

# 沖縄県多良間島における淡水レンズ形状

石田 聡\*・土原健雄\*・吉本周平\*・皆川裕樹\*・増本隆夫\*・今泉眞之\*\*

## 目 次

I 緒 言	1	1 電気伝導度鉛直分布	4
II 調査地区の概要	2	2 地盤の見かけ導電率	5
1 地形・地質	2	V 考 察	5
2 地下水利用状況	2	1 電磁探査結果と塩淡境界深度の関係	5
III 調査方法	3	2 島内の塩淡境界深度分布	6
1 観測孔及び既存井戸における地下水の 電気伝導度深度別測定	3	VI 結 言	7
2 電磁探査法による地盤の導電率測定	3	参考文献	7
IV 調査結果	4	Summary	9

## I 緒 言

淡水レンズは、島や半島において海水を含む帯水層の上部に、密度差によってレンズ状に浮いている淡水域を指し、カリブ海、太平洋、インド洋などの低平な島嶼や、我が国における沖縄県大東島や多良間島などの南西諸島などでは重要な水資源となっている。淡水レンズは降雨浸透水と海水の微妙な圧力バランスによって形成されていることから、降水量の変化、揚水量の変化、海水準の変化に対して、その賦存量が大きく影響を受け、水資源として脆弱である (IPCC AR4 WG2, 2007)。一方で、我が国では沖縄県を対象として淡水レンズを水源として保全・開発する予定であること (内閣府, 2004)、アジア・太平洋諸国の経済成長によって島嶼地域においても水需要量の増加が予想されることなどから、淡水レンズ水資源への関心は国内外で高まりつつある。淡水レンズは井戸からの取水によって利用されるが、揚水に伴って井戸周辺の圧力が低下するため、揚水量が大きいと帯水層下部から塩水がくさび状に浸入し (アップコーニング)、やがて井戸水が塩水化する。帯水層が一度塩水化してしまうと、粒子間の微小間隙に塩水が残留すること、塩水浸入の水みちが形成されることなどから地下水環境は復元せず、当該帯水層からの淡水利用が不可能になる。このような帯水層の塩水化は近年の生活様式の近代化・人口増などで揚水量が増加した島嶼で起こっており、地下水

環境の保全と水資源の持続的利用を両立させることが重要な課題となっている。

淡水レンズを対象とした研究は、1970年代から賦存状況調査が (Plummer et al., 1976; Anthony et al., 1989 など多数)、近年では地盤を均質とみなしたモデル化による現況再現が多く見られる (Bakker, 2000 など)。帯水層の持続的利用方法を検討するためには淡水レンズの分布状況の把握が不可欠であるが、石灰岩帯水層の透水性は大きく偏在しているのが一般的であり (Schneider and Kruse, 2003)、淡水レンズも不規則な形状を呈する。このような淡水レンズ形状を正確に把握するためには観測孔を数多く設置して地下水中の塩淡境界深度を測定する必要があるが、経済的理由で観測孔の数量は限定的になることが多く、物理探査等で限られた観測孔のデータを補間するのが一般的である。地下水中の塩淡境界深度推定には、電気探査法 (Birgit and Luis, 1996 など)、電磁探査法 (Mark, 1988; Ruppel et al., 2000; Schneider and Kruse, 2003 など) が用いられるが、淡水レンズを対象とした研究では後者の適用例が多い。電磁探査法は測定精度としては電気探査法に及ばないものの、塩水と淡水の比抵抗値に大きな違いがあり境界を検出しやすいこと、1箇所あたりの探査時間が短く潮汐の影響を受けにくいことなどがその理由と考えられる。一方我が国においては現地調査結果の数値解析 (柿沼・井内, 1990)、降水量の違いによる淡水レンズ形状の変化を評価した実験的研究 (井内ら, 2000)、電気探査による潮位変動測定 (中里ら, 2007) などが先導的に行われているものの、我が国の島嶼域、特に南西諸島の主要帯水層である琉球石灰岩分布域において電磁探査法を用いて淡水レンズの分布状況を明らかにした研究は見られない。このため筆

\* 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム

\*\* 農村環境部

平成21年12月15日受理

キーワード：地下水、淡水レンズ、塩淡境界深度、電磁探査

者らは沖縄県多良間島を対象として淡水レンズの賦存状況調査するとともに、電磁探査法の琉球石灰岩帯水層への適用性について評価を行った。

本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト研究「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響の評価と高度対策技術の開発」(34020)、及び科研費(21580303)の支援を受けて実施した。また現地調査にあたっては内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課白旗企画指導官、沖縄総合事務局土地改良総合事務所、多良間村役場むらづくり課にご協力頂いた。関係各位に感謝の意を表す。

## II 調査地区の概要

### 1 地形・地質

調査地である多良間島は沖縄県多良間村に属し、沖縄本島那覇市の南西360km、宮古島と石垣島のほぼ中間に位置しており(Fig.1)、総面積は約20km<sup>2</sup>、人口1,300人強、標高十数mの低位段丘が広がる平坦で楕円形の島である。北部には標高30m前後の古砂丘が分布しており、岩石化が進んでいる(沖縄県, 1984)。

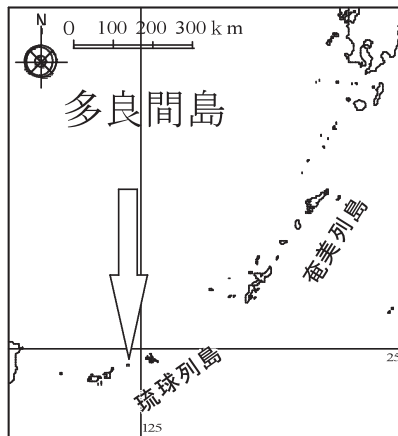


Fig.1 調査地位置図  
Location map of study area

Table 1 多良間島地質層序 (大我ら, 1974 に加筆)  
Stratigraphic sequence in Tarama Island  
(retouched with Ooga et. al. 1974)

年代	地層		層厚
第四紀	完新世	サンゴ礁堆積物 海岸堆積物 および 低位堆積物	10m
	更新世	離水サンゴ礁堆積物 新期砂丘砂 仲筋砂層 (旧期砂丘砂)	
第三紀	鮮新世	琉球石灰岩 層群 (多良間島石灰岩)	50~60m
	中新世	島尻層群 多良間砂層	

地質は上位から石灰質砂から成る砂丘砂層(層厚10~20m)、石灰藻球・サンゴなどを起源とする琉球石灰岩層(層厚50~60m)、石英質砂岩から成る多良間砂層(下部島尻層群に対比)が分布している(Fig.2)。

多良間砂層の露頭は地表には見られず、琉球石灰岩は多良間砂層を不整合に覆う(Table 1)。琉球石灰岩は碎屑性砂質-礫質石灰岩、石灰藻球石灰岩、サンゴ石灰岩などの岩相に区別され、地表面に近い層厚数mの区間は再結晶作用のため固結化しているが、それ以下は砂礫状を呈し、未固結~半固結のものが多い。(沖縄県, 1984)。

### 2 地下水利用状況

1979~2000年の多良間における平均降水量は2,036mm/年である。多良間島では難透水性基盤(透水係数10<sup>-7</sup>m/sec)が海水準以下にあり、石灰岩帯水層中に淡水レンズが形成されていることが知られている。標高10m前後の平坦面上には、石灰岩洞穴が複数認められ、島の水源として利用されてきた(沖縄県, 1984)。揚水試験より求めた琉球石灰岩の透水係数は島の各部で異なり、石灰藻球石灰岩、生碎屑性砂質石灰岩の互層から成る西部では8.8×10<sup>-2</sup>m/sec、サンゴ石灰岩、石灰藻球石灰岩、生碎屑性砂質石灰岩の互層から成る北部では2.5×10<sup>-4</sup>m/sec、有孔虫砂質石灰岩から成る東部では8.0×10<sup>-3</sup>m/secの値が報告されている(長田ら, 1988)。

島の生活用水は淡水レンズを水源とした簡易水道に依存している。2007年度の多良間村における簡易水道の実績給水量は189,592m<sup>3</sup>/y(給水人口1,237人)であった(沖縄県, 2009)。

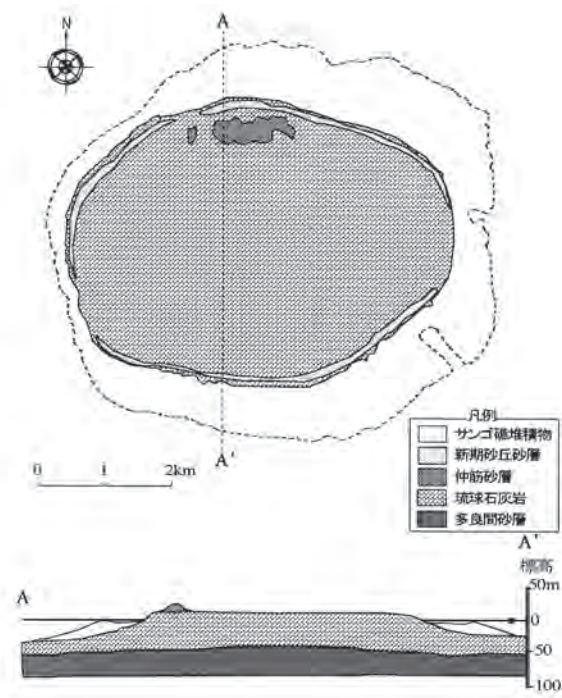


Fig.2 調査地地質平面図・断面図 (沖縄県, 1984 に加筆)  
Geological map and geological section of study area

2005年における耕地面積は総面積の48%にあたる953haであり、農業粗生産額では肉用牛が57%、サトウキビが34%を占める。島の土壌は島尻マージと呼ばれる石灰岩の風化土壌で、保水力が極端に弱く、干ばつの被害を受けやすい。農業用水は降雨とため池を利用しており水源としては不安定であることから、内閣府沖縄総合事務局では淡水レンズを農業用水源とする場合、特に、技術的な課題となる開発可能量の把握方法を検討し、淡水レンズの開発手法を確立するため、大規模淡水レンズ開発技術確立調査を2007年度より多良間村で実施している（白旗・長田，2009）。

### III 調査方法

#### 1 観測孔及び既存井戸における地下水の電気伝導度深度別測定

多良間島において沖縄総合事務局が設置した観測孔のうち7箇所にて、地下水の温度と電気伝導度（25℃換算電気伝導度）を地下水面から孔底まで深度1m毎に測定した。測定に使用した電気伝導度計はIn-Situ Inc.製Aqua TROLL 200であり、測定に際しては孔内の地下水をなるべく攪拌しないよう、電気伝導度計のセンサーを下ろすスピードを毎分1m以下とし、所定の深度にセンサーが到達したら電気伝導度計の数値が安定するまで待った後、数値の読み取りを行った。また上記観測孔の他に、島内の既存井戸12箇所についても同様の方法で地下水の電気伝導度を深度1m毎に測定した。併せてこれらの観測孔・既存井戸において地下水位を測定した。調査にあたっては潮汐の影響を最小限とするため、2班体制で海岸部に近い観測孔から順に測定を行った。

Fig.3に調査地点位置図を、Table 2に観測孔および既存井戸諸元を示す。

#### 2 電磁探査法による地盤の導電率測定

淡水レンズ分布形状の調査については、アメリカフロリダ州の事例（Schneider and Kruse, 2003）より、送信コイルと受信コイルをそれぞれ設置するループ・ループ法電磁探査によって石英砂分布域で塩淡境界深度が測定できることが示されているが、琉球石灰岩への適用事例は未だ無い。また千葉ら（1997）は東北タイにおいてループ・ループ法電磁探査によって帯水層中の高濃度塩水の存在を明らかにしている。本研究ではこれらの研究で用いられているループ・ループ法電磁探査装置（カナダGeonics Ltd.製EM34-3）を用い、地下水の電気伝導度を測定した19の地点において地盤の導電率を測定した。EM34-3は送信コイルと受信コイルの間隔を10m、20m、40mの3通り変えることができ、間隔が大きくなるほど探査可能深度が深くなる。また測定方法には送信コイルと受信コイルを地表面と水平に置く垂直ダイポールモードと、両方のコイルを垂直に置く水平ダイポールモード

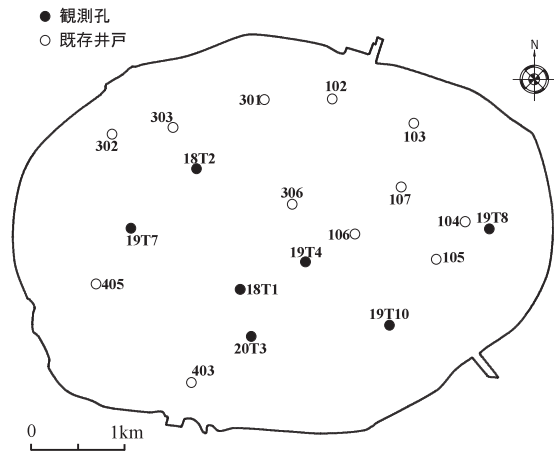


Fig.3 調査地点位置図

Location of observation holes and wells

Table 2 観測孔および既存井戸諸元  
Specifics of the observation holes and wells.

	地点名	地盤標高	深度	口径	備考
観測孔	18T1	11.71m	57.0m	5cm	オールストレーナ、塩ビ仕上げ
	18T2	13.75m	29.7m	5cm	
	19T4	12.79m	30.0m	5cm	
	19T7	11.91m	63.0m	5cm	
	19T8	11.05m	50.0m	5cm	
	19T10	9.68m	30.0m	5cm	
	20T3	10.97m	30.0m	5cm	
既存井戸	102	12.05m	13.0m	1.2m	コンクリート井戸
	103	10.25m	10.8m	80cm	
	104	10.16m	11.1m	1.1m	
	105	10.42m	13.7m	25cm	鋼管井戸
	106	12.30m	17.9m	25.5cm	
	107	12.25m	13.5m	1.0m	コンクリート井戸
	301	15.17m	15.6m	1.0m	
	302	9.30m	10.0m	1.5m	
	303	12.06m	12.3m	1.0m	
	306	13.70m	21.1m	15cm	塩ビ井戸
	403	8.45m	15.6m	15cm	コンクリート井戸
	405	9.90m	9.9m	1.0m	

Table 3 EM34-3におけるコイル間隔と探査深度（McNeill, 1980）  
Exploration depths for EM34-3 at various intercoil spacings

コイル間隔	送受信周波数 (Hz)	探査深度 (m)	
		水平ダイポールモード	垂直ダイポールモード
10m	6,400	7.5	15
20m	1,600	15	30
40m	400	30	60

があり、垂直ダイポールモードは比較的深い部分にも感度を持ち、水平ダイポールモードは比較的浅い部分に強い感度を持つ。Table 3にEM34-3における測定モード・コイル間隔に対する送受信周波数と、McNeill（1980）による探査深度を示す。

Schneider and Kruse（2003）には測定モードについては記載がなかったので、本研究では千葉ら（1997）の方



法を参考に水平ダイポールモードにてコイル間隔 10m, 20m, 40m の 3 通りの測定を行い, 測定した導電率と地下水の電気伝導度深度別測定結果を比較した。

測定にあたってはなるべく地下水の電気伝導度を測定



Fig.4 電磁探査測定状況  
Scenery of electromagnetic survey

した観測孔または既存井戸の近傍で行うことを原則としたが, 付近に電線や金属製のフェンス等が存在する場合は測定に支障が生ずる。障害物の影響は測定データの振れという形で測定中に把握できるので, 現地で測定データが安定する地点で測定を行った(電線の場合概ね 50m 以上の距離を取れば測定はほぼ安定した)。Fig.4 に電磁探査測定状況を示す。手前が受信コイル, 遠方が送信コイルである。電磁探査測定地点の標高はネットワーク型 RTK-GPS 測量によって求めた。

## IV 調査結果

### 1 電気伝導度鉛直分布

地下水位は 2008 年 11 月 26 日に測定し, 標高 0.16 ~ 0.36m の範囲であった。地下水の電気伝導度測定は 2008 年 11 月 26 ~ 27 日に実施し, 60 ~ 4,500mS/m の範囲であった。Fig.5 に代表的な 6 地点における地下水の電気伝導度鉛直分布を示す。

島の中心部よりやや西に位置する 18T1 では地下水面

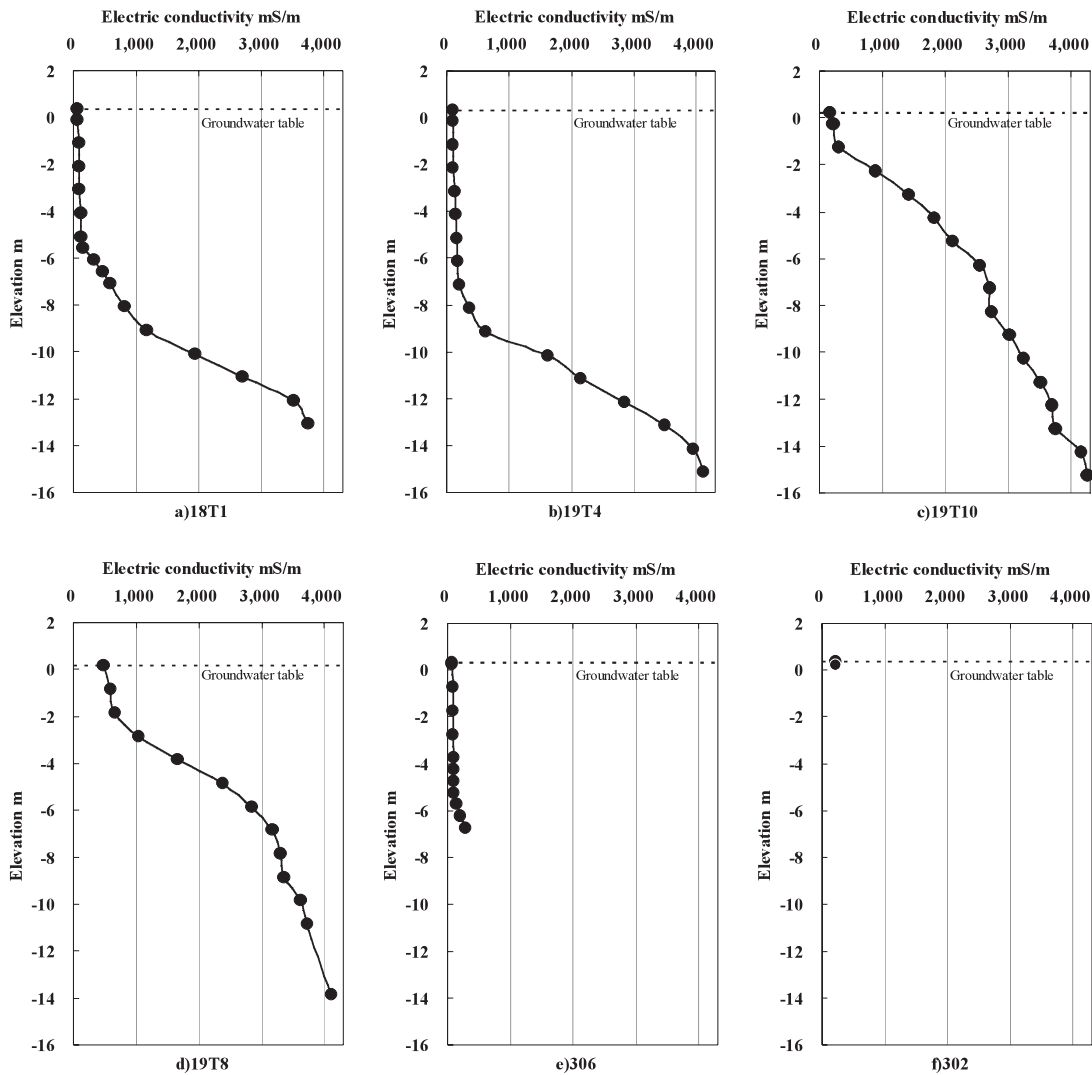


Fig.5 地下水の電気伝導度鉛直分布  
Distribution of electric conductivity of groundwater



から標高 -6m までの電気伝導度は 200mS/m 以下を推移し、それ以深では深度が増すにつれて徐々に値が上昇し、標高 -13m では 3,750mS/m に達した。ほぼ島の中心部に位置する 19T4 では 200mS/m 以下の範囲が地下水面から標高 -7m までと、18T1 よりやや厚くなった。それ以深では 18T1 同様、深度が増すにつれて徐々に値が上昇し、標高 -16m では 4,220mS/m に達した。これら 2 点の観測結果から、島の中心付近では淡水レンズは一定の厚さを持って存在していると言える。

島の中心から 2km ほど離れた 19T10 では 200mS/m 以下の値を示したのは地下水面付近の 1 点だけであり、標高 -1.3m 以深で電気伝導度の値が深度と共に上昇した。島の中心から 2.5km ほど離れた 19T8 では電気伝導度が 200mS/m 以下の領域が無くなり、標高 -1.9m 以深で電気伝導度の値が深度と共に上昇した。これらの観測結果から、島の中心から 2km 程離れると淡水レンズは非常に薄くなると言える。

島の中心に近い既存井戸 306 では電気伝導度は地下水面から孔底まで低い値を保っていた。島の中心から 2.5km ほど離れている既存井戸 302 では水深が 15cm 程しかなかったが、電気伝導度は 220mS/m 程度であった。このように水源として使われている井戸は掘削深度を浅くして、井戸内に塩水を浸入させない構造となっている。

## 2 地盤の見かけ導電率

電磁探査法による地盤の導電率測定は 2008 年 11 月 26～28 日にかけて行われた。EM34-3 は 1 回の測定で 10 データを取得しその平均値を出力するが、今回の調査では 1 地点あたり 10 回の測定を行った。Fig.6 に 19T4 における測定結果を示す。コイル間隔 10m, 20m, 40m の平均値 8.3, 14.4, 46.6 に対する標準偏差はそれぞれ 0.22, 0.06, 0.21 であり測定結果は安定していた。1 地点あたりの測定時間はコイルの移動、ケーブルの交換、ゼロ点調整等を含め 20～30 分程度であった。

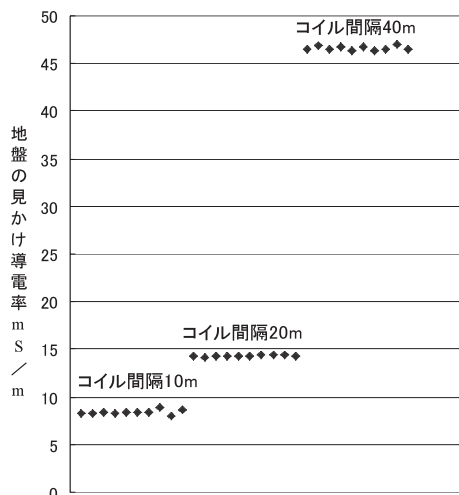


Fig.6 電磁探査測定結果 (19T4)

Result of electromagnetic terrain conductivity measurement (19T4)

Table 4 に各測定地点におけるコイル間隔別の電磁探査結果（見かけ導電率の平均値）とネットワーク型 RTK-GPS 測量によって求めた調査地点の標高を示す。

地盤の見かけ導電率は全ての測定地点においてコイル間隔 40m で最も大きく、コイル間隔 20m, 10m の順に小さくなった。

## V 考察

### 1 電磁探査結果と塩淡水境界深度の関係

今回の測定では地下水の電気伝導度深度別測定によって塩水と淡水が測定できた地点は観測孔 7 地点であった。電気伝導度の値は 60～4,500mS/m の範囲にあり、塩淡水境界付近では海水と淡水の混合域が 5～10m 存在する。電磁探査法は塩水と淡水の導電率のコントラストから塩淡水境界を推定するので、ここでは海水と淡水の中間値 2,000mS/m を一つの指標とし、各測定地点において地表から 2,000mS/m までの深度（以下 2,000mS/m 深度と記す）と電磁探査結果を比較した。

電磁探査結果の解析は、Interpex Limited 社製 IX1D (v3.42) を用い、初期モデルは 1 層目：10mS/m, 10m, 2 層目：1,000mS/m, 10m, 3 層目：4,000mS/m の 3 層構造として逆解析を行った。

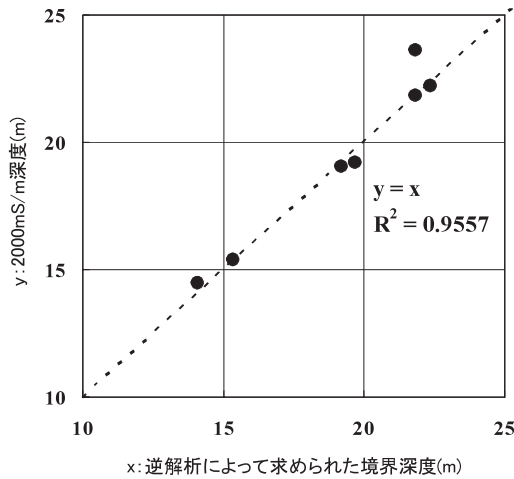
Fig.7 に逆解析によって求められた第 1 層と第 2 層の境界深度と、地下水観測孔で測定された 2,000mS/m 深度を示す。

両者の間には高い正の相関 ( $R^2=0.956$ ) が見られる。

Table 4 電磁探査結果（見かけ導電率）と調査地点標高 Terrain conductivities and elevation of measurement points

観測地点 番号	コイル間隔			探査標高 (m)
	10m	20m	40m	
18T1	13.18	17.33	49.61	11.69
18T2	4.45	13.90	50.38	13.56
19T10	15.74	31.14	74.44	9.59
19T4	8.38	14.31	46.60	12.73
19T7	7.76	18.65	58.69	11.55
19T8	10.76	31.30	80.37	11.06
20T3	8.90	17.33	54.65	11.03
102	29.89	26.60	52.17	11.86
103	20.66	29.87	65.98	10.04
104	18.15	29.28	71.82	9.70
105	13.53	23.88	64.29	10.56
106	9.77	16.69	42.22	12.20
107	11.66	17.13	51.88	12.13
301	11.49	17.08	45.57	14.28
302	12.82	35.94	92.42	9.14
303	13.53	22.28	61.11	11.80
306	5.14	10.13	41.69	13.44
403	11.08	40.50	86.51	8.40
405	9.10	25.55	76.10	9.74

単位：mS/m



**Fig.7** 電磁探査結果の逆解析によって求めた境界深度と2,000mS/m深度の対比

Comparison of 2,000mS/m depths and conductivity boundary depth

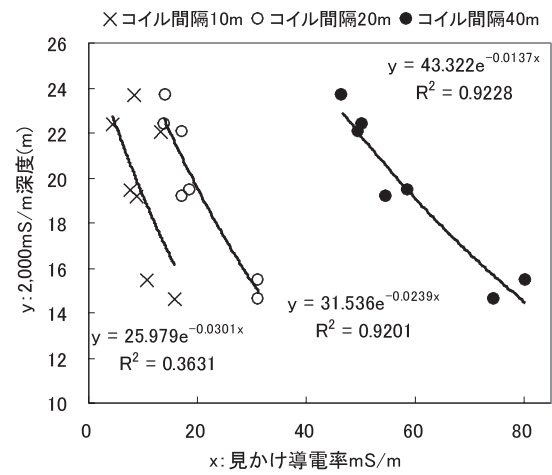
このことは本手法による探査が塩淡水境界に対して感度を有することを示している。中里ら(2009)は、同じ多良間島を対象にTDEM(時間領域電磁探査法)によって琉球石灰岩の不飽和帯と飽和帯の比抵抗境界を明らかにしているが、本手法では第1層を2層に分け、4層モデルでの逆解析を試みたが、地下水面に相当する導電率構造は得られなかった。

ここで、電磁探査によって得られる地盤の見かけ導電率に影響を及ぼす要素は、地質構造が同一のフィールド内では地下水位と塩淡水境界深度である。今回、地下水位は場所によって大きく変化しないので、それぞれのコイル間隔によって得られた地盤の見かけ導電率と、地下水観測孔で測定された2,000mS/m深度を比較した。両者の関係をFig.8に示す。

いずれのコイル間隔においても両者は負の相関を示す。相関係数はコイル間隔が長くなるほど大きくなり、コイル間隔が20m, 40mの場合 $R^2 = 0.92$ と非常に高かった。これに対してコイル間隔が10mの場合は $R^2 = 0.36$ となり有意な相関は認められない。この理由はコイル間隔10mの水平モードでは探査深度が浅すぎて、深度14.5~23.6m以深の塩水域を検知することが出来ないためであると考えられる。

Fig.8において最も高い相関を示したのはコイル間隔40mの測定値である。得られた近似曲線より、塩淡水境界深度が未知の既存井戸12箇所について、コイル間隔40mの測定値を2,000mS/m深度に換算した値をTable 5に示す。

Table 5にはそれぞれの井戸の深度も示している。換算した2,000mS/m深度とそれぞれの井戸深度を比較すると、いずれの井戸においても換算した2,000mS/m深度の方が大きくなり、実測によって確認された事実と整合的であった。



**Fig.8** 電磁探査による地盤の見かけ導電率と2,000mS/m深度の対比

Comparison of 2,000mS/m depths and terrain conductivities

**Table 5** 既存井戸12箇所における推定塩淡水境界深度  
Estimated freshwater-saltwater interface depths at 12 wells

観測地点番号	2000mS/m深度(m)	井戸底(m)
18T1	22.08	
18T2	22.41	
19T10	14.63	
19T4	23.71	
19T7	19.47	
19T8	15.49	
20T3	19.20	
102	<b>21.20</b>	12.9
103	<b>17.55</b>	10.8
104	<b>16.20</b>	11.0
105	<b>17.96</b>	13.5
106	<b>24.30</b>	17.8
107	<b>21.28</b>	13.7
301	<b>23.20</b>	15.6
302	<b>12.21</b>	10.0
303	<b>18.76</b>	12.3
306	<b>24.47</b>	21.0
403	<b>13.24</b>	9.0
405	<b>15.27</b>	9.9

太字は導電率からの換算値

## 2 島内の塩淡水境界深度分布

Table 5に示す塩淡水境界深度の実測値および推定値より描いた、島内の電気伝導度2,000mS/m等標高線図をFig.9に示す。

電気伝導度2,000mS/mの標高は島の中央付近で-10mより深くなり、縁辺部ほど浅くなるが、その中心はやや北に偏っている。Ruppel et.al. (2000)はアメリカのセントジョージ島において淡水レンズの分布を調査し、砂丘の尾根地形が淡水レンズ厚さに影響していることを示唆している。本島においても、島の北側に標高30m程

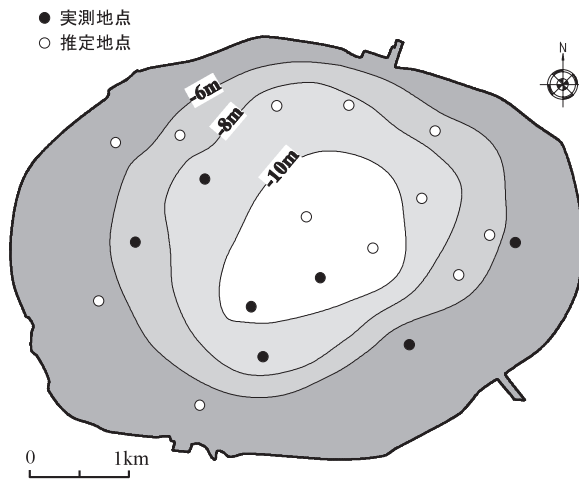


Fig.9 電気伝導度 2,000mS/m 等標高線図  
Distribution of freshwater thickness (EC<2,000mS/m)

度の小丘が発達していることから、島の北側において涵養水のポテンシャルが若干高くなり、その結果電気伝導度 2,000mS/m の標高が深くなっていると考えられる。

## VI 結 言

本研究では沖縄県多良間島を調査地として、観測孔及び既存井戸における地下水の電気伝導度深度別測定及びループ・ループ法電磁探査による地盤の導電率測定を行い、塩淡水境界深度と地盤の見かけ導電率との関係を求めた。

地下水中の電気伝導度が 60 ~ 4,500mS/m の範囲にあることから、電気伝導度 2,000mS/m を指標とし、電気伝導度深度別測定によって求めた 7 箇所の観測孔における電気伝導度 2,000mS/m 深度と、同じ箇所でも測定したコイル間隔 10m, 20m, 40m における見かけ導電率との相関を求めると、相関係数はそれぞれ 0.36, 0.92, 0.92 であり、コイル間隔 20m, 40m については非常に高い値を示した。また、得られた近似曲線より推定した既存井戸 12 地点における電気伝導度 2,000mS/m 深度は、いずれも井戸深度より大きく、井戸内に塩水が見られない観測結果と整合的であった。

見かけ導電率より換算された島内の電気伝導度 2,000mS/m 深度分布より、淡水レンズは島内の北側でやや厚くなっている。このことは島の北側に旧期砂丘砂が分布し標高が比較的高くなっていることによると考えられる。

以上より、本島においてはループ・ループ法電磁探査は淡水レンズ塩淡水境界深度の測定に有効であった。本手法については、本島以外の淡水レンズ分布域に適用可能かどうかは検証されていないが、地質構造が本島同様帯水層が電氣的に均質（地表から塩水域まで単一の琉球石灰岩など）という構造で、淡水、海水の飽和部の導電率コントラストが明瞭であれば適用できる可能性は高いと

考えられる。

今後はより測定値点数を増やして島内の淡水レンズ分布状況を子細に明らかにするとともに、より濃度の低い領域の測定法、塩淡水境界がより浅い場合や深い場合についての電磁探査法の適用性、ループ・ループ法電磁探査以外の物理探査手法との比較について、引き続き検討すべきである。

## 参考文献

- 1) Anthony S. Stephen, Peterson L. Frank, Mackenzie T. Fred and Hamlin N. Scott (1989): Geohydrology of the Laura fresh-water lens, Majuro atoll: A hydrogeochemical approach, *GSA Bulletin*, **101** (8), p.1066-1075
- 2) Bakker M. (2000): The Size of the Freshwater Zone Below an Elongated Island With Infiltration, *Water Resour. Res.*, **36**(1), p.109-117
- 3) Birgit Steinich and Luis E. Marin (1996): Hydrogeological Investigations in Northwestern Yucatan, Mexico, Using Resistivity Surveys, *Groundwater*, **34**(4), p.577-759
- 4) 千葉昭彦・今泉眞之・竹内睦雄 (1997): 物理探査を用いた地下水・塩類集積土壌の探査技術, 物理探査, **50**(6), p.615-631
- 5) 井内国光・坂本 光・柿沼忠男 (2000): 砂モデル実験による海岸及び島しょ地下水の定常挙動, 陸水学雑誌, **61**, p.1-10
- 6) Intergovernmental Panel of Climate Change Working Group 2 (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability, *IPCC Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change 2007*, p.689
- 7) 柿沼忠男・井内国光 (1990): クリスマス島における淡水レンズ (I), 愛媛大学工学部紀要, **12**(1), p.303-315
- 8) McNeill J.D. (1980): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, *Geonics Limited Technical Note*, TN-6, p.6
- 9) Mark Stewart (1988): Electromagnetic Mapping of Fresh-Water Lenses on Small Oceanic Islands, *Groundwater*, **26** (2), p.187-191
- 10) 長田実也・古川博恭・富田友幸・座波吉実 (1988): 沖縄・多良間島の淡水レンズ-琉球石灰岩の透水性について, 日本地質学会学術大会講演要旨, p.420
- 11) 内閣府沖縄総合事務局土地改良課 (2004): 淡水レンズによる農業用地下水の開発, アグリおきなわ, **2004**(11), p.1-4
- 12) 中里裕臣・石田 聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹 (2009): TDEM による多良間島における淡水レンズ調査, 物理探査学会第 121 回学術講演会講演論文集, p.114-115
- 13) 中里裕臣・黒田清一郎・井上敬資・竹内睦雄・汪振



- 洋 (2007) : 比抵抗モニタリングによる地下水の潮位変動の可視化 : 物理探査, 60(6), p.501-506
- 14) 大我晴敏・古川博恭・小倉乙郎・西田民雄 (1974) : 沖縄県多良間島の地下水, 日本地質学会学術大会講演要旨, p.368
- 15) 沖縄県 (1984) : 土地分類基本調査, 宮古地域, p.13-22
- 16) 沖縄県福祉保健部薬務衛生課 (2009) : 沖縄県の水道概要, 平成 19 年度版, p.53-56
- 17) Plummer L.N., Vacher H.L., Mackenzie F.T., Bricker O.P. and Land L.S. (1976): Hydrogeochemistry of Bermuda: A case history of ground-water diagenesis of biocalcarenes, *GSA Bulletin*, **87**(9), p.1301-1316
- 18) Ruppel C., Schultz G. and Kruse S. (2000): Anomalous Fresh Water Lens Morphology on a Strip Barrier Island, *Groundwater*, **38**(6), p.872-881
- 19) Schneider C. James and Kruse E. Sarah, (2003): A comparison of controls on freshwater lens morphology of small carbonate and siliciclastic islands: examples from barrier islands in Florida, USA, *J.hydrol*, **284**, p.235-296
- 20) 白旗克志・長田実也 (2009) : 淡水レンズからの水源開発を目指して - 多良間島における調査 -, 地盤工学会誌, 57(9), p.620

# Distribution of the Freshwater-Saltwater Interface Depths in Tarama Island, Japan

ISHIDA Satoshi, TSUCHIHARA Takeo, YOSHIMOTO Shuhei,  
MINAKAWA Hiroki, MASUMOTO Takao and IMAIZUMI Masayuki

## Summary

Electric conductivity of groundwater was measured every 1 m depth in wells on Tarama Island, Japan to clarify the thickness of the fresh water lens. In addition, electric underground conductivity was measured by electromagnetic surveys, and the results were compared with the freshwater-saltwater interface depths. As a result, it was clarified that the maximum thickness of the fresh water lens (electric conductivity less than 2,000 mS/m) on Tarama Island was 10 m or more. There was a high negative correlation between the electric conductivity and the freshwater-saltwater interface depth. This result shows that the electromagnetic survey is an effective tool to measure the thickness of a freshwater lens. Subsequently, electromagnetic surveys were carried out at 19 points on the island, and the shape of the freshwater lens of this island was clarified.

**Keywords** : Groundwater, Freshwater lens, Freshwater-saltwater interface, Electromagnetic survey

## メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析

-山田バイオマスプラントを事例として-

中村真人\*・柚山義人\*・山岡 賢\*・折立文子\*・  
藤川智紀\*\*・清水夏樹\*・阿部邦夫\*\*\*・相原秀基\*\*\*

## 目 次

I 緒 言	11	1	トラブルおよびその対策	16
II 山田バイオマスプラントの概要	12	2	原料・生成物の重量および成分	18
III トラブル記録, 運転データの収集方法	14	3	物質収支	21
1	14	4	電力消費量, 発電量	22
2	14	5	井戸水使用量	23
3	14	6	臭気	24
4	15	V	結 言	24
5	15		参考文献	25
6	15		Summary	26
IV 結果および考察	16		Appendix	27

## I 緒 言

2002年にバイオマス・ニッポン総合戦略(農林水産省, 2002)が閣議決定されて以降, バイオマスを用いて, エネルギーやマテリアルを製造し, 利用する取り組みが各地で行われている。メタン発酵技術は, バイオマスからエネルギーを取り出す代表的な技術の一つであり, メタン発酵微生物の代謝作用により家畜排せつ物等の有機物を嫌気条件下においてメタン( $\text{CH}_4$ )と二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )に分解する生物化学的プロセスを利用して, メタンを回収する技術である(李, 2005)。メタン発酵においてメタンとともに生成されるメタン発酵消化液(以降, 「消化液」とする)は, 速効性肥料として, 化学肥料を代替できる(中村ら, 2009)。

家畜排せつ物のメタン発酵は古くから行われてきた技術である。メタン発酵により得られるエネルギーは再生可能エネルギーであること, メタンを化石エネルギーの代替として用いることにより温室効果ガス排出量が削減

できること等の理由により近年再び注目を集めている。1990年代後半から北海道, 南九州や東北地方を中心に, メタン発酵プラントが多く建設されるようになってきている(野池, 2009)。

メタン発酵プラントでは, それぞれの地域の実情に合わせて試行錯誤をしながら運転が行われており, 一部のプラントについては, 運転データ, 運転時のトラブルに関する報告が行われている。中川(2007)は, 京都府南丹市のメタン発酵プラントの運転開始8年後の設備の劣化状況について報告している。独立行政法人北海道開発土木研究所(2005a)は, メタン発酵プラントの運転データを取りまとめるとともに, トラブルカルテを作成し, それぞれのトラブルを総括し, 教訓として今後の運転管理に生かす試みを行っている。メタン発酵プラントの運転管理技術を向上させるためには, さらに運転データの事例を積み上げることが必要である。

本報では, 著者らが2005年7月からバイオマス利活用の実証研究を行ってきた山田バイオマスプラント(千葉県香取市に試作・設置)の約4年間のトラブル記録, 運転データを解析し, メタン発酵プラントにおける物質収支, エネルギー消費の特徴, トラブルがプラントの運転に与える影響を明らかにする。なお, 本報で扱うトラブルとは, メタン発酵プラント内で起こる, プラントの安定的な運転に支障を与える出来事と定義する。

本研究は, 農林水産省のプロジェクト研究「地域活性

\* 農村総合研究部資源循環システム研究チーム

\*\* 東京農業大学

\*\*\* 農事組合法人と郷園

平成21年11月5日受理

キーワード: メタン発酵, メタン精製, 消化液, トラブルリスト, 物質収支, 電力消費, 臭気



化のためのバイオマス利用技術の開発（バイオマス利活用モデルの構築・実証・評価）（Cm3200）」の成果の一部である。東京大学生産技術研究所の迫田章義教授、望月和博准教授をはじめ、プロジェクト参画者、プラント運転に携わっていただいている方々には、多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げる。

## II 山田バイオマスプラントの概要

山田バイオマスプラントは2004年11月に建設を開始し、2005年7月から運転を開始した。山田バイオマスプラントの建設、運転に関する主な出来事をTable 1にまとめる。運転を始めてから、原料の投入方法の変更、コジェネレーションシステムの導入、液肥散布車（自走バキューム車、タンク容量1.6m<sup>3</sup>）の導入などを行ったが、2009年8月までの約4年間、運転方法に大きな変更はない。メタン発酵プラントは約4年間連続運転を行っている。

山田バイオマスプラントの施設・設備は、メタン発酵、メタン精製、消化液固液分離、炭化等から構成されている（農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」, 2007a）。各施設・設備の概要をTable 2に示す。また、山田バイオマスプラントのシステム構成をFig.1に示す。メタン発酵の原料は乳牛ふん尿、牛ふん脱離液（乳牛ふん尿を畜産農家で固液分離した液分）、野菜汁（野菜の加工工場等から排出される加工くずおよび規格外品をしぼった液）で、投入量は合計約5t/dである。投入された原料は夾雑物脱水機で固液分離され、液分が発酵槽に送られる。固分（以降、「夾雑物」とする。大部分は乳牛飼養時の敷料に用いるオガクズ）は隣接する堆肥舎に送られ堆肥化される。メタン発酵により得られたメタン濃度約60%のバイオガスは、脱硫塔で脱硫、ガスドライヤーで水分を除去された後、PSAによりメタン濃度98%に精製し（精製されたメタン濃度98%のガスのことを本報では「製品メタンガス」とする）、メタン自動車（軽トラック）、コジェネレーション、炭化設備の燃料等に利用している。バイオガスの精製過程で選択的に取り除かれた二酸化炭素を主成分とするガス

（以降、「オフガス」とする）は、大気へ放出される。コジェネレーションからの廃熱の一部を発酵槽の加温に用いているが、少量であるので本報ではその分の熱量は考慮しないこととする。メタン発酵過程で同時に生成される消化液は、肥料成分である窒素、カリウムを多く含み、また、窒素の約60%が速効性の肥料成分であるアンモニア態窒素（NH<sub>4</sub>-N）であるため、化学肥料の代替として利用できる。消化液の一部は固液分離され、液分である脱水ろ液と固分である脱水ケーキに振り分けられる。脱水ろ液は、消化液中の固形分が取り除かれているので、消化液と比較して散布時の取扱性が改善された液肥となる。一方、固液分離後の固分として脱水ケーキが排出され、炭化、堆肥の原料となる。本報では、山田バイオマスプラントの施設・設備のうち、主にメタン発酵、PSA、コジェネレーション、消化液固液分離装置の運転データを対象とする。

プラントの運転は、化学プラントの運転管理の経験がある場長1名と6名のスタッフ（うち、3名はシニア世代）で行っている。一部のスタッフはフォークリフト運転免許、危険物取扱者等の資格を有している。場長の業務は作業の統括、対外調整、見学者対応等、スタッフの業務は原料の運搬・投入、機材・機器の点検・保守・清掃、消化液の輸送・散布、運転データの記録等である。消化液の輸送・散布を除いた、プラントの施設・設備の運転に関係する業務は、1日あたり約1.5人で行っている。

なお、山田バイオマスプラントは、研究プラントであるために、効率を度外視している部分がある。例えば、山田バイオマスプラントでは実験用のメタンガスを生み出すため、発酵槽加温用にエネルギー効率のよくない電気ヒーター（10kW、電力は購入電力）を4基使用している。事業として行う場合には、発酵槽の加温には、コジェネレーションの廃熱を利用することが現実的であるといえる。また、電気事業者（東京電力）と売電契約を結んでいないので、発電した電力は売電できず、プラント内で消費する必要がある。消費量が常に発電量を上回るようにするため、電気ヒーターのうち1基は常に稼働させる必要がある。その結果、高温期においても電気ヒーターによる電力消費量0とはならない。

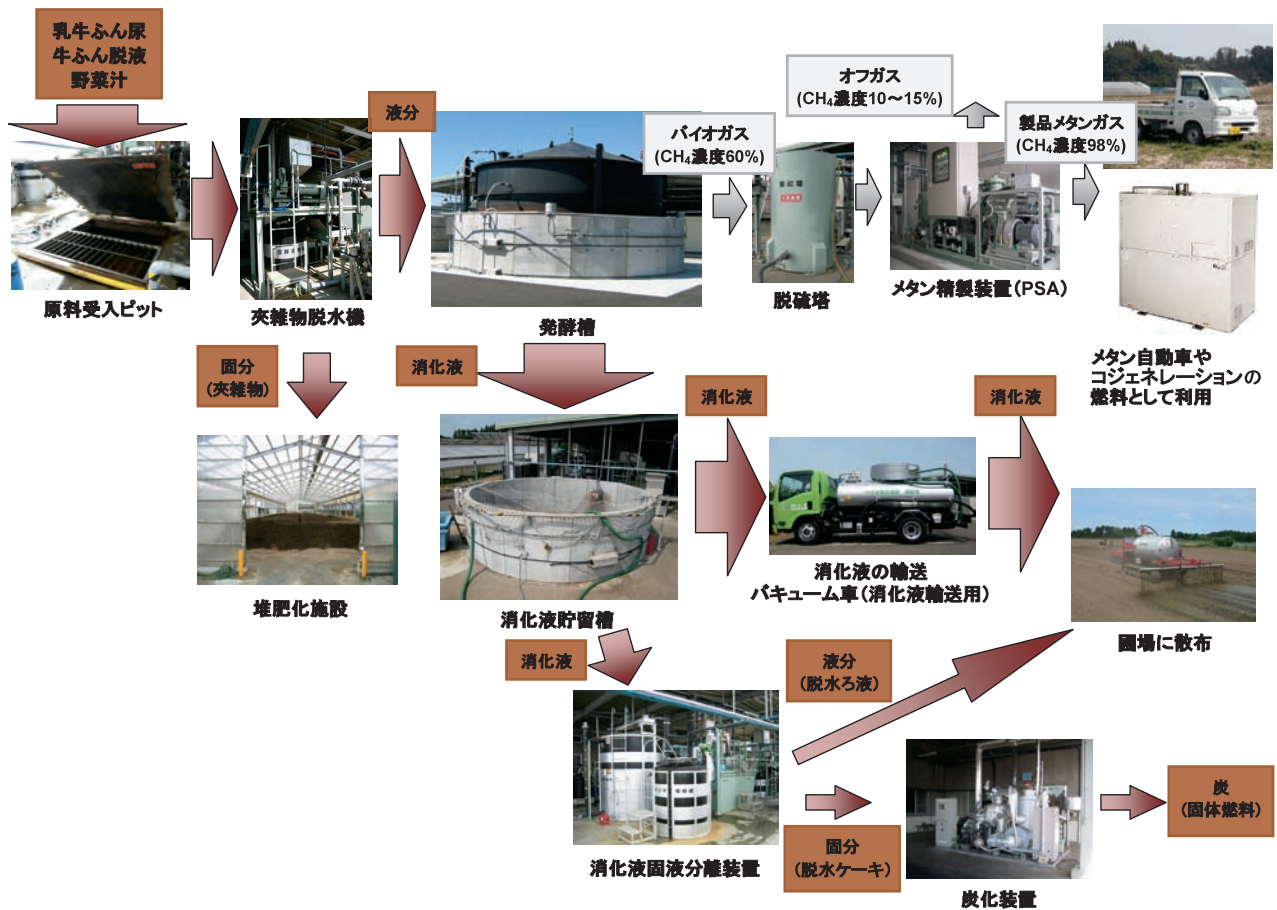
Table 1 山田バイオマスプラントの年表  
Chronological table of Yamada Biomass Plant

2004.11.25	起工式。建設工事開始。
2005.7.4	乳牛ふん尿の投入開始。
2005.7.6	メタン発酵槽原料投入運転開始。 夾雑物脱水機ユニット運転開始。
2005.7.25	野菜汁投入開始。
2005.8.8	PSA装置への送ガス開始。
2005.8.23	発酵槽からの消化液のオーバーフローが開始される（消化液が出始める）。
2005.8.26	消化液脱水機ユニット運転開始。
2006.12.13	コジェネレーション運転開始。
2007.3	原料の投入方法を変更し、乳牛ふん尿の一部を牛ふん脱離液として投入することにした。
2007.4	液肥散布車を導入。

**Table 2** 山田バイオマスプラントの施設・設備の概要  
Facilities of Yamada Biomass Plant

施設・設備	概 要
メタン発酵	135m <sup>3</sup> の発酵槽（単槽）での中温発酵（約37℃）で、滞留時間は約27日である。
メタン精製	PSA（Pressure Swing Adsorption）と呼ばれる吸着分離型のメタン濃縮装置である。細孔径をコントロールした吸着材（活性炭）を用いて、CH <sub>4</sub> とCO <sub>2</sub> の分子サイズの違いにより、選択的に二酸化炭素を除去し、CH <sub>4</sub> の濃縮を行う技術である。精製されたガス（製品メタンガス）のCH <sub>4</sub> 濃度は約98%となる。一方、除去された二酸化炭素を主成分とするガスは、オフガス（CH <sub>4</sub> 濃度10～15%）と呼ばれる。オフガスは、大気へ放出される。バイオガスを1時間あたり6.5Nm <sup>3</sup> 処理できる。
消化液固液分離	スクリープレス式脱水機で、無機凝集剤（ポリ硫酸第二鉄）と高分子凝集剤が添加された消化液を脱水する液（液分）と脱水ケーキ（固分）に分離する。消化液を1時間あたり0.63t固液分離できる。
コジェネレーション	定格出力25kWh。ガスエンジン、発電機、インバータ、熱交換器から構成される。本研究ではPSAで精製された、CH <sub>4</sub> 濃度約98%のガスを燃料としている。また、山田バイオマスプラントのメタン発酵槽加温の熱源は、電気ヒーターであり、コジェネレーションからの熱利用は、量的には限定的である。
炭化	炭化温度350～600℃の過熱水蒸気式炭化装置。各種バイオマスの炭化が可能であるが、本プロジェクトでは主に脱水ケーキの炭化を行っている。

※ 各施設・設備の詳細については既報（農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」, 2007）を参照。



**Fig. 1** 山田バイオマスプラントの主なシステム構成  
Main systems of Yamada Biomass Plant

### Ⅲ トラブル記録, 運転データの収集方法

#### 1 トラブル記録

山田バイオマスプラントは運転開始以来, 無事故で運転を継続してきた。しかし, 重大な事故に結び付いてはいるが, トラブルは多数発生し, 試行錯誤を繰り返しながら, 克服してきた。運転開始から4年間に起きたトラブルそれぞれについて, 「事象・原因」, 「対策とその結果」, 「教訓」等を整理したトラブルリストを作成した。

#### 2 原料・生成物の重量および成分

原料, 生成物の重量は, 原料, 生成物の容積, ポンプの運転時間等の記録, 別途測定した容積重等を用いて, **Table 3** に示す方法で測定した。

液体試料(野菜汁, 牛ふん脱離液, 消化液, 脱水ろ液)の分析項目のうち, 含水率, イオウ(S)は下水試験方法, 懸濁物質(SS), 懸濁物質の強熱残留物(VSS), 全蒸発残留物(TS), 全蒸発残留物の強熱残留物(VS), 化学的酸素要求量(COD<sub>Mn</sub>), 生物化学的酸素要求量(BOD), 全有機炭素(TOC), 全炭素(T-C), 全窒素(T-N), NH<sub>4</sub>-N, 亜硝酸態窒素(NO<sub>2</sub>-N), 硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N), 全リン(T-P), リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P), 全カリウム(T-K), カリウムイオン(K<sup>+</sup>), マグネシウム(Mg), カルシウム(Ca), ナトリウム(Na), 塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>), 鉄(Fe), マンガン(Mn), ホウ素(B), モリブデン(Mo), 銅(Cu), 亜鉛(Zn), カドミウム(Cd), ニッケル(Ni), ひ素(As), クロム(Cr), 水銀(Hg), は工場排水試験法(JIS-K-0102)に準じて測定した。pH, ECは, それぞれ(株)東亜ディーケーケー製HM-12P, CM-21Pを用いて測定した。pH, ECは現場で測定し, その他の項目はプラントでサン

リングした試料を研究室に持ち帰り分析した。測定は, 1年に3,4回の頻度で行った。

固体試料(乳牛ふん尿, 夾雑物, 脱水ケーキ)では, 全炭素(T-C), 全窒素(T-N), 全リン(T-P), 全カリウム(T-K), 全マグネシウム(T-Mg), 全カルシウム(T-Ca)および鉄(Fe)を, 肥料分析法に準じて測定した。固体試料についても, プラントでサンプリングした試料を研究室に持ち帰り分析した。測定は, 液体試料と同様に1年に3,4回の頻度で行った。

バイオガスの流量は脱硫塔通過後の配管に流量計(ドレッサー社製8C175)を設置して測定した。バイオガス中のメタン濃度, 脱硫塔通過後の硫化水素(H<sub>2</sub>S)濃度は, Schmack社製SSM6000を用いて, 1日1回, プラントにて測定した。

#### 3 物質収支

物質収支は, メタン発酵過程(メタン発酵原料投入からバイオガスと消化液の生成まで), 消化液固液分離過程(消化液を脱水ろ液と脱水ケーキに分離する過程), メタン精製過程(PSA装置においてバイオガスを製品メタンガスとオフガスに分離する過程)について算定した。物質収支の算定は, 原料の一部を牛ふん脱離液に変更した2007年3月以降について示す。

メタン発酵過程の物質収支は, Ⅲ. 2の方法で求めた原料, 生成物の重量と成分分析結果から算定した。詳細については, 中村ら(2007)を参照されたい。物質収支計算を行った項目は重量, C, N, P, Kである。トラブルが物質収支に与える影響を示すため, 全期間(2007.3-2009.8)平均の物質収支, 安定運転期間(トラブルのうち最も物質収支に対する影響の大きかった夾雑物脱水機の故障期間を除く期間)における物質収支の2

**Table 3** 原料, 生成物の重量の算定法  
Methods to calculate weight of feedstock material and products

原料, 生成物	算定法
乳牛ふん尿 (t)	(1日あたりの投入量: m <sup>3</sup> ) × (容積重: 0.97 t/m <sup>3</sup> )
野菜汁 (t)	(1日あたりの投入量: m <sup>3</sup> ) × (容積重: 1 t/m <sup>3</sup> )
夾雑物 (t)	(1日あたりの生成量: m <sup>3</sup> ) × (容積重: 0.30 t/m <sup>3</sup> )
バイオガス中の CH <sub>4</sub> (t)	(バイオガス流量: m <sup>3</sup> ) × (CH <sub>4</sub> 濃度: %) × 16 / 22.4 / 1000
バイオガス中の CO <sub>2</sub> (t)	(バイオガス流量: m <sup>3</sup> ) × {100 - (CH <sub>4</sub> 濃度: %)} × 44 / 22.4 / 1000
発酵槽から排出される消化液 (t)	(ふん尿) + (野菜汁) - (夾雑物) - (バイオガス中の CH <sub>4</sub> ) - (バイオガス中の CO <sub>2</sub> )
固液分離される消化液 (t)	(消化液供給ポンプの能力: m <sup>3</sup> /h) × (1日平均脱水機運転時間: h) × (容積重: 1)
ポリ硫酸第二鉄 (t)	重量測定
高分子凝集剤 (t)	重量測定
高分子凝集剤希釈水 (t)	(高分子凝集剤添加量: t) × 80
脱水ろ液 (t)	(固液分離される消化液) + (無機凝集剤) + (高分子凝集剤) + (凝集剤希釈水) - (脱水ケーキ)
脱水ケーキ (t)	(1日あたりの生成量: m <sup>3</sup> ) × (容積重: 0.90 t/m <sup>3</sup> )



種類の物質収支を算定した。全期間（2007.3-2009.8）平均の物質収支については、1日あたりの量と原料1tあたりの量について算定し、安定運転期間については、1日あたりの量のみについて算定した。なお、消化液貯留槽からの二酸化炭素、メタンおよびアンモニアの揮散量は、今回の収支計算では考慮しなかった。

消化液固液分離過程は、メタン発酵過程と同様に、Ⅲ. 2の方法で求めた原料、生成物の重量と成分分析結果から算定した。消化液固液分離過程の物質収支は、消化液1tあたりの量を算定した。

メタン精製過程の物質収支は、PSA装置稼働中のバイオガスの流量、メタン濃度と製品メタンガスの流量、メタン濃度を測定結果から算定した。バイオガス、製品メタンガスの成分はほぼメタンと二酸化炭素のみであるので、二酸化炭素濃度（%）は、「100 - メタン濃度（%）」とした。測定は2008年12月4日に行った。結果は、バイオガス1Nm<sup>3</sup>（Nm<sup>3</sup>:0℃, 1気圧の時の容積）あたりの物質収支として表す。

#### 4 電力消費量, 発電量

山田バイオマスプラント全体と各施設・設備の消費電力量, 発電量を測定した。消費電力計を設置した設備は、メタン発酵, PSA, 消化液固液分離である。また、メタン発酵の発酵槽加温ヒーターにも消費電力計を設置し、メタン発酵施設の消費電力のうち、加温ヒーターでの消費分とその他での消費分を分離できるようにした。

#### 5 井戸水使用量

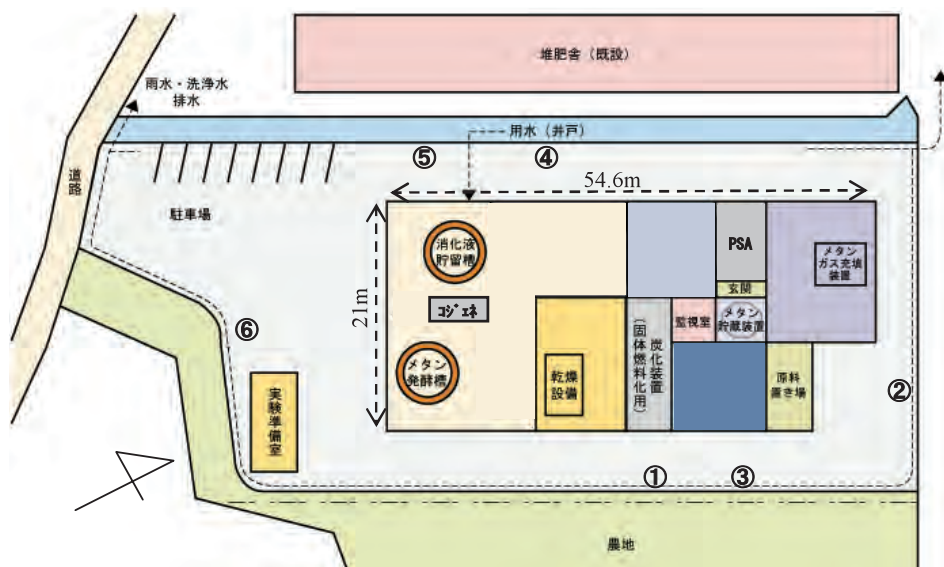
山田バイオマスプラントでは、機器の洗浄や配管の凍結防止のために井戸水を使用している。井戸水使用量は水道メーターを設置し測定した。

#### 6 臭気

山田バイオマスプラントから発生する臭気をプラントの敷地境界上で測定した。臭気測定の様子を Fig.2 に示す。また、測定を行った位置を Fig.3 に、測定時の状況を Table 4 に示す。測定項目は悪臭防止法が規制対象として定めている特定悪臭物質のうち、家畜ふん尿およびその変換物から発生する可能性があると考えられる、アンモニア、メチルメルカプタン、硫化水素、硫化メチル、二硫化メチル、トリメチルアミン、プロピオン酸、ノルマル酪酸、ノルマル吉草酸、イソ吉草酸の各濃度と臭気指数(人間の嗅覚によりにおいの程度を数値化した指標、感知できなくなるまでの希釈倍率の常用対数の10倍で表される)である。臭気指数の測定方法は平成7年環境庁告示第63号、その他の項目については、昭和47年環境庁告示第9号に定める方法で行った(悪臭法令研究



Fig.2 臭気測定の様子  
Odor measurement



①～⑥は測定地点を示す

Fig.3 臭気測定を行った地点  
Points for odor measurement

Table 4 臭気測定時の状況  
Conditions on odor measurement

	2005.12.13 14:00	2006.10.11 14:00	2006.12.13 14:00	2007.9.10 13:45	2007.12.16 12:20	2008.8.13 13:40	2009.7.21 13:30
採取地点	①	②	①	③	④	⑤	⑥
採取地点の選定理由	炭化装置の排ガスと夾雑物、脱水ケーキストックヤード由来の臭気が強かった。敷地境界上でそれらのおいが最も強く感じられる、風下側の地点を選定した。	炭化装置の排ガスと夾雑物、脱水ケーキストックヤード由来の臭気が強かった。敷地境界上でそれらのおいが最も強く感じられる、風下側の地点を選定した。	炭化装置の排ガスと夾雑物、脱水ケーキストックヤード由来の臭気が強かった。敷地境界上でそれらのおいが最も強く感じられる、風下側の地点を選定した。	発生源より風下になる敷地境界線上で、他の臭気の影響が少なく測定作業に支障のおきない場所を選定した。	臭気発生源より風下になる敷地境界線上で、他の臭気の影響が少なく測定作業に支障のおきない場所を選定した。	臭気発生源より風下になる敷地境界線上で、他の臭気の影響が少なく測定作業に支障のおきない場所を選定した。	臭気発生源より風下になる敷地境界線上で、他の臭気の影響が少なく測定作業に支障のおきない場所を選定した。
施設・設備の稼働状況	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 ○ コージェネレーション ×	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 ○ コージェネレーション ×	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 ○ コージェネレーション ×	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 × コージェネレーション ○	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 × コージェネレーション ○	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 × コージェネレーション ○	メタン発酵 ○ 消化液固液分離 ○ PSA ○ 炭化 × コージェネレーション ○
採取時の状況	試料採取中は燃焼臭、牛ふん尿臭及び牛ふんを原料とした堆肥臭のいずれかのおいが常時しており、臭気指数用試料の採取は臭気強度をもっとも強く感じた牛ふん臭の時に行った。	試料採取中は燃焼臭、牛ふん尿臭及び牛ふんを原料とした堆肥臭のいずれかのおいが常時しており、臭気指数用試料の採取は臭気強度をもっとも強く感じた牛ふん臭の時に行った。	試料採取中は燃焼臭、牛ふん尿臭及び牛ふんを原料とした堆肥臭のいずれかのおいが断続的にしており、臭気指数用試料の採取は臭気強度をもっとも強く感じた牛ふん臭の時に行った。	有風時に堆肥臭がかすかに発生していた、無風時には臭気は発生していなかった。メタン発酵施設稼働時において臭気強度をもっとも強く感じた時に採取を行った。	プラントはメタン発酵は稼働していた。運転施設作業時に臭いがかすかに発生していたが、稼働時以外の時には臭気は発生しないような臭気は発生していなかった。メタン発酵施設稼働時において臭気強度をもっとも強く感じた時に採取を行った。	風向きによっては堆肥臭がかすかに発生していた。南東より南の風が吹いている時には臭気は発生しないような臭気は発生していなかった。メタン発酵施設稼働時において臭気強度をもっとも強く感じた時に採取を行った。	降雨の影響が強い臭気を感じる時があった。メタン発酵施設稼働時において臭気強度をもっとも強く感じた時に採取を行った。
天候	晴	晴	曇	晴	晴	晴	晴
温度・湿度	9.2℃・27%	22.5℃・57%	13.1℃・71%	28.2℃・75.0%	14.0℃・37.0%	31.6℃・73.2%	24.1℃・97.4%
風向・風速	西・1.8m/s	南・1.7m/s	西・0.3m/s	南南西・5.8m/s	南東・0.9m/s	南東・2.8m/s	北北東・1.2m/s

会, 2001)。臭気測定用試料(空気)の採取は、各測定日でプラントの敷地境界上の最も臭気強い地点において行った。測定回数は、4年間で7回である。

#### IV 結果および考察

##### 1 トラブルおよびその対策

山田バイオマスプラントの運転を開始した2005年7月から2009年8月までのトラブルを時系列に整理した一覧表をTable 5に示す(各トラブルの詳細についてはAppendixに記載する)。また、トラブルの分類の考え方には各種あるが、本報では原因ごとに分類した。全トラブルをトラブルの原因として多かった「オガクズ(原料の乳牛ふん尿に含まれていたオガクズに起因するトラブル)」、「凍結(冬季の低温による凍結に起因するトラブル)」、「硫化水素(バイオガス中の硫化水素に起因するトラブル)」、「部品消耗・長期運転の影響(部品消耗や長期運転により引き起こされたと思われるトラブル)」に分類し、それらに該当しないものは「その他」とした。

山田バイオマスプラントの運転開始当初のトラブルは、メタン発酵の原料の乳牛ふん尿に含まれるオガクズを原因としたものが多かった。これは、原料を提供していた農家の飼養形態がオガクズを敷料として用い

るフリーストールであったため、平均的な乳牛ふん尿よりもオガクズ混入割合が高かったことによる。乳牛ふん尿に含まれるオガクズは、脱水機や管路の詰まりを引き起こし、また、オガクズ自体は発酵不適物であるので単位原料あたりのバイオガス生成量が少なくなる。同じ乳牛ふん尿でも飼養形態によって排出される性状が異なることを認識して、プラントの設計をすることが重要であるといえる。独立行政法人北海道開発土木研究所(2005b)は、夾雑物のワラにより、消化液のオーバーフロー管が閉塞するという同様のトラブルが起き、原料スラリーに含まれていた大量の夾雑物を除去しなかったことが要因であったと報告している。

また、その他の初期に起こったトラブルとして、消化液貯留槽がほぼ満杯(消化液貯留量が貯留槽の上端から66cm)となるという事態となった。この原因は貯留槽の容量が発酵槽から排出される消化液の約20日分の容量(約100m<sup>3</sup>)と小さかったことや、当時はまだ液肥散布車がなく散布作業を効率的に行えなかったこと、消化液の利用先が決まっていなかったことが挙げられる。消化液を全量利用する計画であっても、プラント運転初期には、利用先の確保が難しかったり、トラブルが生じたりするので、最悪の場合を想定して廃棄先についても検討しておくことも必要であると考えられる。

Table 5 トラブルリスト

Trouble list

	発生日時	分 類	事象・原因
1	2005.7	オガクズ	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、単位原料あたりのバイオガス発生量が設計値より少ない。
2	2005.7	オガクズ	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、夾雑物の排出作業（隣接の堆肥舎へ運搬する作業）の労力が大きかった。
3	2005.8.19	オガクズ	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、夾雑物脱水機内でオガクズが詰まり、夾雑物脱水機が停止した。
4	2005.9	オガクズ	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、メタン発酵槽の出口においては、オーバーフロー管が詰まった。
5	2005.9.27	その他	貯留槽の容量が発酵槽から排出される消化液の約 20 日分の容量（約 100m <sup>3</sup> ）と小さかったため、消化液貯留槽がほぼ満杯となった。
6	2005.12 -2006.2	凍結	低温によりラインが凍結し、配管が破損した。
7	2006.2	凍結	バイオガス中の水蒸気が結露、凍結し、流量計が破損した。
8	2005.12 -2006.2	凍結	バイオガス配管の発酵槽から脱硫塔までの部分が凍結し、閉塞したため、水封水が吸引され PSA 装置内に入り、PSA 装置のガス精製能力を低下させた。
9	2006 年前半	その他	メタン濃度の指示値が 50～65%の範囲で日変動（昼間高く、夜間低い）した。原因は不明。
10	2006.6 他	その他	原料受入ピットにハナアブの幼虫（うじ虫）が発生した。
11	2006.7	その他	消化液脱水機に無機凝集剤を添加する配管で結晶が析出し配管が閉塞した。
12	2006.8	硫化水素	脱硫塔の能力破過を見越したことにより、脱硫塔の下流側にある PSA 装置に硫化水素を含むガスが供給され、吸着剤等に悪影響を与えたと想定された。
13	2006 後半	その他	製品メタンガスの用途がメタン自動車等に限定されていたため、使い切れず、メタンガスの貯蔵量がタンクいっぱいとなった。
14	2007.4	部品の消耗・ 長期運転の影響	発酵槽加温用水槽の水の更新やスケール防止剤の添加を行っていなかったため、加温ヒーター 4 本にピンホールが発生、ショートして部分停電発生した。
15	2007 年前半	部品の消耗・ 長期運転の影響	雨水が入りスパーク装置が腐食したため、フレアスタックが点火しなかった。
16	2007.10	部品の消耗・ 長期運転の影響	PSA 装置の真空ポンプのダイヤフラムが破損したため、PSA 装置の運転をしばらく休止した。
17	2007-2008	部品の消耗・ 長期運転の影響	夾雑物脱水機、消化液脱水機の固分を排出するコンペアーのコンペアーロールが摩耗した。
18	2008.1	部品の消耗・ 長期運転の影響	夾雑物がうまく絞れず、含水率が高い状態のものが排出されていた。原因は、夾雑物脱水機のスクリュウの磨耗。
19	2008	部品の消耗・ 長期運転の影響	受入ピットの転落防止用の安全スノコ（鉄）が腐食した。
20	2008.4.14	部品の消耗・ 長期運転の影響	PSA 装置の空気作動弁のシール材が消耗した。
21	2008.4	部品の消耗・ 長期運転の影響	パンチングメタルは脱硫塔の底部に設置されていて、脱硫剤を支える役割をしている。バイオガスは飽和水分を含有するため、一部が凝縮して液化する。その水に硫化水素が溶けて硫酸となり、パンチングメタルが腐食した。
22	2008.12	部品の消耗・ 長期運転の影響	PSA 装置の真空ポンプのダイヤフラムの破損により、メタンを含むガスが漏れた。
23	2008.12 -2009.3	部品の消耗・ 長期運転の影響	長期使用による磨耗により、充填設備の充填圧力が所定の圧力まで上がらなくなった。
24	2009.3	部品の消耗・ 長期運転の影響	受入ピット底部に蓄積した沈殿物により、夾雑物脱水機が不調となった。
25	2009.3	部品の消耗・ 長期運転の影響	原料受入ピットの清掃を行った結果、原料以外の異物（手袋、石、釘、工具等）が混入していた。
26	2006-2007	硫化水素	硫化水素を含むバイオガスが PSA 装置に供給されたため、PSA 装置周辺機器に不具合が発生し、PSA 装置のメタン収率が 70～80%程度と低迷した。
27	2006-2007	硫化水素	硫化水素により基盤が損傷し、流量計が正確な指示値を示さない。
28	2009.7	部品の消耗・ 長期運転の影響	脱硫塔の上部のマンホールのパッキンの劣化により、バイオガスが漏れた。



2005年12月から2006年2月にかけては、低温により管路が破裂、流量計が破損するなどのトラブルが見られ、管路に保温テープをまく、凍結防止のため井戸水を常時流す等の対策をとった。山田バイオマスプラントの設計にあたり周辺の過去の気象データを参考にしたが、プラント設置場所が窪地に立地しているため、想定以上に低温になり、上記のようなトラブルが起きた。周辺の気象観測データだけではなく、微地形等を考慮に入れた検討が必要であることが示唆された。

2006年8月頃より、脱硫塔の機能低下が起こり、脱硫塔を通過したバイオガスの硫化水素濃度が上昇した。さらに、その対処が遅れ、約2カ月間、硫化水素濃度の高いバイオガスが下流側のPSAに送られ続けた。その時の硫化水素濃度は、最高350ppmに達した。硫化水素は、鉄やコンクリートに対して腐食性があり、機器に対して重大なダメージを与える。山田バイオマスプラントでは硫化水素の影響で、PSAに設置している流量計の誤作動（指示値が正確な値を示さなくなっていた）を引き起こした。また、PSA装置の吸着剤、真空ポンプのダイヤフラム、圧縮機、昇圧機、切替弁、流量計に悪影響を与え、そのことがその後のPSAのメタン回収率低下の一因であったと思われる。このように、硫化水素は重大なダメージを与えるので、硫化水素濃度の変動を注視し、脱硫塔の機能低下前に脱硫剤の交換を行うことが重要である。同様の硫化水素が原因のトラブルとして、独立行政法人北海道開発土木研究所(2005c)は、硫化水素と凝結水によりバイオガス濃度計が腐食したことを報告している。

運転開始から2年経過した2007年後半からは、真空ポンプのダイヤフラム、コンペアーのコンペアロール、夾雑物脱水機のスクリー等部品の消耗・長期間運転の影響が原因のトラブルが増加してきた。独立行政法人北海道開発土木研究所(2005d)のトラブルカルテからは、山田バイオマスプラントとほぼ同様に運転開始後1年半を経過してからトラブルが増加する傾向が読み取れる。部品の消耗・長期間運転の影響の中で、プラント運転への影響が大きかったものの一つに、原料を投入する原料受入ピットの沈殿物による夾雑物脱水機の不調がある。プラントの運転開始後約3年半の間、受入ピットの清掃を行っていなかったため、受入ピットの底に原料の一部が蓄積したことが原因である。また、受入ピットの底部には、原料以外に手袋、石、工具等が混入していた。原料受入ピットへの金属や石等の異物の混入については、中川(2007)が同様の報告を行っており、家畜ふん尿に異物が混入することは不可避であると考えられ、そのことを見越した設計、受入ピットの定期的な清掃が必要であるといえる。部品の消耗によるトラブルは、部品の調達に時間がかかる場合があり、プラントの運転中断期間が長期化する可能性がある。消耗部品については、交換用のものを用意しておくことが望ましい。

## 2 原料・生成物の重量および成分

メタン発酵、消化液固液分離過程における、原料、生成物の重量をFig.4に示す。夾雑物量は、原料の投入方法を一部変更(乳牛ふん尿の一部を牛ふん脱離液に変更)した2007年3月以降、やや減少している。2008年1月と2008年12月から2009年2月までの期間は、夾雑物脱水機が不調(トラブル事例18, 24)になり、固形の原料(乳牛ふん尿)を投入することができなかったため、乳牛ふん尿の投入量が減少している。それに伴い、その期間は夾雑物量も少ない。バイオガス発生量は、初期は乳牛ふん尿のオガクズの混入割合が高かったため、やや少ない。また、2008年1月と2008年12月から2009年2月までの期間は、原料投入量が少ないため、発生量が少ない。製品メタンガス量がとところどころで少ない月がある。これは、PSAの故障(トラブル事例12, 13, 16, 20)により運転を休止した期間があるためである。液肥散布車が2007年4月に本格的に導入されて以降、生成される消化液のうち、液肥として利用される割合が高くなり、脱水ろ液、脱水ケーキの生成量は減少している。

液体試料、固体試料の成分分析結果をTable 6, Table 7に示す。野菜汁の成分のばらつきが大きいのは、用いる野菜の種類により成分が変動すること、野菜を絞る機器の調子により性状が変化することが理由である。ばらつきが大きい分析試料数(n)が19と十分多いと考え、後述する物質収支の算出に平均値を用いることには大きな問題はないと判断した。原料の野菜汁、牛ふん脱離液と生成物の消化液を比較すると、メタン発酵過程で有機物の分解、炭素がメタンや二酸化炭素になったために、消化液の方がBOD、TOC等が少ない。液肥として利用されている消化液、脱水ろ液の肥料要素をみると、消化液、脱水ろ液ともN、Kに比べてPが少なく、脱水ろ液ではPをほとんど含まない。また、T-Nに占めるNH<sub>4</sub>-Nの割合が高く、消化液で51%、脱水ろ液で94%である。Nの多くが植物にとって吸収しやすいNH<sub>4</sub>-Nであることから速効性のNK肥料であると判断できる。柚山ら(2007)は全国5ヶ所の牛ふん尿を原料としているメタン発酵プラントの消化液の肥料成分を紹介している。それらと比較して、NとKが多く、含有するNの約半分がNH<sub>4</sub>-Nであるという点で、山田バイオマスプラントの消化液と全国5ヶ所の消化液とはほぼ同様であった。三要素以外の成分では、モリブデン(Mo)やマンガン(Mn)等の作物の生育に必要な微量元素も含まれているが、含有量は少ない。また、カドミウム(Cd)等の重金属含有量は少ない。また、消化液は固形分が多く含まれ、SSが26,700mg/Lであるのに対し、脱水ろ液は固液分離過程で固形分が取り除かれ、SSが283 mg/Lへと低下し、取扱性が向上している。脱水ろ液であれば、消化液では困難な灌水チューブを用いた散布も可能である(農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉

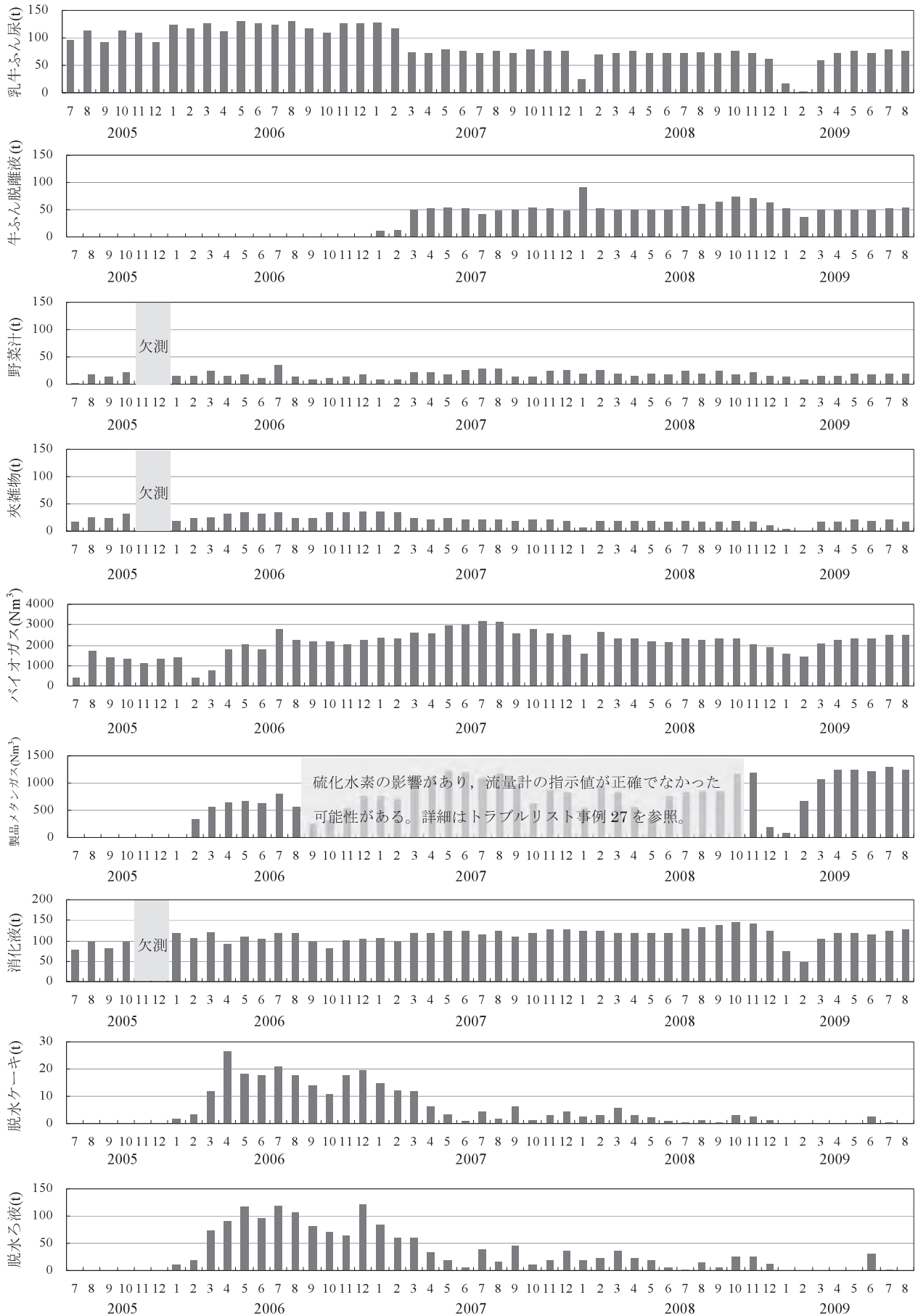


Fig. 4 月別原料投入量・生成物量  
Monthly amount of feedstock and products

**Table 6** 液体試料の成分  
Composition of liquid samples

	単位	野菜汁 (n = 19)		牛ふん脱離液 (n = 10)		消化液 (n = 23)		脱水ろ液 (n = 19)	
		平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)
含水率	%	95.3	(1.9)	94.5	(0.4)	95.9	(0.4)	98.9	(0.4)
pH		4.7	(0.5)	7.3	(0.3)	7.7	(0.2)	7.9	(0.2)
EC	S/m	0.805	(0.069)	1.53	(0.37)	1.96	(0.15)	1.92	(0.27)
SS	mg/L	19500	(12200)	36600	(6780)	26700	(5040)	283	(256)
VSS	mg/L	18200	(11600)	26000	(5480)	17900	(3630)	154	(114)
TS	mg/L	52900	(10200)	53000	(3250)	41300	(7420)	11500	(4342)
VS	mg/L	44900	(10400)	35400	(1810)	24200	(2840)	2420	(569)
COD <sub>Mn</sub>	mg/L	24300	(9670)	20400	(1990)	14100	(6280)	1070	(134)
BOD	mg/L	29400	(9500)	14700	(5520)	2320	(890)	400	(271)
TOC	mg/L	14600	(4260)	10510	(2470)	6220	(1920)	695	(249)
全炭素	mg/L	16200	(94920)	16600	(4430)	9790	(1920)	2250	(554)
塩化物イオン	mg/L	448	(186)	1480	(660)	1390	(395)	1400	(550)
アンモニア性窒素	mg/L	190	(106)	1260	(163)	1740	(300)	1300	(199)
亜硝酸性窒素	mg/L	0.611	(1.95)	0.870	(1.83)	0.434	(1.60)	0.372	(1.58)
硝酸性窒素	mg/L	100	(114)	<0.3	—	<0.3	—	<0.3	—
全窒素	mg/L	1530	(495)	2950	(263)	3390	(628)	1420	(300)
全リン	mg/L	280	(107)	701	(225)	536	(161)	9.94	(3.76)
リン酸態リン	mg/L	283	(205)	282	(214)	169	(159)	4.37	(1.51)
カリウム	mg/L	2690	(416)	2790	(462)	3210	(444)	2600	(602)
カリウムイオン	mg/L	2470	(386)	2810	(368)	2860	(677)	2470	(304)
鉄	mg/L	—	—	—	—	78.5	(25.4)	9.73	(4.26)
イオウ	mg/L	190	(13)	420	(217)	260	(71)	320	(79)
銅	mg/L	—	—	—	—	3.42	(0.53)	<0.05	—
亜鉛	mg/L	—	—	—	—	13.0	(1.6)	0.300	(0.298)
鉛	mg/L	—	—	—	—	0.17	(0.07)	<0.01	—
カドミウム	mg/L	—	—	—	—	0.01	(0.01)	<0.01	—
ニッケル	mg/L	—	—	—	—	0.19	(0.07)	<0.01	—
ひ素	mg/L	—	—	—	—	0.02	(0.01)	<0.01	—
全クロム	mg/L	—	—	—	—	0.18	(0.05)	<0.005	—
水銀	mg/L	—	—	—	—	<0.0005	—	<0.00005	—
全カルシウム	mg/L	—	—	—	—	1600	(242)	100	(19)
全マグネシウム	mg/L	—	—	—	—	661	(139)	190	(24)
ナトリウム	mg/L	—	—	—	—	850	(114)	640	(61)
マンガン	mg/L	—	—	—	—	13.0	(1.5)	2.23	(0.54)
モリブデン	mg/L	—	—	—	—	0.0583	(0.0009)	<0.1	—
ホウ素	mg/L	—	—	—	—	1.83	(0.78)	1.44	(0.13)

**Table 7** 固体試料の成分  
Composition of solid samples

	単位*	乳牛ふん尿 (n = 18)		夾雑物 (n = 19)		脱水ケーキ (n = 17)		炭** (n = 4)	
		平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)	平均	(標準偏差)
含水率	%	84	(1.8)	70	(5.1)	79	(2.4)	0.30	(0.60)
全炭素	%	42	(1.9)	44	(1.4)	37	(2.5)	36	(3.2)
全窒素	%	2.4	(0.43)	1.8	(0.53)	4.4	(0.63)	4.3	(1.1)
全リン	%	0.70	(0.19)	0.45	(0.19)	2.2	(0.42)	2.8	(0.60)
カリウム	%	2.1	(0.42)	1.0	(0.26)	1.5	(0.74)	2.1	(0.14)
マグネシウム	%	0.65	(0.16)	0.40	(0.10)	1.3	(0.29)	2.2	(0.10)
カルシウム	%	1.7	(0.38)	1.2	(0.25)	4.8	(1.0)	8.5	(1.0)
鉄	%	0.090	—	0.11	(0.030)	2.1	(0.76)	3.8	—
全イオウ	%	0.90	(0.23)	0.75	(0.090)	0.20	—	—	—

\* 含水率以外は乾物あたりの量。

\*\* 脱水ケーキを原料とした炭である。

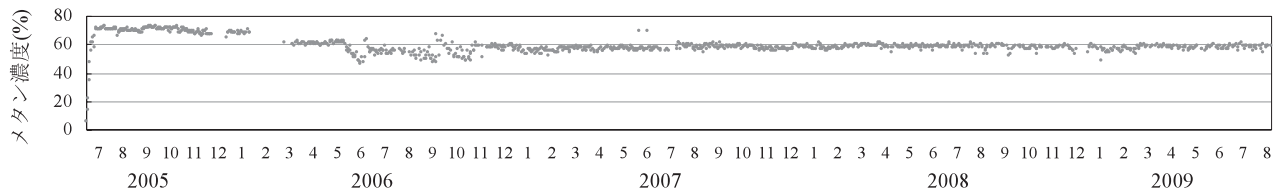


Fig.5 バイオガス中のメタン濃度  
Methane concentration of biogas

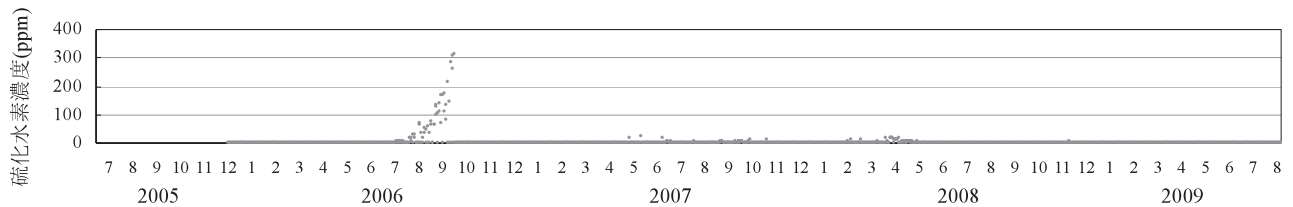


Fig.6 バイオガス中の硫化水素濃度  
Hydrogen sulfide concentration of biogas

ユニット」, 2007b)。

Fig.5, Fig.6にバイオガス中のメタン濃度, 硫化水素濃度を示す。メタン濃度は, 原料投入を開始した2005年7月から濃度が上昇し, 2週間程度で60%前後まで上昇した。運転開始から半年間はメタン濃度が70%程度で推移し, その後60%程度で安定している。運転開始から半年間はメタン濃度が70%程度で推移した理由については不明である。脱硫塔通過後の硫化水素濃度を測定しているため, ほぼ0であるべきであるが, トラブルリスト(事例12)で述べたように, 脱硫塔の機能低下を見逃していたため, 硫化水素濃度は最高350ppmまで上昇した。その後, 脱硫剤の交換を行い濃度は0に戻った。その後は濃度が上昇を始める前に脱硫剤の交換を行う対応をとることにより, 硫化水素濃度をほぼ0の状態に維持している。

### 3 物質収支

#### a メタン発酵過程の物質収支

メタン発酵過程の物質収支をTable 8に示す。Table 8(a)に示したのが原料の一部を牛ふん脱離液に変更した2007年3月から2009年8月までの日平均, 原料1tあたりの物質収支である。Table 8(b)にはトラブル期間を除く安定運転期間(ここでは, トラブルのうち最も物質収支に対する影響の大きかった夾雑物脱水機の故障期間を除く期間)の物質収支を示す。Table 8(a)とTable 8(b)を比較することにより, トラブルの影響の一例を示すことができる。

対象期間の平均物質収支であるTable 8(a)をみると, 投入される原料は, 乳牛ふん尿, 牛ふん脱離液, 野菜汁がそれぞれ2.22t/d, 1.79t/d, 0.65t/dの合計4.66t/dである。投入された原料は固液分離され, 固分(夾雑物)0.59t/dは堆肥化施設に送られ, 残りの4.07tが発酵槽に投入され, バイオガス79.9Nm<sup>3</sup>(メタン46.4 Nm<sup>3</sup>, 二酸化炭素

33.5 Nm<sup>3</sup>)と消化液3.96tが生成される。原料1tあたりに換算すると, バイオガス17.1Nm<sup>3</sup>(メタン9.97 Nm<sup>3</sup>, 二酸化炭素7.19 Nm<sup>3</sup>)と消化液0.85tが生成される。発酵槽に投入されたもののうち, 原料から夾雑物を除いたものに含まれるCの21%がメタンとして回収された。原料に含まれる肥料成分のN, P, Kは, 夾雑物として取り除かれるもの, アンモニアとして揮散(測定は行っていない)する以外は, ほぼ全量消化液に振り分けられる。

Table 8(a), Table 8(b)を比較すると, トラブル期間を含む全期間の日平均値は, トラブル期間を含まない正常運転期間の平均値よりも原料投入量が5%少なく, メタンの生成量も5%少ない。このように, 山田バイオマスプラントでは, 夾雑物脱水機のトラブルにより, 設計通りの性能が発揮できない期間が生じ, メタン発生量は5%減少した。この値はあくまでも山田バイオマスプラントにおいて, トラブルによりプラントの能力がどの程度低下したかを示した一例であり, 他のプラントに当てはまる話ではない。しかし, プラント運転にはトラブルはつきものであるため, 正常に運転できている期間だけに着目し, そのデータでプラントの性能, 環境負荷低減効果等を試算する時には留意する必要があるといえる。

#### b 消化液固液分離過程の物質収支

消化液固液分離過程の物質収支をTable 9に示す。この過程では, 消化液に無機凝集剤, 高分子凝集剤を混合して, 脱水機で固液分離する過程である。消化液1tに対して, 無機凝集剤のポリ硫酸第二鉄3.7kg, 高分子凝集剤3.0kg, 高分子凝集剤の希釈水0.24tを添加する。それに対して生成物として, 脱水ろ液1.13t, 脱水ケーキ0.12tが生成される。

固液分離過程を経て, CとPの大部分が脱水ケーキに, Kは大部分が脱水ろ液に振り分けられる。Nは脱水ケーキと脱水ろ液にほぼ1:1で振り分けられる。脱水ろ液



**Table 8** メタン発酵過程の物質収支  
Material balance in methane fermentation process

(a) 平均 (2007.3-2009.8)

1日あたりの物質収支						原料 1t あたりの物質収支					
<b>IN</b>						<b>IN</b>					
	C	N	P	K	重量		C	N	P	K	重量
	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(t/d)		(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)
乳牛ふん尿	150.11	8.55	2.53	7.41	2.22	乳牛ふん尿	32.26	1.84	0.54	1.59	0.48
牛ふん脱離液	29.67	5.29	1.26	5.01	1.79	牛ふん脱離液	6.38	1.14	0.27	1.08	0.38
野菜汁	10.43	0.99	0.18	1.74	0.65	野菜汁	2.24	0.21	0.04	0.37	0.14
計	190.21	14.83	3.97	14.16	4.66	計	40.88	3.19	0.85	3.04	1.00
↓						↓					
<b>OUT</b>						<b>OUT</b>					
	C	N	P	K	重量		C	N	P	K	重量
	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(t/d)		(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)	(kg/原1t)
夾雑物	79.26	3.14	0.80	1.82	0.59	夾雑物	17.03	0.67	0.17	0.39	0.13
CH <sub>4</sub> (バイオガス)	24.88	0.00	0.00	0.00	0.03 (46.4Nm <sup>3</sup> /d)	CH <sub>4</sub> (バイオガス)	5.35	0.00	0.00	0.00	0.01 (9.97Nm <sup>3</sup> /原1t)
CO <sub>2</sub> (バイオガス)	17.93	0.00	0.00	0.00	0.07 (33.5Nm <sup>3</sup> /d)	CO <sub>2</sub> (バイオガス)	3.85	0.00	0.00	0.00	0.01 (7.19Nm <sup>3</sup> /原1t)
消化液	38.78	13.42	2.12	12.72	3.96	消化液	8.33	2.88	0.46	2.73	0.85
計	160.85	16.56	2.92	14.54	4.65	計	34.56	3.55	0.63	3.12	1.00

(b) 安定運転期間 (2007.3-2009.8のうち、トラブル期間 (2008.12.24-2009.3.8) を除いた期間)

1日あたりの物質収支					
<b>IN</b>					
	C	N	P	K	重量
	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(t/d)
乳牛ふん尿	166.29	9.47	2.80	8.21	2.45
牛ふん脱離液	29.41	5.24	1.25	4.97	1.78
野菜汁	10.86	1.03	0.19	1.81	0.67
計	206.56	15.74	4.24	14.99	4.90
↓					
<b>OUT</b>					
	C	N	P	K	重量
	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(t/d)
夾雑物	87.58	3.47	0.88	2.01	0.66
CH <sub>4</sub> (バイオガス)	26.06	0.00	0.00	0.00	0.03 (48.7Nm <sup>3</sup> /d)
CO <sub>2</sub> (バイオガス)	18.78	0.00	0.00	0.00	0.07 (35.1Nm <sup>3</sup> /d)
消化液	40.57	14.04	2.22	13.31	4.14
計	172.99	17.51	3.10	15.32	4.90

**Table 9** 消化液固液分離過程の物質収支  
Material balance in digested solid-liquid separation process

消化液 1t あたりの物質収支					
<b>IN</b>					
	C	N	P	K	重量
	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(t/消1t)
消化液	9.79	3.39	0.54	3.21	1.00
ポリ硫酸第二鉄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0037
高分子凝集剤	0.50	0.06	0.00	0.00	0.0030
高分子凝集剤	0.54	0.34	0.00	0.62	0.24
希釈水					
計	10.83	3.79	0.54	3.83	1.25
↓					
<b>OUT</b>					
	C	N	P	K	重量
	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(kg/消1t)	(t/消1t)
脱水ケーキ	9.31	1.11	0.56	0.39	0.12
脱水ろ液	2.53	1.60	0.01	2.93	1.13
計	11.84	2.71	0.57	3.32	1.25

**Table 10** メタン精製過程の物質収支  
Material balance in methane refining process

バイオガス 1Nm <sup>3</sup> あたりの物質収支			
<b>IN</b>			
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	容積
	(Nm <sup>3</sup> )	(Nm <sup>3</sup> )	(Nm <sup>3</sup> )
バイオガス	0.58	0.42	1.00
計	0.58	0.42	1.00
↓			
<b>OUT</b>			
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	容積
	(Nm <sup>3</sup> )	(Nm <sup>3</sup> )	(Nm <sup>3</sup> )
製品メタンガス	0.54	0.02	0.56
オフガス	0.04	0.40	0.44
計	0.58	0.42	1.00

に振り分けられた N の大部分は NH<sub>4</sub>-N であり、有機態 N の大部分は脱水ケーキに振り分けられたと考えられる。

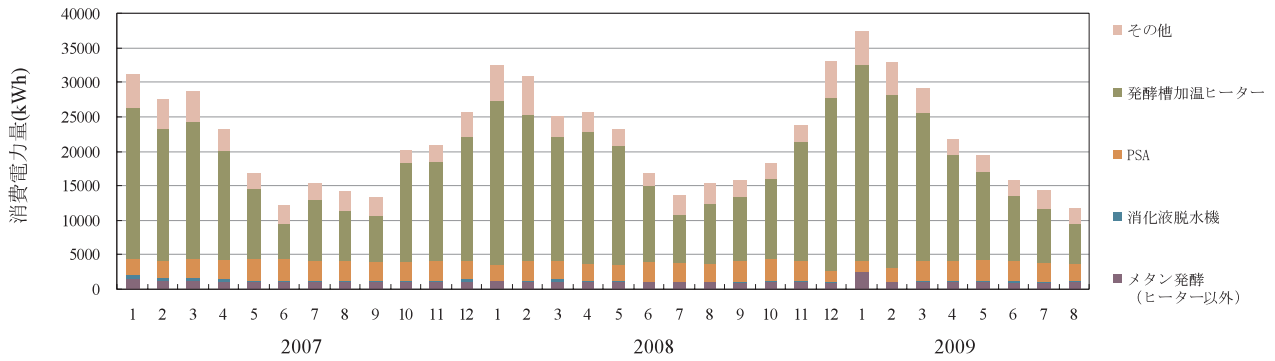
c メタン精製過程の物質収支

メタン精製過程の物質収支を **Table 10** に示す。バイオガス 1Nm<sup>3</sup> は、PSA 装置により精製されて、製品メタンガス 0.56 Nm<sup>3</sup> ができ、残り 0.44 Nm<sup>3</sup> がオフガスとし

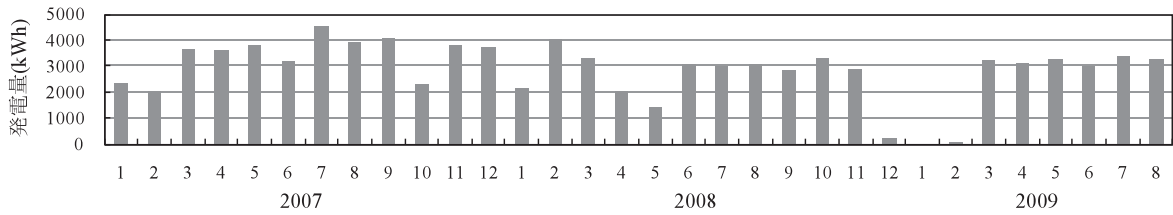
て大気に放出される。メタンの回収率 (バイオガスに含まれるメタンのうち、製品メタンガスとして回収できた割合) は、93%であった。

4 電力消費量, 発電量

各設備・施設の消費電力量を **Fig.7** に示す。山田バイオマスプラント全体の電力消費量は夏に少なく、冬に多



**Fig.7** 各施設・設備の消費電力量  
Electric power consumption of each facility



**Fig.8** 発電量  
Electricity generation

いという季節変動を示した。各設備・施設ごとの消費電力量をみると、季節変動をしているのは発酵槽加温用の電気ヒーターのみであり、その他の設備・施設については、トラブルの影響で運転を停止している期間（例えば、2009年1月のPSA）を除けば、電力消費量は年間を通じてほぼ一定であった。前述のとおり、山田バイオマスプラントでは実験用のメタンガスを生み出すため、発酵槽の加温のために電気ヒーターを用いている。また、発酵槽加温用の熱をコジェネレーションからの廃熱やその他の熱源から確保できていれば、電気ヒーターによる電力消費は考慮する必要はない。

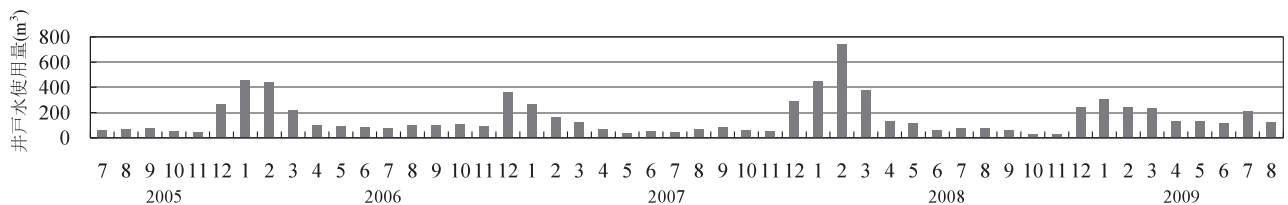
2007年4月から2009年3月までのメタン発酵施設（加温ヒーター除く）の日平均消費電力量、原料1tあたりの消費電力量は、それぞれ39.9kW/d、8.6kW/原料1tである。加温ヒーターの日平均消費電力量、原料1tあたりの消費電力量は、それぞれ499kWh/d、108kWh/d/原料1tである。固液分離される消化液1tあたり消化液固液分離過程の消費電力量は、8.1kWh/消化液1tである。また、PSA装置の消費電力は、バイオガス1Nm<sup>3</sup>あたり

1.3kWhであった。上記で示した消費電力の原単位はあくまでも山田バイオマスプラントに設置されている施設・装置での値であり、大きい施設・設備ではスケールメリットが発揮され、単位処理量あたりの電力消費量は小さくなると考えられる。

コジェネレーションによる発電量を **Fig.8** に示す。発電量が少ない月は、コジェネレーションの原料である製品メタンガスを製造する PSA が不調の時期である。

### 5 井戸水使用量

井戸水使用量を **Fig.9** に示す。井戸水使用量は高温期に少なく、低温期に多い傾向が見られた。場内清掃や液肥散布車の洗浄に用いる量は年間を通してほぼ同量である。低温期に消費量が多いのは、管路の凍結対策による消費である。IV. 1のトラブルに関する節で述べたように、2005年12月から2006年2月にかけて管路が凍結し、破裂するトラブル（トラブル事例6、7、8）があったため、その教訓として、クーリングタワーの水を常に流すなど、凍結を防止する対策をとっているためである。



**Fig.9** 井戸水使用量  
Well water use

## 6 臭気

Table 11 に臭気の測定結果と悪臭防止法に定める規制基準の範囲（この範囲の中で、都道府県知事等が地域の実情に応じて規制基準を定める）を示す。測定は2005年から2009年の間に7回行っている。季節、天候、風速等の環境条件の影響を受けるが、環境条件の多様な7回の測定を行うことにより、平均的な結果が得られた。2006年までに行った前半3回の測定は、炭化装置が稼働している状況、2007年以降の4回は炭化装置が稼働していない状況である。

悪臭成分の濃度は全体的に低く、山田バイオマスプラントから発生する臭気は問題となる濃度ではないと判断できる。その中で炭化装置が稼働していた前半3回の測定では、アンモニア、硫化水素の濃度がやや高かったが、規制基準程度であった。後半の4回は炭化装置が稼働しておらず、メタン発酵施設、PSA、コジェネレーションが稼働している状況で測定を行った。その場合、悪臭物質はすべて検出限界以下であった。臭気指数に関しても炭化装置が稼働している時の測定値がやや大きかったが、炭化装置が稼働せずメタン発酵、PSA等だけが稼働している時の臭気指数は小さかった。2009年7月の測定は、雨の中での測定であったため、湿度が高く、臭気指数がやや高くなったと思われる。

以上のことから、山田バイオマスプラントでの悪臭物質濃度は低く、臭気は少ない施設であると判断できた。メタン発酵プラントは発酵槽や原料受入ピットなどは密閉系であるので、臭気は少ない施設であると推察される。

なお、山田バイオマスプラントは牛舎や堆肥舎が隣接しており、測定された臭気にはそれら施設由来の臭気も含まれている。また、山田バイオマスプラントは各施設・設備から敷地境界までの距離が近く、特に、炭化装置からの排ガスの排出位置から臭気測定用ガスの採取口までの距離が約3m（水平距離）と近かった。そのため、濃度および臭気指数が高めの値となった可能性がある。

## V 結言

本報では、山田バイオマスプラントの約4年間におけるトラブル記録、運転データを解析し、メタン発酵プラントにおける物質収支、エネルギー消費の特徴、トラブルがプラントの運転に与える影響を明らかにした。

山田バイオマスプラントでは「オガクズ」、「凍結」、「硫化水素」、「部品消耗・長期運転の影響」が原因の各種トラブルが発生した。運転開始当初は、乳牛ふん尿に想定以上の割合のオガクズが混入していたことによる脱水機等の詰まり、冬季に想定以上の低温にさらされたことによる管路の凍結等のトラブルが多く、同じ乳牛ふん尿でも飼養形態によって排出される性状が異なることを認識してプラントの設計をすること、周辺の気象観測データだけではなくプラントの建設予定地の微地形を考慮に入れて気象条件を検討することが必要であることが示唆された。また、硫化水素は重大なダメージを与えるので、硫化水素濃度の変動を注視し、脱硫塔の機能低下前に交換を行うことが重要であること、運転開始後2年を経過した頃から部品の消耗が急激に増加することから、交換部品の用意等の対応が必要であることが示された。以上の情報はメタン発酵プラントの安定的な運転に寄与できる。

山田バイオマスプラントの運転実績から、原料投入量5t/d規模のメタン発酵プラントにおけるメタン発酵過程、消化液脱水過程、メタン精製過程の物質収支および各施設・装置の消費電力の原単位を整理することができた。メタン発酵過程では、原料1tあたりバイオガス17.1Nm<sup>3</sup>（メタン9.97Nm<sup>3</sup>、二酸化炭素7.19Nm<sup>3</sup>）と消化液0.85tが生成され、消費電力は原料1tあたり8.6kWである。また、消化液固液分離過程では、消化液1tに対して、脱水ろ液1.13t、脱水ケーキ0.12tが生成され、消費電力量は消化液1tあたり8.1kWhである。ここで得られた原単位は、メタン発酵プラント導入による化石エ

Table 11 臭気の測定結果  
Results of odor measurement

	単位	2005.12.13	2006.10.11	2006.12.13	2007.9.10	2007.12.6	2008.8.13	2009.7.21	定めることができる 規制基準の範囲※
アンモニア	ppm	0.05	0.09	0.23	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1 ~ 5
メチルメルカプタン	ppm	0.0005	<0.0001	<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002 ~ 0.001
硫化水素	ppm	0.050	0.0021	0.0004	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02 ~ 0.2
硫化メチル	ppm	0.0007	0.0002	<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01 ~ 0.2
二硫化メチル	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.009 ~ 0.1
トリメチルアミン	ppm	-	-	-	-	-	-	<0.0005	0.005 ~ 0.07
プロピオン酸	ppm	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.03 ~ 0.2
ノルマル酸	ppm	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.001 ~ 0.006
ノルマル吉草酸	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0009 ~ 0.004
イソ吉草酸素	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.001 ~ 0.01
臭気指数	-	20	13	13	<10	<10	<10	16	10 ~ 21

※ 規制規準は、悪臭防止法施行規則で定めた基準の範囲内で、地域の実情に応じ、県知事が定める。

エネルギー削減効果、地球温暖化防止効果等を評価するための基礎データとして活用できる。

山田バイオマスプラントでの悪臭物質濃度は低く、臭気は少ない施設であると判断できた。メタン発酵プラントは発酵槽や原料受入ピットなどは密閉系であるので、臭気は少ない施設であると推察される。

山田バイオマスプラントは現在も継続して運転を行っている。メタン発酵プラントのより安定的な運転方法を提案するために、今後もデータの蓄積を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 悪臭法令研究会 (2001)：四訂版ハンドブック悪臭防止法，ぎょうせい，東京 p.268-329
- 2) 独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005a)：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書，p.334-475
- 3) 独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005b)：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書，p.354-355
- 4) 独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005c)：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書，p.396-397
- 5) 独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005d)：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書，p.334-475
- 6) 中川悦光 (2007)：南丹市八木バイオエコロジーセンターの資源循環 -メタン施設が8年を経過したことに伴う2005年度設備改修を顧みて-，共同利用型バイオガスプラントの課題と展望に関するシンポジウム資料，独立行政法人土木研究所，p.1-13
- 7) 中村真人・柚山義人・山岡 賢・藤川智紀 (2007)：メタン発酵プラントにおける物質収支と消化液および消化液脱水ろ液の肥料特性，農土論集，249，p.107-113
- 8) 中村真人・藤川智紀・柚山義人・前田守弘・山岡 賢 (2009)：メタン発酵消化液の施用が畑地土壤からの温室効果ガス発生と窒素溶脱に及ぼす影響，農業農村工学会論文集，264，p.17-26
- 9) 野池達也 (2009)：メタン発酵，技報堂出版，東京，16p
- 10) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007a)：アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ，p.14-32
- 11) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007b)：アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ，p.71-72
- 12) 農林水産省 (2002)：バイオマス・ニッポン総合戦略，<http://www.maff.go.jp/j/biomass/> (最終確認日：2009年11月4日)
- 13) 李 玉友 (2005)：バイオマス利活用 (その3) -メタン発酵技術-，農業土木学会誌，73(8)，p.77-82
- 14) 柚山義人・中村真人・山岡 賢 (2007)：メタン発酵消化液の利活用技術，農業土木学会論文集，247，p.119-129



# Trouble Records and Analysis of Operation Data for Methane Fermentation Plant

– A Case Study at Yamada Biomass Plant –

NAKAMURA Masato, YUYAMA Yoshito, YAMAOKA Masaru, ORITATE Fumiko,  
FUJIKAWA Tomonori, SHIMIZU Natsuki, ABE Kunio and AIHARA Hideki

## Summary

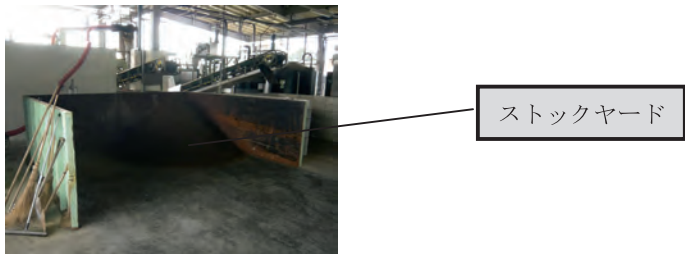
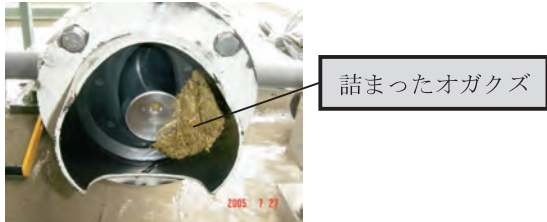
Methane fermentation is a biomass conversion process to produce energy as methane and fertilizer as digested liquid from feedstock biomass such as livestock wastes and food residues. Little data is available on the operation of methane fermentation plants, so it is important to collect such data. This paper describes material balance, energy consumption, odors from the plant and troubles that have occurred in the methane fermentation plant (Yamada Biomass Plant) during the last four years. The following conclusions were made


- (1) Basic information on material balance and energy consumption in methane fermentation processes can be used to evaluate the effects of the application of methane fermentation technology on fossil energy reduction and global warming prevention.
- (2) A troubles list that contains “causes of troubles”, “measures against troubles” and “lessons learned” can contribute to stable operation of methane fermentation plants.
- (3) Concentrations of malodorous substances at the methane fermentation plant were low, so odor around a methane fermentation plant is considered negligible.


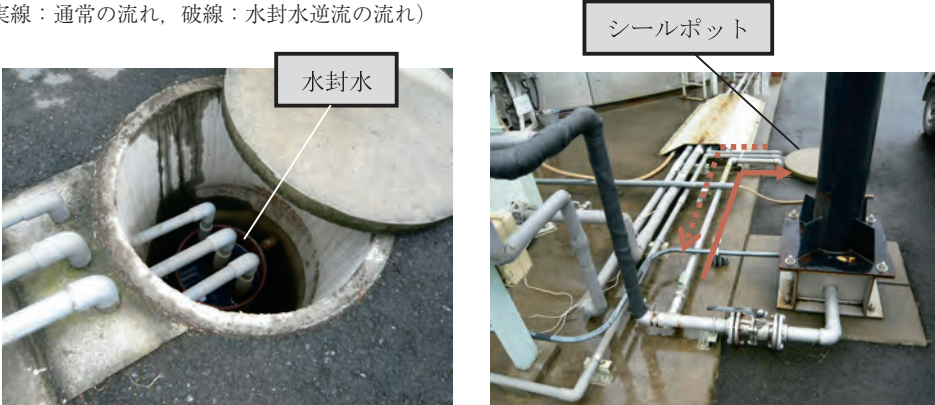
**Keywords :** methane fermentation, methane refining, digested liquid, troubles list, material balance, energy consumptions, odor

## Appendix

## トラブルリスト


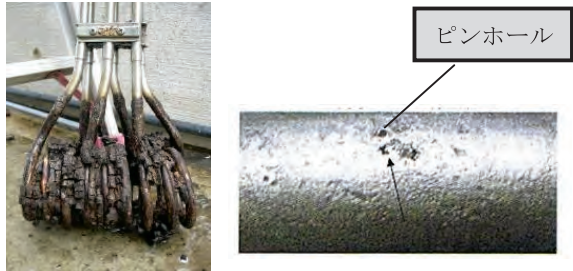
事例番号	1	日時	2005.7	分類	オガクズ
件名	設計値と比較してバイオガス発生量が少ない。				
事象・原因	原料を提供いただいた乳牛農家の飼養形態が、オガクズを敷料として用いるフリーストール方式であったため、牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかった。そのため、単位原料あたりのバイオガス発生量が設計値より少ない。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>畜産農家のご協力により、敷料に用いるオガクズの量を極力減らした。</li> <li>2007年3月からは原料の乳牛ふん尿の一部を牛ふん脱離液に変更（オガクズ使用量の少ない飼養形態から排出される乳牛ふん尿を想定）したことにより、バイオガス発生量はほぼ設計値となった。</li> </ul>				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>同じ乳牛ふん尿でも飼養形態によって性状が異なることを認識し、想定している原料の性状を確認してから施設の設計を行う。</li> <li>できるだけ敷料が混合しない飼養形態の畜産農家のふん尿を用いる。</li> </ul>				
備考					
写真					
事例番号	2	日時	2005.7	分類	オガクズ
件名	夾雑物搬出量が多い。				
事象・原因	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため夾雑物量が多く、夾雑物の排出作業（隣接の堆肥舎へ運搬する作業）を1日に8回程度行う必要があり、労力が大きかった。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>畜産農家のご協力により、敷料に用いるオガクズの量を極力減らした。</li> <li>夾雑物ストックヤードを設置し、1日分の夾雑物をストックできるようにした。</li> <li>小型ホイールローダーとダンプカーを使用して、夾雑物の搬出・運搬作業を効率化した。</li> </ul>				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>できるだけ敷料が混合しない飼養形態の畜産農家のふん尿を用いる。</li> <li>中間生成物を一時貯留できる場所の確保が必要。</li> </ul>				
備考					
写真	設置したストックヤード。 				
事例番号	3	日時	2005.8.19	分類	オガクズ
件名	夾雑物脱水機の詰まり				
事象・原因	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、夾雑物脱水機内でオガクズが詰まり、夾雑物脱水機が停止した。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管の清掃を行い、復旧した。</li> <li>畜産農家のご協力により、敷料に用いるオガクズの量を極力減らした。</li> <li>オガクズ以外の混入物（タオル、軍手、ビニール等）の混入を防止するため、原料受入ピットに簡易スノコ（人間の転落防止対策も兼ねる）を設置した。</li> </ul>				
教訓	できるだけ敷料が混合しない飼養形態の畜産農家のふん尿を用いる。				
備考					
写真	脱水機にオガクズが詰まった様子。 				




事例番号	4	日時	2005.9	分類	オガクズ
件名	消化液オーバーフロー管の詰まり				
事象・原因	牛ふん中のオガクズ割合が想定より大きかったため、メタン発酵槽の出口においては、オーバーフロー管が詰まった。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・配管の清掃を行い、復旧した。</li> <li>・畜産農家のご協力により、敷料に用いるオガクズの量を極力減らした。</li> <li>・消化液循環ポンプ設置し、オーバーフロー管の中を消化液が常に循環させることにより、固形分が滞留しないようにした。</li> <li>・正転、逆転の切り替えが可能な消化液循環ポンプを設置することにより、詰まりが生じてても、ポンプの正転、逆転操作により、詰まりを取り除くことができるようになった。</li> </ul>				
教訓	できるだけ敷料が混合しない飼養形態の畜産農家のふん尿を用いる。				
備考					
写真					
事例番号	5	日時	2005.9.27	分類	その他
件名	消化液貯留槽満杯				
事象・原因	貯留槽の容量が発酵槽から排出される消化液の約20日分の容量(約100m <sup>3</sup> )と小さく、また、消化液の利用先が決まっていなかったため、消化液貯留槽がほぼ満杯(消化液貯留量が貯留槽の上端から66cm)となった。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原料投入を中断した。</li> <li>・利用しきれない消化液を固液分離して、脱水ろ液とし、一時的に近隣施設の排水処理ラインに投入した。</li> </ul>				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・消化液を全量利用する計画であっても、プラント運転初期には、利用先の確保が難しかったり、トラブルが生じたりするので、最悪の場合を想定して廃棄先についても検討しておく。</li> <li>・貯留槽の容量を大きめに設計する(利用が円滑に進んでいれば容量は大きい必要はないが、プラント運転稼動初期は散布先を見つけることが難しい)。</li> </ul>				
備考	貯留槽の容量を発酵槽から排出される消化液の約20日分の容量としたのは、山田バイオマスプラントが研究プロジェクトの試作機であり、予算の制約があったためでもある。				
写真					
事例番号	6	日時	2005.12-2006.2	分類	低温
件名	ライン凍結、配管の破損				
事象・原因	低温によりラインが凍結し、配管が破損した。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・配管を保温材(毛布、保温テープ等)で巻く。</li> <li>・クーリングタワーの冷却水を常に流す。</li> </ul>				
教訓	・周辺の気象観測所のデータだけでなく、現地の微気象も考慮に入れて設計を行う。				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2005年～2006年の冬は気温が低い日が多かった。</li> <li>・プラントが窪地にあるため、周囲よりも気温が低いという事情もあった。</li> </ul>				
写真	<p>配管を保温材(毛布、保温テープ等)で覆っている様子。</p> 				



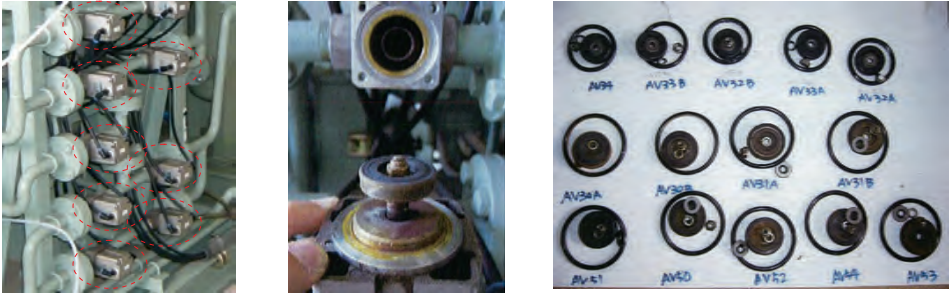
事例番号	7	日時	2006.2	分類	低温
件名	バイオガス流量計故障				
事象・原因	発酵槽から出た直後のバイオガスは約 37℃で、水分は飽和している。冬季には低温になり、バイオガス配管（発酵槽から PSA 装置までのバイオガスが通る配管）でバイオガス中の水蒸気が結露、凍結した。凝結水が凍り流量計が破損した。				
対策とその結果	・配管を保温材（毛布，保温テープ等）で巻く。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発酵槽から出てくるバイオガスには水蒸気が含まれているので、そのラインが低温にさらされると結露し、凍結する危険性があることを認識しておく。</li> <li>・周辺の気象観測所のデータだけでなく、現地の微気象も考慮に入れて設計を行う。</li> </ul>				
備考					
写真	保温テープで流量計を保温している様子。 				
事例番号	8	日時	2005.12-2006.2	分類	低温
件名	バイオガス配管の凍結による水封水の吸引				
事象・原因	バイオガスラインには排水ラインがあり、シールポットでシールされている。バイオガス配管の発酵槽から脱硫塔までの部分が凍結し閉塞したため、PSA を運転した時に、発酵槽からのバイオガスを吸引できず、脱硫塔-PSA 間の排水ラインから水封水が吸引され PSA 装置内に入り、PSA 装置のガス精製能力を低下させた。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製品ガス流量を 2.5Nm<sup>3</sup>（通常，3.5Nm<sup>3</sup>）と負荷の少ない条件で運転して、吸着剤を再生させようとした。3 週間後にはほぼ回復した（ただし、ダメージが残っており、2007～2008 年の不調の原因の一つとなったと考えられる）。</li> <li>・PSA 入口ガス圧力 LL で PSA をシャットダウンするようにした。</li> </ul>				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発酵槽から出てくるバイオガスには水蒸気が含まれているので、そのラインが低温にさらされると結露し、凍結する可能性があることを認識しておく。</li> <li>・周辺の気象観測所のデータだけでなく、現地の微気象も考慮に入れて設計を行う。</li> </ul>				
備考					
写真	シールポット（左）とシールポット周辺の配管（左） （実線：通常の流れ，破線：水封水逆流の流れ） 				



事例番号	9	日時	2006 年前半	分類	その他
件名	メタン濃度計の不良				
事象・原因	メタン濃度の指示値が 50～65% の範囲で日変動（昼間高く、夜間低い）した。原因ははっきりしないが、屋外に設置したこと（メーカーの推奨は屋内設置）、バイオガス配管内の結露水の影響が考えられる。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・濃度計を屋内に移設した。</li> <li>・ガスドライヤーで処理したガスを測定するように、ラインの変更を行った（ライン変更前は除湿前の水蒸気で飽和したガスの濃度を測定していた）。</li> <li>・配管を保温材（毛布、保温テープ等）で巻く。</li> </ul>				
教訓					
備考					
写真	メタン濃度計（左）、 ガスドライヤー（右） 				
事例番号	10	日時	2006.6, 2007.6, 2009.6	分類	その他
件名	うじ虫（ハナアブの幼虫）の発生				
事象・原因	原料受入ピットにハナアブの幼虫（うじ虫）が発生した。				
対策とその結果	受入ピット周辺部の隙間をビニールテープで密閉。（メタン発酵菌を殺す可能性があったため、消毒薬は使えなかった。）				
教訓	ハナアブの這出口を密閉することが有効である。ただし、完全に防ぐことは難しい。				
備考					
写真					
事例番号	11	日時	2006.7	分類	その他
件名	配管の閉塞				
事象・原因	消化液脱水機に無機凝集剤（ポリ鉄）を添加する配管で結晶が析出して配管が閉塞した。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転休止中は配管内を空にできるように、凝集剤を抜くための液抜きバルブを取り付けた。</li> <li>・発酵槽から出てきた消化液が直接消化液貯留槽に入るラインであったが、ライン変更を行い、閉塞を起した配管を経由して消化液貯留槽に流れるようにした（配管内に液が滞留することがなくなった）。</li> </ul>				
教訓	消化液脱水機を連続運転していれば、起こりにくい事象である。山田バイオマスプラントのようにバッチ運転を行う場合には注意が必要。				
備考					
写真	閉塞した管路（左）、管路に詰まった析出物（右） 				

事例番号	12	日時	2006.8	分類	硫化水素
件名	脱硫塔の機能低下の見過ごし				
事象・原因	<p>脱硫塔の機能低下を見過ごしたことにより、脱硫塔通過後のバイオガス中の硫化水素濃度が最高約 300ppm に達した。下流側にある PSA 装置の吸着剤、真空ポンプのダイヤフラム、圧縮機、昇圧機、切替弁、流量計に悪影響を与えたと想定された。</p> <p>原因は、2006 年 8 月から硫化水素濃度の値が上昇していたが、計測値が正しくないと思いこんでいたため放置したこと、メタン濃度と硫化水素濃度の計測は独立しているが、計器が一体であったことから、メタン濃度計測値の信頼度低下の影響を受けたことである。</p>				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検知管によるクロスチェック</li> <li>・脱硫剤の取り替え（1 回/年必要と考えられる）</li> </ul>				
教訓	脱硫の不良は周辺機器に重大な損傷を与えるため慎重な対応が必要。脱硫剤の劣化する周期を把握し、早めに交換することが必要。				
備考					
写真	<p>脱硫剤交換の様子。</p> 				
事例番号	13	日時	2006 後半	分類	その他
件名	メタンガス貯留タンクが満杯。				
事象・原因	日常運転時のメタンガスの用途がメタントラックとフォークリフトだけであるため（2006 年当時）、使い切れず、メタンガスの貯蔵量がタンクいっぱいとなった。そのため、PSA 装置の運転を一時中断した。				
対策とその結果	メタンガスを消費するために、バイオマスボイラーでの消費運転を行った。また、バイオガスはフレアスタックで燃焼した。				
教訓	プラント管理用の車（軽トラ、フォークリフト）だけではメタンガスを消費しきれない。得られたガスを有効に消費するためには、小型のコジェネレーションの設置が必要である。				
備考	実証研究だから起こるトラブルである。実際の事業ではガスの使用計画を立てているので問題がない。				
写真					
事例番号	14	日時	2007.4	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	加温ヒーターのショートによる部分停電発生。				
事象・原因	発酵槽加温用水槽の水の更新やスケール防止剤の添加を行っていなかったため、加温ヒーター 4 本にピンホールが発生、ショートして部分停電発生した。				
対策とその結果	加温用水槽の水 65 t の入れ替え、スケール防止剤を 5kg 添加、ヒーター入れ替え。				
教訓	発酵槽の加温用水槽にはスケール防止剤を添加し、定期的に入れ替える必要がある。				
備考	実証研究だから起こるトラブルである。本研究では生成メタンガスの多様な用途に用いる実験をするために、生成されたバイオガスをコジェネレーションの燃料とせず、ほぼ全量 PSA で精製している。発酵槽加温用の熱源をコジェネレーションの廃熱から利用できないため、加温ヒーターを用いている。実際の事業では、加温ヒーターを用いることはないで、問題がない。				
写真	<p>電気ヒーター（左）、 電気ヒーターにできたピンホール（右）。</p> 				

事例番号	15	日時	2007年前半	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	フレアスタックが点火せず				
事象・原因	雨水が入りスパーク装置が腐食したため、フレアスタックが点火しなかった。				
対策とその結果	スパークプラグ交換（交換頻度1回/1年）				
教訓	定期的点検修理が必要。				
備考					
写真	スパークプラグ交換の様子。  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">フレアスタック</span>				
事例番号	16	日時	2007.10	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	PSA装置の真空ポンプのダイヤフラム破損。				
事象・原因	PSA装置の真空ポンプのダイヤフラムが破損したため、PSA装置の運転をしばらく休止した。PSA装置を休止するまでの間、破損状態で運転が継続したため、吸着剤が真空再生されていなかったことにより、製品ガス濃度が低下した。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダイヤフラムの交換。</li> <li>・製品ガス流量を2.1Nm<sup>3</sup>/h（通常、3.5Nm<sup>3</sup>/h）と負荷の少ない条件で運転して、吸着剤を再生させようとした。</li> </ul>				
教訓	・ダイヤフラムの交換時期を計算し、破損前に交換を行う。				
備考					
写真	真空ポンプ（左）、ダイヤフラム（右）。 				
事例番号	17	日時	2007～2008	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	コンベアーロール摩耗				
事象・原因	夾雑物脱水機、消化液脱水機の固分を排出するコンベアーのコンベアーロールが摩耗した。				
対策とその結果	交換を行った。				
教訓	すぐに復旧できるように予備品をもつ。				
備考					
写真	 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">コンベアー</span>				

事例番号	18	日時	2008.1	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	夾雑物脱水機の不調				
事象・原因	夾雑物がうまく絞れず、含水率が高い状態のものが排出されていた。原因は、夾雑物脱水機のスクリーンの磨耗。				
対策とその結果	スクリーンを交換した。また、今度同様の不調が発生した時用にスクリーンの予備を作成した。また、外筒に変形が見られ新作した。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>定期的な点検が必要。</li> <li>交換部品（スクリーン等）を用意しておき、原料投入ができない期間を最短にする（脱水機が壊れると牛ふん投入ができず処理が滞るため、早めの部品交換が必要である）。</li> </ul>				
備考					
写真	夾雑物脱水機の交換部品。スクリーン（左）、外筒（右）。 				
事例番号	19	日時	2008	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	受入ピットのスノコの腐食				
事象・原因	受入ピットの転落防止用の安全スノコ（鉄）が腐食した。				
対策とその結果	すのこを更新した。材質は鉄からステンレスに変更した。				
教訓	ふん尿に直接さらされる部品は腐食しやすい。				
備考					
写真	受入ピットの安全スノコ。 				
事例番号	20	日時	2008.4.14	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	PSA 装置での空気作動弁の不調				
事象・原因	PSA 装置の空気作動弁のシール材が消耗した。				
対策とその結果	空気作動弁のシール材の交換。				
教訓	空気作動弁のシール材は消耗品なので、定期的に交換する必要がある。				
備考					
写真	空気作動弁（左）、空気作動弁を取り外した様子（中）、取り外したパッキンとシール材（右）。 				



事例番号	21	日時	2008.4	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	脱硫塔内のパンチングメタルの腐食				
事象・原因	パンチングメタルは脱硫塔の底部に設置されていて、脱硫剤を支える役割をしている。バイオガスは飽和水分を含有するため、一部が凝縮して液化する。その水に硫化水素が溶けて硫酸となり、パンチングメタルが腐食した。				
対策とその結果	パンチングメタルを交換した。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パンチングメタルの腐食状況を予測し、定期的な交換する（2年に1回程度）。</li> <li>・脱硫剤の交換に際しては、腐食が進行している場合を想定して、交換用のパンチングメタルを用意することが望ましい。</li> </ul>				
備考					
写真	腐食したパンチングメタル。 				
事例番号	22	日時	2008.12	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	PSA装置の真空ポンプのダイヤフラムの破損				
事象・原因	PSA装置の真空ポンプのダイヤフラムの破損により、メタンを含むガスが漏れた。				
対策とその結果	ダイヤフラムを交換した。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定期的な予防、保全が必要。</li> <li>・メタンが漏れると事故につながるため、破損する前にダイヤフラムを定期的に交換する。</li> </ul>				
備考					
写真					
事例番号	23	日時	2008.12	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	メタンガス充填設備のプースターの不調				
事象・原因	長期使用による磨耗により、メタンガス充填設備の充填圧力が所定の圧力まで上がらなくなった。				
対策とその結果	プースターの消耗部品（ピストンリング、ダイヤフラム）を交換した。				
教訓	定期的な予防、保全が必要。				
備考					
写真	メタンガス充填設備（左）、プースター（右） 				

事例番号	24	日時	2008.12-2009.3	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	受入ピット底部にたまった沈殿物による夾雑物脱水機の不調				
事象・原因	受入ピット底部に蓄積した沈殿物により、夾雑物脱水機が不調となった。プラントの運転開始後約3年半の間、受入ピットの清掃を行っていなかったため、受入ピットの底に原料の一部が蓄積したことが原因である。				
対策とその結果	プラント運転開始後初めて原料受入ピットを掃除し、回復した。				
教訓	定期的（3～4年に1回）に受入ピット内の沈殿物を除去する必要がある。				
備考					
写真					
事例番号	25	日時	2009.3	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	受入ピットへの原料以外のものの混入				
事象・原因	原料受入ピットの清掃を行った結果、原料以外の異物（手袋、石、釘、工具等）が見つかった。				
対策とその結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>原料供給者に原料の管理の徹底を依頼する。</li> <li>定期的な清掃が必要。</li> </ul>				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>原料供給者に原料の管理の徹底を依頼する。</li> <li>一方、ある程度の異物混入はやむをえないので、ピットの構造で異物を分離できるようにし、機器への致命的なダメージを避ける。</li> </ul>				
備考	受入ピットは原料に混入する異物を分離する役割を果たしている。				
写真	受入ピット清掃の様子（左）、受入ピットの底から出てきた異物（石、釘等）				
					
事例番号	26	日時	2006-2007	分類	硫化水素
件名	PSA 装置でのメタン収率の低下				
事象・原因	PSA 装置のメタン収率（バイオガス中のメタンのうち製品ガスとして回収した割合）が70～80%程度（設計値は90%以上）と低迷した。原因として、PSA 装置の空気作動弁のシール材の劣化、製品ガス流量計が故障していたため最適な運転条件で運転していなかったこと等が考えられる。製品ガス流量計が故障した原因は2006年8月に高濃度の硫化水素がPSA 装置に混入したことによると推察される。				
対策とその結果	電磁弁の交換、製品ガス流量計の修理・校正。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量計は定期的に校正する必要がある。</li> <li>空気作動弁のシール材等の消耗部品の定期的な交換が必要。</li> </ul>				
備考					
写真					

事例番号	27	日時	2006-2007	分類	硫化水素
件名	製品ガス流量計の不調				
事象・原因	硫化水素により基盤が損傷し、流量計が正確な指示値を示さなくなっていた。				
対策とその結果					
教訓	・定期的な予防、保全が必要。				
備考					
写真	製品ガス流量計 				
事例番号	28	日時	2009.7	分類	部品の消耗・長期運転の影響
件名	脱硫塔のパッキンの劣化によるバイオガスの漏れ				
事象・原因	脱硫塔の上部にあるマンホールのパッキンの劣化により、バイオガスが漏れた。				
対策とその結果	脱硫塔内の圧力を落としてからパッキンを樹脂で固めて応急修理をした。				
教訓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定期的に石鹼水を用いてガス漏れのチェックが必要。</li> <li>・脱硫剤の交換時にはパッキンの交換を行っているが、より慎重に作業を行う必要がある。</li> </ul>				
備考					
写真	脱硫塔 (左), 脱硫塔上部 (右) 				

# 限界化が危惧される地域の振興支援方策

－群馬県南牧村における振興支援型研究－

遠藤和子\*・唐崎卓也\*\*・安中誠司\*\*・石田憲治\*\*\*

## 目次

I 緒言	37	1 支援活動の画期	44
II 南牧村の位置づけ	37	2 支援活動の反省点	45
1 南牧村の概要	37	3 「限界化」問題の本質	45
2 南牧村に関わることになった経緯	38	V 支援に求められる役割	46
3 南牧村に関わる複数支援主体	38	1 段階別整理	46
III 支援活動記録の整理	39	2 南牧村において支援が果たした役割	46
1 分析の視点	39	VI 結言	46
2 活動毎の整理	41	参考文献	47
IV 支援活動を通し明らかになった点	44	Summary	48

## I 緒言

「限界集落」という言葉がにわかに注目されるようになった。もともとは、大野（1991）が65歳以上の高齢者が集落人口の半数を超え、冠婚葬祭をはじめ田役、道役などの社会的共同生活の維持が困難な状況におかれている集落を限界集落と定義したことに始まる。農林業センサスによると1995年から2000年にかけておよそ5,000の集落が消滅している。その後も農村振興局（2005）の調査で1,400、国交省（2006）の調査で2,640の集落が消滅の危機に瀕していることが報告されており、「限界集落」問題の根拠となっている。

当事者にとって見るとがん宣告にも等しいこの言葉は、現在でこそ多用されてはいない。しかし、そこに住み続けることが限界になっていく状況があることには変わりはなく、そうした地域の振興を支援する方策の確立が急務の課題となっている。

本稿では、そうした事態を「限界化」と呼ぶことにしたい。筆者等は平成18年より、限界化が進む群馬県南牧村を対象に振興支援活動にかかわってきた。ところで、平成20年度、ポスト過疎法を議論する過疎問題懇談会から補助金ならぬ「補助人」を望む答申が出されたこと

を受け、特別交付税措置による集落支援員制度が創設された。これを契機に限界化が危惧される地域の振興を支援する取り組みが全国で開始されるようになった。しかし、実際にはどのように支援をすすめていったらいいのか、苦悩する自治体は少なくない。筆者等の活動も多分に試行錯誤の連続であった。そこで、本稿では、筆者等が南牧村の振興支援にかかわり行ってきた働きかけと、それらが現地に与えた影響を住民等の反応から整理、分析することにより、限界化が危惧される地域に対する支援方策について考察を行う。

## II 南牧村の位置づけ

### 1 南牧村の概要

群馬県の南西部にあり長野県との境に位置する南牧村は、1,000m級の急峻な山々に囲まれた村である。村の89%が森林で占められており、村を東に横断する南牧川周囲のわずかな平地に家々が点在し斜面に張りつくように石垣の段々畑がある。3つの旧村、磐戸村、月形村、尾沢村が合併した昭和30年当時の人口は10,573人であったが、平成17年には2,929人となり50年間の減少率は72.3%に上る（Fig.1）。また、平成2年に25.7%だった65歳以上人口割合は平成17年には53.4%にまで増加し、人口の半数以上が老年人口で占められている。

もとは、養蚕と林業、そしてこんにやく生産で栄えた村である。かつては、水はけのよい急斜面でしかこんにやく栽培ができなかったため、こんにやく玉は「灰色のダイヤモンド」と呼ばれ傾斜地での生産が売り上げを独占

\* 農村計画部地域計画研究室

\*\* 農村計画部集落機能研究室

\*\*\* 農村計画部長

平成21年12月14日受理

キーワード：限界化、地域振興支援、南牧村



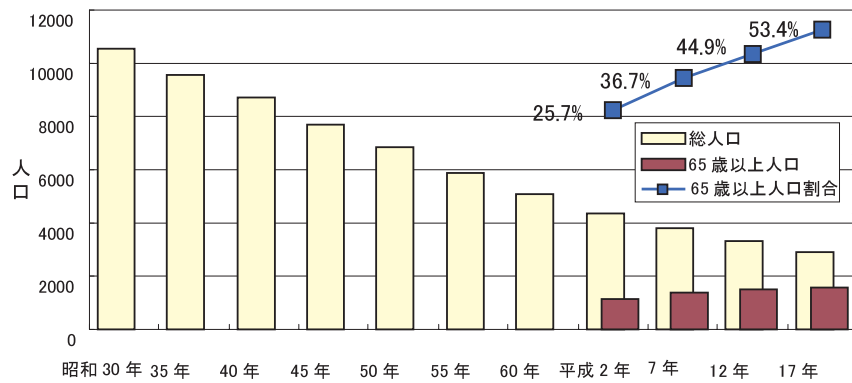


Fig.1 南牧村の人口推移と高齢化  
Decreasing in population and aging in Nanmoku village

してきた。ピークの昭和50年には、こんにゃく栽培農家が703戸、栽培面積は184haあり、年間5億6千万円を売り上げていた。しかし、平場でのこんにゃく栽培が可能になると生産は激減し、平成12年には平場への出耕作を含めても栽培農家43戸、栽培面積31haにまで減少してしまう。

急峻な山々に囲まれた自然の豊かさと「火とぼし」（武田信玄ゆかりの祭り）が開催されるなど歴史のある村であったが、昭和50年代以降、養蚕、林業に加えこんにゃく生産が衰退していくことにより村の産業は一気に落ち込み、それとともに活力も失われてきた。近隣町村との合併協議は開催されたものの、隣接町の住民投票において南牧村との合併に慎重な意見が多数を占めたことから不調に終わった。その結果、平成16年8月には村の高齢化率が51%を越え全国第一位となってしまった。

南牧村は、少量多品目の野菜を女性や高齢者がステップアップを図りながら直売所に出荷していく再生プラン「チャレンジ21農業」「重点野菜推進事業」で有名な、JA甘楽富岡管内に位置する。当初、都市部のスーパーと提携した「インショップ」にも出荷していたが、平成17年3月までにJA支所が金融部門を残して撤退すると最寄りの市場が遠くなり、その結果高齢農家等はインショップへの出荷が困難な状況になってしまう。

一方、県の普及員は花卉、果樹生産を中心に熱心に南牧村にかかわってきた。ヒベリカム、南天、菊などの生産に取り組む花卉生産組合は売り上げを伸ばし、平成21年3月からは大田市場に出荷を開始した。切干芋も好調であり平成20年には生産組合が発足している。さらに、ブルーベリー栽培農家が増えており、ジャムなどの加工にも取り組んでいる。

村内で生産される農産物の多くは、平成16年にオープンした村の駅「オアシスなんもく」の直売コーナーで販売されている。JAが取り組むインショップへの出荷は困難になっているが、現在、オアシスなんもくが、モノや情報の行き交う場となっている。

## 2 南牧村に関わるようになった経緯

このような南牧村に筆者等が関わるようになったのは、中山間地域フォーラム（産官学民の協力により中山間地域の再生を支援することを目的に平成18年に設立。以下、フォーラム）が、支援地区を募集したことに端を発する。大学や研究機関などの有志が集うこの任意組織は、研究会の開催や政策提言の作成を行うほか、具体的に限界化が危惧される地域を対象とする支援活動を展開しようとしていた。支援対象地域を求めて行われた募集に対し候補地の一つとなったのが南牧村であった。平成18年、南牧村は現地ヒアリング等の作業を通じ最終的に支援対象地域に選ばれたのである。選ばれた理由には、第一に、高齢化日本一の村で振興支援が成功すれば他の地域にとって大きな勇気を与えることになると考えられたこと、そして、第二に、南牧村では活性化の芽が未だ芽生えていないと判断されたため自立的な活動の邪魔をしないと考えられたことなどがあげられた。筆者等は、当初、フォーラムの活動を観察することにより支援方策の検討を行うことを目的として南牧村との関与を開始した。その後平成20年からは筆者等が自ら支援者となり関与していくことになる。

ところで、村はこの募集に対し独自に応募をしてきたわけではなかった。応募には、南牧村を対象に長年普及活動を行ってきた県職員の強い働きかけがあり、実質的には当該職員の声に応える形で応募がなされている。そのためか、当初は『村を何とかしたいので是非一緒に活動して欲しい』という村の積極的な意志を感じ取ることができなかった。もちろん、村内には、南牧村をなんとかしたいという思いのある人が多数存在したが、筆者等の支援活動をどのように受け止めるべきか困惑しているようにも思われた。南牧村と筆者等が関わるようになった経緯は以上のものであり、村自身の真意を計りかねる状況の中で活動が開始された。

## 3 南牧村に関わる複数支援主体

南牧村の振興支援を推進するため、中山間地域フォー

ラム南牧協議会が設立されている。協議会は、役場の担当課（振興整備課）が事務局となり、フォーラムの支援チーム、県の関係機関、役場の関係課が参画することになった。支援チームは、フォーラム会員への呼びかけに応じた大学教員、大学院生、海外支援関係者、民間コンサルタント主催者などで構成された。当初、支援チームが活動を牽引する役割を担うことが期待されたが、実質的には部分的にしか機能しなかったため、支援体制の再編後に筆者等が牽引役を果たして行くことになった。

協議会においては、それぞれの立場において南牧村を支援していくことが確認され、支援の方針などが話し合われた。ワークショップの開催にあたっては、協議会でテーマ決めや、その後の具体的振興策（ワークショップの成果をインターネットを用いて情報発信して行く）などが話し合われた。しかし、メンバーは村外の者が多くを占めており、実際に顔を合わせての協議は年1回程度にとどまらざるを得なかった。また、支援チームの中には、諸般の事情により活動から離れていくメンバーもいたことから、途中体制の再編を余儀なくされる場面もあった。

一方、協議会のメンバー等はそれぞれの立場で村にかかわり、そのことが結果的に活動を推進することにつながった。例えば、県の関係機関は活性化を目的とする事業を村に結びつけるなどして資金面で活動を支えた。大学教員および学生等は、それぞれの問題意識や興味に基づき、研究や卒論のフィールドとして村内で調査を展開した。また、地元で開催されるイベントに応援に駆けつけるなど住民等とのかかわりを深めた。

このように、立場こそ違いが、南牧村の振興を目的と

する複数の主体が集い、それぞれの活動を展開するというきっかけを協議会の設立がもたらした。結果、筆者等や複数の大学教員等が南牧村を訪れるようになった。また、大学教員に同行する学生等は地元の若者と意気投合し、こうした交流は地元若者層の決起につながっていった。

### Ⅲ 支援活動記録の整理

#### 1 分析の視点

平成18年に活動が開始されて以降、主として活動を牽引すべき支援チームが途中再編されたこと、さらに大きな問題として平成19年9月、台風9号により被災し甚大な被害を被ったことを契機として、南牧村を対象とする振興支援の方針は紆余曲折を経ることになる。また、凄まじい産業の衰退を経験し、なお限界化が進む中で、何がどう展開すれば南牧が振興したことになるのか、その十分な見通しがないうまに活動が開始されたこともあり、活動それ自体、試行錯誤となった。

しかしながら、そもそも限界化が進行している条件不利地域を対象とする活動であるため、試行錯誤の活動は必然であったとも考えられる。実際に、その時々において効果を発揮した点、反省点の両面があったと思われる。本稿では、それら両面を含め活動の記録を整理、総括する作業を行うことにより分析を進めることにする。

まず、活動の記録を時系列に整理したものを **Table 1** に示す。この整理から明らかのように、活動は、台風により被災するまでの活動初期、南牧村の活性化方策を話し合うワークショップ（以下、活性化ワークショップ）

**Table 1** 南牧村の振興を支援する活動の記録  
Records of activities for supporting promotion of Nanmoku village

時期	支援活動の内容	住民等の活動	村内外を取り巻く出来事
平成18年 10月	中山間地域フォーラム支援地区決定のため南牧村に予備調査に入る。		
11月	南牧村を支援地区に決定する。		
12月	県や村と支援方針を話し合う。		
平成19年 1月	支援の方針およびスケジュールを決定し村に提案する。		
2月	フォーラム会員より支援チーム員を募集。チーム編成を行う。		
3月	支援チーム内の担当課題を決め、支援方針を確認する。		
4月	支援チームが現地視察を行う。協議会を設立し支援体制の整備を行う。		
6~7月	基礎データの収集、担当課題別に支援チーム員がそれぞれ聞き取り調査を行う。		
8月	地域住民との合意形成を図るためのワークショップ開催の準備を始める。 <u>「段々畑コンサート」に参加する。</u>	<u>住民有志等が「段々畑コンサート」を開催する。</u>	
9月	災害復旧のため、支援活動を中断する。		<u>台風9号が南牧村を直撃し道路、家屋に被害が発生する。</u>
9~10月	災害復旧募金活動、民宿利用キャンペーンをフォーラムの会員に呼びかける。		災害復旧活動に追われる。

時期	支援活動の内容	住民等の活動	村内外を取り巻く出来事
11月	南牧村商工会青年部の座談会に参加する。	商工会青年部が座談会を開催し、支援チームのメンバー等と懇談する。	
12月	南牧村において開催された「ふるさと南牧塾」で地域活性化に関する講演を行う。	県の事業により「ふるさと南牧塾」を開催する。	
平成20年 1月	<u>フォーラム内で南牧村支援活動の途中評価を行う。支援方針の是非について議論する。</u>		NHK「ご近所の底力」に南牧村H地区が限界集落として登場する番組が放映される。
2月	支援チームが活性化ワークショップの開催を協議会に提案する。村で協議会を開催しワークショップの企画を練る。		
3月	<u>南牧村にて、第一回南牧活性化ワークショップを開催する。県、村、フォーラムに加え農工研の専門家が活動を支える。</u>	<u>ワークショップという形式で、村の将来を議論する最初の経験をする。</u>	
6月	<u>支援チームの再編を行う。</u>		
7月	第一回南牧活性化ワークショップの結果をとりまとめ村に報告する。村の広報誌へとりまとめを寄稿する。村と今後の活動方針について懇談をする。その中で特定の地区を対象とする点検ワークショップの開催を提案する。候補地としてH地区を紹介され訪問する。		
9月	前期農業祭に参加し花卉生産についてヒアリングする。		前期農業祭が開催される。
9月	県の事務所（高崎市）において協議会を開催し、今後の支援方針を話し合う。点検ワークショップを開催するなど住民等の自立を促す支援活動に転換していくことを提案する。		
9月～1月		<u>滝マップづくりワークショップが開催されることになり、村の呼びかけに応じた住民が活動を進める。ワークショップは年度内に3回開催される。</u>	
9月	点検ワークショップの開催をH地区と協議する。		
10月	点検ワークショップをH地区で開催することについて住民等と合意する。日照時間が長くなる2月か3月に開催することを決定する。	甘藷生産組合が設立される。	
11月	後期農業祭に参加し、第一回南牧活性化ワークショップのアイデア展示とお気に入りアイデアへの投票を実施する。投票に参加した住民と南牧村の活性化について議論する。農業振興の新しい動きをヒアリングする。		後期農業祭が開催される。
平成21年 1月	村において、点検ワークショップ開催に向けての打ち合わせを行う。 滝マップづくり、緑のふるさと協力隊受け入れなど村内に起きている動きをヒアリングする。		緑のふるさと協力隊の受け入れを決める。
1月			人口社会問題研究所が2035年の人口推計を発表し、南牧村は人口減少率全国第一位として公表される。
2月	点検ワークショップを開催するH地区の区長宅を訪問し懇談する。		
2月	H地区において、ワークショップ開催に反対する意見が出たことを受け、一端、開催を断念する。他の方策を模索する。		
3月	<u>点検ワークショップの主催者をH地区から村に変更し、H地区点検ワークショップを開催する。</u>	<u>滝マップが完成する。H地区住民が点検ワークショップに参加する。</u> 花卉生産組合が大田市場に出荷を始める。	南牧村において『田舎で働きたい』事業が展開され、35名の若者を受け入れる。
4月			地球緑化センター主催の緑のふるさと協力隊員を受け入れる。
4月	H地区点検ワークショップの結果をまとめ村に報告する。点検ワークショップの成果を発展させH地区の将来構想を描くワークショップ（以下、構想づくりワークショップ）を提案する。		

時期	支援活動の内容	住民等の活動	村内外を取り巻く出来事
5月		農産物加工研究会がオアシスなんもくにて山菜祭りを開催する。	
6月	H地区点検ワークショップの成果パネルをH地区へ送る。		
7月	ブルーベリー祭りに参加し活動を視察する。	農産物加工研究会がオアシスなんもくにてブルーベリー祭りを開催する。	
7月	H地区の歴史や現状について前区长よりヒアリングする。構想づくりワークショップの開催を提案するが合意に至らず。		
9月			<u>経済危機対策関連交付金を活用し、オアシスなんもくに隣接する用地を買収、整備していくことが議会で承認される。</u>
10月		<u>村の呼びかけに応じた若者等が村の将来構想について話し合いを行う。</u>	<u>経済危機対策関連交付金を契機とし、村は滝マップづくりに参加した若者等に活性化計画づくりを投げかける。</u>
10月	H地区を訪問し懇談する。	<u>若者5人が「明日の南牧を考える会」設立を決める。</u>	

注：本文中に記載がある出来事のうち、支援側、村、住民にとって転機となるようなものを下線と太字で示している。

の開催とそれに至るまでの混迷、支援チームの再編、H地区を対象とする環境点検ワークショップ（以下、点検ワークショップ）の開催など、様々な出来事を経ている。

途中の経過はあるが、平成21年10月、村内の若者5人が「明日の南牧を考える会」を設立することになった。若者等は、小学生以下の子をもつ親達であり、現在、『よその人たちが南牧の小中学校に子どもを通わせたくない、そんな地域づくりをしてみたい』と夢をふくらませている。取組当初、積極的な意志を感じ取ることができなかった南牧村において、住民の中からこのような動きが出てきたことは活動がもたらした成果の現われといえよう。なぜ若者等からこのような動きが出てきたのか。以下では、支援者の行ってきた働きかけに対し、村、住民等がどのように反応し変化していったのかに注目し整理を行っていく。

## 2 活動毎の整理

### a 支援開始から台風被災するまでに行った活動

活動初期においては、協議会の設置や基礎データの収集、村、県との懇談など支援体制の整備から着手された。そして、集めた基礎データやヒアリング調査結果をもとに、振興テーマとしてあらかじめ(1)花卉振興、(2)農村移住・帰農、(3)石垣保全、(4)コミュニティ・ビジネスの4つが設定され、支援チームのメンバーがそれぞれのテーマを担当することになった。さらに、活動のスケジュールについては、平成19年1月～3月：支援チーム編成、基礎データの収集、4～6月：問題意識の共有化を図るワークショップ開催、7～9月：アイディ

ア抽出と合意形成を行うワークショップ開催、10月以降：課題への具体的支援を開始する、と整理された。

こうした計画に沿い、例えば、コミュニティ・ビジネスについては、高齢者世帯の状況、公共交通の便、高齢者組織の存在について資料収集、区長へのヒアリング調査が精力的に行われた。ヒアリング調査では「困っていることは何か」という問いかけが行われた。

活動の初期において体制整備、目標およびスケジュール設定がなされ、調査も積極的に進められていったが、住民等の反応は「別に困ったことなどない」という盛り上がり欠けるものであった。結局、村や住民等の意識は支援活動に対して予定調和的には高まらず、計画通りに事は進まなかった。

そうした中、平成19年9月、台風9号が南牧村を直撃し村は大きな被害を受ける。人的被害こそ免れたが、道路、家屋の被害は著しく役場はしばらく災害復旧に追われることになる。それに伴い支援活動は計画の中断を余儀なくされた。

### b 活動再開に至るまでの混迷

活動初期では、支援チームの動きと住民等の意識はうまくかみ合わなかった。災害復旧の目途が立った後に支援活動は再開されることになるが、初期の状況を受け、南牧村は本当に振興していくことができるのか、なぜ村の人々の気持ちは盛り上がらないのか、支援の方向が間違っているのではないかという議論がフォーラムの中ですら出ようになっていた。そうした中、支援チームの中には事情により南牧村の振興活動から離れていくメンバーも現れ、チームとしての活動は実質不可能となっていた。



計画された活動が頓挫する一方、支援チームの中の大学教員と住民との間で予定外の交流が生まれていった。それは、南牧村へIターンした住民(県のグリーンツーリズム・アドバイザー)が中心となり、南牧村商工会青年部、住民有志が企画した「段々畑コンサート」の開催がきっかけとなっている。コンサート開催についてはフォーラム会員へ情報提供がなされるとともに、開催を応援しようと支援チームの中の若手大学教員等が大学生を同伴し現地へ駆けつけた。舞台設営を手伝った大学生は商工会青年部のメンバーと意気投合し交流していくことになる。その後も、商工会青年部企画の座談会への招待、「段々畑コンサート」開催に関わった有志等で開催する「ふるさと南牧塾」での講演依頼を受けるなど、住民は独自の視点で支援活動に興味を示していった。

### c 活性化ワークショップの開催

チームとしての活動が実質不可能になる中、活動を継続していた支援チームメンバーは、支援活動の仕切り直しを図り住民等の意識を引っ張り上げることを目的に、村住民によるワークショップの開催を提案する。

改めて、協議会の中で振興目標が話し合われ、ワークショップのテーマとして新たに(1)炭を活かす、(2)農産物加工、(3)空き家対策・農村移住、(4)南牧のお宝発見、の4つが設定された。そして、ワークショップの成果をインターネット上で情報発信していくことなどが目標として定められた。なお、テーマの素材としては「華道の材料となる枝モノの活用」、「花卉振興」なども提案されたが、花卉についてはすでに主体的な取組が進んでいること、枝モノについては県の普及方針に合わないことなどの理由からワークショップテーマには採用されなかった。

ワークショップは「南牧活性化ワークショップ」と位置づけられ、村内住民30名(男性24名、女性6名、年齢32歳~76歳)が参加し、上記テーマに即して4班に分かれ話し合いを行った。協議会のメンバーはファシリテーター、記録係を担当した。また、本ワークショップでは農工研の専門家が開催を支援した。

30名の住民等は協議会事務局である村が参集を呼びかけた。参加者は、農業委員会、花卉生産組合、商工会青年部、オアシスなんもくの運営主体「あぐりくらぶ」、「かあちゃん本舗」、「農産物加工研究会」に所属する人々のほか、ITライター、自然保護員(以上、もともとの村住民)、県のグリーンツーリズム・アドバイザー、Iターン者(移住してきた住民)などであった。参加者等は、それぞれの立場や目的、問題意識により村内において個々に活動を展開している状態であり、少なからず「南牧を何とかしたい」と思っている人々であった。活性化ワークショップの開催は、これらの人々が一堂に会する機会を与えるとともに、Fig.2に示すように、複数グループが交わる班編成を行ったことにより、様々な立場にある人々が南牧村の活性化についてともに考え、意見を述

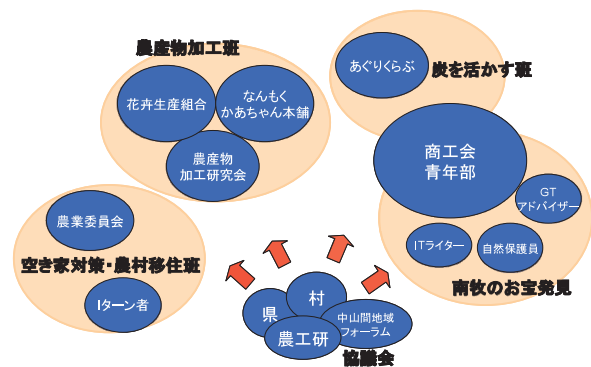


Fig.2 活性化ワークショップ参加者の活動母体別にみた班編成  
Composition of the workshop groups expressed according to participant's membership of institutions

べ合う「場」を提供することになった。

4つの班は、それぞれテーマにそって話し合いを進めた。この中から、バイオプラスチック、漢方的利用など炭活用の新しいアイデア、柚子ジュースや味噌など地元農産物の活用、「炭よい南牧村」、「群馬の炭っこ南牧村」、「50、60まだ娘、70、80まだ現役」、「死ぬのを忘れた南牧村」などユニークなキャッチフレーズ、石垣を利用した観光モノレール、首都圏のNPOとの連携など様々なアイデア、提案が出された。成果を持ち寄った全体発表では、時折拍手が沸き起こり村を活性化していくためのアイデアに共通認識を深めることができた(Fig.3, Fig.4)。参加者からは「住民がこのような形で意見交換するのは初めてであり、このような機会を持つことができよかった」、「次は〇〇について話し合ってみよう」という積極的な感想が聞かれた。中には、自身のブログ記事に早速掲載する参加者もいた。このように、住民の中で起こった反応はワークショップの開催が住民等に好意的に受け止められたことを示していると考えられた。

活性化ワークショップは、問題を探る思考を働かせてきたそれまでの支援活動と一転し、住民等が村の活性化のために自由に意見を述べ発表をするという住民主体の行動を引き出すことになった。また、それまで地ならしにとどまっていた村、県、フォーラムの関係も、本取組を経て信頼関係が築かれるようになった。住民が繰り出す様々なアイデアは村や県の職員等を驚かせ、「村を何とかしたい」という住民の底力に気づかせることになる。村は、ワークショップがそのような住民等の主体性を引き出すのに有効な手法であることを知るようになる。そのことが次の活動への発展を生み出す原動力になっていったと考えられる。

一方、(1)炭を活かす班、(2)農産物加工班から出された商品開発のアイデアはバイオプラスチックや柚子ジュースなど具体的なものであった。そのため、このようなアイデアに対しては専門家による技術指導が必要と思われた。特に、農産物加工研究会では県の普及指導



Fig.3 発表風景 (1)  
Presentation of ideas in the workshop



Fig.4 お宝発見班の成果  
Result of the workshop

を受けながら様々な試作品作りを展開していた。そのため、出てきたアイデアをワークショップという形式を用いて膨らましていくだけではなく、自主的な勉強会を開催し学習を重ねながら商品開発に結びつけていく段階にさらにステップアップすることが適当と思われた。

また、農産物加工についていえば、すでに「かあちゃん本舗」が活動を展開しており、開発した商品がオアシスなんもくにおいて多数販売されていた。農産物加工班の話し合いでは、このグループが開発した商品に対し、村内産の材料を使ってはどうかというアイデアが提示された。しかし、採算が合わないという理由でアイデアは否定されてしまった。このことから、すでに自立的に活動している事項について、あえて働きかけをしても自立的な活動を阻害してしまう場合があり留意が必要と思われた。

#### d 「お宝発見班」の活動

活性化ワークショップを体験した後、村は、滝マップづくりワークショップを主催し「お宝発見班」のメンバーを中心に参集を呼び掛けた。平成20年度、村はもともと観光マップづくりを計画していた。事業費を確保する県との協議の中から、住民等が「滝」という地域資源を発掘しながらマップづくりに取り組むワークショップ形式を採用することになったのである。

村主催のワークショップは3回開催され、お宝発見班でのワークショップの経験が活かされることになった。住民等は自主的に学習を進め村内にある多くの滝を発掘しマップづくりにふさわしい写真の収集を行った。

ここでの経験は、お宝発見班での経験に引き続き、楽しく取り組むことができた。そして、ワークショップを契機とし、それまで別々に活動してきた主体が村を思い合う気持ちを共有する機会を得ることになった。こうした経験は、後に若者等の決起を促すことにつながっていったと考えられる。

#### e 支援チームの再編

前述してきたとおり、支援チームメンバーの一部は活動から離れることになった。代って、農工研の専門家ら

がワークショップ手法を中心として支援活動を支えることになった。こうした実態に合わせ、平成20年6月に支援チームの再編を図ることになり、筆者等が支援チームのメンバーに加わることになった。以降、筆者等が支援チームの牽引役を果たして行くことになる。

活性化ワークショップが開催されて以降、支援側は次の一手を進められずにいたが、支援チームが再編されたことにより、点検ワークショップの開催を提案することにした。活性化ワークショップの経験は、住民等の主体性を引き出すきっかけとなっており、さらに、住民等の気づきや力づけを促す作業を支援活動の中心に据える必要があると考えたことによる。

#### f H地区点検ワークショップの開催

点検ワークショップは、村の推薦によりH地区での開催を模索することになった。この地区は役場から車で20分ほど奥まった山間地に位置する区であり5つの集落(分区)から構成されている。世帯数は全体で65戸、住民はおよそ150人である。そのうち、よそに働きに出ている60歳未満の住民は9人(6戸)であり、多くが年金を主たる収入源とする高齢世帯である。林業、養蚕、こんにやくで栄えたが、昭和35年頃こんにやく栽培が平場でも可能になるとH地区のこんにやく栽培は衰退していった。昭和50年ころには地区の住民等でトラクタを共同購入し平場へ出耕作したが、その頃から農業をあきらめる世帯が増え、子の進学を契機に多くの農家が離村していったという。

多くが年金世帯という高齢化著しい地区であるが、6年毎に開催される諏訪神社御柱祭は平成22年に50本目、300年を迎えることになっており歴史のある地区であることがわかる。また、平均年齢73歳という「H地区青年合唱団」は地区を明るく元気にしようと数年前に結成されたグループであり、厳しい状況下でありながらもあきらめずに地区を盛り上げていこうとする住民の意識を感じることができる。

H地区は、あるテレビ番組の中で「困った限界集落」として紹介された経験を有する。そうしたとり上げられ



方に対し区内では不満の声があがっていた。そのため村はそのようなH地区の心境を覆すためにワークショップの開催を利用しようと考えたのである。

開催に至るまでには、数ヶ月の話し合い、調整を要し、直前に集落内で反対の声があがるなどし開催が危ぶまれる事態も発生したが、村や区長らの奮起により平成21年3月、無事、H地区点検ワークショップ（H地区いいもの探し）が開催されることになった。最終的に地区住民17名、県、村、農工研、中山間地域フォーラムから19名が参加し、4班編成で5集落（分区）をそれぞれ点検しあった。高齢者が多いことからアイデアが出てくるかどうか心配されたが、多くのお宝（地域資源）が取り上げられ、全体発表は一人ひとりが発表を行ったため時間を大幅に超過するなど期待以上の盛り上がりを見せた（Fig.5, Fig.6）。

この経験により、H地区は「困った限界集落」から「地域資源をたくさん持っている誇れる地域」、「仲間がいて明るく楽しい地域」というポジティブな思考で地域をとらえ直す機会を得ることになった。全体発表における住民等のいきいきとした様子を目の当たりにした村の職員からは、「良いアイデアを出すということだけではなく、高齢化が進む地区ではこうした取組をすること自体に大きな意義がある」という意見が示された。支援活動を開始した当初には、村からこのような積極的な意見を聞くことはなかったが、様々な経験、支援者との交流を通じ村職員等の意識も大きく変化していったと考えられた。

#### g 若者等の決起

平成21年9月、村は、経済危機対策関係の交付金を活用し、都市農村交流の場として整備することを目的にオアシスなんもくくに隣接する用地を買収した。当面は、イベントのたびに不足していた駐車場を整備していくが、最終的には、都市農村交流のできる場として整備していくことを想定しての決断であった。

背景として、南牧村の南に位置する上野村には年間30万人の観光客が訪れており、それらの多くがオアシスなんもくをトイレ休憩の場として利用し通過していくことがあげられる。この観光客たちを引き留めることができれば、南牧村を活気づかせる起爆剤になると村は考えたのである。村は、交流の場づくりを計画するために、滝マップづくりワークショップに参加した若者等にアイデアを要請した。この話し合いをきっかけに、若者等の中から「明日の南牧を考える会」設立の話が持ち上がったのである。

### IV 支援活動を通し明らかになった点

#### 1 支援活動の画期

以上のように、若者等の決起に至るまでの活動を整理した。支援側の活動方針の変遷という観点からこれら期



Fig.5 発表風景 (2)

Presentation of the ideas in workshop



Fig.6 点検マップの例

Result of the workshop

間を見直してみると、それは3期に分けて捉えることができる。第1期は、支援の方向が間違っているのではないかと議論がフォーラムの中で出るようになっていた平成20年1月を境とする。つまり、それ以前は、『支援すべき事項を探し出し処方箋を与えようとした時期』（平成18年10月～）であり、それまでの活動の評価に対する議論が起こったことをきっかけに、ここで活動方針の転換が起こったと捉えることができる。

第2期は、活性化ワークショップの開催に見られるように『具体的な振興テーマを与え住民意識を引っ張り上げようとした時期』（平成20年1月～）である。そして第3期は支援体制の再編を境とするものであり、点検ワークショップを開催し『住民等の気づきや自発的な学習、力づけを促そうとした時期』（平成20年6月～）となる。

支援側の働きかけに対し住民等の反応は様々であった。その中でも若者等は「段々畑コンサート」を契機とする支援者等との交流、活性化ワークショップと滝マップづくりワークショップを経験したことによる気づきや意識の醸成、交流施設作りへのアイデア要請を契機とする決起など、いくつかの出来事を経ながら変化を遂げていった。

一方、H地区での試みは未だ点検ワークショップの段階でとどまっており、住民等の飛躍は見られない。しかし、高齢化が進む地区において住民等がいきいきと取り組む様子は、村の職員等に住民主体の大切さを気づかせることになった。村では、H地区で構想づくりワークショップが開催できるよう働きかけを進めている。

## 2 支援活動の反省点

若者等の決起により支援活動の効果が強調される一方、活動はスムーズには進まなかったことも事実である。例えば、支援活動が開始された当初は、住民等の困っている点を探し出し、決められたテーマにそって支援策を明らかにしていく方針がとられた。しかし、支援チームの積極的な活動に対し住民等は期待された通りには反応を示さなかった。最終的には、住民等の気づきや力づけを促す、見守りの姿勢に方針を転換することになった。こうした経過に基づき、活動の反省点についても触れておく必要がある。

反省点1：「困っていることは何ですか？」という質問に対し、住民等の反応は「別に困ったことなどない」という盛り上がりには欠けるものであった。支援者側は、「困っていることがあったら助けますよ」という態度に陥り易いが、そうした態度は施しの姿勢に他ならず、住民の主体性、尊厳を無視することにつながる。そのような態度は住民にとって受け入れ難いものであり、結局、支援活動は空回りすることになる。「困っていることは何ですか？」という質問、態度は避けるべきである。同時に、どのように厳しい条件下にあっても住民は主体性を失っていないことに留意する必要がある。

反省点2：活性化ワークショップでは、話し合いのテーマをあらかじめ設定したことにより、自由なアイデアを抽出するというワークショップの特性を活かすことができない場面があった。また、支援活動の初期では振興テーマを決めたことにより、住民等の主体性を育む機会をつくる事ができず他人の活動になってしまった。「フォーラムの示してくれたテーマにそって進めて

ほしい」という村長の発言はそれを象徴している。課題やテーマの掘り起しは住民主体で行う場面が必要である。

反省点3：農産物加工班の話し合いでは、すでに主体的な活動を展開している事項を議論のテーマにしたため、アイデアに対する否定が起きてしまった。アイデア自体が優れていたとしても、新しい提案が活動主体の実績や自負心を傷つけることもあり、その場合、自立的に行っている活動を邪魔することになりかねない。活動が展開している事項については、当事者等が自主的な学習を重ねステップアップを図る方法で支援していくほうが有効である。

反省点4：専門性が求められる技術的な事項は、支援スタッフ以外に専門家の協力を得るべきである。例えば、南牧村には普及員が熱心に足を運び、営農や特産品開発等に関する指導を行っている。農業振興については彼らの活動を尊重すべきであろう。

反省点5：中山間地域フォーラム南牧協議会は活動ごとに調整の労をとらねばならない点において機動性を欠いた。そのため、協議会という体制自体が南牧村の振興を推進したとは言いがたい。むしろ、多様な主体が南牧村に関わるきっかけをつくった点において協議会の設立は意義があった。そして、支援活動を展開するそれぞれの支援者が村や住民といかに信頼関係を築いていくかという点が重要であった。

## 3 「限界化」問題の本質

以上のような反省点が見えてくると、逆に、「限界化」問題の本質は何であり、必要とされる支援とは一体何かという疑問が生じてくる。それについては、H地区における取組を踏まえ次のように考えてみたい。

H地区では、平成21年3月に点検ワークショップが開催され、住民のいきいきとした様子は村職員に意識の変化をもたらした。その後、本ワークショップの成果を活かしていくために地区の将来構想を描く構想づくりワークショップ（以下、構想づくりワークショップ）の開催を提案したが、容易には合意に至らなかった。ヒアリングによると、その理由は、H地区は世代交代を託すあとつぎが地区内には存在しないため、本心では「自分限り」と思わざるを得ない状況にあり、そのような中で5年後、10年後のことを構想することなどできない、というものであった。しかし、その後筆者等や村が働きかけを継続することにより、構想づくりワークショップの開催について少しずつ前向きな反応が示されるようになってきた。H地区の取組からは、世代交代の困難性を有しつつも、支援者等が働きかけを継続することにより活動を前に進めることができないわけではない、ということを示している。

H地区の事例を踏まえると、世代交代の困難性を有する地域では、自分限りという思いを捨て前に踏み出す気



持ちが、まずは必要とされるのではないかと考えられる。つまり、限界化とは、世代交代の困難性に依拠する「自分限り」という気持ちが地域を活性化させようとする力を著しく低下させている状態と捉えられることができ、限界化が危惧される地域では、初期にはそのような気持ちを取り除くことが課題になると考える。そのため、このような状況の中では、困難を分かち合い課題解決の道のりを伴走してくれる仲間（支援者）が必要とされるのではないだろうか。H地区では、活動を推進していく人材が不足しているが、若者グループが設立されたことを契機に、これら地区外の若者の手を借りるなど広域的な関係づくりに発展していくことにより、前に踏み出す気持ちを形成することができるのではないかと考えられる。

「限界化」問題に対するこのような捉え方はH地区を事例とするものであり、本稿において改めて問題提起するものである。したがって本事例を踏まえつつも、限界化の他の段階にある地域においても検証を進めることにより「限界化」問題の本質をさらに見極めていく必要がある。

## V 支援に求められる役割

### 1 段階別整理

一口に地域振興といっても、その守備範囲は非常に広い。経済的な振興を目指すのであれば、特産品の開発が必要になるであろうし、都市農村交流などのイベントを開催し観光地としての道を歩むなどの方策が考えられる。一方、そこに住み続けるからには、生活の問題を解決していかなければならない。最寄りの医療機関まで何分かかるか、買い物の利便性は良いか、そもそもお店はあるのか、世代交代していく若者はいるのか、学校はあるか。クリアしなければならない問題は山積しており、必ずしも、経済的な自立やイベント開催などのお祭り騒ぎのみを対象としているわけではない。

では、地域振興は何から取り組んでいったら良いだろうか。阪神淡路大震災の復興にかかわった久保（2005）は、「まちづくりとは、自己組織化、創発、進化を促すプロセスである。計画的に仕組まれたものではなく、個人や集団を意図的に動かせるものではない。そこにあるのは、ボトムアップから起こった自立的で自然な活動であった」と述べている。また、ジェイコブス（2001）は、人間の集落のような動的なシステムは絶えず自己修正が必要であり、システムを維持しようとするネガティブ・フィードバックや、システムの再編を図ろうとするポジティブ・フィードバックといった自己修正手段を有していると指摘している。

つまり、「地域を何とかしたい」とするネガティブ・フィードバックは必ず地域内に存在するのであり、そこを刺激することにより、ポジティブ・フィードバック、

すなわちボトムアップの活動を興し自立の道筋を立てること、それが地域振興の第一歩になると考える。しかし、限界化の特徴は、内部の力だけではその第一歩を踏み出すことが非常に困難であるところにある。そこで、支援が必要になる。

Table 2 に発展段階別の支援内容を示す。学習と実践を繰り返しながら力をつけることにより、問題の把握と解決のための計画づくりが可能となる。その力づけを行うのが表で示すエンパワメント支援段階である。すでに福与ら（2007）は、住民等のエンパワメントを促すワークショップ手法を提案しており、ワークショップのようなアイデアを膨らませる活動が有効に機能する段階である。南牧村の現在の支援方針はここに相当する。例でみたように、内部の力が弱まっているように見えても施しの姿勢は決して受け入れられない。あくまでも自らの能力を発揮できるよう気づきとエンパワメントの機会創出が肝要となろう。

### 2 南牧村において支援が果たした役割

支援活動が開始された当初、南牧村には、むらづくりのための村の目標があるわけではなく、村を何とかしたいという積極的な意志を感じることはできなかった。役場職員の通常業務は繁忙を極めており、何とかしたくてもそのような余力は村内部には存在しない状況にあった。

そのような中、2度のワークショップを通し、様々な形で支援者等が村を訪問し交流する中で、役場職員はもちろん、住民の中にも支援活動の趣旨が浸透していった。その結果、若者等の自立を刺激し決起につながった。

南牧村における支援活動は試行錯誤の連続であった。また、ワークショップで出されたアイデアはまだまだ活かされてはおらず、H地区の活動は足踏み状態である。しかし、改めて地域の自立的で自然な活動という観点で活動を見直した場合、住民等の気づきを見守り無理のない支援活動を展開してきた点は評価することができよう。

## VI 結 言

群馬県南牧村を対象とする振興支援型研究を素材とし、限界化が危惧される地域の振興支援方策について考察してきた。支援方針の転換を伴いながらも様々な主体が村にかかわっていった結果、若者の中から「明日の南牧を考える会」を設立する動きが現れた。

ここに至るまでに行ってきた支援活動について、記録を整理するという方法で分析を行った結果、何よりも、住民等の主体性を重視すべきであることが明らかとなった。限界化が危惧される地域を支援するという立場に立った場合、支援者の多くは、効果的な振興策をトップダウン的に提示しなければならないという誤解を持つ

**Table 2** 振興段階別支援内容  
Assist content according to promotion stage

段 階	支 援 者	事 例	支援の内容
①地元住民が自主・自立の活動を展開できるようにするまでの間（エンパワーメント支援段階）	まちづくりを支援するNPO, 大学, 研究機関	福与ら（2007）による高知県の町中央地区における運動論的研究, <u>南牧村</u>	ワークショップの企画, 運営, ファシリテーションを担いながら, エンパワーメントな計画づくりを支援する。地元住民等の気づきを促し自己決定による地域づくりを実現していけるような力づけを目標にする。
②パートナーシップの関係を築きながら活動を展開させていく段階 （パートナーシップ構築段階）	中間組織の役割を果たすNPOなど	NPO法人ひろしまね	「もう一つの役場」を目指す。 歴史文化に関する調査活動, シンポジウム開催, ネットワークづくり, 住民団体の活動支援など多面的に活動を展開
	活動目的に応じて連携していくNPOなど	魚津市中山間地域連絡協議会とNPO法人パトリーズ	草刈サポート隊の派遣 グリーン・ツーリズムコーディネーター育成などを展開

のではないと思われる。しかし、そのような支援者の態度に対しては、住民等は反応を示さないことが本事例から明らかとなった。一方で、支援活動の方針転換を図り、ワークショップを中心とした活動を展開することにより、住民等は少しずつ支援者の働きかけに反応を示すようになり、滝マップづくりワークショップなど自立的な活動が行われるようになった。また、外部の複数主体が必ずしも支援という形ではなく村に入り込み、人々と交流していくことにより、住民の中に気づきや村を活性化させていこうとする認識が生まれていった。

これらのことから、住民等の主体性は、解決策を与えるという方法ではなく、(1) 地域に存在する様々な主体をつなぎ、話し合いを行う「場」を設定することにより生まれていき、(2) 支援者が住民と交流を図ったり、働きかけを繰り返したりすることにより育まれていく、ということが明らかとなった。活動記録の分析は以上のように総括される。

冒頭述べたように、集落支援員制度が創設され、限界化が危惧される地域の振興を支援する取り組みが全国で展開されるようになった。このこと自体は当該地域を活性化させていく上で必要な施策であったと思われる。今後、活動件数が増えるとともに、持続性・継続性を有した活動の展開が期待される。そのためには、支援者となる人材の確保、育成（技術習得）と併せ当該地域の振興を支えていくための制度拡充が望まれる。本稿で述べた取り組みでは、筆者等が研究を目的に外部支援者として地域に関わってきたが、一般的には、NPOなどの主体が外部支援者として想定される。あるいは、技術移転を図ることにより、県、市町村職員が農業生産振興とともに農村振興の支援者として必要な技術を習得していくことも可能と考える。

また、制度拡充においては、主体性を適度に刺激しつつ、試行錯誤の展開を許容し得る裁量性を持った制度設計が望まれる。このような方向転換は、限界化が危惧される地域の振興に限らず、農村地域の活性化対策というより大きな枠組みの中で捉えた場合においても、ボトムアップの力を活かしながら活性化を図るという確固たる方向性を築くことにつながると考える。

本稿では、南牧村における振興支援型研究を素材とし議論を展開してきた。一事例に基づく議論を基礎としているものの、外部支援者が地域住民とともに活動する構図は、集落支援員制度をはじめ近年充実が期待される様々な地域支援形態に共通的に内在する論点を有している。今後、南牧村の展開を引き続き観察するとともに、他地域における振興支援活動にも注目し当該地域の支援方策についてさらに深く検証していく必要がある。

### 参考文献

- 1) 福与徳文・筒井義富（2007）：多様な主体による資源管理計画の作成方法，農業農村工学会誌 75（8），pp.23-26
- 2) ジェイン・ジェイコブス（2001）：経済の本質，日本経済新聞社
- 3) 国土交通省（2006）：平成 18 年度「国土形成計画策定のための集落の状況に関する現況把握調査」
- 4) 久保光弘（2005）：まちづくり協議会とまちづくり提案，学芸出版社
- 5) 農林水産省農村振興局（2005）：平成 17 年度「限界集落における集落機能の実態等に関する調査報告」
- 6) 大野 晃（1991）：山村の高齢化と限界集落，経済，新日本出版社，pp.55-56

# **Intervention Study about How to Support Promotion of the Area Where Those Who Live Cannot but Give Up a Change of Generation after Themselves**

**- Case Study of Nanmoku Village in Gunma Prefecture -**

ENDO Kazuko, KARASAKI Takuya, YASUNAKA Seiji and ISHIDA Kenji

## **Summary**

We studied how to support promotion of the area where those who live cannot but give up a change of generation after themselves using the approach of an intervention study in case of Nanmoku Village in Gunma Prefecture. Although we supported for this village, that action was trial and error. As a result of our support, five young men formed the group to draw the future vision of the village finally. It was showed that the reason was in the following point by analyzing record of activity. First, the resident sense which tries to activate their village was fomented by having gained experience of the workshop. And, we and the staffs of the village made the confidential relation brew through various activities. Furthermore, it was thought by respecting residents' independent activity that it was urged to residents' empowerment.

**Keywords :** giving up of a generation change, promotion support, Nanmoku Village

# 農業分野での障がい者就労の類型化による 支援課題の抽出とその解決方策

安中誠司\*・山下 仁\*・片山千栄\*・石田憲治\*\*

## 目 次

I 緒 言	49	IV 類型別にみた農業分野での障がい者就労の 支援課題と解決方策	55
II 農業分野での障がい者就労の概況	50	1 農業法人等での受入れにおける課題	55
1 作業面・経営面・資源活用面からみた特徴	50	2 農業への新規参入における課題	56
2 農業法人等による障がい者の受入れ状況	51	3 課題解決に向けた支援方策	56
III 農業分野における障がい者就労の類型化	51	V 結 言	56
1 障がい者就労に関する類型化の視点	51	参考文献	57
2 障がい者就労の類型化	52	Summary	59
3 類型別にみた就労事例	52		

## I 緒 言

近年、農業分野においても障がい者就労への支援が注目されはじめた(注1)。「21世紀新農政2008」(食料・農業・農村政策推進本部が平成20年5月に決定)では、「意欲と能力のある担い手の育成」の一環として「女性、高齢者、障がい者等の多様な人材が活躍できる環境づくりを推進する」ことが謳われている。また、「障がい者基本計画(平成15～24年度)」の後期5年に係る「重点施策実施5か年計画(平成20～24年度)」(障がい者施策推進本部が平成19年12月に決定)では、「障がい者の能力や特性に応じた働き方の支援」の一環として「農業法人等への障がい者雇用の推進」が盛り込まれている。

これらの背景の1つとしては、性別・年齢・障がいの有無等に関わりなく安全・安心に暮らせる共生社会の実現が政策的に推進され、人口減少時代にあつて農業生産の場、農村振興のためには、多様な人材がコミュニティに継続的に参画していく必要性が指摘される。既に農業生産の場では、施設園芸における作業環境の改善や機械作業における安全対策の視点から、様々な高齢化対策が工夫されているが、これらは障がい者を対象としたバリアフリー化への取り組みとしても有効である。農業農村

整備においても、すでに平成8年度には農村総合整備事業(高福祉型)が導入され、道路や生活環境施設における段差解消などの取り組み事例がみられる。そして、現在の農村振興総合整備事業(高齢者福祉基盤整備)では、「農村において高齢者・障がい者が安全に安心して活動できるよう、福祉施設用地の整備、集落歩道の幅員の拡大及び農業施設のバリアフリー化を促進するとともに、高齢者・障がい者が健康で生きがいを持って暮らせるよう、生きがい農園等の整備を総合的に実施する」と、高齢者・障がい者が受益者であることが明記されている。

一方、医療・福祉の分野では以前よりリハビリテーションの手段として園芸作業が注目されてきた。作業療法(主体的な生活の獲得をはかるために諸機能の回復・維持および開発を促す作業活動を用いた治療・指導・援助)の一種としての園芸療法や、健常者も含めて健康回復や生きがいづくりを目指す園芸福祉などの取り組みが存在する(原2007)。近年では、福祉から雇用へ、障がい者の自立支援という流れのなか、農業分野における就労の可能性に高い関心と期待が寄せられている。

ところが、農業分野での障がい者就労事例は確かに存在するものの、受け入れ先はなかなか広がらない状況にある。この一因として、農業分野における就労のあり方の多様性と天候の影響や作物生育状況の考慮など作業の定型化が困難なことが指摘されているが、農業分野の就労の実態やその展開方向は必ずしも十分な整理がなされていない。そのため、農業分野における障がい者就労の現場で発生している課題とその支援方策について議論する際に、論点が噛み合わず、混乱するケースもみられる。

\* 農村計画部集落機能研究室

\*\* 農村計画部長

平成21年12月14日受理

キーワード：障がい者、就労支援、共生社会、人材活用、農村振興、農業参入、類型化



例えば、雇用と福祉的就労（注2）の混同などがその例である。農業分野における障がい者就労の課題とその支援方を検討するには、目的にあった類型の設定と課題の整理が重要である。

農業分野での障がい者就労に関する類型化について、牛野ら（2007）は、農業の経営主体（農家か福祉施設か）、農家からの位置づけ（労働力として期待するか）、雇用の形態（障がい者との契約か福祉施設との契約か）に注目し、知的障がい者が農業に取り組むパターンを「農家や農業法人の農作業を担う従業員として障がい者が就業」、「農家の委託を受けた障がい者施設が障がい者を引率して作業」、「障がい者福祉への貢献のため農家で障がい者を受け入れ」、「障がい者施設が施設内で農作業を実施」に類型化している。また、日本障がい者雇用促進協会（1997）では、知的障がい者を長期・常時雇用している農業経営体等の調査を通じて、障がい者福祉と農業の関わりを、「社会復帰訓練としての農作業」、「福祉施設での農業生産、加工、販売」「福祉施設での農業生産の事業化」、「一般の農業経営体による障がい者の雇用」の4つに整理している。ただし、障がい者が農作業に取り組む際のこれらのパターン分けは支援方策の検討を目的にしたものではないため、本報が目指す課題の整理と支援方策を検討するには限界がある。

さらに当時と比べて障がい者を取り巻く社会的環境も大きく変化した。農業者と障がい者との関係についても、これまでの農家や農業生産法人等が障がい者を雇い入れるという農業者側からの一方的な関係から、農業者と障がい者はどちらも農村地域における新たな共生社会の創造に対等に資する貴重な社会資本として捉えることが重要である。そして、農業生産や農村振興への効果についても、障がい者単独での効果を捉えるのではなく、健全者を含めた多様な担い手による諸効果を捉えることが不可欠である。

そこで本報では、障がい者と農業者との共生による農業・農村の発展に向け、農業分野における障がい者就労の現状について概観した上で、農業分野における障がい者就労の類型化を行い、就労支援に係わる課題を整理する。その上で、課題解決に向けた支援方策について言及することを目的とする。

ここでの「障がい者」は「身体障がい」「知的障がい」「精神障がい」などの障がいの種類を限定していない。これ

までの調査事例では、農業分野では知的障がい者及び精神障がい者の就労が多くみられている。また、本報では、雇用に係わる支援機関等について「労働・福祉」と表記している。なお、本報の一部には、当所が農水省経営局から受託した「農村生活総合調査研究事業」における農業分野での障がい者就労に関する調査研究、（平成17～20年度）の成果文献2）、3）、7）、8）、12）、13）を活用している。記して関係各位に深謝する。

## II 農業分野での障がい者就労の概況

### 1 作業面・経営面・資源活用面からみた特徴

生命産業である農業は、自然や生き物との関わりの中で営まれる。福祉側からみると、農作業に対し、体力づくりや身体機能の回復、注意力や集中力の向上、気分転換やストレス発散、達成感や向上感の獲得などの効果が期待されている（例えば佐渡ら2009など）。また、農作業は、工場労働等と比べて、マイペースで作業ができ、失敗してもやり直しができる場合が多い。作業が多様であることは、個々の障がい者に適した作業（適性）を把握しやすいとも言える（片倉ら2007）。

一方、農作業は、作目にもよるが、作業内容や作業量に季節性があり、天候にも左右されやすい。同一内容の作業が必ずしも通年継続するわけではなく、雇用は季節雇用が主体となる。一般に知的障がい者の場合は、作業の習熟に時間をかけた繰り返しが必要な場合が多い。そのため、定型的な作業を通年で確保しやすい施設園芸や畜産などの作目での就労が目立つ。

障がい者の就労という点からみれば、自然や生き物との係わりは適している部分、作業の季節性は適していない部分と言える。なお、障がい者の場合、個々人の適性（何が苦手で何が得意か）を把握し、その能力を十分に発揮できるように担当作業を特定することが就労の継続性の観点からも重要となる。作業が多様であることは、個々の障がい者の適性を尊重しやすい反面、適性に合った担当作業の特定に手間がかかるとも言える。

経営面での特徴としては、農業は他産業と比べて小規模な家族経営が主体であり、他人を雇用した経験のある経営体は少ないことが挙げられる。2005年農林業センサス結果によれば、農林業経営体のうち作業従事者数が10人以上のケースは5%、法人化している経営体は1.3%

注1 障がい者の表記に関しては、かつて“障碍”という字を使用していたが、漢字制限に伴う標準的な漢字表記の制約もあり、1949年の身体障害者福祉法の制定以降“障害”の表記が用いられてきた。近年、この“障がい”の表記については様々な場で議論が行われるようになり、2009年12月8日の閣議決定による「障がい者制度改革推進本部」の設置に際して、一時的に“害”を平仮名表記にする“障がい”の表記が採用された。本稿はこれに倣い、“害”の字を使用せず“障がい”と表記することとし、法令および既往刊行物の名称等を除き、これまでの名称等で“障害者”または“障害”と表記していたものも含め、“障がい者”または“障がい”と統一表記している。

注2 障がい者の「就労」は、通常の雇用契約に基づく一般就労（雇用と呼ぶことにする）だけではなく、福祉サービス提供事業所（以下、福祉施設と略す）が就労の場を用意する「福祉的就労」を含めて、広がりのある概念と捉えている。福祉的就労には、労働基準法が適用されないことが多く、作業活動の成果による収益の一部が工資として支払われる。それに対し、雇用では、最低賃金法の適用など、労働分野との関わりが生じる。

に過ぎない。200万9千の農業経営体のうち家族経営(個人経営体+法人経営のうち一戸一法人)は198万1千で98.6%を占める。障がい者雇用促進法(1987年に改称)では障がい者の雇用義務を定めているが、民間にて1.8%の法定雇用率が適用されるのは常用労働者が56名以上の事業主であり、雇用義務が生じる農業法人等は農業経営体総数からみて極めて少数であることがわかる。また、農業においては、常時労働者が5人未満の個人経営や任意組合では労働保険(労災保険・雇用保険)が任意加入となっている。これらは、他産業に比べ、労働関係の機関との接点や関係法規の知識習得機会が不足しがちである間接的要因となっている。さらに産業として収益性が高いとは言えないうえ、生産量や価格が変動しやすいという不安定さが保険加入等に消極的な背景となっている。

一方、高齢化の進行等による担い手不足が懸念されており、農業分野での人手不足の解消策として障がい者の就労が期待できる面もある。さらには、担い手不足により遊休化した農地や施設を借り受けて障がい者の就労の場とするなど、障がい者は単なる農業生産の働き手にとどまらず、農村の主要な地域資源である農地の活用・管理の担い手にもなり得る存在である。これは他産業ではみられない農業の大きな特徴の一つであると言える。

このように他産業と比べて農業は、障がい者に適した作業を特定しやすいといった面がある一方、障がい者の就労に関する情報や経験に乏しく、経営面では対応が困難な面がある。これらの多面性が、農業分野での障がい者就労への期待と可能性をもたらすとともに、受け入れが広がらない背景となっていると考えられる。

## 2 農業法人等による障がい者の受入れ状況

農村工学研究所(以下「農工研」)が作成した手引き(農村工学研究所2008)では、障がい者による作業事例として、施設野菜の播種や定植、収穫、出荷調整、トレイの洗浄、果樹の栽培管理や観光補助、家畜の給餌や畜舎の清掃、観葉植物の肥培管理、挿し芽、出荷調整、さこの類の収穫補助や出荷調整、水田畦畔の草刈り、畑の石拾いや草刈りなどを取り上げた。しかし、これらは一

部の例に過ぎず、障がいの程度や種類などによって内容は異なるものの、他の作業についても何らかの形で障がい者が作業に参加することは可能である。ところが実際には農業分野での受け入れ先が広がらない状況にある。

そこで農工研では、平成20年6月に(社)日本農業法人協会の会員になっている農業法人を対象としたアンケート調査(以下、農業法人調査)を実施して、障がい者の受け入れに関する農業法人の意識や意向を調査した。同調査では、質問票を郵送した1707法人のうち27.9%の476法人から回答を得ている(山下ら2009)。

その結果をみると、回答法人のうち94.7%は常用雇用労働者が56人未満であり、障がい者の雇用義務はない。そのため、過去も含めて障がい者を雇用したことがない法人が69.2%と多い。その一方、障がい者を現在雇用している法人は16.1%、以前は雇用していた法人は14.8%を占めている。これらは、雇用義務がない法人においても、経営主の意思・判断によって障がい者の受け入れが一部ではすでに行われていることを示しており、何らかの支援により、農業分野での就労拡大の可能性を示唆するものと言える。しかしながら、農業分野での障がい者の雇用について、「わからない」もしくは「あまり関心がない」という法人は73.1%を占め、今後の対応についても、不明もしくは障がい者の雇用を当面考えていない法人が56.7%を占める。

障がい者雇用における不安や心配についての複数回答結果(Fig.1)をみると、「障がい者に適した業務の特定・開発」が59.6%。「障がい者の事故や怪我」が53.7%と多く、「賃金等の労働条件や社会保険」は27.2%に過ぎない。つまり、障がい者が農作業を行うこと自体が不安視されている状況にある。これは、農業分野での障がい者就労についての情報が手元にないことを示唆している。

## III 農業分野における障がい者就労の類型化

### 1 障がい者就労に関する類型化の視点

農業の現場において、障がい者が担い得る農作業は様々であり、作業が行なわれる場所も多様である。農業

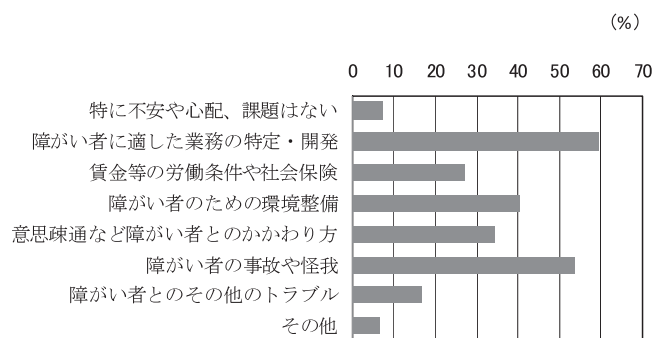


Fig.1 障がい者雇用への不安等(複数回答)  
Anxiety etc. for employment of the persons with disabilities (MA)

法人等が従業員として障がい者を雇用しているケースはその一部に過ぎない。特別支援学校の校外実習の受け入れや、福祉施設への作業委託なども行われている。障がい者の家族が農業に参入したり、福祉施設自らが農業に取り組んでいるケースも少なくない。また、障がい者雇用のための民間企業が農業分野で設立されることもある。さらに、福祉系の団体を母胎としている農業生産法人もあり、既存の農業法人が障がい者を雇用するための経営展開を図っているところもある。

そこで、農業分野における障がい者就労の類型化を行う上で重要なのは、障がい者の農作業がどのように確保されているかである。就労の形態によって、支援方策の対象となる問題が異なってくる。また、農業分野での障がい者就労においては、障がい者に限らない農業就労の問題と農業分野に限らない障がい者就労の問題とが混在しており、就労支援に係わる課題を整理するための類型化に際しては、その点をも踏まえる必要がある。ここでは、福祉から雇用へという政策的な動向や、障がい者雇用のために設立された会社の農業参入などの新しい取り組みなどを反映できる形で、農業と福祉の関係性に着目した障がい者就労のタイプ分けを行うこととする。具体的には、従来、雇用の概念の曖昧さが類型化の際に混乱を招いていたことに鑑み、①雇用と福祉的就労、および②既存の農業法人等での受け入れか農業への新規参入かという2つの主要軸を明確にした上で、障がい者の活動の場ならびに地域との関わりに着目して類型化を行うこととした。

## 2 障がい者就労の類型化

農業分野での障がい者就労では、担当作業を用意し、作業環境を整える必要がある。障がい特性による適性については個人差が大きく、個別の対応が重要とされているが、障がいの種別によりある程度の整理ができる。福祉関係者からの聞き取り結果によれば(片倉ら 2007 など)、身体障がいでは、作業の理解に問題はないが、肉体労働を主体とする野外での作業は難しい場合が多い。知的障がいでは、自己判断が必要な作業には向いていないが、同じ作業の繰り返しには根気よく対応できる場合が多い。一方、精神障がいでは、判断を要する作業において自己の判断に固執する場合や、疲れやすく体調に波があるので長時間労働が難しい等の傾向がみられた。

障がい特性への対応には、農作業に関する知識や判断とは別の経験や能力が必要となる。例えば、作業工程の分割やパターン化を行い、健常者との組作業を行って進めたり、具体的な説明や言葉によらない指示を行うなどの工夫が必要となる(農工研 2009 など)。

このような障がい者への対応については、既存農業法人等が障がい者を受け入れる場合と、福祉施設などが農業に参入する場合とでは、何が障壁となるかが異なってくる。前者の場合は、農作業に関する知識や経験のみで

は障がい者への対応は困難なため、福祉側からの協力が不可欠となる。他方、後者の場合は、農業生産に必要な農地、施設、資材、技術などを確保しなければならず、特に技術面では、既存の農業法人等を含む農業関係者の協力が重要となる。また、収入を得るのであれば、農作業とは異なる流通・販売という側面への対応が求められる。そのため、農業の参入に際して、福祉施設等での就労の受け皿として農業生産法人が設立されたり、農業生産法人として特例子会社が設立されることがある。地域との係わりにおいては、農地や施設の有効活用などが可能である反面、既存の農業法人等との競合が発生しかねない。

その一方、労働・福祉側からみた障がい者の就労は、雇用と福祉的就労に大別される。雇用では、雇う側が障がい者と直接向き合うことになり、雇われる障がい者の側も働き手としての質(作業適性や意欲など)が問われることになる。他方、福祉施設が就労の場を用意する福祉的就労では、障がい者へのリハビリ効果、作業適性の把握などを期待して、作日や作業内容を設定するケースも少なくない。障がい者にとっての就労のハードルは、前者に比べて低いと言える。現在、障がい者の自立支援の観点から、福祉的就労から雇用への移行が推進されているが、福祉的就労として農作業を行っていた障がい者が、農業分野での雇用へと円滑に移行できるとは限らない。これは、農業分野に限らず、障がい者就労における大きな問題とされている。

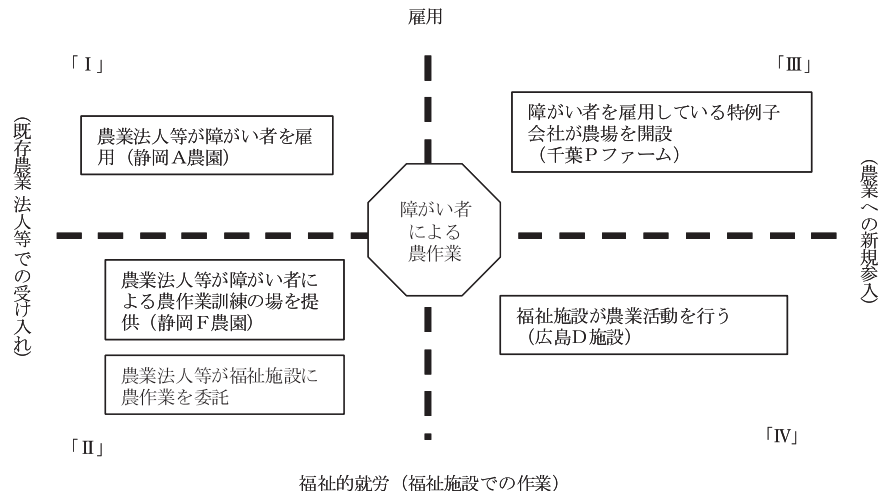
Fig.2は、上記の2つの軸の組み合わせにより就労のタイプを類型化したものである。その中心には、障がい者による農作業が位置づく。既存農業法人等で雇用の受け入れを行う領域(I型と呼ぶことにする)の典型例は、既存農業法人等が障がい者を雇用するケースである。既存農業法人等で福祉的就労の受け入れを行う領域(II型と呼ぶことにする)に該当するのは、既存の農業法人等と福祉施設が作業受委託契約を行うケースや、障がい者の農作業訓練の場を提供するケースなどである。雇用で参入する領域(III型と呼ぶことにする)には、障がい者を雇用している会社が農業に参入するケースなどが該当する。福祉的就労で参入する領域(IV型と呼ぶことにする)には、福祉施設自らが、農業活動を行うケースなどが該当する。

## 3 類型別にみた就労事例

### a I型：既存農業法人等での雇用事例(A農園)

静岡県浜松市のA農園(株式会社)では水耕野菜の施設栽培で障がい者を雇用している。A農園では、70aの水耕施設で野菜(芽ネギ、ミツバ、チンゲンサイ)、120aの田畑でトマトや無農薬米などの生産を行っている。平成21年1月時点で、役員4名と社員7名にくわえ、パート32名を雇用し、うち10名が障がい者である(知的6、身体2、精神2)。また、研修生としての障がい者





**Fig.2** 農業分野での障がい者就労のタイプ  
Work style of persons with disabilities in agriculture

の受け入れも行っている。研修生の受け入れは平成 10 年、雇用は平成 12 年からである。障がい者は、芽ネギの播種と定植、出荷調整、ミツバの定植、下葉取りと洗浄、チンゲンサイの収穫、トレイの洗浄などを担当している (Fig.3-1)。芽ネギの播種とミツバの定植には専用機を用いることから専任を決めているが、担当者が休んでも別の者が作業できる形としている。

雇用は相対ではなく、地元の障がい者就業・生活支援センター（関係機関との連絡調整を行いながら障がい者の就業面及び生活面の一体的な支援を行う機関として知事の指定を受けた社会福祉法人や NPO など）を介している。採用にあたっては、農業に対する意欲（やる気）を重視し、賃金（時給）は、作業内容に応じた額としている（最低賃金の減額特例を申請）。

A 農園では、障がい者の雇用を掲げたユニバーサル農園としての経営を展開している。社会保険労務士のアドバイスを受け、福祉・労働分野の公的制度を積極的に活用する一方、障がい者の作業状況の確認や体調の管理を行う担当者をおいている。経営主である A 氏は、静岡県で農業分野での障がい者就労支援に取り組む NPO（平

成 15 年に設立され平成 18 年に NPO 法人として認証）の中心人物の 1 人でもある。受け入れのメリットとして、A 氏は、障がい者が熱心に働いている姿が他の従業員のやる気を促し、作業効率があがった。また、障がい者への配慮が職場内の雰囲気を良いものにしたと指摘する。その一方、作業の習熟に時間がかかることが多い。

但し、経営作目や雇用経験の有無、地域的な支援体制の充実度などにより個々の状況は異なる。雇用経験があり、通年で定型的な作業を確保しやすい作目を経営し、農業分野での就労について地域的な支援体制が充実している事例では、受け入れに係る負担が相対的に少ないと言える。

**b II 型：既存農業法人等での福祉的就労事例（F 農園）**

静岡県浜松市の F 農園（合名会社）では、福祉施設の職員と複数の障がい者がチームを組んで農園の圃場や施設等に向向き、受託した作業や訓練の受け入れを行っている。F 農園では、20a のハウス等を活用し、観音竹、オモト、花物トウガラシ、ムラサキシキブ等の花木を生産している。平成 20 年時点で経営者夫婦とその家族 4



**Fig.3-1** 障がい者による農作業の様子（A 農園）  
Working by the persons with disabilities in 'A-farm'





**Fig.3-2** 障がい者による作業訓練の様子 (F 農園)  
Work-training by the persons with disabilities in 'F-farm'

名のほか、4名の障がい者(精神3, 知的1)を雇用している。毎週1回2時間、就労支援組織(地元の障がい者就業・生活支援センター)に農作業訓練の場を提供し、障がい者を集団(10数名)で受け入れている。雇用は平成13年、研修生の受け入れは平成14年からである。

具体例としては、鉢上げ、植替え、挿し芽、剪定などの作業について、農業者が指導員に説明し、指導員が障がい者を指導する形で行っていた(**Fig.3-2**)。そして鉢上げでは作業の分割、植替えは対応困難な部分を農業者が分担、挿し芽では作業の定型化、剪定ではイラストでの説明といった工夫を加えていた。経営主のF氏は、農作業での訓練を集団で受け入れることで個々の能力差をカバーできるし、作業を一度に終わることができる。手間をかけられる分だけ品質が良くなった面もあると指摘する。

#### c Ⅲ型：雇用での参入事例(Pファーム)

人材派遣業を営む企業を親会社に持つP社では、千葉県八千代市の社会福祉法人との共同事業として、平成18年に23aの農場(Pファーム)を開設した(**Fig.3-3**)。平成19年時点で8名の知的障がい者が野菜やバラを生産している(現在は諸事情により流山市に農場を移転)。春はキャベツやチンゲンサイ、夏はジャガイモや枝豆、

秋はナスや里芋、冬は白菜や大根など、年間を通した無農薬栽培を行い、季節ごとの旬の食材を親会社の社員食堂等に提供している。また、Pファームでは、親会社の従業員とその家族たちとの交流を深めるために収穫祭等のイベントも開催している。

P社のように障がい者雇用促進法に基づいて障がい者を雇用する目的で設立された子会社は「特例子会社」と呼ばれ、障がい者雇用率の算定において親会社が雇用したとみなされる。なお特例子会社に限らず、農業参入に関しては、平成17年の農業経営基盤強化促進法改正による特定法人貸付事業の創設、さらには平成21年の農地法改正により、農地の確保が以前よりは容易な状況となっている。

#### d Ⅳ型：福祉的就労での参入事例(D施設)

広島県三原市のD施設(昭和54年に開設された知的障がい者の入所施設:定員50名, 職員23名)では、作業活動の一環として、平成19年時点で水稲6ha, 有機野菜30a, ぶどう1ha, 繁殖牛(親13頭, 子9頭)などに取り組んでいる(**Fig.3-4**)。平成7年にD施設の関連法人としてE農園(農業生産法人)が設立され、ぶどうの栽培管理と収穫時期の販売補助をD施設に委託、平成17年からは水稲や野菜の栽培管理も委託している。



**Fig.3-3** 障がい者のために開設された農園の様子 (Pファーム)  
Farm for the persons with disabilities 'P-farm'

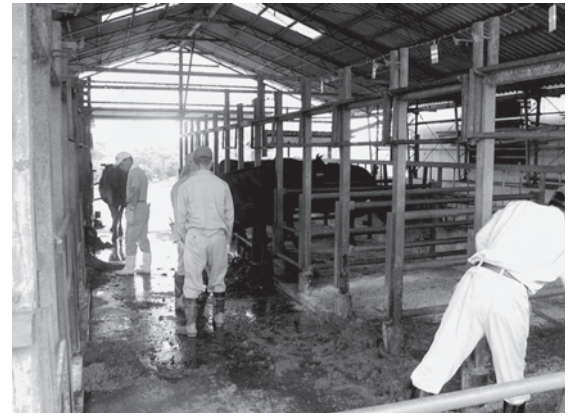


Fig.3-4 障がい者による農作業の様子（D施設）  
Working by the persons with disabilities in 'D- sheltered workshop'

生産物のうち、水稲は、D施設を運営している社会福祉法人が所管する他の福祉施設の利用者と職員を含めて、施設関係者の飯米としても利用されている。

#### IV 類型別にみた農業分野での障がい者就労の支援課題と解決方策

##### 1 農業法人等での受入れにおける課題

既存の農業法人等が雇用として受け入れを行うI型の場合、契約相手が障がい者本人であり、農業者は特定の障がい者とじかに向き合う必要が生じ、障がい者への対応についての知識や経験をいかに確保するかが重要不可欠となる。既存農業法人等の場合、法的な雇用義務を生じない場合がほとんどであるため、受け入れの最終的な判断は経営主の意思による。労働・福祉側との連携・協力がなければ、たとえ障がい者雇用への関心があっても躊躇せざるを得ないであろう。A農園のように連携・協力体制が確立しているケースは希であり、一般の農業法人等は、労働・福祉側とは接点がない状況におかれている。障がい者が農業分野で実際に就労している姿をイメージできないという声も少なくない。

さらに雇用するとすると、農業には、経営基盤の脆弱さや農作業の季節性などが存在し、障がい者就労による作業効率の低下に対する緩衝力が小さいことから、障がい者個人に対して作業の質（作業適性や意欲など）を求めることになる。それは、労働・福祉側からみた職場への定着（雇用の継続）という問題でもある。雇用の意欲をもった障がい者が適した作業を担当すれば、たとえ習熟に時間はかかっても健常者と同等もしくはそれ以上の能力を障がい者が発揮する可能性がある。作業の質を求めていく場合でも、障がい者への対応についての知識や経験は重要となる。

なお、雇用に際しての負担を軽減するため、労働・福祉側の支援制度が用意されており、事業主に対する経費補助や、障がい者の職場適用を援助する専門家（ジョブコーチ）の派遣などを受けられる。しかし、例えば、20

時間以上就労することや、雇用保険・労災保険の加入など個々の制度ごとに満たすべき要件があり、必ずしも制度がすぐさま活用できるとは限らない状況にある。

それに対し、既存農業法人等で福祉的就労の受け入れを行うII型の場合は、具体的な指示は同行者（福祉施設等の職員）が行うため、農業者による障がい者の対応は間接的なものとなる。I型とは異なり、契約相手が福祉施設等であるため、障がい者への対応についての知識や経験の確保は大きな問題とはならない。障がい者の移動についても福祉施設等による送迎が基本となる。少なくとも福祉側との連携・協力を図りやすいうえ、無理がない範囲で作業を委託することができる。既存の農業法人等にとっては、雇用よりも受け入れやすい就労のあり方とも言える。既存の農業法人等に集団で出向いて農作業を行うことは、F農園のように、障がい者にとっては訓練の一環である。福祉的就労ではあるものの、農作業の委託を受けることで、集団としてはあるが作業の質が問われ、適度の緊張感が生じる。既存の農業法人等での雇用（I型）と福祉施設内での農業活動（IV型）の中間に位置づけることが可能であろう。

いずれにせよ、既存の農業法人等による受け入れが前提となる場合（I型やII型）は、まず障がい者の就労についてのマッチングを行う必要がある。ここでいうマッチングとは、個々の具体的なケースにつき労働力の需要側と供給側の調整をして仲介を行うことにとどまらない。障がい者の適性に応じた作業内容の特定への支援、労働・福祉側との接点が弱いことを踏まえた情報提供やネットワークづくりも含まれる。特にI型では、受け入れ時の負担の大きさが円滑な受け入れを阻害することが懸念される。労働・福祉側からの情報提供などにより受け入れ側の負担感を軽減するとともに、仲介者が農業分野の特徴を踏まえて円滑なマッチングを行う必要がある。その際、まずは福祉的就労で受け入れ、福祉側との連携・協力を構築しつつ、実際の農業現場での就労体験を蓄積していき、雇用への移行を検討するという方策も考えられる。



## 2 農業への新規参入における課題

障がい者を雇用する特例子会社等が農業分野に参入するⅢ型では、障がい者への対応についての知識や経験については労働・福祉側との協力を得られやすい状況にあるが、農業生産に必要な農地、施設、資材、技術などを別途確保する必要がある。従来よりも農業への参入がしやすい状況になってはいるものの、特例子会社にとっての前提は障がい者の雇用であり、農業分野は選択肢の1つに過ぎない。これは、障がい者の受け入れが経営主の判断によるⅠ型やⅡ型とは対照的である。会社である以上、事業としての継続が困難であれば、農業分野からの撤退もあり得る。収入確保のためには生産のみならず販売での対応が必要だが、特例子会社の場合、千葉県のパファームのように、親会社（とその社員）を生産物の提供先としているケースが目立つ。農業分野への参入を円滑にするためには、受け入れ側（特例子会社や企業等）が農家や農業生産法人への担い手の提供のみならず、蓄積した経営ノウハウの積極的提供を行うことにより、農業分野から農業生産に係わる技術面での支援も期待することが出来る。

福祉施設等が農業活動に参入するⅣ型では、障がい者への対応についての知識や経験についてはほぼ問題ないと言えるだろう。しかしⅢ型と同様に、農業生産に必要な農地、施設、資材、技術などを確保する必要があり、収入を得るのであれば、農作業とは異なる流通・販売という側面への対応も求められる。全国社会就労センター協議会のデータベース (<http://www.selp.or.jp/database/index.html>) によると、少なくとも全国で約700の福祉施設が農耕を作業品目に行っていることが確認できるが、D施設のように本格的に農業活動に取り組んでいる例は多くはない。Ⅳ型では、福祉施設等が主体的に障がい者に対応できるため、収入を二の次にして治療やリハビリを重視する形で生産活動を行える点に特徴がある。

障がい者自立支援法の制定により、障がい者の自立に向けた就労支援の流れのなかで、福祉的就労から雇用への移行が労働・福祉分野では大きな課題となっている。農業分野においても、福祉的就労での農作業と雇用での農作業との違いが指摘されている。福祉的就労での作業は必ずしも雇用への移行を想定したものではない。雇用では、最低賃金の支払が求められるため、販売における利益追求を前提に就労が行われる。Ⅳ型でありがちな「作ったものを売る（買って欲しい）」という姿勢と、Ⅲ型に求められる「（誰がつくったかに関わりなく）売れるものを作る」では農作業のあり方が異なる。雇用への移行を想定した就労においては、単なる治療やリハビリの手段ではなく、雇用に向けた技術習得のための農作業が必要となる。

このように新規参入を行う場合（Ⅲ型やⅣ型）は、農業生産に係わる技術習得が必要となるが、一部の先進地を除き、技術を指導する人材との連携構築は大きく立ち

後れている。また、連携がある場合でも、組織的なものよりも、個人的な関係により成立している部分が目立つ。

## 3 課題解決に向けた支援方策

障がい者就労における課題は就労のタイプにより異なる部分もあるが、農業と福祉の両面からの支援が必要となる点は共通している。障がい者を受け入れる既存の農業法人等には労働・福祉側の情報やノウハウが、農業参入を行う特例子会社や福祉施設には農業側の情報やノウハウが必要だと言えよう。しかし、農業はもともと労働・福祉との接点が弱く、関係機関を含む支援体制が構築されているのは、一部の先進事例にとどまる。そのため、農業分野での障がい者の就労に対し、福祉側は「農作業は障がい者に向いているから」と過度の期待を、農業側は「農作業を障がい者が担えるのか」と過度の不安を抱きやすいと言える。まずは交流の機会を設け、就労の場としての農業の多面的な特徴と農業分野における障がい者就労のあり方の多様性について互いの情報提供を行うことで、情報の偏在をまずは解消することが、連携に向けた第一歩となろう。

以上を踏まえ、農業分野での障がい者就労の推進については、農業関係者の関心を高めて福祉側に技術指導を行う体制を構築するとともに、労働・福祉と農業が積極的に連携する必要がある。労働・福祉側が農業分野における障がい者就労に関心を示さない場合は、農業側からの働きかけも重要となってくる。そのためには、農業分野での障がい者就労が農業・農村側にもたらすメリットを今後の可能性も含めて積極的に提示していくことが必要であり、その際には、地域資源の活用という農業ならではの特徴をこれまで以上に活かしていくことがポイントとなろう。

障がい者の就労によるメリットとしては、農作業の働き手の確保という側面が強調されがちだが、耕作放棄地の活用や公園等の花壇管理など、施設外で住民との交流を図りながら、地域づくりの一端を担っている事例もみられる。さらには、地元の女性起業と連携し、直売所、地域特産品の開発、農家レストラン、弁当づくりと配食に取り組むなどの展開も想定される。つまり、地域資源と積極的に関わることで、障がい者は地域づくりの一翼を担う貴重な人材となり得る。さらには、福祉系団体との協働など、地域づくりにおけるネットワークの拡大も期待される。これまで、農業と福祉の連携については、福祉側からの働きかけに農業側が対応する形がとられてきたが、地域資源の維持・活用の観点からすれば、むしろ農業側が福祉側に働きかけを行い、その活力を農村振興へ繋げていくことが将来の方向として展望される。

## V 結 言

本報では、農業分野における障がい者就労の現状につ

**Table 1** 類型に対応した問題点と支援方策  
Problems and suggesting solutions corresponding to type

類型	特徴	主要課題	具体的な問題点	支援方策
I	既存農業法人等での受け入れ	就労についてのマッチング	障がい者への対応（能力活用）についての知識や経験が不足	労働・福祉側の情報やノウハウの提供 労働・福祉側との協力
			職場への定着準備が不足	作業適性や意欲などを背景とした作業の質の確保
II			福祉的就労に伴う付随的支援の不足（障がい者の移動手段、指導者など）	実際の作業現場での適切な就労体験の蓄積 地域ぐるみでの支援体制の構築
III	農業への新規参入	農地等の確保	特例子会社の経営維持の困難性	生産技術等に関する情報共有 農業団体・行政による地域との調整 農家等との相互理解の誘導
IV			農産物の品質不安定販路が未確立	生産技術指導 販路の確立 地域との協調

いて概観し、農業分野における障がい者就労の形態に着目した類型化を通じ、就労支援に係わる課題とその解決方策について考察した。類型化を重視した背景には、近年の障がい者就労を取り巻く社会の急激な変容がある。すなわち、障がい者の自立支援に向けた法制度の整備、それに伴う福祉行政の変化、当事者はもとより障がい者就労の現場の関係者の意識変革等々が指摘されよう。その中で、「既存の農業法人等による受け入れと福祉施設等が農業参入に関する軸」と「雇用と福祉的就労に関する軸」の2つの軸により、既存の農業法人等での雇用（I型）、既存の農業法人等での福祉的就労（II型）、雇用での農業参入（III型）、福祉的就労での農業参入（IV型）の4つの類型を設定することができ、各類型ごとに事例の特徴を整理した。一方、IVの1および2で述べた類型別の主要課題や具体的な問題点と、IVの3で言及したその解決のための支援方策を総合的に整理すると **Table 1** に示すとおりである。すなわち、既存の農業法人等が雇用としての受け入れを行うI型では、障がい者への対応についての知識や経験をいかに確保するかが重要不可欠となること、特例子会社等が農業分野に参入するIII型では、むしろ農業生産に係わる技術面で既存の農業法人等を含む農業団体・行政との連携協力が重要となること等を明らかにした。

農業分野での障がい者就労が福祉側から強く期待されている状況のなか、農業と福祉の連携が模索されている。就労の場として農業をみると、障がい者に適する面とそうとは言えない面が混在している。雇用義務がないにも拘わらず障がい者を雇用する農業法人が存在する一方、法人の多くは障がい者に対する関心が高いとは言えない。障がい者による農作業就労は、農業法人等による雇用だけではなく、農業法人等から福祉施設への作業委託、障がい者を雇用する特例子会社の農業参入、福祉施設による農業活動などの形態によっても実現されている。

障がい者の就労には、作業の一つ一つについて、農業と福祉の両面からの具体的な作業方法や技術支援が不可欠である。労働・福祉側との接点が弱いという農業の特

徴から、関係機関を含む支援体制が構築されている地域は現状ではわずかであり、そのことが農業分野での障がい者就労に対する負担感を増大させていると言える。農業と福祉の連携を図るためには、まずは相互の情報提供が必要と言える。そして、次のステップとしては、地域資源の維持・活用に注目することで連携のメリットを目に見える形で提示し、農業側の関心を誘発していくことが重要である。将来的には、福祉のために農業が協力するだけではなく、地域づくりに福祉の力も借りることで、連携を両立へと変え、農村における共生社会を実現していくという方向も展望できよう。

これらを農村振興の観点から言い換えれば、障がい者や福祉施設の運営組織も参加した地域づくりを念頭において、高齢者や障がい者など多様な人材の参画を前提とした地域運営を担う主体形成ならびに集落空間の物的環境整備や地域のコミュニティ形成などが緊急の課題である。労働・福祉分野と農業分野のそれぞれの特徴に依拠する課題は、両者の連携と地域住民や調整機能を有する第三者の仲介に委ねることになるが、ハード・ソフト両面から地域づくりを支えるための農業農村整備が、交流や就労の場の創出にむけて益々重要な役割を果たしていくと考えられる。

## 参考文献

- 1) 牛野 正・中野裕子・林 賢一（2007）：農業における知的障害者雇用に関する一考察，農村計画学会誌 25-4，p.556-563
- 2) 片倉和人・山下 仁（2007）：農業経営における障害のある人の雇用マネジメントと地域支援モデル，平成18年度農村生活総合調査研究事業報告書，独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所，p.73-106
- 3) 片倉和人・山下 仁（2006）：障害のある人を受け入れる農業経営の事例，平成17年度農村生活総合調査研究事業報告書，独立行政法人農業工学研究所，



p.51-84

- 4) 片倉和人・山下 仁・工藤清光 (2007) : 農業経営における障害者雇用のマネジメント, 農林業問題研究第 166 号 (第 43 巻第 1 号), p.78-83
- 5) 佐渡賢一・河村恵子 (2009) : 農業分野における障害者の職域拡大, 資料シリーズ 45, 独立行政法人高齢・障害者雇用支援機構障害者職業総合センター
- 6) 日本障害者雇用促進協会 (1997) : 農業分野における障害者の積極的雇用促進方策に関する調査研究報告書Ⅱ, 日本障害者雇用促進協会
- 7) 農村工学研究所 (2009) : 農業分野における障害者就労マニュアル, 平成 20 年度農村生活総合調査研究事業報告書, 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
- 8) 農村工学研究所 (2008) : 農業分野における障害者就労の手引きー作業事例編ー, 平成 19 年度農村生活総合調査研究事業報告書, 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
- 9) 林 賢一・片倉和人・会田敬志・中野裕子・伊丹一浩 (2004) : 障害者の就労の場としての農業, 生活研究レポート 61, 農村生活総合研究センター
- 10) 原 珠里 (2007) : 園芸療法・園芸福祉をめぐる現状と問題点, 近畿中国四国農研農業経営研究 16, p.11-29
- 11) 山下 仁 (2009) : 障害者の能力活用による農業・農村の活性化, 農業と都市を結ぶ 59-10, p.14-19
- 12) 山下 仁・片山千栄・安中誠司 (2009) : 農業分野における障害者就労の受入れ手法の検討, 平成 20 年度農村生活総合調査研究事業報告書, 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
- 13) 山下 仁 (2008) : 農業分野における障害者就労の支援方策の検討, 平成 19 年度農村生活総合調査研究事業報告書, 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所

# Identifying Problems in and Suggesting Solutions for the Provision of Support by Classifying Work Style of Persons with Disabilities in Agriculture

YASUNAKA Seiji, YAMASHITA Masashi, KATAYAMA Chie and ISHIDA Kenji

## Summary

This paper classified the work style of persons with disabilities in agriculture and identified the problems in providing them with work-related support. Based on showing typical cases from our case studies, the work style of persons with disabilities in agriculture is classified four types from the two view points. One viewpoint is competitive employment or non-competitive employment style. Other viewpoint is that their working place is in existent farm households and agricultural legal persons or not in such as a residence for persons with disabilities, a industrial workshop, and a newcomer from other industry.

In order to promote the employment of a person with disabilities, support in both agricultural work sector and welfare or vocational rehabilitation sector of them is indispensable. Though such support systems vary with the problems depending on the type of work style, lack of cooperation between the two makes the situation difficult for a person with disabilities working in agriculture. Information exchange is the most important factor to facilitate cooperation between the both. It is also important to build this cooperative relationship by using a local resource and increase the concerns on the agricultural side.

**Keywords :** persons with disabilities, work-related support, symbiotic society, use of skill, rural development, entry in agriculture, classification

## 霞ヶ浦流域の主要河川の窒素濃度変化とその要因解明

松森堅治\*・板橋 直\*\*

## 目 次

I 緒 言	61	1 霞ヶ浦に流入する河川的全窒素濃度変化	63
II 方 法	62	2 河川水的全窒素濃度が上昇する要因	65
1 霞ヶ浦流域の対象河川と解析に使用したデータ	62	3 谷津田流域における非かんがい期の窒素浄化機能の変化	70
2 流域の窒素浄化能変化を解析する対象流域と調査方法	62	IV 結 言	71
III 結果と考察	63	参考文献	72
		Summary	73

## I 緒 言

霞ヶ浦の水質に関して、1981年に霞ヶ浦富栄養化防止条例が制定されて以降様々な対策が実施されてきた。加えて、農業分野では、1992年に「新しい食料・農業・農村政策の方向」の中で環境保全型農業が位置づけられ、1999年の「食料・農業・農村基本法」、「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律」の成立、2006年の「有機農業の推進に関する法律」の成立、2007年には「農地・水・環境保全型向上対策」が実施されるなど、農業の持続的な生産と農村の振興、環境保全、自然再生に向けた施策が進行している。しかし、霞ヶ浦の全窒素濃度の変化はFig.1に示すようにほぼ横ばいで、1996年以降はわずかながら上昇の傾向も見られる。

農地からの施肥窒素の溶脱が浅層地下水や河川・湖沼の水質汚染の一因と言われる中、小川ら(1984, 2000)や田淵ら(1983, 2005a)によって谷津田における窒素浄化が確認された。施肥量の削減とともに、水田・ため池・湿地が持つ脱窒・吸収による窒素の浄化機能の活用において、地形および土地利用における連鎖を利用した窒素浄化により集水域外への流出削減が期待されている。

しかし、近年の水田とそれを取り巻く環境の変化は著しく、たとえば、Fig.2の2時期の空中写真にみるように霞ヶ浦に流入する河川沿いの低地では、圃場整備前(Fig.2a)は水路が狭く蛇行し、水田は区画が小さく不整形ながらもほとんどが耕作されていた。現在(Fig.2b)は圃場整備に伴い排水路の分離が進む一方、整備水田

の畑作利用や狭い谷津や谷壁斜面など条件不利地での休耕・耕作放棄が進行している。これらの水田の利用・管理状況の変化に伴い、流域内の水の流れにも大きな変化があると予測される。

圃場整備により、かんがい期には河川水の循環かんがいによる水田の窒素浄化機能の発揮や、低い窒素濃度の用水による希釈が期待できる。しかし、非かんがい期には、台地からの湧水を利用して谷津田において、排水路や暗渠の整備により、浅層地下水が田面あるいはその地下を通過せずに排水路へ直接流出するなど、湧水の窒素濃度が高いときに水田の持つ窒素浄化機能が十分に発揮されない場合が考えられる。一方、休耕・耕作放棄や転換畑は、これまで窒素浄化機能が発揮されていた水田の消失であり、かんがい期の浄化機能の減少につながる。休耕・耕作放棄は、未整備水田に多く、関東の台地や丘陵地では、特に、谷頭部、谷壁斜面や狭い谷底にある水田での荒廃が目立つ。さらに転換畑では、畑作物への転換による施肥量の増加に加え、溶脱した窒素成分が暗渠を通して速やかに流出するなど水系への窒素流出の

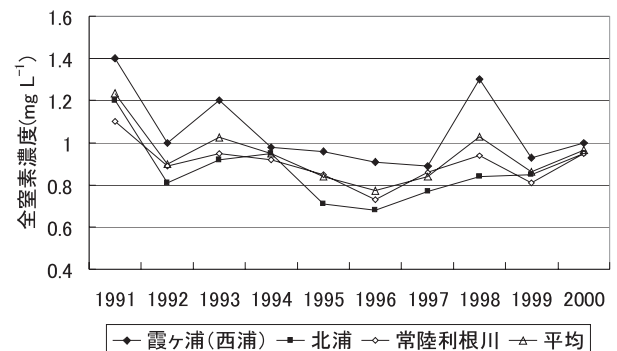


Fig.1 霞ヶ浦の全窒素濃度の経年変化  
Change of total nitrogen concentration of Lake Kasumigaura  
茨城県資料(2002)より作成

\* 農村環境部環境評価研究室

\*\* (独)農業環境技術研究所

平成21年11月5日受理

キーワード：硝酸態窒素、水田、脱窒、圃場整備、耕作放棄

増加が懸念される。

そこで、水田の窒素浄化能に着目して、霞ヶ浦流域の河川における窒素濃度と流域への窒素負荷量、および水田の利用状況の変化との関係について解析し、窒素濃度変化の要因を解明する。

## II 方法

### 1 霞ヶ浦流域の対象河川と解析に使用したデータ

河川水の窒素濃度が変化する主な要因には、面源や点源による流域への窒素負荷量、水田等の脱窒による浄化能、雨水やかんがい水による希釈能の変化の3つがあげられる (Fig.3)。本報告では、主に窒素の負荷量と浄化能の変化を取り上げる。窒素負荷量の変化についての対象地域は、霞ヶ浦流域 (2,157km<sup>2</sup>) および流域内の河川のうち利根川水系の霞ヶ浦、北浦、常陸利根川に流入する河川から公共用水域水質測定結果 (1972～2003) で年6回以上の観測データがそろっている24河川とした (Fig.4)。窒素浄化能については、霞ヶ浦の支流である菱木川を対象流域とした。

霞ヶ浦流域への負荷量の変動傾向の解析には、農林水産省平成14年第4次土地利用基盤整備基礎調査データ、

農林業センサス、茨城県肥飼料検査所 (1993, 2003, 2004) の統計資料、茨城県霞ヶ浦対策課 (2002) の統計資料を用いた。対象とする個別の河川流域への窒素負荷量については、農林業センサス、国勢調査等の統計データ、気象データおよび地形図、土地利用図から構築したGISを用いて推定した Itahashi ら (2006) の数値を用いた。

河川的全窒素濃度の変化の解析には、茨城県の公共用水域水質測定データ (1972～2003年) を用い、月別観測値から年平均値を求め、32年間の対象24河川の水質変動傾向を検討した。また、年間の変動パターンを経年変化について検討するために1975年から5年ごとに各月の月別観測値の5年間平均値を求めた。ただし、1990年以前は、隔月に測定された河川が多いため、奇数月を対象に年内変動の図を作成した。

### 2 流域の窒素浄化能変化を解析する対象流域と調査方法

流域における窒素浄化能の変化については、非かんがい期を対象として霞ヶ浦流域内の菱木川流域 (24.6km<sup>2</sup>) を事例地域として調査、解析した (Fig.5)。菱木川は、次章で詳述するが対象期間の窒素濃度の変化に他の多くの河川と共通の傾向が見られた河川である。すなわち、

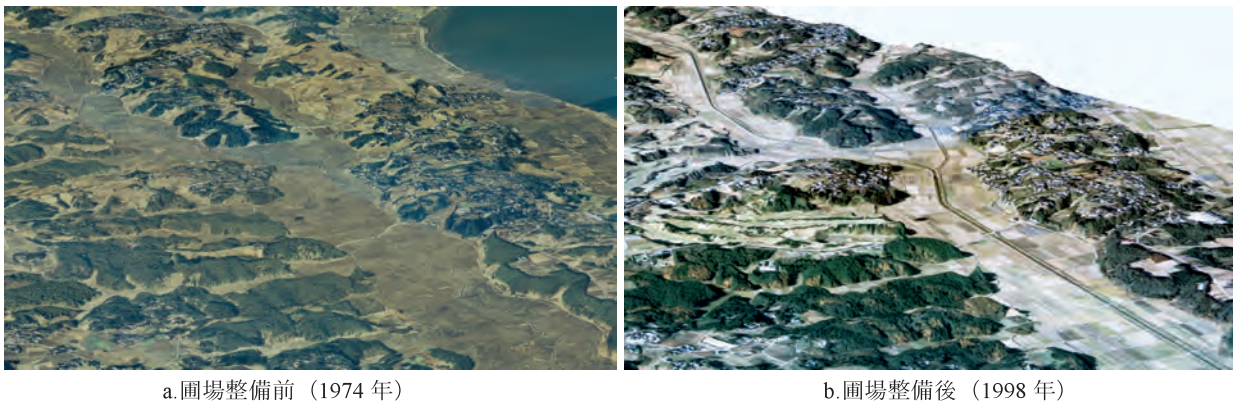


Fig.2 菱木川流域の圃場整備前後の景観の変化  
Landscape before and after farm land consolidation (the Hisiki River watershed)

### 窒素濃度上昇の要因

- 負荷の増大
  - 点源 (家庭、家畜、事業所)
  - 面源 (農地、施肥量、転換畑、大気沈着)
- 浄化能の低下
  - 浄化域の減少 (水田、ため池、湿地の減少)
  - 浄化能の喪失 (転換畑)
  - 浄化機能の変化 (圃場整備)
- 希釈能の低下
  - 浸透水量、かんがい水量の減少

Fig.3 農業河川における窒素濃度変化の要因  
Causes of change of nitrogen concentration



Fig.4 霞ヶ浦流域の主要な河川の流域  
Watersheds of Lake Kasumigaura



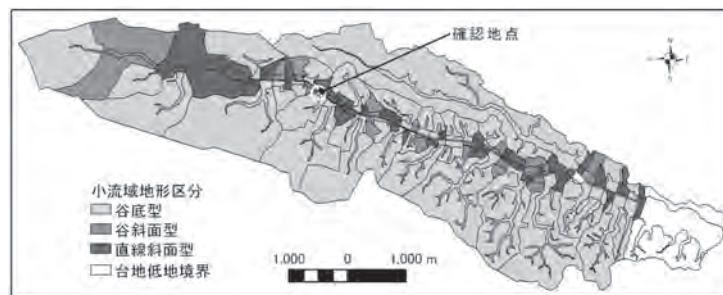


Fig.5 地形の特徴による菱木川流域の小流域区分  
Small watershed units of the Hishiki river watershed

1970年代から1990年代までの窒素濃度上昇とその後の下降、1997年頃から再上昇するという傾向で、これらの変化との関係を探るべく、詳細な土地利用図の情報作成と流域内の多数の地点で窒素濃度の測定を行った。

ここでは、表流水と湧水の硝酸態窒素濃度調査の結果から、濃度変化に及ぼす土地利用と土地・水管理との関係について検討した。流域を菱木川に流入する水路により84の集水域（以下、小流域と呼ぶ）に分け、小流域からの流出水量と硝酸態窒素濃度の測定、および各集水域の土地利用、水田・水路の整備状況の調査を行った。

小流域からの流出水量は、2003年4月7日と10日の2日間に84小流域を巡回して、水路横断面計測と電磁流速計（離合社TK-105DH）による流速測定、もしくは水路幅が60cm以下で菱木川流入直前に落差工等がある場合に容器による一定時間の全量計測により算定した。硝酸態窒素濃度は、流出水量の計測時に反射式光度計（MERCK社製RQ-Flex2）を用いて現地で計測した。なお、4月5日に30.6mmの降雨（菱木川流域に近い石岡市石川に設置した雨量計の観測値）があり、調査日と近いことからその影響が懸念されるため両調査日に本流の同一地点（Fig.5の円印）で観測を行った。その結果、10日の流量に1割強の減少が見られたが、硝酸態窒素濃度は両日とも $4.7 \text{ mg L}^{-1}$ で変化はなかった。

小流域区分図は、2,500分の1都市計画図の等高線と水路から分水界を判読し、現地において水路の流入状況を確認して作成した。小流域は、内部に谷底面を含む場合を谷底型小流域、谷底面を含まない場合を斜面の形状により谷斜面型小流域と直線斜面型小流域として区分した。土地利用、水田・水路の整備状況図は、2,500分の1都市計画図を基図として1998年（カラー）と2002年（白黒）の空中写真オルソ画像を判読し、2003年に現地調査を行って作成した。GISデータの作成、解析にはArcGIS Ver.9.2（ESRI社）を使用した。

### III 結果と考察

#### 1 霞ヶ浦に流入する河川の全窒素濃度変化

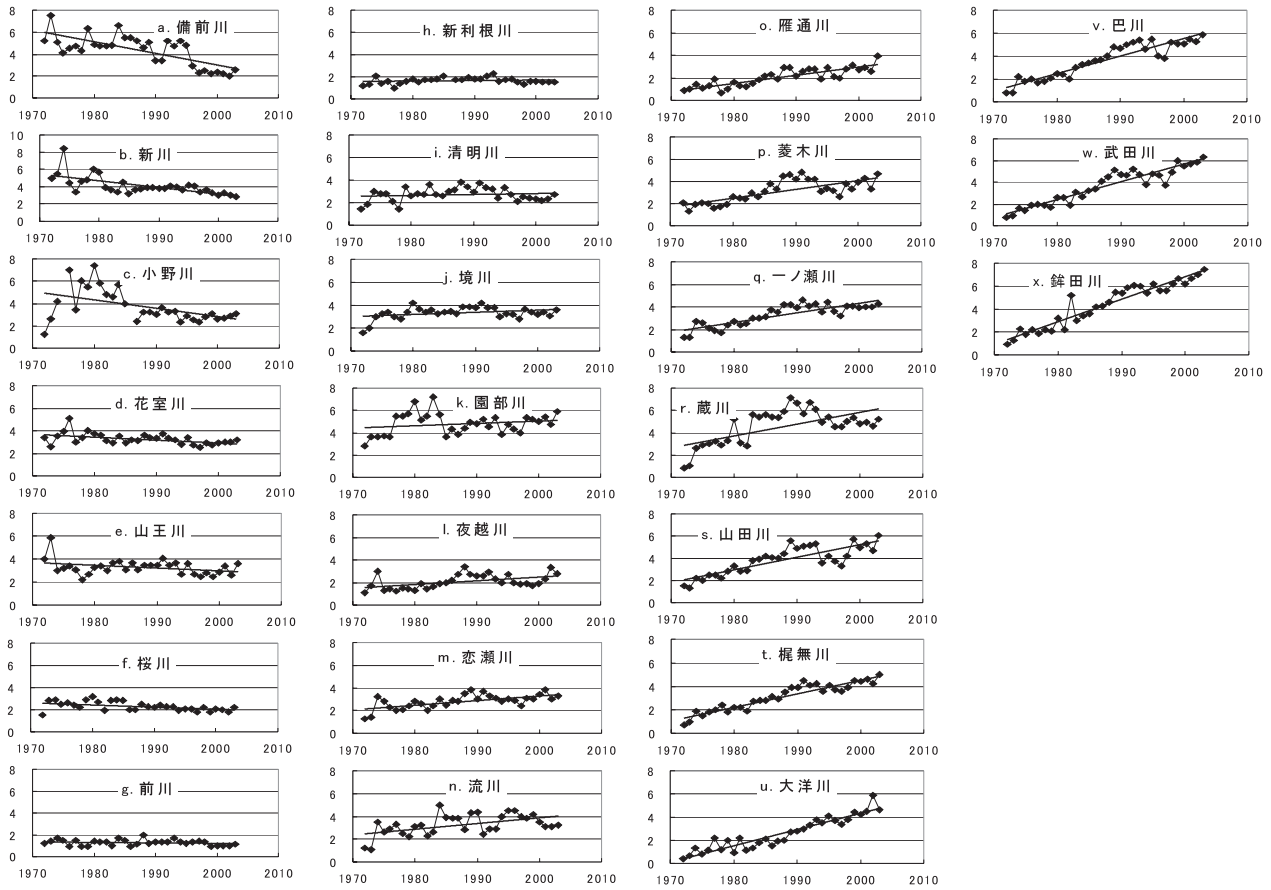
Fig.6は、霞ヶ浦流域の24河川について32年間の全窒素濃度の年平均値（月1回測定の平均値）をプロット

したもので、図中に直線で示した1次式の回帰係数の大きさによって減少～変化なし（回帰係数 $< 0$ ）、変化なし～微増（回帰係数 $< 0.05$ ）、増加（回帰係数 $> 0.05$ ）の3タイプに分けられる。減少傾向が7河川（a～g）、変化の小さいのが7河川（h～n）、増加傾向が見られるのは10河川（o～x）となっている。増加傾向の河川ではいずれも1990年代前半に一度ピークがあり、その後一旦は減少しているが1997年ころ以降に再び濃度の増加傾向が見られる。同様の傾向は、変化の小さい河川のグループにおいても見られる。また、全期間（1972～2003年）では減少傾向の河川でも小野川、花室川、山王川において、弱いながら近年の増加傾向が見られる。

それらの地理的な分布をFig.7に示す。減少傾向の河川は、備前川、新川、小野川、花室川、山王川、桜川、前川で多くが霞ヶ浦の西部に分布する。備前川、新川、小野川は減少が顕著で1970年代に $6 \text{ mg L}^{-1}$ を超えていたものが2000年には $2 \sim 3 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下している。これらの流域は、Fig.8-aに見るように建物用地率が高い地域が多く、都市的な土地利用を含むことから、下水道の普及や農地、畜産の減少などにより窒素負荷量が減少したと予想される。

変化の少ない河川は、水田が流域の65%を占める新利根川に代表されるように水田の面積割合が特に高い流域や森林面積率の高い恋瀬川、夜越川、流川など、単位面積当たりの窒素負荷が比較的小さな土地利用の多い流域である。浄化能や希釈能が高いために窒素負荷量の変化が水質に現れにくい、もしくは負荷量の変化が少ないと考えられる。新利根川など水田や森林の割合が高い河川では $1 \sim 2 \text{ mg L}^{-1}$ の比較的低い濃度で推移するが、畑地の割合が高い園部川や境川などでは $3 \sim 5 \text{ mg L}^{-1}$ の高い濃度で推移している。

増加傾向は、銚田川、巴川、武田川など北浦に流入する河川に顕著で、いずれの河川も1970年代には全窒素濃度が $1 \text{ mg L}^{-1}$ ほどであったものが、 $4 \sim 7 \text{ mg L}^{-1}$ に上昇している。これらの流域では、畑や樹園地など単位面積当たりの窒素投入量の比較的大きな土地利用が多く、水田の割合が小さいなど、窒素負荷が大きく浄化能が小さな流域で窒素負荷量の増大が水質の変化に現れやすい。Fig.8-b, cに見るように増加率（回帰係



減少～変化なし(回帰係数 < 0)    変化なし～微増(回帰係数 < 0.05)    増加 (0.05 < 回帰係数)

Fig.6 霞ヶ浦流入河川の年平均全窒素濃度の変化傾向

Changes of Annual mean of total nitrogen concentration of 24 rivers

茨城県公共用水域水質調査 (1972～2003年) より作成した。回帰係数は a. 備前川が最小値 -0.107, x. 銚田川が最大値 0.196 で, a から x の順に大きい。

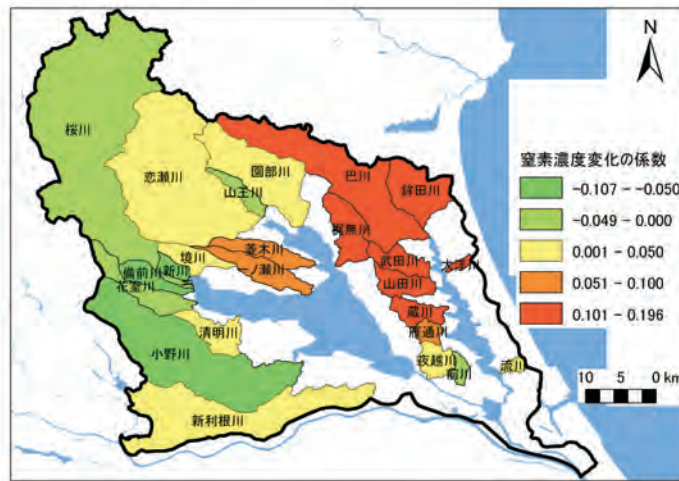
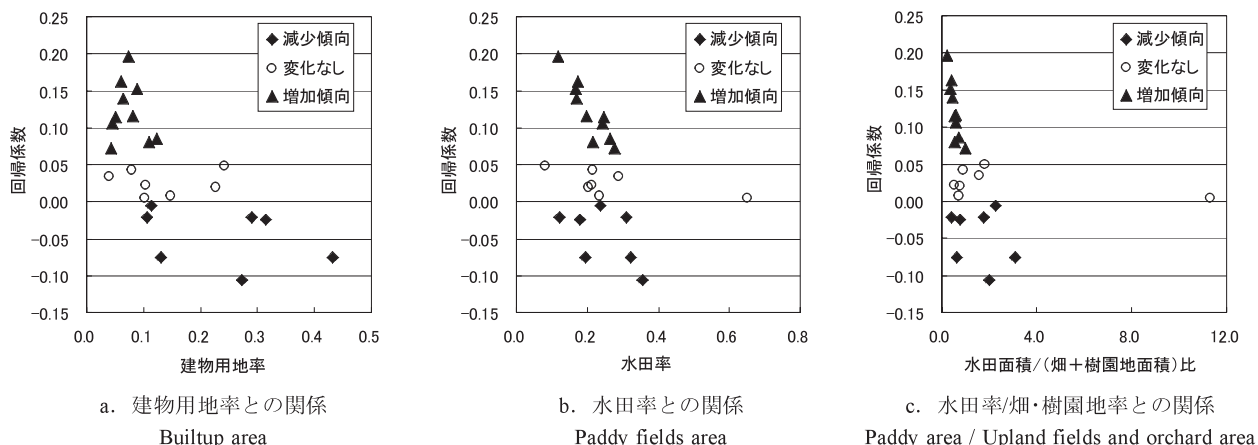


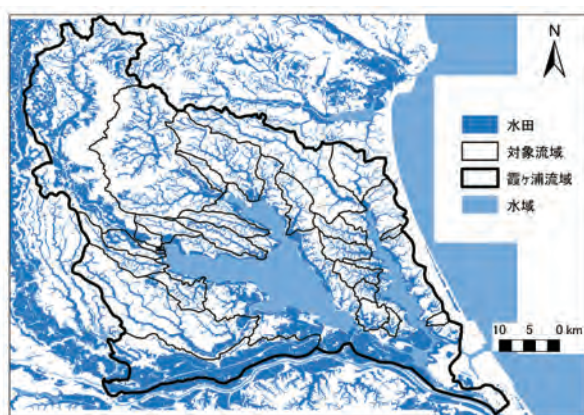
Fig.7 霞ヶ浦流域の主な流入河川の1972年から2003年の全窒素濃度の変化傾向  
Regression coefficient of total nitrogen concentration changes of 24 rivers (1972-2003)

数) が正で高い河川ほど、水田面積率および畑・樹園地面積に対する水田面積の比が小さい傾向にある。すなわち、水田の面積が大きい流域ほど、窒素負荷の増加に伴う流出窒素濃度の上昇に対して頑健である。

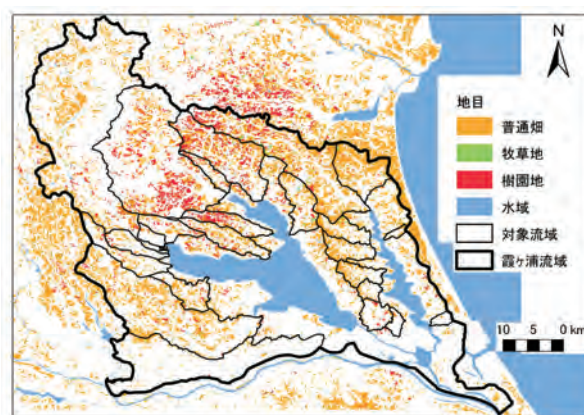
霞ヶ浦流域において、水田は湖岸の低地や河川の氾濫原のほか、台地の谷津田地形に分布し、山地を含む桜川流域と恋瀬川流域では扇状地性の低地にも見られる。また、面積は多くないが、台地上位面には井戸による地下



**Fig.8** 河川流域の土地利用と河川水の全窒素濃度の変化傾向との関係  
Relationships between the regression coefficient of total nitrogen concentration and landuse ratio of watershed  
横軸は流域の土地利用面積率（国土数値情報 1/10 細分土地利用 1998 年から流域ごとに集計）  
もしくはその比縦軸は全窒素濃度変化の回帰係数（Fig.6 の回帰直線の傾き）



**Fig.9** 霞ヶ浦流域の水田分布  
Paddy fields area of the Lake Kasumigaura watershed



**Fig.10** 霞ヶ浦流域の畑，樹園地の分布  
Upland fields area of the Lake Kasumigaura watershed

（農林水産省平成 14 年第 4 次土地利用基盤整備基礎調査より作成）

水のくみ上げや霞ヶ浦からの用水を用いた陸田とよばれる水田が見られるのも本地域の特徴である (Fig.9)。平坦な台地上位面では畑，樹園地（果樹）が主な土地利用で，特に，畑は低地との比高が小さく平坦な流域の上流部に多く，比高の大きい下流部では平坦地が少なく急斜面が多くなるため主に林地として利用され畑は少ない (Fig.10)。

## 2 河川水の全窒素濃度が上昇する要因

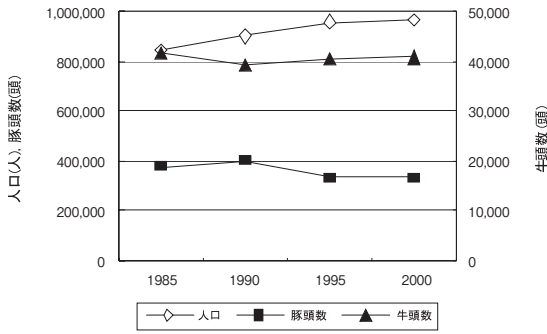
### 1) 窒素負荷量の変化

窒素濃度上昇の要因として，まず考えられるのが流域の窒素負荷量の増加である。霞ヶ浦流域全体で見ると，豚頭数は 1990 年をピークにやや減少傾向，牛頭数はほぼ横ばいであり，人口は増加傾向にある (Fig.11)。生活排水についてみると，霞ヶ浦流域全体では下水道利用人口は増加している (Fig.12)。一方では，単独処理浄化槽や合併処理浄化槽も増加しており，下水道整備による負荷減少を戸別浄化槽の増加による負荷増大で埋めて

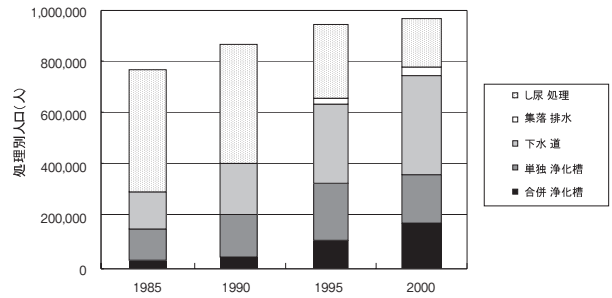
いる (田淵, 2005b) とされ，Fig.6 において都市域を含む流域では窒素濃度の減少傾向が見られたものの，農村部では増加傾向が見られたことから，地域的には生活排水の処理方式の変化も濃度上昇の一因である。

面源系では，畑，水田の面積はともに減少傾向にあるが，水田に比べ畑の減少割合が高く，畑に対する水田の面積比は増加傾向となっている (Fig.13)。茨城県全体で見ても同じ傾向が見られ，1970 年と 2000 年を比較すると畑は約 5 割，水田は約 2 割減少している (Fig.14)。耕地面積の減少から施肥に由来する面源系の窒素負荷量は減少していると考えられる。多肥作物への転換により単位面積当たりの施肥量が増加した可能性も考えられるが，Fig.15 に示すように茨城県内の化学肥料の流通量は 1980 年代に横ばいであったものが 1992 年以降急激に減少し，かつ化学肥料流通量の減少割合が畑面積の減少割合より高いことに加え，全国の水田への単位面積当たりの施肥量 (Fig.16) が減少していることから，同一の作物であれば環境保全型農業の推進により減肥が普及し，

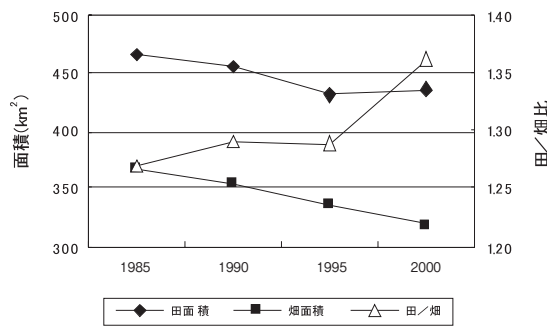




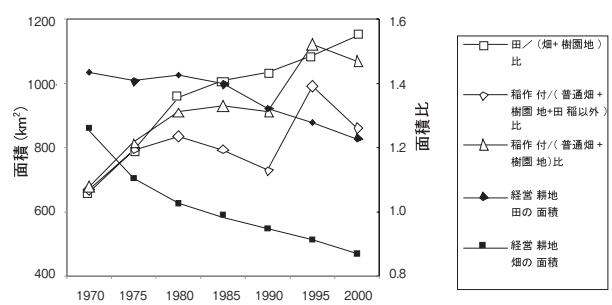
**Fig.11** 霞ヶ浦流域の人口、家畜頭数変化  
Population and number of animals (pigs, cattle)  
in the Lake Kasumigaura watershed  
茨城県資料より作成



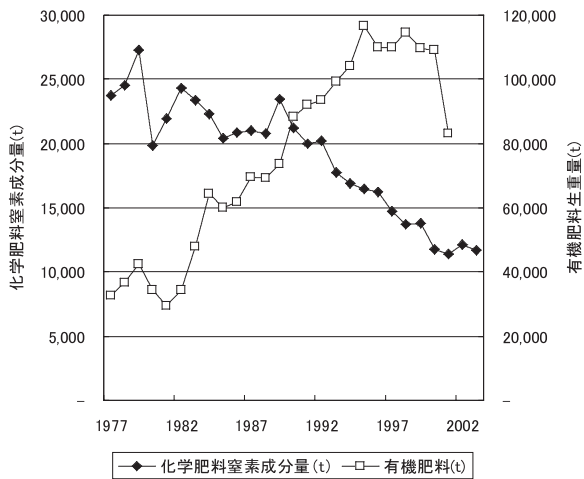
**Fig.12** 霞ヶ浦流域の生活排水処理方式の変化  
Population according to domestic waste water treatment  
in the Lake Kasumigaura watershed  
茨城県資料より作成



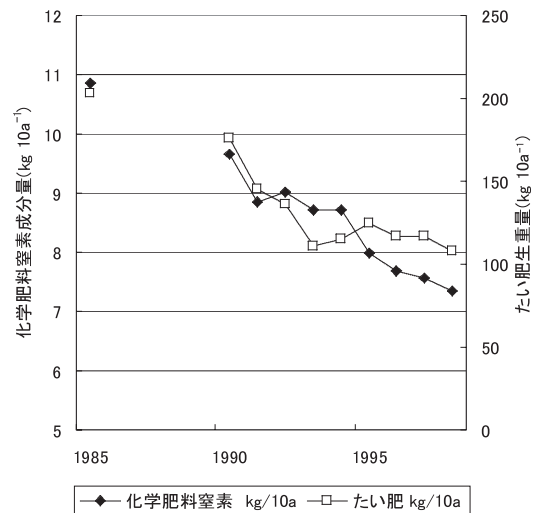
**Fig.13** 霞ヶ浦流域の農地面積変化  
Cultivated land of the Lake Kasumigaura watershed  
茨城県資料より作成



**Fig.14** 茨城県の農地面積変化  
Cultivated land of Ibaraki Prefecture  
2000年世界農林業センサスより作成



**Fig.15** 茨城県の肥料流通量  
Amount of fertilizer circulation in Ibaraki Prefecture  
茨城県肥料流通調査報告より



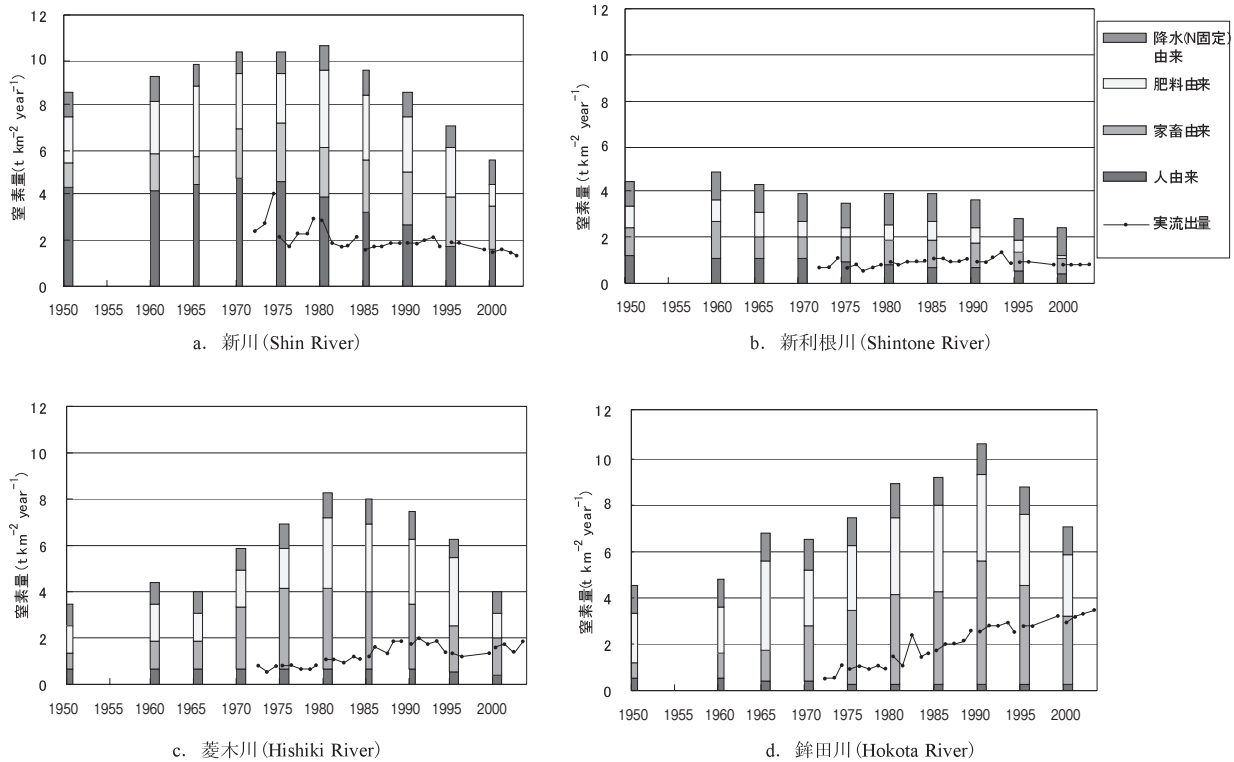
**Fig.16** 水田への施肥量の変化  
Change in amount of applied nutrient into paddy fields  
農業生産資材情報センターより  
(資料：農林水産省農業統計調査)

畑面積の減少と合わせて流域全体では面源からの窒素負荷量は減少している。ただし、有機肥料については全量が把握されていないために詳しい状況は不明である。茨城県内における流通量の増加 (Fig.15) と近年の有機農業の推進状況から、場所によっては有機肥料の多投によ

り施肥窒素の総量が増加している可能性がある。

次に、Fig.6において窒素濃度変化の傾向の異なる河川として、新川、新利根川、菱木川、銚田川の4河川について流域ごとに窒素の負荷量と流出量の変化を解析する。人由来の排出負荷は、新川と新利根川では1970年





**Fig.17** 各河川の原因別の全窒素排出負荷量と流出量  
N potential outflows in a watershed and actual outflows in the corresponding river

**Table 1** 河川的全窒素濃度変化と流域の土地利用面積  
Regression coefficients of total nitrogen concentration of outflows and landuse in the corresponding catchment area

	窒素濃度 変化係数	水田 面積率	畑・樹園地 面積率	建物用地 面積率
新川	-0.076	0.323	0.104	0.432
新利根川	0.005	0.651	0.058	0.103
菱木川	0.080	0.215	0.396	0.110
鉾田川	0.196	0.118	0.558	0.074

全窒素濃度変化係数は、1972年から2003年の月別観測値の年平均値の単回帰式の係数(傾き)。公共用水域データより作成。土地利用面積率は1998年の国土数値情報より作成。

以降に減少、菱木川と鉾田川では横ばいとなっており流域によって傾向が異なる (Fig.17)。人由来の排出割合が高く、その減少が特に大きい新川的全窒素濃度の減少傾向は、実流出量と人由来の負荷量の変化がよく一致しており、下水道の整備など生活排水対策による負荷量の削減の効果と考えられる。新利根川の実流出量は変化の幅は小さいが1970年以降の負荷合計量の変化とよく似ており、家畜由来および肥料由来の負荷の影響が大きいと考えられる。

一方、全窒素濃度が上昇傾向の菱木川と鉾田川では、1990年代までの実流出量が家畜由来および肥料由来の負荷量に少し遅れて変化する傾向を示している。しかし、1990年代前半をピークとして一旦減少した後に1997年頃から再び窒素流出量が増加する傾向については、菱木川、鉾田川ともに増加を示す窒素負荷量の項目は見あたらない。これは Fig.6 の他の増加傾向の河川についても

同様である。

窒素濃度の変化には降雨による希釈の効果も考えられるため、当該年の降水量で各流域の合計負荷量を割ってみたが、結果は負荷量合計の変化とほぼ同じ傾向であった。このように、負荷量や希釈能の変化だけでは最近の河川の窒素濃度変化の傾向を捉えることができない。そこで、濃度変化に重要なもう一つの要因である流域の窒素浄化能の変化について解析する。

### 2) 流域の窒素浄化能に関わる変化

河川の窒素濃度に影響する要因の一つとして、水田やため池等の窒素浄化能の変化が考えられる。霞ヶ浦流域には広い台地とそれを開析する谷津が多く分布する。谷津の低地や谷壁斜面では、台地の浅層地下水からの湧水が見られ、それらを利用して古くからため池や水田(谷津田)がつくられてきた。水田の多くは谷底につくられるほか、谷壁斜面に階段状に作られている場合も多い。水田やため池、湿地が脱窒や植生吸収による窒素浄化の機能を持つことは以前から知られ、窒素濃度の高い湧水が見られる台地の畑の下流に位置する谷津田では、特に高い浄化機能が期待されている(田淵ら(1983)、小川ら(1984))。

Fig.18 は、濃度変化傾向の異なる4河川の月別全窒素濃度の5年毎の平均値を奇数月について示したものである。すべての河川で1975(1975年~1979年)は5月の濃度が最も高く、7月と9月に低くなり、冬期にやや高くなる傾向が見られる。5月の高濃度は代かき濁水の落水の影響、7、9月の濃度低下は水田へのかんがいによ

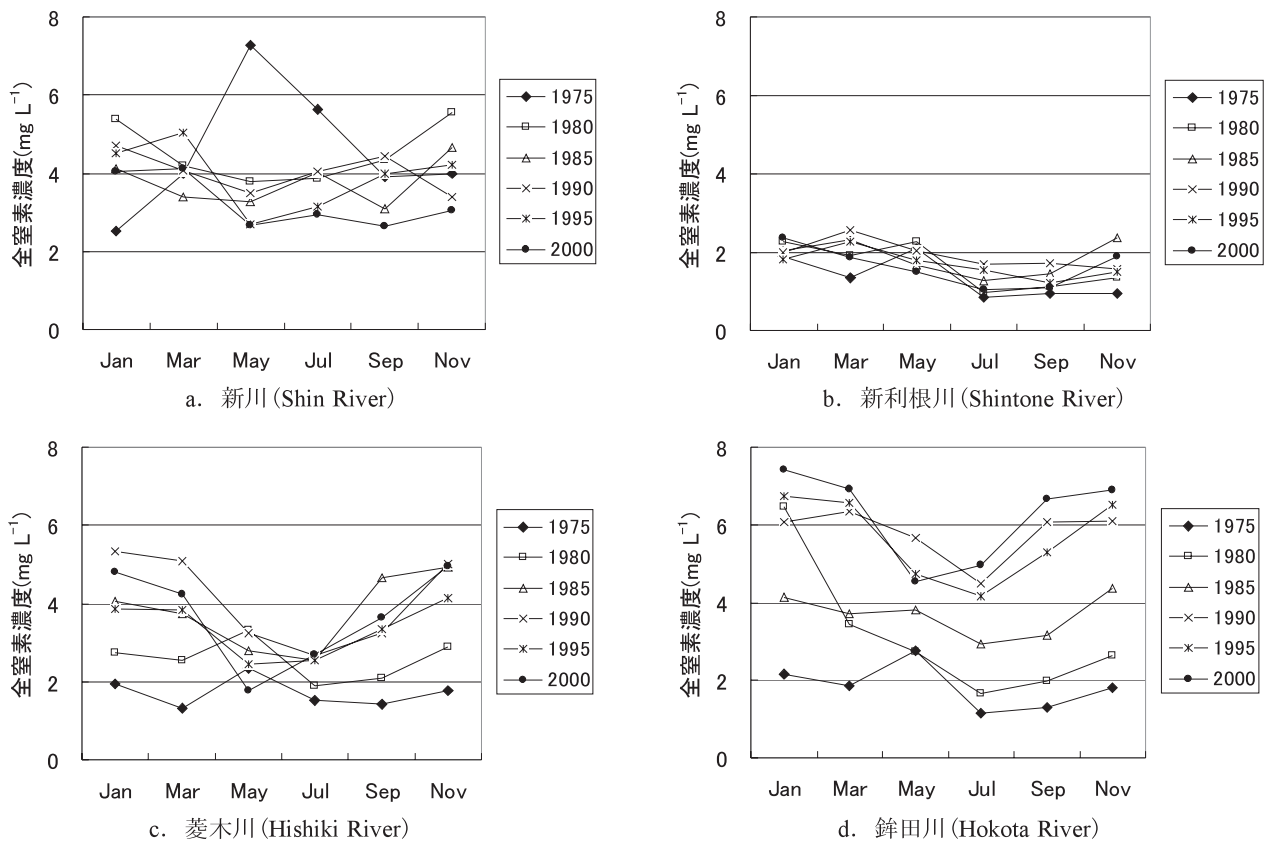


Fig.18 河川の月別全窒素濃度の5年間の平均値 (mg L<sup>-1</sup>) の推移  
Changes of five-year mean of the monthly total nitrogen concentration in river water  
1975は1975～1979年の5年間の平均値。茨城県公共用水域調査より作成。

る浄化，冬期は水田へのかんがいの停止および低温による脱窒能の低下などによるものと考えられる。いずれの河川も1980年代以降は年間の濃度分布に変化が現れ，徐々にかんがい期に濃度が低く非かんがい期に濃度が高いという分布に移行しており，その傾向は鉾田川や菱木川などの窒素濃度が増加傾向の河川に顕著である。

Fig.19より，菱木川の月別の全窒素濃度の変動を詳しく見ると，1970年代～1980年代前半は代かき，田植え時期に高く，非かんがい期にやや高い傾向にある。非かんがい期の濃度は1978年～1980年と1986年～1988年に急激に上昇している。菱木川両岸低地の圃場整備は2時期に分けられ，第一期は1975年～1979年に流域の下流側半分，第二期は1986年～1990年に上流側が施工された。圃場整備により循環かんがいの水利システムが構築され，低地水田との境界である台地斜面下部には2面柵渠の排水路がつくられた。また，菱木川の支流となる谷津では，一部は土水路の未整備水田あるいはその休耕・放棄水田として残っているが，圃場整備され2面柵渠もしくは3面コンクリート水路となっている場合も多い。このような構造では，台地の浅層地下水からの湧水は水田を通らず，排水路に直接に流出して河川に流入することが多く，窒素濃度の高い湧水においては脱窒による水田の浄化機能が発揮されない場合があると推測される。濃度上昇と圃場整備の時期が一致することから，投

入窒素量の増加による地下水の窒素濃度の上昇に加え，非かんがい期においては圃場整備に伴う水田の浄化機能の減少が濃度上昇の一因である。

水田の圃場整備はFig.20（平成14年第4次土地利用基盤整備基礎調査）に見るようになりに進行し，鉾田川流域では8割，菱木川流域でも6割を越える整備率となっている。菱木川では，本流沿いの低地はほぼ圃場整備が完了し，1990年代以降には支流の谷津田についても整備が進行し，ほぼ半数の谷津で排水路，暗渠の整備がなされている。一方では，Fig.19の圃場整備前後の空中写真に見るように，アクセスが難しく機械作業が困難な谷津田では，休耕や耕作放棄，ため池の消失，荒廃も進行している。

かんがい期は，菱木川両岸の低地ではパイプラインによる河川水の循環かんがいが行われるため，水田の浄化機能が働いている。また，陸田と呼ばれる台地上位面の水田では，湧水や河川水に比べて窒素濃度の低い出島用水（霞ヶ浦から取水）が利用され，さらに窒素濃度の低い低地の井戸（台地の浅層地下水とは異なる帯水層）による地下水かんがいを利用する谷津田もあるため，希釈も窒素濃度を低下させる要因である。さらに，未整備水田やため池等により台地からの高濃度湧水の浄化も見込まれるため，かんがい期の菱木川本流では上流から下流のどの地点をとっても1～2 mg L<sup>-1</sup>と変化が小さく，非

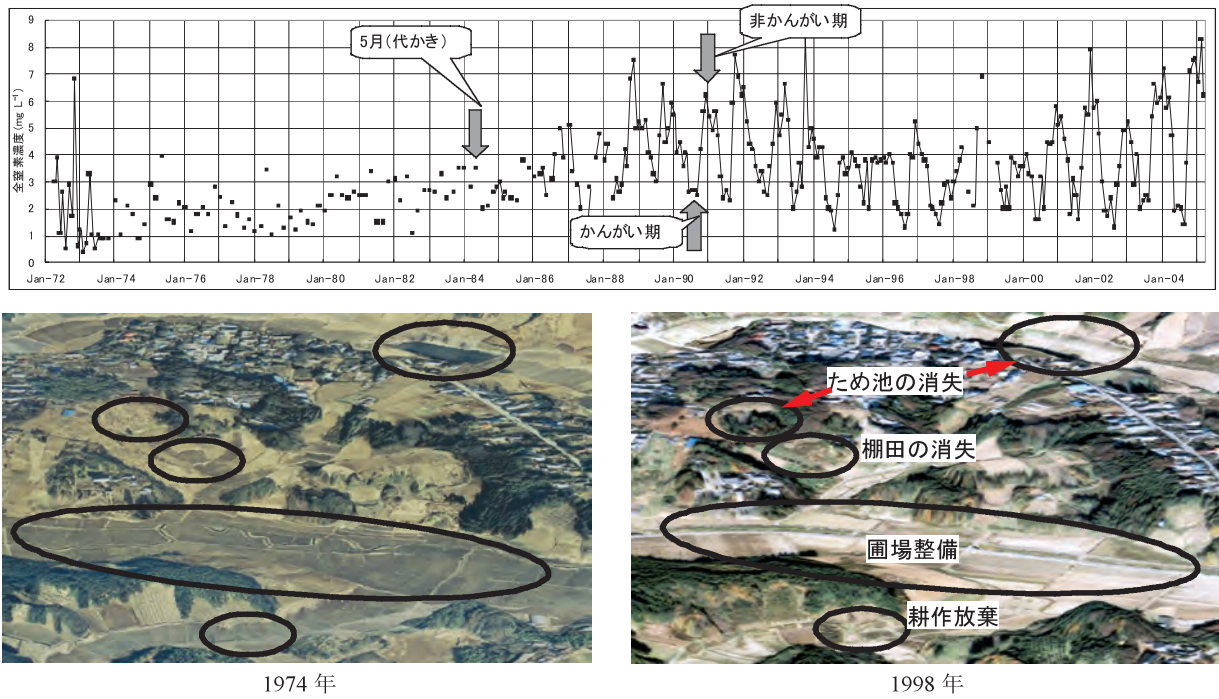


Fig.19 菱木川の月別全窒素濃度の変動傾向の変化と対応する土地の変化状況  
Monthly variations in total nitrogen concentration of the Hishiki River and corresponding land condition changes

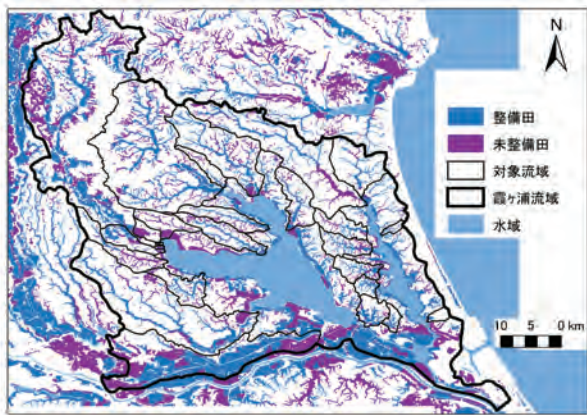


Fig.20 流域の水田整備状況

Farm land consolidation area in the Lake Kasumigaura watershed  
農林水産省平成 14 年第 4 次土地利用基盤整備基礎調査より作成

かんがい期に比べ濃度が低い (Fig.21)。Fig.21 の第 9 地点で 2004 年 3 月 12 日と同年 5 月 12 日に突発的な濃度の上昇が見られるが、これは点源 (工場排水) に由来する一時的なものであった。

圃場整備および休耕・耕作放棄が窒素浄化能の低下につながっている可能性は示したが、機能低下の定量的な評価および経年的な変化についてはまだ把握されていない。したがって、霞ヶ浦の支流流域における 1997 年以降の窒素濃度上昇の要因として、休耕、耕作放棄および圃場整備による浄化機能の低下は影響が大きいと推察されるが、その検証は今後の課題である。

### 3) 流域の窒素負荷と浄化の両方にかかる要因

流域の窒素負荷と浄化の両方にかかる要因としてもう一つ重要なものに田畑転換、転作田がある。Fig.22 は全

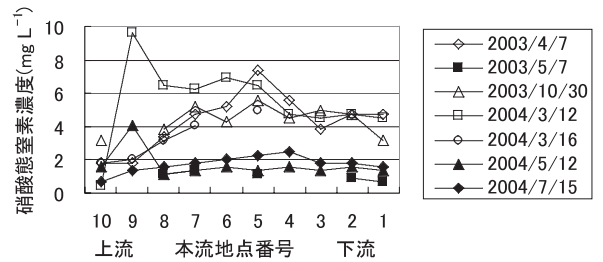


Fig.21 菱木川のかんがい期と非かんがい期の硝酸態窒素濃度 (調査地点番号は Fig.23 を参照)

Spatial distribution of nitrate nitrogen concentrations in the Hishiki River in irrigation and nonirrigation period

国の田、畑面積の減少と田から畑への転換面積の変化である。水田の転作、畑転換では、畑として利用されるため脱窒の機能は著しく低下し、かつ施肥窒素による負荷の増大が懸念される。特に、基盤整備により暗渠が整備された水田では、降雨等の浸透水は暗渠を通して速やかに排水路に流出し、かつ水田は地形や土地利用の連鎖の最下流に位置することが多いため、下流域での浄化を期待できず、その転作による流域への影響は台地の畑よりも大きい。霞ヶ浦流域のように窒素濃度の高いかんがい水の流入が多い水田における転作では、浄化機能の喪失となる。すなわち、水田転作はこれまで流域外への窒素流出の削減に対して、正の大きな値から負の大きな値に変わる可能性が高い。

転作作物としては大豆や小麦、ソバなど比較的施肥量の少ない作物が多いが、霞ヶ浦流域では、ハウス野菜・果物や果樹など比較的多くの肥料を投入する作物が栽培されている地域もある。霞ヶ浦流域内の水田および転作



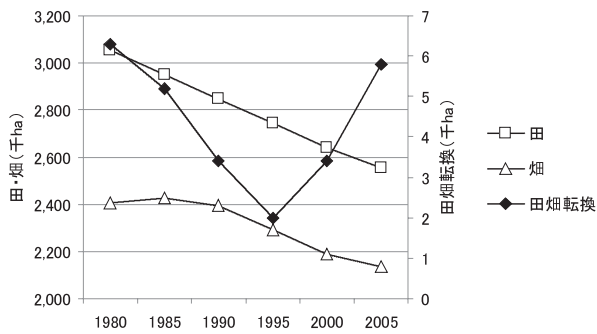


Fig.22 農地面積の変化 (全国)

Area of cultivated land, and transfer from paddy fields to upland fields

田、転換畑で暗渠排水の硝酸態窒素濃度の調査を行った結果では、水稻作の場合、かんがい期、非かんがい期を通じて  $1 \text{ mg L}^{-1}$  を超える田は少ないのに対して、畑作利用されている水田の場合に数～数十  $\text{mg L}^{-1}$  の範囲で濃度の高い暗渠排水が多く見られた。水田の転作、転換畑利用の面積は今後も拡大すると予想される。圃場レベルの流出機構の解明に加え、その流域への影響を明らかにし、対策についての検討が必要である。

### 3 谷津田流域における非かんがい期の窒素浄化機能の変化

水田の窒素浄化能については、小川ら (1984, 2000)、田淵ら (1987, 2005a) など多くの計測、実験事例がある。ここでは菱木川を事例に、流入する水路についての硝酸態窒素濃度の実測値と土地利用別の原単位法による推定値との差および集水域の地形や谷津田の有無との関係から、最近の谷津田環境の変化を踏まえつつ、流域単位で見た場合の浄化能の有無について検討する。特に、循環かんがいの水利システムを利用した浄化が期待できず、窒素濃度が上昇する非かんがい期を対象に水田の効果について議論する。

菱木川を小流域 (Fig.23 の支流の流域) に区分し、小

流域の末端で表流水の硝酸態窒素濃度と流量の測定を2003年4月に、小流域内部の湧水と表流水の硝酸態窒素濃度の測定を同年の3～4月に行った。非かんがい期には、中流の小流域で窒素濃度が高く (最高値  $15.9 \text{ mg L}^{-1}$ )、本流の濃度もほぼ中間の第5地点の濃度が  $7.4 \text{ mg L}^{-1}$  と最も高く、下流の小流域は濃度の低い流域が多いため希釈され河口に近い第1地点では  $4.7 \text{ mg L}^{-1}$  まで低下した。

Fig.24 は小流域において表流水の硝酸態窒素濃度の実測値を被説明変数、土地利用別の原単位法 (田淵ら, 1986) による流出窒素濃度の推定値を説明変数として、小流域の地形と水田の有無による相違から非かんがい期の浄化機能の有無を調べたものである。小流域内に谷底面を含む場合を谷底型小流域、谷底面を含まない場合を斜面の形状により谷斜面型小流域と直線斜面型小流域として区分した (Fig.5)。

谷津田を含む35の谷底型小流域では、流域に占める谷津田面積比を0.1で2区分すると谷津田面積比の高いグループで実測値の濃度に低い傾向が見られた。さらに図には示していないが未整備水田の有無で窒素濃度を比較すると、未整備の谷津田がある小流域で実測窒素濃度が低い傾向が見られた。谷斜面型と直線斜面型の48の小流域では、谷壁斜面に湧水を利用した水田がある場合に流出する窒素濃度が低くなる傾向がみられた。これらから非かんがい期でも水田により窒素が浄化されていると考えられる。田淵ら (2005a) は谷津田の通年の湛水試験から非稲作期にも湛水により窒素浄化があることを示した。

台地の流域では、古くから湧水を利用して谷底面や谷頭凹地、谷壁斜面に水田が作られている。台地が畑や果樹園として利用されている場合、浅層地下水の硝酸態窒素濃度が高くなることが多く、菱木川流域の谷津田でも  $10 \text{ mg L}^{-1}$  を越える高窒素濃度の湧水が田越しにかんがいはれる場所もある。これら湧水は、かんがい期には田面に湛水され、表面排水や浸透水として下流の田に移動

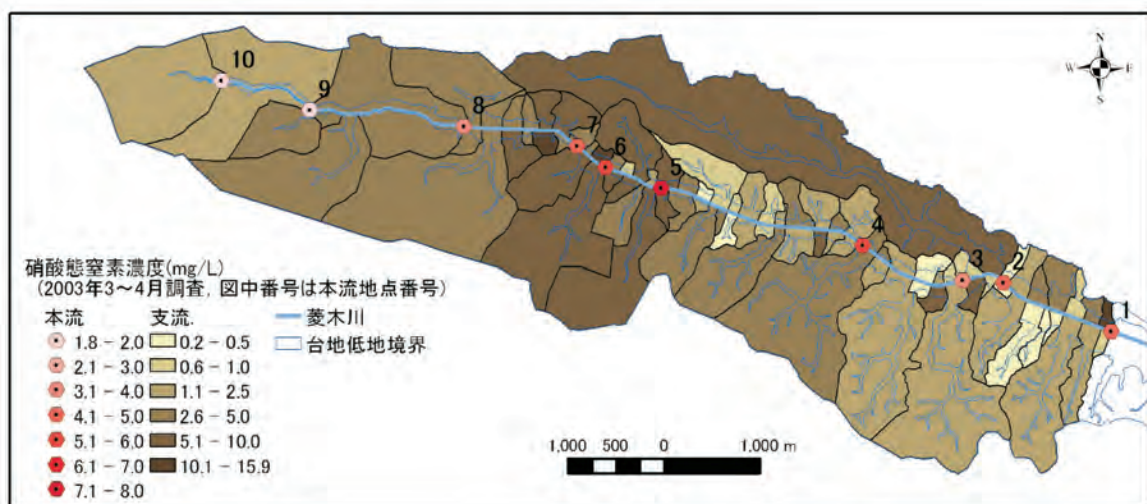
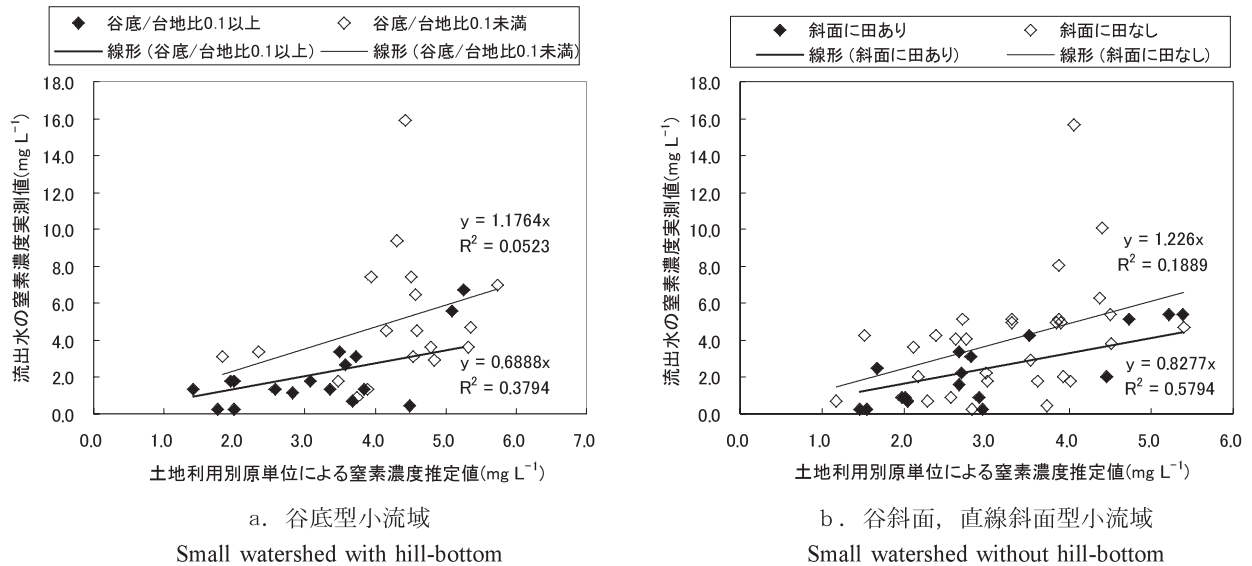


Fig.23 菱木川の本流および支流 (小流域) の表流水の硝酸態窒素濃度分布  
Nitrate nitrogen concentrations in main and branch streams of the Hishiki River





**Fig.24** 小流域における水田の有無と流出負荷

Relationship between nitrogen outflow and existence of rice paddy in small watershed

- a. 谷底型小流域は、流域の谷底面積と台地面積の比を0.1で2区分して比較した。
- b. 谷斜面, 直線斜面型小流域は、斜面の水田の有無で2区分して比較した。

するにしたがって徐々に濃度が低下する。非かんがい期では田面に入らずに水路を流下して濃度が低下しないまま系外に排出されるが、未整備田などで田面との比高の小さい土水路の場合には、田面へのしみだしや流入も見られるなど非かんがい期にも浄化機能が發揮されていると考えられる水田が多い。また、数は少ないが、かんがいを湧水に頼っている場合に12月から湛水を始める水田も見られた。

しかし、圃場整備された谷津田では、2面柵渠、3面張りコンクリート水路や暗渠によって非かんがい期に湧水が速やかに排水されるため、浄化機能が低下している。菱木川両岸の低地は、ほぼ基盤整備され菱木川からの揚水による循環かんがいが行われている。谷津でも5割以上で排水路や暗渠、地下水を水源とするかんがい用管路が整備され、台地湧水の窒素を浄化する可能性が高い未整備水田が少なくなっている。さらに、残った未整備水田では4割近くが休耕、放棄されており、谷壁斜面・麓部の湧水を利用したテラス状の未整備水田は、かつて谷壁斜面の湧水帯に沿って多く見られたが、その9割近くが放棄や植林によって消失し、窒素の浄化機能が失われつつある。

#### IV 結 言

霞ヶ浦流域の河川について統計情報をもとに流域内の土地利用と窒素負荷量の変化について検討を加え、流域の窒素浄化機能が低下しているのではないかとの視点に立ち、主要な河川の全窒素濃度の変化について解析した。その結果、1990年代半ばまでの窒素濃度の変化は面源および点源の窒素負荷量変化と関係が強いこと、循環灌

漑により灌漑期の窒素濃度上昇が抑制されていること、1997年以降の窒素濃度上昇に対応する窒素負荷量の増大は見られないことを明らかにした。さらに、その一支流域である菱木川流域の事例解析から流域内の水田の減少や水田の圃場整備と休耕・放棄など管理状態の変化により窒素浄化機能が低下している現状を把握した。これらより、1997年以降の窒素濃度上昇が窒素浄化機能の低下が一因であることを示した。

これら窒素浄化機能の変動に関わる休耕・耕作放棄、田畑輪換、圃場整備等の経年変化について、流域を対象に解析できる情報はない。今後、必要なGISの数値情報の整備により浄化機能の定量的な変動評価を行うことが必要である。

また、流域への環境負荷の削減に向けた環境保全型農業の取り組みへの要望は、今後一層高まるものと思われる。一方では、畜産廃棄物の農地還元、有機農業の進展、バイオマス燃料用の作物生産などの施策も展開され、地域にとっては新たな窒素負荷となる可能性も懸念される。流域内の持続的な環境の形成のためには、窒素負荷量の一層の削減とともに流域内の浄化機能の向上が必要である。特に、谷津が広く分布する関東の台地では谷津田の耕作放棄も多く、水田、ため池、湿地等を利用した窒素浄化には、流域外への排出負荷を削減するとともにビオトープや集落の景観管理への効果も考えられる。

2007年度から農地・水・環境保全向上対策が本格実施されるなど、農村の環境保全に向けた取り組みが進む中、地域資源を活かした保全技術の開発が期待されている。そうした期待に応えることができる貴重な資源である谷津田を、その機能を發揮できるように維持、管理する手法の開発が課題である。

## 参考文献

- 1) 茨城県霞ヶ浦対策課 (2002) : 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画, 第4期.
- 2) 茨城県環境対策課 (1972 ~ 2005) : 茨城県公共用水域調査.
- 3) 茨城県肥飼料検査所 (1993) : 茨城県肥飼料検査所創立30周年記念誌, p36-41.
- 4) 茨城県肥飼料検査所 (2003) : 茨城県肥飼料検査所創立40周年記念誌, p32-124.
- 5) 茨城県肥飼料検査所 (2004) : 平成15年度茨城県肥料流通調査報告, p8-13.
- 6) Itahashi, S., Komada, M. and Takeuchi, M. (2006): Methods for estimating the Nitrogen Load on a Catchment Scale, *JARQ*, **40**, 131-142.
- 7) 松森堅治 (2005) : 地理情報システムを用いた窒素負荷予測, 続・環境負荷を予測する, 博友社, 東京, p60-79.
- 8) 農林水産省関東農政局 : 茨城県農林水産統計年報
- 9) 農林統計協会 : 2000年世界農林業センサス
- 10) 小川吉雄・酒井 一 (1984) : 畑地から水田へ流入した硝酸態窒素の動向, 土肥誌, **55**, 533-538.
- 11) 小川吉雄・加藤英孝・陽 捷行 (2000) : 地下水面直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能, 土肥誌, **71**, 494-501.
- 12) 田淵俊雄・鈴木誠治・高村義親 (1983) : 非稲作期の谷津田における畑地流出水中のNO<sub>3</sub>-Nの除去について, 農土論集, **104**, 9-15.
- 13) 田淵俊雄・高村義親 (1986) : 集水域からの窒素・リンの流出, 東京大学出版会, 東京, 226pp.
- 14) 田淵俊雄・末正奈緒希・高梨めぐみ (1987) : 水田湛水による硝酸態窒素の除去試験, 農業土木学会誌, **61**, 53-58.
- 15) 田淵俊雄・黒田久雄・篠田鎮嗣 (2005a) : 湛水流下過程における硝酸態窒素濃度の低下, 土壌の物理性, **99**, 65-72.
- 16) 田淵俊雄 (2005b) : 湖の水質保全を考える, 技法堂出版, 東京, p194.

# Changes of Nitrogen Concentration in Branch River of Lake Kasumigaura and Their Causes

MATSUMORI Kenji and ITAHASHI Sunao

## Summary

Recently, the change concerning the management situation of the paddy field like the abandonment of cultivation, the paddy-upland rotation, and the farm land consolidation, etc. is large. It is expected that a decrease in the paddy field area and these changes influence the nitrogen outflow load of the watershed as a decrease in the water quality purification ability.

Then, causes of the change of the nitrogen concentration was examined in branch rivers of the Lake Kasumigaura in Ibaraki Prefecture. In this study, water monitoring data of 24 rivers observed by public sectors, statistical data and GIS data were analyzed. And then, to clarify the decrease in the purification function, high density synoptic observed data of nitrate-nitrogen concentration in the Hishiki River watershed that is branch in Lake Kasumigaura were analyzed.

As a result, it became clear the following. ①The change in nitrogen concentration until middle of the 1990's relates to the nitrogen load amount change of the non-point and point source. ②The rise of the nitrogen concentration of the irrigation period is controlled by the cyclic irrigation. ③ The increase of the amount of the nitrogen load corresponding to the rise of the concentration of nitrogen after 1997 is not observed. ④The nitrogen purification ability has decreased by the change in the condition of the paddy field such as fallow, abandonments, and rotational upland fields.

**Keywords :** Nitrate-nitrogen, paddy field, denitrification, farm land consolidation, cultivation abandonment

## 住民参加型による水田植生調査手法の構築に向けた考察

嶺田拓也\*・松森堅治\*・廣瀬裕一\*・石田憲治\*\*

## 目 次

I 緒 言	75	1 秋期の植生調査における調査特性	77
II 調査地域および調査方法	76	2 春期の植生調査における調査特性	79
1 調査地の概要	76	IV 結 言	81
2 調査方法	76	参考文献	81
III 結果および考察	77	Summary	82

## I 緒 言

2002年に策定された「新・生物多様性国家戦略」では、我が国の生物多様性に対する危機の一つとして、里地・里山の人間活動に依存してきた生態系を取り上げ、その環境下に生息しているメダカなど身近な動植物の動態に注目した。農村地域においても、国土や環境の保全、自然との共生への国民的関心の高さを反映して、1999年に制定された食料・農業・農村基本法では農業生産活動に伴う「自然環境の保全」などが明記され、農村地域における生物相への理解も進み始めている。また、農業農村整備事業に際しては「田園環境マスタープラン」が作成され、生物相への配慮指針が示されるなど、農村における生物相の把握とその評価が益々重要になりつつある。

一般に生物相の調査は、全種類をリスト化する自然誌的調査と、生物種の生活史や生息環境などを把握する生態調査とに分けられる。農業農村整備など事業実施に伴う生態調査においても、先んじて自然誌的調査が行われることが多く、ほとんどの場合はコンサルタントなど生物調査や分類の専門家に委託されている。生物の分布や移動、生育環境に及ぼす影響は、事業対象地区を含む地域全体で評価しなければわからないことも多いが、生物相の把握には専門性のみならず時間とコストを要するため、事業対象地区以外の調査が行われることは少ない。地域全体の自然誌的な基礎情報の把握は、対象の事業とは無関係に、地域の自然史系博物館による報告書や植物研究会・動物愛好会などに属する少数の専門家による調

査活動に依存しているのが現状である。

一方、近年、土地改良区や行政主導で、住民に身近な地域の自然環境への理解を深めるために、イベント的に水路や水田などを対象に生物観察会等を開催することも増えてきており、そうした観察会を通じて希少な生物の新たな生息域が報告されることも多い(田中ら, 2003)。現在、民間を含むさまざまな団体が農村地域の生物相に対する啓発や評価を目的とした活動を主催しており(嶺田ら, 2008)、これらの活動を通じて農村の自然環境に関心を持ち、生物相の保全や環境計画に積極的に参加しようとする住民が増加することが予想される。また、農林水産省と環境省が連携する「田んぼの生きもの調査」では、魚類などを対象とした調査手法の統一化を図り、専門家に同定を依頼するなど住民参加型に加えて調査精度の確保に努めている事例もある。このように、住民参加型の調査データを地域の自然誌的情報として積極的に位置づけていくことの重要性は今後高まると考えられる。しかし、生物に対する知識や経験にばらつきのある住民参加型の調査データの精度について、専門家による調査結果と比較した検証や調査特性の解析は充分になされていない。現在、各地で行われている「田んぼの生きもの調査」の対象生物は、原生物、昆虫類、クモ類、魚類、貝類、甲殻類、線虫・ミミズ類、両生類、は虫類、昆虫類、鳥類、ほ乳類、植物と非常に多岐にわたり、調査環境も対象生物によって、水田(耕作水田、休耕田)、畦畔、水路、ため池、集落内とさまざまである(嶺田ら, 2008, 桐谷ら, 2009)。そのうち、水路の魚類と水田内の両生類、そして水路・水田内の水生昆虫の一部に関しては、農林水産省と環境省が中心となって調査の体系化がなされており(農村環境整備センター, 2007)、耕作水田内のミミズ類や水田を含む集落内の鳥類などの動物類に関してもNPOで調査手法が提案されている(岩淵, 2007)。しかし、農村域に分布する植物に関しては、調査手法の提案や体系化が特に遅れている現状にある。

\* 農村環境部環境評価研究室

\*\* 農村計画部

平成21年12月14日受理

キーワード：水田植生，採集精度，積算優占度，採集特性，採集行動，GPS



そこで本研究では、農村の中で身近な植生である耕作田や休耕田を含む水田内の草本植生を対象とした調査手法の構築に向けて、植物分類に対する専門的な知識の少ない住民が多く参加する「田んぼの生きもの調査」を念頭におき、まずはその調査特性および調査精度を把握することを目的とした。調査の対象を草本植生とした理由は、動物と異なり誰でも簡単に採集が可能で、標本としての保存が容易であること、また作成した標本を通じて専門家による種同定を受けやすいことに加え、農地である水田における住民参加型の植生調査手法に関しては体系化が遅れており、調査手法を提案するにあたり必要な基礎的知見を得るためである。なお、本研究における調査の実施に際しては、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所技術研修課のご理解とご協力をいただいた。また調査の目的を理解し被験者となられた方々に、改めてお礼を申し上げたい。

## II 調査地域および調査方法

### 1 調査地の概要

本調査は小貝川と鬼怒川に挟まれた平坦部に広がる茨城県つくばみらい市T地区内の耕作田および休耕田の水田植生を対象とした (Fig.1)。小貝川の旧河道 (標高12m) に耕作田口および休耕田ハ、ニが分布し、耕作田イは自然堤防上 (標高15m) に位置する (Fig.1)。植生調査区は各水田の畦を除く田面に設定し、調査の対象とした面積はイ: 3,708m<sup>2</sup>, 口: 1,251m<sup>2</sup>, ハ: 495m<sup>2</sup>, ニ: 272m<sup>2</sup>である。

### 2 調査方法

調査は、農業土木技術者を中心に被験者を募って、秋期・春期の2時期に実施した。被験者には、植物分類に関してあまり専門知識を持たない農業土木技術者や大学生に協力いただき、採集精度や調査特性の解析を行った。

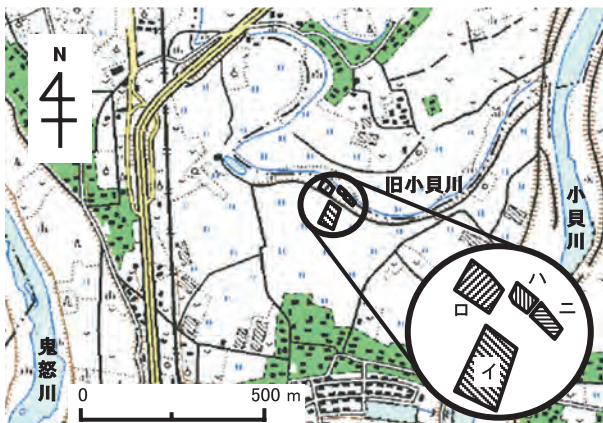


Fig.1 調査対象地

Location of the study site

この地図は国土地理院の数値地図25000

(地図画像)『千葉』を使用し、作成したものである。

### a 専門家1名による事前調査

調査対象水田の植生を正確に把握するために、被験者による植物調査前に、水田植生に関しての調査経験を有している専門家による植生調査を実施した。秋期は耕作田イおよび口の植生を2004年9月20日(天候:雨)に、春期は休耕田ハおよびニの植生を2005年4月25日(天候:曇)に事前調査した。調査時間は、被験者による調査時間と同じくイ、口が20分、ハ、ニを15分とした。コンサルタントなどによる水田等の植生調査では、一日で数十ha以上をこなす場合も多く、今回対象とした小規模な水田においては十分な調査時間といえる。事前調査では、対象区内で確認された全植物種、各植物種の主な生育ステージ、各植物種の平均的な草高、各植物種の対象区内における群度および被度の相観による調査から算出した総合優占度を記録した。なお、調査時間内には植物の採集は行っていない。

### b 秋期の植生に対する調査

秋期の調査は、農業土木技術者を対象に(独)農業工学研究所(現(独)農研機構農村工学研究所)が実施した農村環境・整備技術研修内の演習プログラムを利用して2004年9月30日(天候:快晴)に落水・収穫後の耕作田2筆で行った。計32名(うち女性3名)の被験者を5名あるいは6名の計6班に分け、調査に伴う植生に対する攪乱を抑えるため3班ずつ水田イおよび口の調査に充てた。被験者の属性は、国、道府県、そして土地改良区連合の職員で、年齢層は20歳代から50歳代までで30歳代が最も多かった (Table 1)。また参加者のいずれも植物関係の自然観察会参加や植物分類に関する講習等の受講経験がないことを確認している。被験者による調査は以下の手順で実施した。1) 各人に植物採集用の園芸用ハサミと採集した植物を収納するポリ袋(20L)を配布、2) 時間内で調査区内に生育するすべての草種を採集してほしいと指示、3) 対象水田内の植物を20分間で採集、を班ごとに実施した。被験者に対しては調査前に簡単な趣旨説明を行ったが、調査対象区内のイネ以外の植物に関する分布情報や見分け方などの説明は一切行わなかった。また植物採集の際の留意点として、結果として同じ種類を重複して採集しても構わないこと、植物

Table 1 秋期調査の被験者年齢層  
Age group of examinee in autumn survey

班	調査水田	人数	20歳代	30歳代	40歳代	50歳代
1	イ	5	0	4	1	0
2	イ	5	3 (1)	1	1	0
3	イ	6	1	4	1	0
4	口	5	2 (1)	2	1	0
5	口	5	1	2	1	1
6	口	6	3 (1)	1	2	0
	計	32	10 (3)	14	7	1

注) ( ) 内は女性の人数

体の一部ではなく、地下部を含め出来るだけ全草を採集すること、の2点を補足説明した。採集時間については、「田んぼの生きもの調査」等による住民参加の生物観察会のプログラムが飽きのこないように0.5～1時間程度に抑えていることなどを参考に、調査人数や調査面積を勘案して設定した。

調査終了後に回収した採集植物は、専門家によってすべてその場で種同定されるとともに、一部の植物については証拠標本を残した。

c 春期の植生に対する調査

春期の調査は、農業土木技術者7名に加え、大学授業等で植物観察会等への参加経験がある造園学および生態学専攻の大学生等の2名の参加も得て2005年4月26日(天候：晴)に実施した(Table 2)。植生調査の対象は、秋に調査した耕作田が耕起直後であったため、隣接する休耕田(前年度夏期に刈払い管理)ハ、ニとした。被験者は2班に分かれ、ハ、ニを各1回ずつ調査した。各水田での調査手順は、秋期調査と同様としたが、採集時間については、調査対象面積が狭くなったことから15分間に短縮して実施した。また、春期の調査では、分類知識の学習がその後の採集行動に与える影響を検討することを目的に、先行して調査した水田で採集した植物について専門家がその場で草種の同定を行うとともに口頭で簡単な見分け方等の説明を教授したのち、もう片方の水田の植生調査を行った。また、被験者の採集行動パターンを明らかにするために、GPS受信機(GARMIN社 Geko201)を各人に装着してもらい、調査時の移動軌跡、移動距離、平均速度を記録した。

各人で採集されたすべての植物については証拠標本が残され、種同定された。

III 結果および考察

1 秋期の植生調査における調査特性

a 各被験者の採集種数と調査精度

専門家1名による事前調査では、維管束植物と蘚苔類とをあわせて、耕作田のイで23種、ロで33種を確認し

Table 2 春期調査の被験者属性  
Examinee attribution in spring survey

班	被験者	性別	年齢	専門・専攻	植物観察会参加の経験
I	A	男	28	造園学	あり
	B	男	35	農業土木	なし
	C	男	51	農業土木	なし
	D	男	51	農業土木	なし
II	E	男	20	生態学	あり
	F	男	26	農業土木	なし
	G	男	36	農業土木	なし
	H	男	41	農業土木	なし
	I	男	46	農業土木	なし

班Iはハ→ニ、班IIはニ→ハの順で調査を行った

た。被験者の個人あたりの平均採集草種数は水田イで10.5種、ロで16.6種であった。年齢層別では、30歳未満の若年層の採集数は40歳以上の採集数と比較して少ない傾向を示した(Table 3)。また、突出して多く34草種を採集した50歳代の男性は兼業農家を営んでおり、水田雑草には馴染みがあるとのことだった。また、班単位の採集草種数は水田イでは19～22種、ロでは30～35種となり、事前調査による確認草種数と同等あるいは上回った。また、事前調査で確認できなかったが、被験者らによって採集された草種は、水田イでハタケゴケ、ハナイバナなど8種、ロでマツバイ、コシロネなど12種を数えた(Table 4)。事前調査で記録された草種のうち、イネやコナギなど被験者個人や班別においても採集率が80%を超えるものに関しては、専門家による調査と比較しても採集精度が高いとみなされ、特に総合優占度が1以上と高い草種の多くは、採集精度も高い傾向を示した。しかし、イボクサ、キカシグサ、ヒデリコなどで水田間の採集率にばらつきが見られ、草種特性より形態の類似種など他の群落構成種との間違われやすさが示唆された。また、水田イ、ロとも、コナギ、イヌビエ、クサネムなどで採集の重複が多くなった。

b 積算優占度による草種ごとの被採集特性評価

沼田(1969)は、植物群落を構成する種類の関係を表す総合的な指標として積算優占度(Summed Dominance Ratio: SDR)を提案している。測度として総合優占度や草高を適用した場合、SDRは「目立ちやすさ」すなわち、草種特性としての「採集しやすさ」の指標としても利用できると判断し、Table 5のように測度に重み付けしたSDR<sub>3</sub>を算出し、水田イ、ロで記録された各草種の採集率との関係をFig.2に示した。

採集率が50%以上となる草種のうち、イネやタイヌビエ、イヌビエ、コナギ、ヒデリコなどは、SDR<sub>3</sub>が高く、発生量が多いため採集しやすいと考えられた。一方、採集率が高い草種のうち、キクモやクサネム、キカシグサなどのSDR<sub>3</sub>は低かった。これらの草種には、発生量が少なかったり、小型であったりしても、キクモのように目立ちやすい花やクサネムのように他とよく区別され目立ちやすい特徴的な果実を着けるものが多く含まれた。SDR<sub>3</sub>と採集率が低い草種には、キツネノボタンやノミノフスマなど生育初期の越年草種やミゾハコバやヒナガ

Table 3 年齢層別の植物採集率  
Plants collection ratio by age bracket

年齢層	イ 水田		ロ 水田	
	人数	平均採集率	人数	平均採集率
20～30歳未満	4	10.3	6	14.0
30～40歳未満	9	9.8	5	16.6
40～50歳未満	3	13.0	4	16.3
50歳以上	0	-	1	34.0
平均		10.5		16.6

**Table 4** 秋期調査において記録・採集された草種  
Herbal species recorded/collected at autumn survey

(1) 水田イ					(2) 水田ロ												
種名	生育 ステージ <sup>a</sup>	総合 優占度 <sup>b</sup>	草高 <sup>c</sup>	事前 記録	採集率 (%) <sup>d</sup>				種名	生育 ステージ	総合 優占度	草高	事前 記録	採集率 (%)			
					全体	1班	2班	3班						全体	4班	5班	6班
イネ	◎	2	IV	○	81	80	100	67	イネ	-	2	IV	○	88	80	80	100
コナギ	○, ◎	2	III	○	100	100	100	100	イボクサ	◎	2	III	○	88	100	80	83
タイヌビエ	◎	2	IV	○	75	80	80	67	コナギ	○, ◎	2	III	○	88	100	100	67
マツバイ	△	2	II	○	69	80	60	67	ヒデリコ	◎	2	III	○	88	100	80	83
キカシグサ	○, ◎	1	II	○	100	100	100	100	ヤナギタデ	○, ◎	2	IV	○	63	80	60	50
キクモ	○, ◎	1	II	○	94	100	100	83	キカシグサ	○, ◎	2	II	○	44	60	60	17
トキンソウ	○, ◎	1	II	○	56	80	60	33	イヌビエ	◎	1	IV	○	100	100	100	100
イヌホタルイ	○, ◎	1	IV	○	50	60	60	33	クサネム	□, ○, ◎	+	IV	○	94	100	80	100
チョウジタデ	○, ◎	1	IV	○	50	40	60	50	キクモ	○, ◎	+	II	○	75	100	80	50
イボクサ	◎	1	III	○	19	20	20	17	オオハリイ	○, ◎	+	III	○	69	80	60	67
ヘラオモダカ	○	+	III	○	50	60	20	67	スカキビ	○, ◎	+	IV	○	63	60	80	50
アメリカアゼナ	○, ◎	+	II	○	50	60	80	17	ヒメミツハギ	○, ◎	+	IV	○	63	60	80	50
タケトアゼナ	○, ◎	+	II	○	25	60	20	0	スズメノトウガラシ	○, ◎	+	III	○	56	80	40	50
イヌタデ	○	+	IV	○	19	0	20	33	イヌホタルイ	○, ◎	+	III	○	50	80	60	17
イチドメ	□	+	I	○	19	0	60	0	タカサプロウ	□, ○	+	III	○	50	80	20	50
タカサプロウ	○, ◎	+	IV	○	6	20	0	0	チョウジタデ	○, ◎	+	III	○	50	80	40	33
スギナ	△	r	II	○	31	40	20	33	イヌタデ	○	+	III	○	50	60	60	33
セリ	□	r	III	○	25	20	40	17	トキンソウ	◎	+	II	○	44	100	20	17
タウコギ	□, ○	r	IV	○	25	20	20	33	ヨシ	□	+	V	○	44	60	20	50
カントウヨメナ	□	r	III	○	13	40	0	0	ヒメガマ	□	+	V	○	38	40	40	33
キツネノボタン	△	r	I	○	6	20	0	0	オモダカ	□, ○	+	III	○	38	0	60	50
メヒシバ	◎	r	III	○	6	0	20	0	タネツケバナ	△	+	II	○	31	20	60	17
ヒデリコ	◎	r	III	○	0	0	0	0	ヘラオモダカ	○, ◎	+	III	○	31	0	80	17
ハタケゴケ	□	r	I	-	19	20	0	33	マツバイ	△	+	I	-	25	20	20	33
タマガヤツリ	◎	r	III	-	13	20	0	17	アメリカアゼナ	○, ◎	+	II	○	19	0	0	50
ヒナガヤツリ	◎	r	II	-	13	0	40	0	エノキグサ	□	r	II	○	31	0	40	50
ハナイバナ	◎	r	II	-	13	0	0	33	ツルマメ	□	r	II	○	25	0	40	33
タネツケバナ	△	r	I	-	6	20	0	0	タケトアゼナ	○, ◎	r	II	○	19	20	0	33
アメリカセンダングサ	◎	r	IV	-	6	0	20	0	ハリイ	○	r	II	○	19	20	40	0
エノキグサ	◎	r	II	-	6	0	0	17	スマトラノオ	□	r	III	○	19	60	0	0
ノミノフスマ	△	r	II	-	6	0	0	17	アキノウナギツカミ	○	r	III	○	6	20	0	0
種数計				23	31	22	19	22	ミゾハコベ	□, ○	r	I	○	0	0	0	0
a: 生育ステージの区分は、事前調査および標本から、芽生え: △, 生育期: □, 開花期: ◎, 結実~枯死期: ○, で示している。									コゴメガヤツリ	◎	r	II	○	0	0	0	0
b: 総合優占度は植生の被度と群度を総合化した概念で、事前の植生調査時に調査区を対象に以下の尺度に沿って区分した。被度が調査面積の1/20~1/4を占める。または、それ以下であっても個体数が極めて多い: 2, 被度が調査面積の1/20以下であるが、個体数は多い: 1, 極めて低い被度でわずかな個体数: +, まれに最小被度で出現する: r。									ヒナガヤツリ	○, ◎	r	II	○	0	0	0	0
c: 草高は、平均的な個体から判断して、1~5cm程度: I, 5~10cm程度: II, 10~30cm程度: III, 30~50cm程度: IV, 50cm以上: V, とした。									ウシクグ	○	r	III	-	19	0	20	33
d: 採集率は、対象植物を採集できた人数を全体 (N = 32) および各班の構成員数で除した。									タウコギ	□	r	III	-	19	40	20	0
									コシロネ	□	r	III	-	19	60	0	0
									キツネノボタン	△	r	I	-	6	20	0	0
									タマガヤツリ	◎	r	III	-	6	20	0	0
									セリ	△	r	II	-	6	0	20	0
									メヒシバ	◎	r	III	-	6	0	20	0
									サデクサ	△	r	III	-	6	0	20	0
									ツククサ	△	r	I	-	6	0	20	0
									アメリカセンダングサ	△	r	III	-	6	0	20	0
									キク科sp.	△	r	I	-	6	0	20	0
種数計													33	45	30	35	30

ヤツリなどの小型草種が多く占めた。また、SDR<sub>3</sub>が50以上と高い草種のうち、草高が高いヒメガマ、ヨシ、そして草高は低いものの発生量が多いトキンソウの採集率は低くなった。その理由として、これらの草種の多くは、単子葉植物(ヒメガマ、ヨシ)あるいは花の形態が比較的地味(トキンソウ)であるため、被験者が気づきにくかったことが考えられた。以上の結果から、住民参加型の調査では、発生量が多いか、特徴のある花などで

よく目立つ草種が、植物分類に関する知見や経験が少ない調査者によっても採集されやすいと考えられた。一方、小型あるいは生育ステージが若い未開花草種、目立たない花を着けるような草種に関しては、ある程度の知識や経験を有していないと採集されにくいことが示唆され、住民参加型調査では記録されにくい草種が存在すると考えられた。



**Table 5** 積算優占度の算出  
Conversion of SDR<sub>3</sub>  
(Summed Dominance Ratio)

総合優占度	A'	草高	H'
2	100	I	3.125
1	50	II	9.375
+	25	III	25
r	5	IV	50
		V	100

$$\text{積算優占度 (SDR}_3\text{)} = \frac{A' + H'}{2}$$

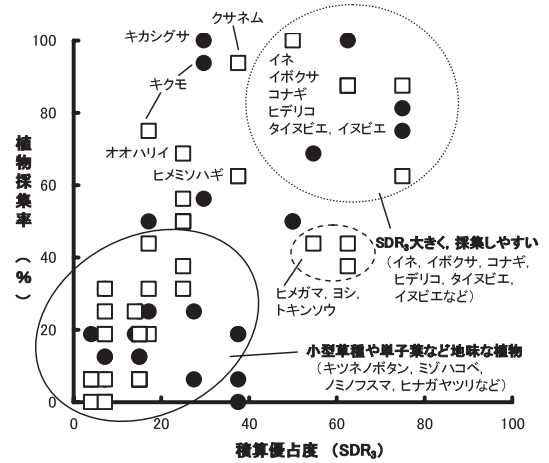
例えば、総合優占度：2、草高：Ⅲでは、

$$\text{SDR}_3 = \frac{100 + 25}{2} = 62.5$$

2 春期の植生調査における調査特性

a 各被験者の採集種数と調査精度

専門家による事前調査では休耕田ハで23種、ニで25種確認できた (Table 6)。被験者による調査での採集草種数は、事前調査での確認種数に収まり、平均ではハが13.7種、ニで12.4種となり、植物観察会等への参加経験がある調査者でより多くの草種を採集できた傾向が示された (Table 7)。また、春期の調査時点で芽生え期にある1cm未満のSDR<sub>3</sub>が非常に低い草種も被験者に採集されていた。例えば、調査対象地一帯の旧河道には絶滅危惧Ⅱ類 (環境庁編, 2000) のミズネコノオが生育して



**Fig.2** 植物採集率と積算優占度との関係

Scatter chart of plants collection ratio and SDR<sub>3</sub>

●：水田イの採集種 □：水田口の採集種

おり、被験者らに対しては事前に説明していなかったが、ハにおいて被験者Dによって採集された。植物観察会等への参加経験もなく植物分類に関する知識の少ない被験者Dによって芽生え期の絶滅危惧植物が採集されたことは、希少種を含む地域の植生把握における住民参加型調査の可能性を示したといえる。

b 被験者の採集行動パターン

被験者に装着したGPS受信機のデータから、採集行

**Table 6** 春期調査において記録・採集された草種  
Herbal species recorded/collected at spring survey

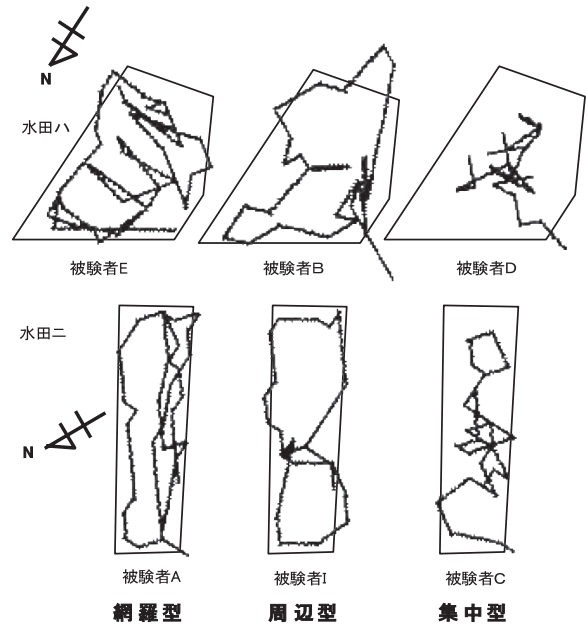
(1) 水田ハ						(2) 水田ニ					
種名	生育ステージ	総合優占度	草高	採集率 (%)	SDR <sub>3</sub>	種名	生育ステージ	総合優占度	草高	採集率 (%)	SDR <sub>3</sub>
ヨシ	○	3	IV	100	75.0	サナエタデ	△, ○	2	II	100	29.7
タネツケバナ	△, ○, ◎	+	III	100	15.0	カサスゲ	○, ◎	1	III	89	25.0
スカシタゴボウ	△, ○, ◎	+	III	100	15.0	ヒメガマ	△, ○	3	V	89	100.0
ヤナギタデ	△, ○	3	II	100	54.7	タネツケバナ	△, ○, ◎	+	II	78	7.2
オオハリイ	○, ◎	1	III	89	25.0	スズメノテッポウ	○, ◎	+	III	78	15.0
スズメノテッポウ	○, ◎	+	III	89	15.0	サデクサ	△, ○	+	II	78	7.2
オランダミミナグサ	◎	+	III	89	15.0	ヤナギタデ	△, ○	3	I	78	51.6
ムシクサ	○, ◎	+	II	78	7.2	オオハリイ	○, ◎	1	III	78	25.0
ノミノフスマ	○, ◎	+	III	78	15.0	ヨシ	○	3	IV	67	75.0
カズノコグサ	○, ◎	+	IV	78	27.5	オヘビイチゴ	○, ◎	+	III	67	15.0
サナエタデ	△, ○	3	II	67	54.7	アゼスゲ	○, ◎	2	IV	67	50.0
オヘビイチゴ	○, ◎	+	III	67	15.0	スカシタゴボウ	△, ○, ◎	1	II	56	17.2
ミコシガヤ	○	1	III	56	25.0	ウマノアシガタ	△, ○	1	II	44	17.2
キジムシロ	○, ◎	+	III	44	15.0	コハコベ	○, ◎	+	II	44	7.2
ウマノアシガタ	△, ○	+	II	44	7.2	オランダミミナグサ	◎	+	III	33	15.0
ナズナ	○, ◎	+	V	44	52.5	カズノコグサ	○, ◎	+	IV	33	27.5
サデクサ	△, ○	+	II	44	7.2	オギ	△, ○	+	IV	33	27.5
カサスゲ	○, ◎	2	III	33	37.5	ヤブマメ	△	+	III	33	15.0
ハハコグサ	○, ◎	r	II	22	5.2	キジムシロ	○, ◎	+	II	22	7.2
セリ	△, ○	r	II	11	5.2	ノチドメ	△, ○	+	I	22	4.1
イシミカワ	△	+	II	11	7.2	ムシクサ	○, ◎	+	I	11	4.1
クサヨシ	○	+	V	11	52.5	ノミノフスマ	○, ◎	+	II	11	7.2
ミズネコノオ	△	r	I	11	2.1	ツユクサ	△	+	II	11	7.2
種数計				23s		シロザ	△, ○	+	I	11	4.1
						ヤノネグサ	△, ○	+	II	11	7.2
						種数計				25	



**Table 7** 春期の植生調査における被験者の採集種数  
Number of plants species collected by examinee in spring survey

班	被験者	植物観察会参加の経験	採集種数	
			休耕田ハ	休耕田ニ
I	A	あり	18	21
	B	なし	12	8
	C	なし	9	10
	D	なし	13	15
II	E	あり	15	13
	F	なし	11	6
	G	なし	15	9
	H	なし	12	14
	I	なし	18	16

動のパターンは **Fig.3** のように3パターンに類型化できた。すなわち、「網羅型」は調査時間内にくまなく調査区内を歩き回るパターンで、「周辺型」は調査区の外周部分を重点的に歩き回り、中心部にはあまり立ち寄らないパターン、「集中型」は調査区内の数点を重点的に採集するパターンである。各人に装着したGPSの軌跡データから、各パターンの調査時間(15分)内における滞留時間(1カ所に留まる時間)、平均速度、そして単位面積あたりの移動距離を算出した。各パターンの特徴として、「網羅型」は単位面積あたりの滞留時間が0.15~0.44秒/m<sup>2</sup>と比較的短く、移動の平均速度は10m/分以上と早かったため、単位面積あたりの移動距離は長くなった(**Table 8**)。「周辺型」では、滞留時間は0.24~0.38秒/m<sup>2</sup>と「網羅型」と同様かそれ以上に短かったが、平均速度は若干遅くなり、そのため面積あたりの移動距離は「網羅型」よりも短くなった。「集中型」の滞留時間は、0.5秒/m<sup>2</sup>前後と「網羅型」や「周辺型」より長くなる傾向を示し、平均速度も遅く、面積あたりの移動距離は平米あたり0.27mと最も短くなった。また、総種数に対する採集効率も、「集中型」よりも「網羅型」や「周辺型」で高くなる傾向を示した。一方、ミズネコノオやシロザなどSDR<sub>3</sub>の小さい草種は「集中型」で採集されることが多く、「集中型」のようにじっくりと観



**Fig. 3** 被験者の採集行動パターン  
Collecting behavior excursion of examinees  
※各類型の典型例を示した。

察して採集するパターンでは、移動の速度が速く、一カ所に留まる時間の少ない「網羅型」や「周辺型」で見落とされがちな草種も採集しうる可能性が示唆された。また、同じ種類を採集してしまう重複率は、植物観察会などへの参加経験のある被験者A、Eで、他の被験者よりも少なくなった。しかし、採集した植物の特徴や見分け方の簡単な講義を行った後の2回目調査では、被験者Fを除いていずれも重複率が増加した。採集種数は1回目より2回目で増加する傾向(**Table 7**)を示したことから、短時間の学習でも採集効率に寄与することが考えられたが、重複率の増加は、短時間の学習によってかえって被験者を混乱させてしまうおそれも示し、今後、学習プログラムの内容の充実化などが課題として残された。

また、記録・採集された各草種の生育ステージに階級

**Table 8** 被験者の採集行動解析  
Analysis of examinee's collecting behavior

類型	被験者	滞留時間 <sup>a</sup> (秒/m <sup>2</sup> )	平均速度 (m/分)	移動距離 (m/m <sup>2</sup> )	採集効率 <sup>b</sup> (%)		重複率 <sup>c</sup> (1回目)	重複率 (2回目)
					ハ	ニ		
網羅型	A	0.27	13.3	0.51	78%	84%	28%	43%
	E	0.16	12.2	0.39	65%	52%	15%	47%
	F	0.15	14.2	0.41	48%	24%	67%	64%
	H	0.44	10.2	0.36	52%	56%	71%	92%
周辺型	B	0.26	11.9	0.39	52%	32%	33%	50%
	G	0.38	8.7	0.30	65%	36%	33%	47%
	I	0.24	9.0	0.34	78%	64%	50%	78%
集中型	C	0.52	8.5	0.27	39%	40%	56%	70%
	D	0.46	7.9	0.27	57%	60%	62%	67%

a: 滞留時間、移動距離は15分間あたりの値を各調査面積で除した。

b: 採集種数を現地で確認された草種の総数で除した。

c: 採集種数のうち重複して採集した種数の割合。

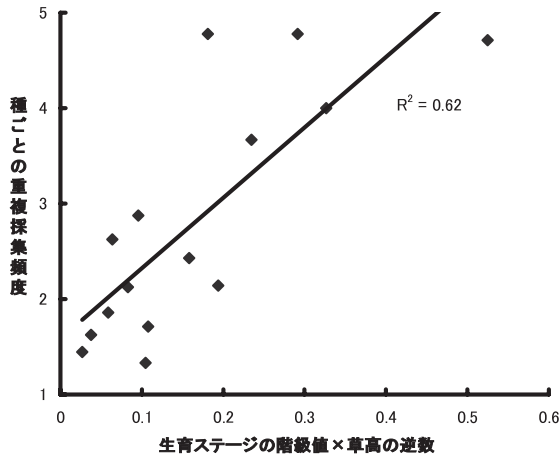


Fig.4 重複採集回数および植物形態との関係  
Correlation of repetition collection frequency and plant trait

値を与え（芽生え・生育期：1，開花期：2，結実～結実期：3），生育ステージの階級値と草高の逆数との積と重複頻度との相関を見てみると，有意な正の相関（スピアマンの順位相関： $p < 0.01$ ）が認められたことから，調査者の分類学的知識が少ない場合，小型で特徴のわかりづらい草種や生育初期における調査では種類の区別を認識しにくくなることが示唆された（Fig.4）。

しかし，今回の結果からは，調査者の分類学的知識が少ない場合でも，採集行動特性の異なる多くの参加者による調査によって，希少種の発見も含め，少数の専門家による短時間の調査と同等それ以上の種数が採集可能であることが示された。

#### IV 結 言

植物学や分類学的知識や経験を持たない住民の参加による水田の植生調査を想定し，その特徴を解析したところ，量的に多い草種やよく目立つ草種は採集しやすく，小型で地味な草種は見過ごしやすいたことが示唆された。また，多数の参加を得た調査では，希少種の発見も含め，少数の専門家による短時間の調査と同等およびそれ以上の種数が採集可能であることが示された。さらに，調査行動の軌跡の解析からは，調査地区内をくまなく歩く「網羅型」，「周辺型」，そしてじっくり対象植物を観察する「集中型」のパターンに類型されることを示した。「網羅型」，「周辺型」の採集行動では，「集中型」よりも採集種数が多くなる傾向を示したが，草高が低く発生量が少ない草種など気付かれにくい草種は「集中型」で採集されやすく，調査対象の植生リストの充実を図るためには，「網羅型」，「周辺型」だけでなく「集中型」も含めた多数の住民が参加することの重要性が提示した。このことから，事前の情報として調査者の行動パターンが「網羅的」か「集中的」かが分かっているならば，両者をうまく織り交ぜ役割を分担させることによって，調査精度の向上を図れる可能性がある。さらに，植物分類知識の不十分な参加

者に対して，短期間の学習によって採集効率を増加させられることも示唆されたが，同じ草種を何度も採集してしまう重複率が上昇してしまったことから，知識や経験にばらつきのある住民による調査に際しては，それぞれの知識レベルに応じた学習プログラムの開発が必要であることが課題として残された。しかし，住民参加型による調査の主目的を少数の専門家による短時間の調査の補足調査として捉えれば，採集効率を向上させるためには，単なる学習だけでなく調査経験を重ねることが必要である。また，留意点としては，植物分類に関して経験の少ない場合，後日に専門家の同定が可能となる標本作製も重要と考えられる。今後，低年齢層の参加など参加者の属性が異なる場合や，水田以外の植生区分，草本植生以外の木本等における調査特性の解析もすすめ，住民参加型による農村地域の植生調査手法のシステム化を図りたい。

海外では，農業者を含む地域住民に対する生物多様性把握のための生物調査員養成を契機に，新たな食料生産システムの萌芽も報告されている（Janzen, 2004）。わが国においても今後，今回考察した水田の植生調査をはじめ，住民参加型の体系だった「生きもの調査」の提案により，地域の生物相や生態系に対する新たな視点が市民や農業者に形成され，持続的な食料生産システムの提案につながることを期待したい。

#### 参考文献

- 1) 岩渕成紀編（2007）：だれにでもできる田んぼの生きもの調査ガイド，18-149，田んぼの生きもの調査プロジェクト，東京。
- 2) Janzen, D.H. (2004): Setting up tropical biodiversity for conservation through non-damaging use: participation by parataxonomists, *J. Applied Ecology*, **41**(1), 181-187
- 3) 環境庁編（2000）：改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物 植物 I，522，自然環境研究センター，東京。
- 4) 桐谷圭治編（2009）：田んぼの生きもの全種リスト，7-13，農と自然の研究所，福岡。
- 5) 嶺田拓也・芦田敏文・石田憲治（2008）：新たな環境認識ツールとしての農業者による生きもの調査，*農村計画学会誌*，27(3)，125-131
- 6) 農村環境整備センター：田んぼの生きもの調査，農村環境整備センター〈<http://www.acres.or.jp/Acres/chousa/main.htm>〉，2007年3月23日，2009年11月11日。
- 7) 沼田真編（1969）：図説植物生態学，24-36，朝倉書店，東京。
- 8) 田中道明・渡辺一哉（2003）：田んぼ周りの生きもの調査，*農村と環境*，19，140-159

## A View of Trends of Behavior in Investigation of Flora in Paddy Fields with Residents' Participation

MINETA Takuya, MATSUMORI Kenji, HIROSE Yuichi and ISHIDA Kenji

### Summary

Recently, the case of survey on flora / fauna in paddy fields and surrounding environment with residents' participation has increased. Although the survey data obtained by community participation is requested to be situated as natural history information in the region, the analysis of the survey characteristic and verification concerning investigator's survey data with a little knowledge and experience to animal and plants are insufficient.

This study was conducted to understand the collection characteristics and collection accuracy of the survey by examiners with a little knowledge to plant taxonomy for vegetation in the paddy field.

It was shown that high SDR (summed dominance ratio) the collections of the high SDR species were frequent, but low SDR or unremarkable species before flowering were not frequent in autumn survey. Moreover, species that the entire participant was able to collect surpassed confirmation species by the specialist though the total species that was able to be collected privately was limited.

In the spring survey with wearable GPS examinee, the number of collection plants has increased by "examinee of all covering type" that walks all over in the investigation site and "examinee of around type" that particularly walks in the surrounding site. On the other hand, it was suggested that learning effect to the herbal plants increase in "examinee of concentrated type" that the residence time in one place is long.

**Keywords :** flora of rice paddy fields, collection accuracy, summed dominance ratio, collection characteristic, collection behavioral, global positioning system

## 水田土壌を対象とした動電学的手法による重金属除去試験

久保田富次郎\*・人見忠良\*・濱田康治\*・白谷栄作\*・三重野俊彦\*\*・塩濱圭治\*\*\*

## 目 次

I 緒 言	83	IV 水田型 EK 試験	93
II EK 法の原理と供試土壌	84	1 実験方法	93
1 動電学的浄化手法 (EK 法)	84	2 結果	94
2 供試土壌	84	V 考 察	96
III カラム試験	85	VI 結 言	97
1 カラム試験 1 (土壌 A)	85	参考文献	98
2 カラム試験 2 (土壌 B)	90	Summary	99

## I 緒 言

金属鉱山や精錬所から排出された廃水や煤塵等の影響により生じた重金属汚染農地対策が着手されて 40 年近い。この間、従来の食品安全基準である玄米 1kg 中に含まれるカドミウム (Cd) の許容含有量 1mg を超える米を産出する水田はその面積の 9 割程度が客土を主体とする対策により解消された。しかし、近年、国際的な食品安全基準の見直しを背景として Codex 委員会において、コメを始めとする食品全般に対する Cd の含有値基準の検討が行われる中で、コメについては 1kg 中に含まれる Cd の許容含有量は 0.4mg とされ、我が国においてもこの新しい国際基準に沿って国内法の改定が進められているところである。もし、コメの Cd 基準値が 1ppm (玄米) から 0.4ppm (玄米および精米) に改定された場合、コメの基準超過率 (0.3%) から推察すると、これにより新たに対策が必要となる農地面積は、(全水田面積) × 0.3% = 250 万 ha × 0.3% = 7500ha となる。このうち、面積の多くを占めると考えられる土壌中の Cd 濃度が低い農地に対しては、pH 調整や湛水・水管理などの吸収抑制技術やファイトレメディエーションを適用するとしても、一部の Cd 濃度が高い農地では、従来法である客土やその代替工法の適用が必須となる。

客土工法は、農用地土壌汚染対策の主力工法として広く採用されてきた工法であり、その効果の長期持続性に

ついても近年、検証されている (山田, 2007)。一方、客土工法の問題点として、①高コストであること、②現場によっては良質の客土資材の入手が困難であること、③客土後の地力回復に長期を要する、などの点が指摘されている。①に関連して、コスト面を考慮すると上乗せ客土が採用されることが多いが (梶原ら, 1983)、上乗せ客土を実施すると田面標高が 30cm 程度上がるため、用水路や周辺の農道の改修が必要になる場合がある。そして、田面標高の上昇を避けるため排土客土を行う場合、さらなるコストの増嵩と排土処理が問題となる。また、混住化地域では、住民の安全性や土砂輸送ルートの確保の困難さから、客土工法を採用できないケースもある。

このような在来工法のもつ問題を解決する工学的手法の一つとして汚染土壌の原位置浄化に特徴を持つ動電学的土壌浄化手法 (EK 法) がある。EK 法は、1980 年代から本格的に開発が進められ、1980 年代末には重金属汚染工場跡地への適用 (Lageman et al., 1989) が紹介されている。国内においては、主にカオリナイト等の特性が分かった粘土鉱物を用いて、人工汚染物質の移動・除去特性を調べる室内試験を中心として研究が進められており (Wada and Umegaki (2001), 新苗ら (2001a, 2001b, 2002), 中川ら (2003) など)、総説が和田ら (2002), 新苗ら (2003), 張ら (2008) によりまとめられている。また、秋田ら (2004), 塩濱ら (2005) は、オランダからの技術導入を図り、同工法により野外における規模の大きな原位置浄化実証試験を行い、鉛を対象物質として良好な結果を得ている。

一方、本手法を重金属汚染農地土壌へ適用する試みは、Chang et al. (2008), 川地 (2006, 2008) など世界的にみても極めて限定的である。工場跡地等との比較における重金属汚染農地対策の特徴は、①浄化対象物質の濃度が概して低い、②汚染が広範囲に広がっていること、③浄

\* 農村環境部水環境保全研究室

\*\* 元(株)富士エンバイロン

\*\*\* (株)浅沼組 技術本部技術研究所

平成21年12月14日受理

キーワード：動電学的土壌浄化法, 重金属, 農地土壌, カドミウム



化対策後の土壌には作物生産を念頭においた速やかな地力回復が求められること、である。都市域と農地における状況の違いをみるために汚染濃度の比較をすると、例えばCdについて工場跡地等に適用される土壌汚染対策法では土壌含有量基準が150ppmであるのに対して、汚染農地における含有量の上限は15ppm程度で、一般的な汚染農地では数ppm程度、さらには条件によっては0.4ppm程度でも作物中のCd含有量が高まる恐れがある。非汚染農地のCd含有量の平均は0.3ppm以下であり、土壌分析時の抽出法の違いを考慮してもその差は歴然としている。

電気修復技術の汚染農地への適用の可能性と問題点については、川地ら(2006, 2008)により指摘されているが、知見は十分でない。従って、EK法の農地土壌への適用の可能性を検討するためには、実際の汚染土壌を用いた浄化試験を実施し、基礎的なデータの積み重ねを図ることが当面の課題であると考えた。

そこで、本研究では、従来の研究で不足していた実際の農地土壌へのEK法の適用性の検討を行うため、重金属による農地土壌汚染が懸念される2地区で採取された水田土壌に対してEK法の適用試験を行う。EK法が実際の農地土壌中において、Cdや一般に環境中でCdと類似の動態を示すといわれるZnに対して有効であるかどうか、特に多様な共存物質が存在する中で低濃度のCdに対して有効であるかどうか、さらに共存する塩基や重金属元素の動態はどうか、等の点について実験的な検討を行う。

なお、本研究は、農研機構の共同研究制度(農村工学研究所・(株)浅沼組・(株)富士エンバイロン)による成果の一部である。供試土壌の一部は、藤森新作氏(元農村工学研究所・現農業・食品産業技術総合研究機構本部)より提供を受けた。また、重金属の分析・評価手法では木方展治氏(独)農業環境技術研究所)のご指導を仰ぎ、土壌分析では張銘氏ならびに原淳子氏(産業技術総合研究所)、田中正一氏(鹿児島県)の協力を得た。さらに、研究費の一部として、農研機構の産学官連携強化経費の配分を受けた。ここに記して謝意を表す。

## II EK法の原理と供試土壌

### 1 動電学的浄化手法(EK法)

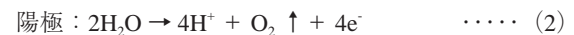
EK法は土壌中に通電することで荷電を帯びたイオンやコロイドが電流によって生じる電気移動(または電気泳動)、正に帯電した物質の移動に伴って誘発する電気浸透流、さらに昇温による揮散・微生物分解などを利用した土壌および地下水汚染の浄化技術である。

電気泳動と電気浸透流による間隙水中の溶質*i*のフラックス $J_i$ は場の電位勾配を駆動力とする次式で表される(和田ら, 2002)。

$$J_i = -u_i z_i F C_i \nabla E + \frac{\varepsilon \xi}{\eta} C_i \nabla E \quad \dots\dots (1)$$

(1)式の第一項は電気泳動を表し、第二項は電気浸透流を表す。式中の $u_i$ は電気泳動移動度、 $z_i$ はイオンの価数、 $F$ はファラデー定数、 $C_i$ は濃度、 $\varepsilon$ は水の誘電率、 $\eta$ は間隙水の粘性係数、 $\xi$ は土粒子のゼータ電位、 $E$ は電位である。なお、一般にイオン性溶質では電気泳動の寄与が圧倒的に大きい(和田ら, 2002)。

また、両電極槽では直流電圧の印加により水の電気分解が生じ次式の反応が起こる。



ここで生成した $\text{H}^+$ と $\text{OH}^-$ は(1)式に従って電極槽と土壌の界面から浸入し土壌の酸性化(陽極側)とアルカリ化(陰極側)を進める。

一方、重金属元素は、一般に土壌中において交換態や吸着態に加えてヒドロキシイオンや水酸化物、炭酸塩、硫化物、有機錯イオンなど様々な形態で存在している(和田, 1984)。ここで土壌が酸性化すると $\text{H}^+$ の増加による交換性陽イオンの置換や錯体からの交換脱着、硫化物の溶解等が生じ、重金属元素は間隙水中にイオンとして放出される。それによって通常、正の荷電を持つ重金属イオンは電気移動(または電気泳動)によって陰極側に移動する。

重金属イオンは塩基性下で水酸化物として沈殿し移動性が失われる。そのため、効果的に重金属を除去するには、陰極コンディショニング(Reed et al., 1995)と呼ばれる陰極で生じるアルカリを中和し中性~酸性条件で管理する操作が求められる。陰極コンディショニングに使用する酸性物質は、希硝酸(新苗ら, 2001a, 2001b)をはじめ、近年では環境への影響がより小さいと考えられる酢酸やクエン酸(張ら, 2008)あるいは木酢液(川地, 2006)といった弱酸を使用する試みもなされている。

### 2 供試土壌

供試土壌は、農地の重金属汚染が懸念される2地区の水田圃場で採取されたものである。土壌Aは、東北地方の金属鉱山の下流沖積地に位置する水田表土から採取されたものであり、土地分類基本調査によると全層が概ね灰褐色を呈する強粘質土壌である細粒灰色低地土に分類される。採取地区周辺では、氾濫時に鉱山廃水等の影響を受けた河川底質の流入や灌漑水を通じた農地重金属汚染が見られ、汚染農地対策が進められた経緯がある。一方、土壌Bは、九州地方の海成堆積物を起源とする水田表土から採取されたもので、分類は細粒強グライ土である。採取地区では近隣の亜鉛精錬工場の煤塵を起源とする汚染が進行し1970年に農用地のCd汚染が明らかになり、その後、土壌汚染対策事業により客土が漸次

進められた経緯がある。

それぞれの土壌の X 線回折および蛍光 X 線分析による主な鉱物および成分組成を **Table 1** に示す。供試土壌中の鉱物は、土壌 A では斜長石が卓越して雲母類が比較的少ないのに対して、土壌 B は石英が卓越しており雲母類を比較的多く含んでいるという違いがある。また、酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) は土壌 A により多く含まれている。

土壌 A, B 共に、採取された土壌は、風乾後に乳鉢で粉碎し含まれる細根等を取り除き、2mm のふるいを通したものを調整試料とした。土壌の CEC は、土壌 A が  $25.5\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、土壌 B が  $23.4\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$  であった。

なお、事前の検討で土壌 A の元土壌中の Cd や Zn などの重金属 0.1M HCl 抽出量が比較的lowだったので、硫

酸亜鉛 ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) を添加し、人工汚染土壌として実験に供した。硫酸亜鉛の添加量は水和物として風乾土 1kg 当たり 2.04g とし、均等に混合するよう、始めは少量の土壌に硫酸亜鉛を全量混ぜ、その後少しずつ土壌を加えて量を増やしつつ混合した。その結果、供試土壌の亜鉛含量は  $349\text{mgkg}^{-1}$  (0.1M HCl 抽出)、 $394\text{mgkg}^{-1}$  (1M HCl 抽出) となった (**Table 2**)。

### III カラム試験

#### 1 カラム試験 1 (土壌 A)

##### a 実験方法

土壌 A を対象として、**Fig.1** に示すカラム試験器を用

**Table 1** 供試土壌の分類と含有成分  
Soil properties and classification

サンプル	土壌分類	石英	斜長石	黄鉄鉱	雲母類	緑泥石	スメクタイト	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
土壌A	細粒灰色低地土	○	◎	--	-	-	-	10.8 (3.7)
土壌B	細粒強グライ土	◎	○	--	△	-	-	6.3 (2.0)
単位/凡例	◎:極多量 ○:多量 △:中量 +:少量 -:微量 --:痕跡認められず							% (変動係数%)
分析条件	不定方位分析, 対陰極:Cu, モノクロメータ使用, 管電圧:40kV, 管電流:100mA, スリット系:1° - 1.26mm - 1° -0.3 mm サンプリング幅:0.020°, 走査速度:2° min <sup>-1</sup> , 走査範囲:3~70°							ターゲット:Rh, 電圧50kV, フィルター:Zr, 測定時間:300s
分析機器	Rigaku RINT2500 粉末X線回折装置							島津 EDX-700HS2

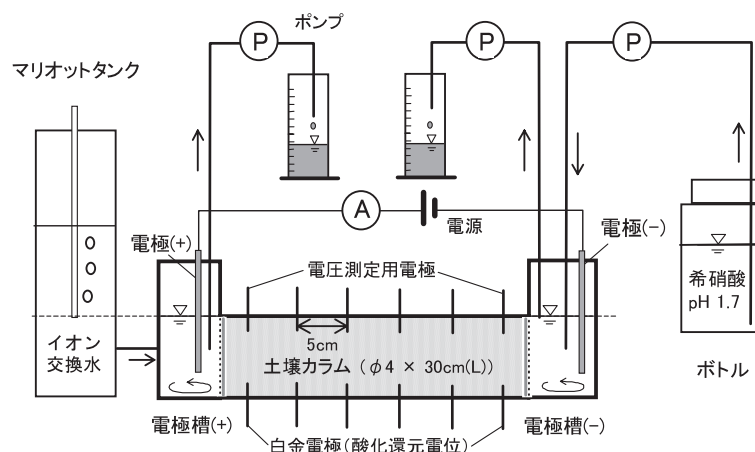
**Table 2** 供試土壌の酸抽出法による供試土壌の重金属含量  
Heavy metal content of soils by soil extraction methods (unit: mg · kg<sup>-1</sup> DW)

	抽出法	Fe	Mn	Cd	Zn	Pb	Cu	As	Cr	Ni
土 壤 A <sup>1)</sup>	0.1M HCl 抽出	456	181	0.42	349	4.6	3.3	0.1	0.1	0.8
	1M HCl 抽出	8800	594	0.50	394	126	28.7	1.3	5.1	47.1
土 壤 B	0.1M HCl 抽出	455	233	13.2	183	21	6.2	0.2	0.3	2.7
	1 M HCl 抽出	6700	533	15.7	353	149	18.8	4.8	3.8	37.7
非汚染水田の平均値 <sup>2)</sup>	欄外を参照のこと	—	76.3 <sup>3)</sup>	0.265 <sup>3)</sup>	7.23 <sup>3)</sup>	3.06 <sup>3)</sup>	4.47 <sup>3)</sup>	0.97 <sup>4)</sup>	0.16 <sup>5)</sup>	0.42 <sup>5)</sup>

1) 硫酸亜鉛を添加 (Zn として  $463\text{mg kg}^{-1}$ ) した。

2) 浅見 (2001) の p.7 表 1-4 における非汚染水田土壌 (n=231) の表層土の平均値

3) 0.1M HCl 抽出, 4) 1M HCl 抽出, 5) 0.2M- $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  (pH4.5) 抽出



**Fig.1** 実験装置 (カラム試験 1)

Schematic diagram of laboratory setup

いてEK処理試験を行った。供試土壌は内径4cm、長さ30cmのアクリル製カラムに充填し、両端を濾紙、ナイロンメッシュ、多孔アクリル板により拘束した。土壌の充填にあたって、カラムに長さ方向に2.5cmづつ土壌を投入し、一層毎にガラス棒で約20回づつ突いて充填密度が均一となるよう注意深く充填した。土壌の充填密度は $1.02\text{gcm}^{-3}$ であった。

カラム両端には中に電極液と電極が入る電極槽を接続した。電極は陽極に炭素棒( $\phi 3\text{mm}$ )を、陰極にはステンレス棒( $\phi 2\text{mm}$ )を用いた。電極には電流計をつなぎ、さらに直流電源に接続される。電極槽には空気抜き孔と電極液の攪拌装置が付いた蓋を被せており電極液の蒸発を減らすよう配慮した。土壌充填と装置の組み立てが終わった後に、両側の電極槽にイオン交換水を投入して、土壌を飽和させた。実験は、室温が $24 \pm 1^\circ\text{C}$ に調節された恒温室内で実施した。

実験開始時に、初期の通電性を確保するため、電極槽のイオン交換水に電解質としてNaCl水溶液を若干添加した。通電条件は、実験当初の印加電圧は30Vとし、約1日後から印加電圧を50Vに変更し、その後、酸化還元電位の測定時間を除く通算72日間(72.4d)にわたって、定電圧条件で通電した。なお、通電は後述する土壌カラム内の電圧分布が全体的にほぼ安定化した時点まで行った。

陽極および陰極の電極液は、各電極に集積したイオン性物質の成分と量を調べるために定量ポンプで吸引シメスシリンダーに採取した。陽極槽では、減少した電極液はマリオットタンクよりイオン交換水が補給される構造である。また、陰極槽ではまずpH調節を目的とした希硝酸溶液(pH1.7)をポンプで投入し、そこで生じる余剰水を定量ポンプで分析用に採取している。希硝酸溶液の投入量は電極槽のpHが概ね2前後に調整されるよう必要に応じて流量を調節した。ポンプ流量の設定条件をTable 3に示す。電極槽の容量はそれぞれ約70mLで電極液の平均滞留時間は陽極が0.67日、陰極が0.34日であった。

土壌カラムには5cm間隔でpH測定孔および電圧測定用電極(ステンレス製)と酸化還元電位測定用白金電極を設置し、pHと酸化還元電位は4~5日毎の通電停止時に測定し、電圧測定はデータロガー(Graphtec社GL800)で1分毎に行った。土壌pHの測定はpHメータ

Table 3 流量設定条件(カラム試験A)  
Flow discharge condition of experiment (Test A)

		平均	最大	最小
陽極	採水速度(mL/d)	108	129	56
	電極槽の滞留時間(d)	0.67	1.25	0.54
陰極	採水速度(mL/d)	213	305	126
	電極槽の滞留時間(d)	0.34	0.56	0.23

(HANNA社・土壌pHメータHI99121)を用い、酸化還元電位の測定は通電停止時に比較電極を陽極槽に設置し、白金電極との電位差をデータロガーで測定し安定後の数値を採用した。このとき、電位の安定には最長で6~8時間程度を要した。なお、比較電極を陽極槽に設置した場合と陰極槽に設置した場合を比較したところ、数値に多少の差は見られたものの得られた電位の相対的な傾向はほぼ同じであった。

両電極槽から採取された溶液は、主要重金属をICP-MS(PerkinElmer, ELAN DRC II)、その他無機イオンをイオンクロマトグラフ(DIONEX, DX320)で分析した。水質分析項目をTable 4に示す。また、土壌中の重金属含有量は、0.1M HCl抽出法によって評価した。0.1M HCl抽出法では100mL容のプラスチック製容器に風乾土10gと0.1M HCl 50mLを入れ、振とう器で1時間の水平振とうにより得られた抽出液の上澄みを採取し、定量濾紙(Advantec No.5B)で濾過した後、水溶液と同じくICP-MSで分析した。風乾土の調整にあたっては、ごく一部を除いて土壌水は土壌とともに乾燥されたため、土壌の分析値には溶存・吸着両成分が反映されている。供試土壌については、抽出液として0.1M HClに変えて1M HClを用いたものも合わせて分析した。

Table 4 水質分析項目  
Items of water quality analysis

分析項目	分析法
pH	pH計
Cd, Zn, Cu, Fe, Cr, Mn, Ni, As, Pb	誘導結合プラズマ質量分析
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Br <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	イオンクロマトグラフ

#### b 実験中および実験後の諸条件

##### ①通電状態の変化と消費電力

実験期間中の土壌内の電圧分布と電流の変化をFig.2に示す。印加電圧を50Vに上昇した1dより電流値は4mA前後まで上昇し、12.4dにおいて最大5.3mAをとりその後漸減した。また、電圧は、3~5dにおいて陽極槽から0~2.5cmの土壌部位において大きな電圧降下が見られたが、その後、5d以降は2.5~7.5cm、13d以降は7.5~12.5cm、22d以降は12.5~17.5cm、32d以降は17.5~22.5cm、49d以降は22.5~27.5cm、63d以降は27.5~30cmの部位で順次電圧降下量の増加が見られた。このように、当初、電圧降下が陽極近傍の土壌に偏っていたものが、時間とともに全体に均質化する傾向であった。

##### ②土壌および電極槽のpHと土壌ORP

土壌pHと酸化還元電位(ORP)の変化をFig.3に示す。土壌pHは当初、全体が6.1~6.4の範囲にあったが、

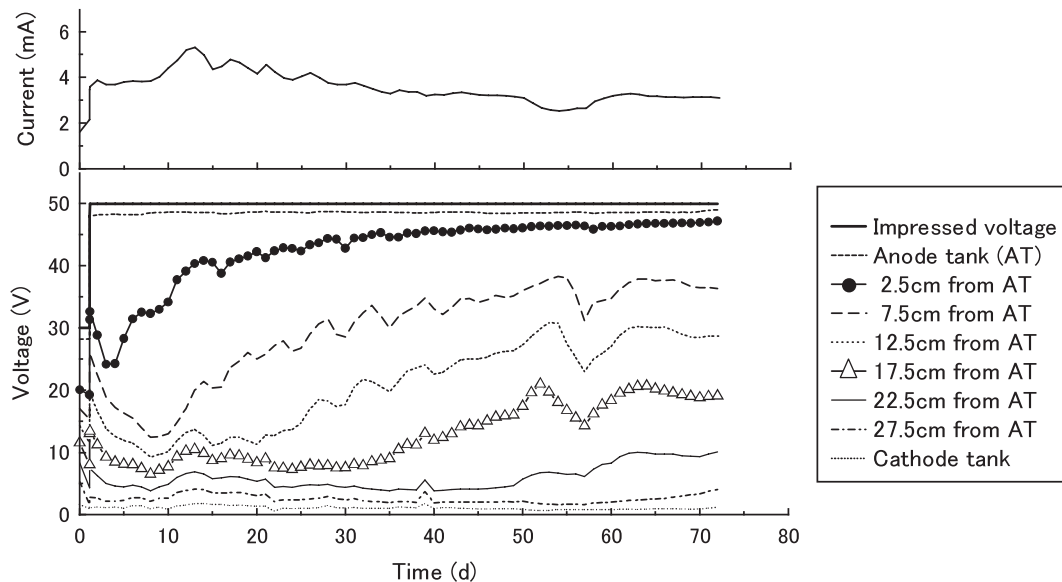


Fig.2 電流と電圧分布 (カラム試験1)  
Current and distribution of voltage

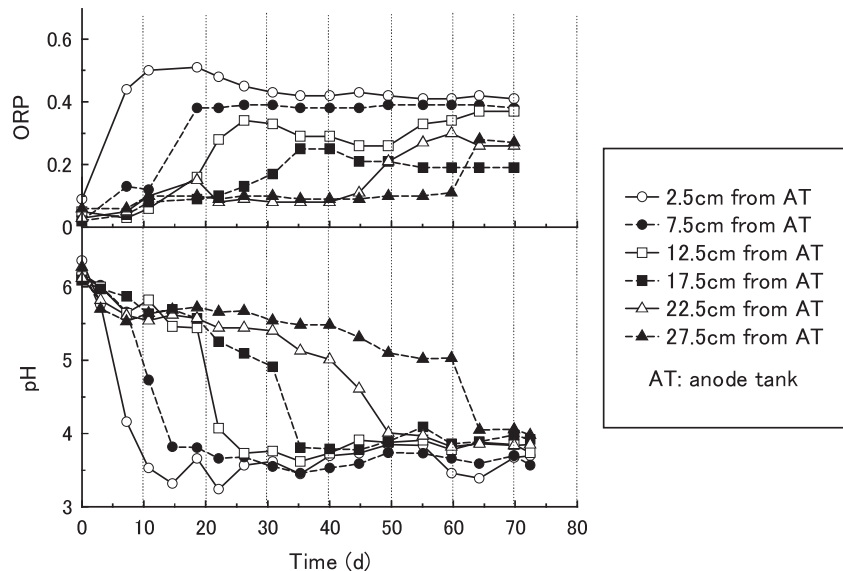


Fig.3 土壌カラムのORP (V) と pH 分布  
Distribution of ORP and pH along soil column

通電後は時間経過とともに陽極側から酸性化が進行し、陽極槽から 2.5cm の地点で 11d の時点で pH が 4 以下に低下し、順次、7.5cm で 14.6d、12.5cm で 26d、17.5cm で 35d、22.5cm で 55d、27.5cm で 72d の位置で pH が 4 以下に低下した。酸化還元電位も pH 低下と合わせて上昇する傾向が観察された。

なお、実験開始後の電極槽における pH は、陽極槽で概ね 1.9 ~ 2.4、陰極槽で 2.2 ~ 2.4 の範囲であった。

### c 重金属の除去特性

電極槽より回収された重金属の量から陽極と陰極に分けた重金属除去速度を Fig.4 に示す。始めに土壌中に比較的多く含まれる Mn、Fe と人工汚染物質として加えた Zn についてみる。陽極側からの Mn、Zn の回収はほとんどないが、Fe は 0.3 ~ 0.7mgd<sup>-1</sup> の範囲で回収された。

一方、陰極では、当初から Fe の回収が進むとともに 50d 以降 Mn の除去量が顕著に増加し 64d 前後で 7mgd<sup>-1</sup> にピークを迎え、その後減少している。Zn は実験開始後から 60d までは 0.1 ~ 0.2mgd<sup>-1</sup> と除去はほとんど進まなかったが、その後除去速度は急上昇し、試験終了時 (72d) には 11.7mgd<sup>-1</sup> まで上昇した。

これを供試土壌の 0.1M HCl 抽出量に対する積算除去率 (Fig.5) でみると、Fe は 50d 以降やや減速するが試験期間全般にわたって除去がすすみ、40 ~ 45d には、0.1M HCl 抽出量を上回る除去がなされており、0.1M HCl 抽出量を基準とした見かけの除去率 (以下では「除去率」と略す) は最終的に 164% に達した。同様に Mn は 50d 以降除去が加速し 72d には 196% となった。一方、Zn は 60d までは除去がほとんど進まず、60d 以降に急速に



除去率が伸び、実験終了時には75%に達した。

FeとMnについて0.1M HCl抽出量を大きく超える除去率が得られた理由としては、第一に、弱い酸(0.1M HCl)で抽出されない形態で存在するFeとMnの一部が溶出した可能性が考えられる。これは、両者ともに1M HCl抽出量が0.1M HCl抽出量と比べて数~数十倍(Table 2)多いことから容易に推察される。EK処理中の長時間にわたる強酸性下への曝露による溶出の影響である。

一方、Znは0.1M HCl抽出量と1M HCl抽出量を比較しても $349\text{mg kg}^{-1}$ と $394\text{mg kg}^{-1}$ と大差ない。そのため、Fig.4やFig.5にみられるZn除去の傾向から推察すると実験終了時におけるZn除去はまだ半ばであると判断されるが、もしこのまま実験を続けていたとしてもZnの積算除去率が100%を大きく超えるとは考えにくい。Figs.6(a)に実験後の土壤残留量の分布を示すが、Znでは、初期値と比べて土壤残留量は少なく、さらに多くが陰極槽近傍の25~30cmに集中している。従って、仮に実験期間を延長していた場合でも、Znの回収はFig.5のグラフのトレンドを踏襲して多少はZnの除去が進むが、陰極槽近傍に集まっていたZnが出てしまうと除去率は頭打ちとなると考えられる。Znの収支を検討すると、供試土壤の0.1M HCl抽出量 $135\text{mg}$ (100%)に対して除去されたZnが $100\text{mg}$ (75%)、土壤残留が $15\text{mg}$

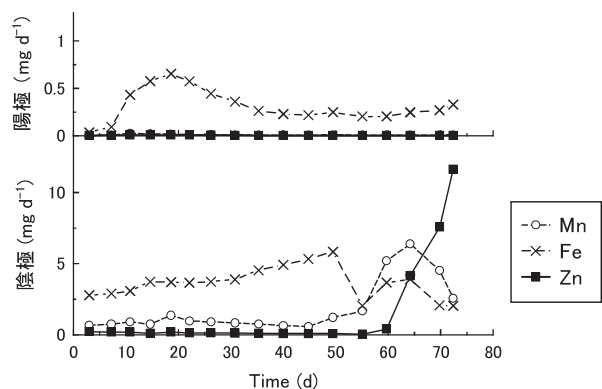


Fig.4 重金属除去速度 ( $\text{mg d}^{-1}$ )  
Removal rate of heavy metals

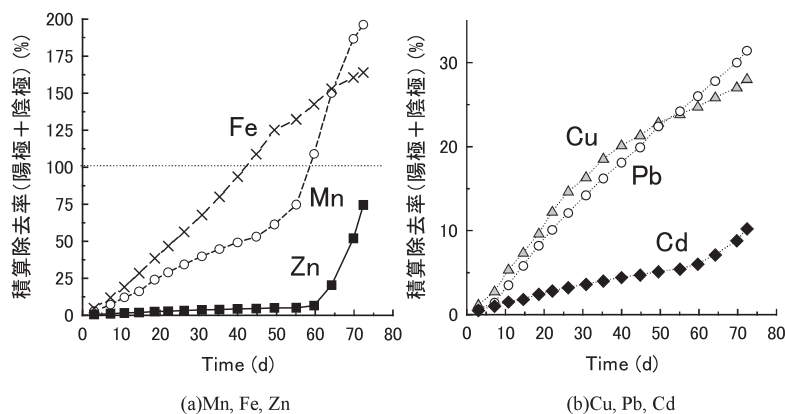


Fig.5 供試土壤の重金属0.1M HCl抽出量に対する積算除去率(%)

Ratio of amount of HMs cumulative removal to amount of the content of soil HMs (0.1M HCl extraction)

(11%), 不明分が $20\text{mg}$ (15%)である。

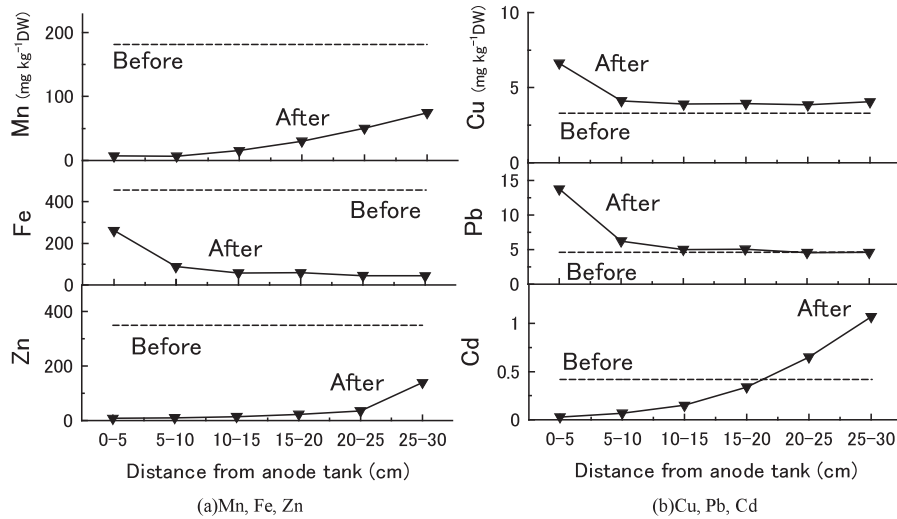
Figs.6の処理後土壌における残留重金属分布をみると、前述のZnと同様にMnも陰極側により多く残留している傾向がみられるが、Feは逆に陽極側の残留量が多い。この理由は明確にはわからないが、Feは陽極槽からの回収量も少なくないことから、負に帯電した錯イオン等の形態で土壌中を移動するFeも少なくないものと考えられる。

次に、CdおよびCu、Pbについてみる。Cdは、0.1M HCl抽出量が $0.42\text{mg kg}^{-1}$ (Table 2)と非汚染水田の平均値(浅見, 2001)である $0.265\text{mg kg}^{-1}$ と比べて顕著に高いわけではない。同様にCuとPbの酸抽出量は平均値と比べるとやや低い。これら供試土壌に比較的低濃度で含まれる成分について、実験後の0.1M HCl抽出量の分布(Figs.6(b))をみると、CuとPbは陽極側にやや多く存在するのに対して、Cdは陰極側に移動したことを窺わせる分布を持つ。特に陽極槽からの距離が0~15cmまでの土壌は明らかにCdが実験前の土壌と比べて低く、浄化が進んでいると判断される。また、陰極槽から溶液を通じて除去されたCdについても、Figs.5(b)をみると60dからややペースを高めており最終的に10%に達している。このことは、EK処理が、1ppm未満の低濃度Cd含有土壌に対して、ある程度有効であることを示している。一方、CuとPbでは除去は進んでいるものの(Figs.5(b))、残留量の分布(Figs.6(b))を見る限り0.1M HCl抽出量の低下はみられない。これについては、詳細なメカニズムはわからないが、FeやMnと同じく0.1M HCl抽出量に対して高い1M HCl抽出量が影響しているものと考えられる。

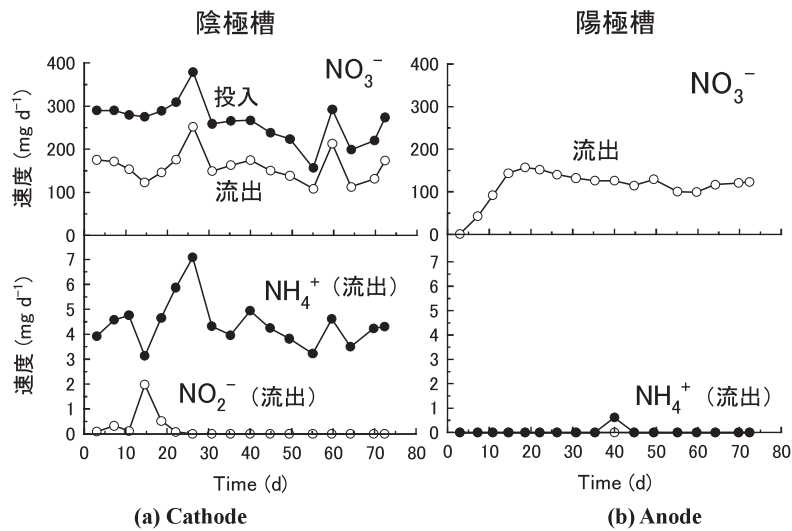
#### d 重金属以外の無機イオンの移動と除去

##### ①硝酸イオンのフロー

本実験では、陰極槽のpH調整のため硝酸を投入しているが、ここでは硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )の行方をみておく。Figs.7(a)に示すように陰極槽には $200\sim 300\text{mg d}^{-1}$ で $\text{NO}_3^-$ が投入されており、このうち約2/3は、陰極槽から採水によって直接除去される。また、陰極槽内の $\text{NO}_3^-$



**Figs.6** EK 処理後の土壌重金属 0.1M HCl 抽出量の分布  
Distribution of content of soil heavy metals before and after EK treatment (0.1M HCl extracted)



**Figs.7** 無機態窒素の投入・除去速度 ( $\text{mg d}^{-1}$ )  
Input and removal velocity of inorganic nitrogen

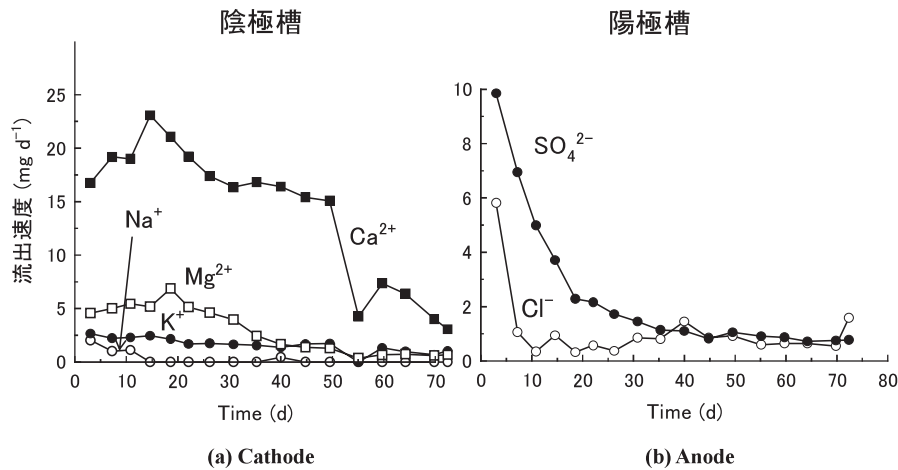
の一部は、槽内で亜硝酸イオン ( $\text{NO}_2^-$ ) やアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) に還元された可能性がある。特に  $\text{NH}_4^+$  は試験期間を通じて一定回収されている。陰極槽から回収された  $\text{NH}_4^+$  は土壌から  $\text{NH}_4^+$  として陰極槽に流出したのか、もしくは陰極槽内に投入された  $\text{NO}_3^-$  が槽中で還元されたものか、等については不明であり解釈に当たり注意を要する。

一方、陰極槽内に残された  $\text{NO}_3^-$  は電気移動で土壌中に入り込み、主に間隙水中を移動してやがて陽極槽に到達する。**Figs.7(b)** をみると試験開始後、7d には  $\text{NO}_3^-$  が陽極槽に到達しており、15d には  $144\text{mgd}^{-1}$  となりその後はほぼ安定している。窒素収支を算定すると全期間を通じて、 $\text{NO}_3^-$  投入量が  $4.51\text{g}$  に対して除去量が  $4.89\text{g}$  と 9% 除去量が多く、定常に達した 15d 以降でみると投入の  $3.65\text{g}$  に対して除去が  $4.21\text{g}$  と 15% 除去量が多い結果となった。いずれにせよ、実験終了時には土壌中に多くの

$\text{NO}_3^-$  が残留している。

## ②無機イオンの除去

土壌に含まれる主要な無機イオンの除去についてみたものが **Figs.8** である。土壌中の交換性塩基は地力の重要な構成要素であるが、EK 処理により、陰極槽に土壌中の陽イオンが集まり除去されてしまう。**Figs.8(a)** をみると陰極槽に塩基が集まり除去される状況が把握できる。まず、 $\text{Na}^+$  が速やかに減少し、次に  $\text{K}^+$  と  $\text{Mg}^{2+}$  が低下する。 $\text{Ca}^{2+}$  は当初  $15 \sim 23\text{mgd}^{-1}$  と高い除去速度を維持するが、50d を超えると急激に減少しその後  $3\text{mgd}^{-1}$  まで低下する。ところで  $\text{Mg}^{2+}$  は最大  $6.9\text{mgd}^{-1}$  から  $0.6\text{mgd}^{-1}$  まで低下するが、 $\text{K}^+$  は  $2.2 \sim 2.5\text{mgd}^{-1}$  から  $0.7 \sim 1.0\text{mgd}^{-1}$  まで低下するに過ぎない。**Table 1** では確認されないが、県農試における聞き取り調査によると採取された地域の土壌には 2:1 型粘土鉱物が多く含まれているとのことであり、これによる  $\text{K}^+$  の特異吸着が緩慢な流出に影響し



**Figs.8** 主要無機イオンの除去速度 (mg d<sup>-1</sup>)  
Removal velocity of major ions

**Table 5** 無機イオンの乾土 1kg 当たりの積算除去量  
(カラム試験 1)

Total amount of removal quantity of inorganic ions (unit: cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)

	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
除去量	陽極槽	0.52	0.43	0.03	0.27	0
	陰極槽	0.08	0	0.18	0.73	2.2
	合計	0.60	0.43	0.21	1.0	2.2
投入量	0.68*					
供試土壌の交換性塩基 (1M酢安抽出)				0.64	2.62	7.72
除去率 (%)				(156)	84	84

(cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)

\* ZnSO<sub>4</sub>

ている可能性がある。

**Figs.8(b)** は陽極槽を通じた無機イオンの除去速度を示している。ここで回収された Cl<sup>-</sup> は、供試土壌由来の他に、実験開始当初に添加した NaCl に由来すると思われる。また、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> も土壌由来の他、土壌中に混入した ZnSO<sub>4</sub> に由来するものと考えられる。**Table 5** に無機イオンの単位積算除去量を示す。

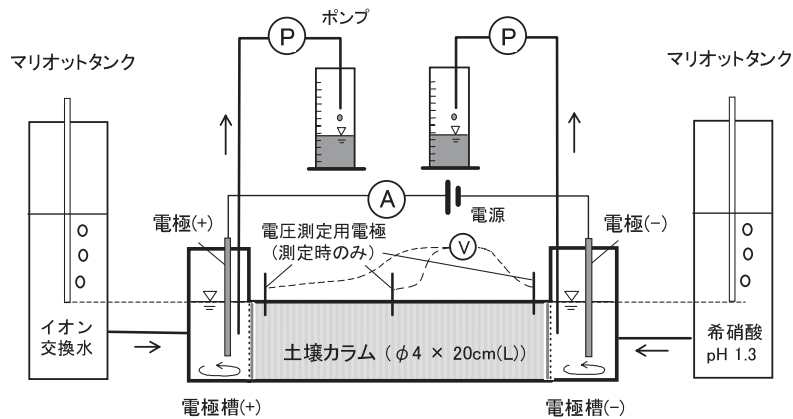
## 2 カラム試験 2 (土壌 B)

### a 実験方法

土壌 B を対象として、**Fig.9** に示すカラム実験装置を用いて動電学的浄化試験を行った。供試土壌は内径 4cm、長さ 20cm のアクリル製カラムに充填し (0.96gcm<sup>-3</sup>)、両端を濾紙とテフロンメッシュで拘束した。実験装置はカラム試験 1 と共通する点が多いので相違点を中心に述べる。

まず、陰極槽の pH 調整用の希硝酸は pH1.3 とし、陽極側のイオン交換水の補給と同様にマリオットタンクで供給した。ポンプの流量設定条件を **Table 6** に示すが、電極液の平均滞留時間は陽極で 0.51 日、陰極で 0.34 日であった。

実験に先立って両電極槽にイオン交換水を注入し土壌カラムの両端から試料を飽和させた。その際、カラム上部に空けた小孔を空気抜きとした。その後、実験開始直前に実験初期の通電性を確保するために陽極槽のイオン交換水を pH1.3 の希硝酸に置換したのちに実験を開始した。当初は印加電圧を約 30V とし、通電状況を確認しながら、試験開始後 24 時間後から電流を 10mA (8.0Am<sup>2</sup>)



**Fig.9** 実験装置 (カラム試験 2)  
Schematic diagram of laboratory setup

**Table 6** 流量設定条件 (カラム試験2)  
Flow discharge condition of experiment

カラム試験2の流量設定			
陽極	①平均採水速度 0~2 d (=day) (mL/d)	22	
	2~33d (mL/d)	138	
	②電極槽の平均滞留時間 (d)	0.51	
	③イオン交換水の給水量 (2~33d) (L)	4.27	
	④ポンプ採水量 (2~33d) (L)	4.28	
⑤ (=③-④) (L)	-0.01		
陰極	⑥平均採水速度 (mL/d)	206	
	⑦電極槽の平均滞留時間 (d)	0.34	
	⑧希硝酸 (pH1.3) の給水量 (2~33d) (L)	6.48	
	⑨ポンプ採水量 (2~33d) (L)	6.20	
⑩ (=⑧-⑨) (L)	0.28		
⑪陽・陰極槽間の水収支の差 (=⑩-⑤) (L)	0.29		

に調整し、その後試験終了まで定電流条件で通電した。なお、その間の印加電圧は自動制御とした。実験開始後3日目より陰極側の電極層内に浮遊物の発生が見られたため、両極の電極槽に攪拌機を設置してタイマーを用いて一定時間毎に攪拌した。実験は20℃に設定した恒温室内で実施した。

水質分析項目はTable 4の項目に加えて本実験ではEC(電気伝導度)を測定した。

通電試験は、電極液流出水の電気伝導度や土壌の電圧勾配を監視しながら変化が概ね落ち着いた33日目で終了した。

#### b 実験中および実験後の諸条件

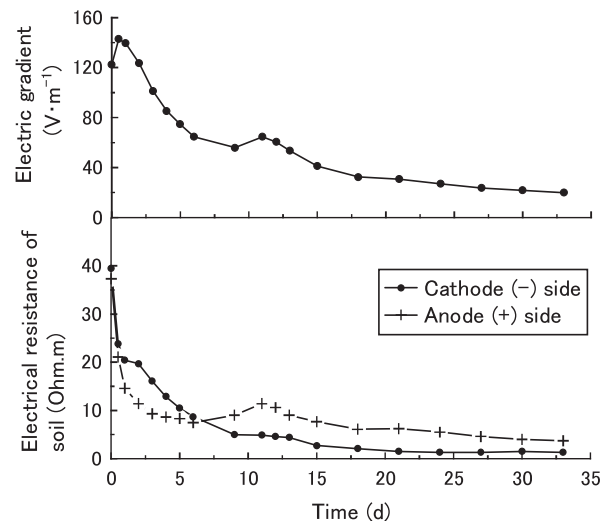
##### ①通電状態と電圧勾配・消費電力

実験期間中の土壌内の電圧勾配と比抵抗の変化をFig.10に示す。電圧勾配は実験初期に120~140V $m^{-1}$ であったが、2dからは漸減し、10dから11dにかけて一旦上昇したが、13d以降実験終了まで再度漸減した。これは当初導電性に強く影響する溶存イオンが少なく電圧勾配が大きかったものが、通電によって電極槽で発生したH<sup>+</sup>やOH<sup>-</sup>による直接・間接の影響および陰極槽に供給されたNO<sub>3</sub><sup>-</sup>が電圧勾配下で土壌カラムに入り、導電性が向上したためと考えられる。

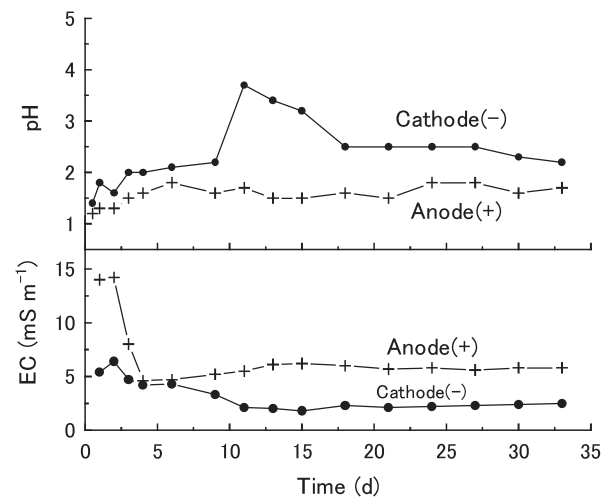
土壌比抵抗も試験期間を通じて電圧勾配と似た変動傾向を示すが、陰極側と陽極側で分けてみると、試験前半の1~6dで陰極側の比抵抗が高く、その後逆転して7d以降は陽極側で高くなる傾向がみられた。

##### ②電極槽流出水のpHとEC

Fig.11に電極槽流出水のpHとECを示す。pHは陽極では水の電気分解により生じるH<sup>+</sup>により酸性を呈し、陰極は電極より発生するOH<sup>-</sup>によりアルカリ性になる



**Fig.10** 電圧勾配と比抵抗(陰極側および陽極側)の変化  
Temporal change of electric gradient and resistance



**Fig.11** 電極液流出水のpHとECの変化  
Temporal change of pH and EC

が、実験では希硝酸を加え酸性に調整している。

両電極槽における平衡pHについて検討する。まず陽極において、水の電気分解によるH<sup>+</sup>の生成速度 $c$ は(2)式において、電流が10mAであることから、 $c = 10 \text{ (mA)} = 0.01 \text{ (C s}^{-1}\text{)} = 0.01 \times (6.24 \times 10^{18}) / (6.02 \times 10^{23}) \text{ (mol s}^{-1}\text{)} = 0.373 \text{ (mmol h}^{-1}\text{)}$ となる。

このときの電極液の交換速度は、 $q = 5.75 \text{ (ml h}^{-1}\text{)}$ であるから、 $[\text{H}^+] = c/q = 0.065 \text{ (mol L}^{-1}\text{)}$ となり、土壌カラムとのH<sup>+</sup>やOH<sup>-</sup>の出入りを無視し、槽内の完全混合を仮定すれば、電極槽の平衡時のpHは1.19となる。Fig.11をみると、陽極側のpHは1.3~1.8とやや平衡値より高い。これは、H<sup>+</sup>の土壌カラムへの移動やOH<sup>-</sup>の陽電極槽への移動/溶出が要因として考えられる。一方、陰極における希硝酸によるH<sup>+</sup>の添加速度は0.433 mmol h<sup>-1</sup>である。陰極側におけるOH<sup>-</sup>の生成速度は陽電極のH<sup>+</sup>と同様に0.373 mmol h<sup>-1</sup>であるから、差し引きのH<sup>+</sup>の残存量は0.060 mmol h<sup>-1</sup>となる。従って、電



極液の交換速度 (8.58ml h<sup>-1</sup>) を考慮すると、平衡濃度は 0.00699 mol L<sup>-1</sup> (= pH:2.16) となる。

pHの実測値は、陰極側では開始当初の2前後から5d以降に3前後となり、11dには4を超えて最大値をとり、その後漸減し、2.0~2.2となった。以上から、実験初期と終盤では実験装置の平衡pHと大差ないが、中盤では土壌から電極槽へのOH<sup>-</sup>等の移動によりpHに変動が生じていることが推察される。

また、ECについては試験開始後3dまで変化が大きい。4d以降は比較的安定する。陰極側で8d以降にやや減少するのに対して、陽極側では15d頃をピークとしたなだらかな上昇が見られる。

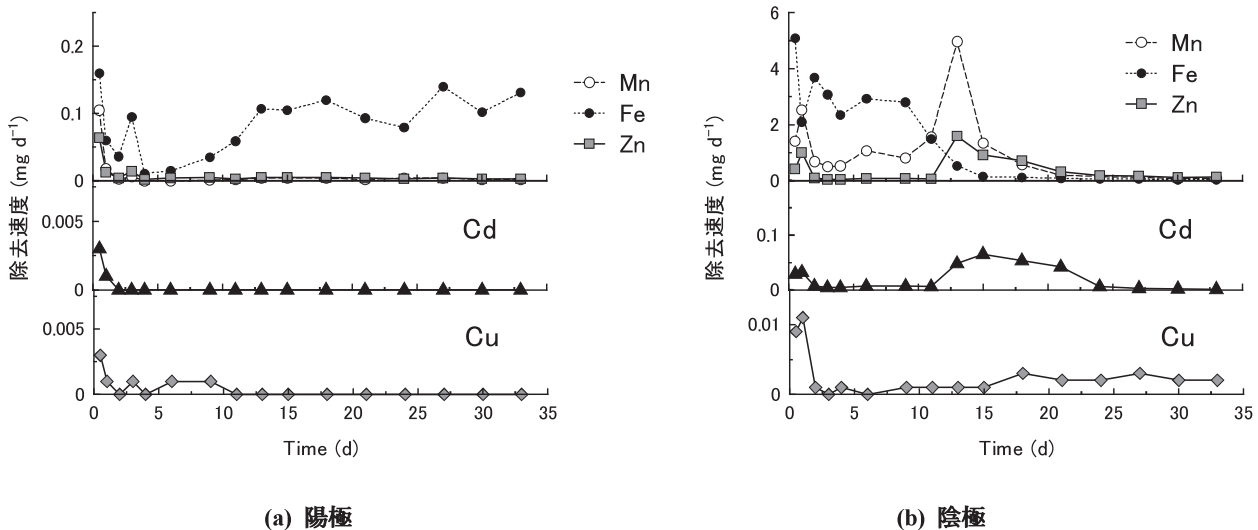
c 重金属の除去特性

**Figs.12** に電極槽別の重金属除去速度の時間変化を示す。

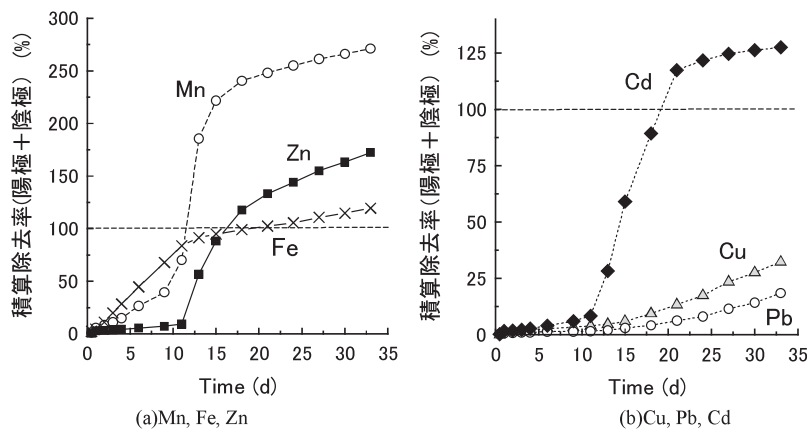
重金属は主に陰極槽から回収された (**Figs.12**)。陰極槽の除去速度をみると、ピークはFeで実験初期から9dにかけて、MnとZnは13d、Cdは15dにあり、実験初期からFe、Mn、Zn、Cd、Cuの順で除去が進行している

ことがわかる。Cuは15d以降から除去速度が極めてなだらかに上昇し、試験終了時においても除去が進んでいることが観察された。陰極槽から回収された重金属は、積算除去量でみるとMn 150mg、Fe 110mg、Zn 75mg、Cd 4.0mgの順で、9項目の合計は340mgであったのに対し、陽極槽は、Fe 22mg、Zn 0.9mg、Mn 0.7mgと続き合計は24mgであり、重金属の積算除去量 (366mg) に対する陰極槽からの除去割合は94%であった。

**Figs.13** に供試土壌の重金属0.1M HCl抽出量に対する積算除去率を示す。これをみると、Mnは11~13dに100%を超過して実験終了時 (33d) には270%に達している。Feは20d前後に100%を超えて33dに120%に、Znは15~18dに100%を超えて33dには173%に達した。このように、電極槽から回収された重金属量を用いて除去率を評価すると多くの項目で100%を超えてしまう。これはカラム試験1の重金属の除去特性でもみたように、通常の0.1M HClによる抽出処理では抽出されない画分を含めて除去されている影響と考えられる。同様にCdは、11d以降に積算除去率の上昇が著しく18~



**Figs.12** 重金属除去速度の時間変化 (カラム試験2)  
Temporal change of removal ratio of heavy metal components



**Figs.13** 供試土壌の重金属0.1M HCl抽出量に対する積算除去率 (カラム試験2)  
Ratio of amount of HMs cumulative removal to amount of the content of soil HMs (0.1M HCl extraction)

21d にかけて 100% を超えて最終的に 128% に達したが、Pb と Cu は 33d においても 19% と 32% に留まった。

また、処理後の土壌カラム内における平均の Cd の 0.1M HCl 抽出量は  $0.4\text{mgkg}^{-1}$  であったが、供試土壌が  $13.2\text{mgkg}^{-1}$  であったことから、土壌抽出量ベースの除去率は 97% に達した。一方、Zn では供試土壌の  $183\text{mgkg}^{-1}$  から  $55\text{mgkg}^{-1}$  に低下し除去率は 70% であった。

#### d 重金属以外の無機イオンの移動と除去

調べた実験系において重金属以外の無機イオンは、①土壌にもともと含まれていたもの、②陰極に投入した  $\text{HNO}_3$  に由来するもの、③実験開始直前に陽極槽に投入した  $\text{HNO}_3$  に由来するもののどれかである。回収した試料より得られた無機イオンの積算値 (Table 7) は、それぞれに由来する無機イオンの動態を示している。なお、ここで注意しなければならないことは、分析サンプルは電極槽から時間をかけて流出した電極液を採取・分析していることである。そのため表の値は土壌からの流出成分を表しているのではなく、電極槽内で生じる化学反応

Table 7 無機イオンの乾土 1kg 当たりの積算除去量 (カラム試験 2)

Total amount of removal quantity of inorganic ions (unit: $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )					
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	
除去量	陽極槽	0	0.02	0.09	0.12
	陰極槽	0.51	0.93	2.9	5.4
	合計	0.51	0.95	3.0	5.5
供試土壌の交換性陽イオン (1M酢安抽出)		1.23	4.73	12.4	
除去率 (%)		77	63	45	

単位:  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

やその後の採水期間の影響をも反映している。前述のように結果の解釈には注意を要する。

Table 7 からカラム試験 1 と同様に陰極槽を通じて K, Mg, Ca などの交換性塩基が除去されていることが確認された。電極液を通じて回収された塩基量と供試土壌の塩基量 (1M 酢酸アンモニウム抽出) から溶脱率を算定すると、 $\text{K}^+$  で 77%,  $\text{Mg}^{2+}$  で 63%,  $\text{Ca}^{2+}$  で 45% であった。

## IV 水田型 EK 試験

### 1 実験方法

カラム試験に続いて、水田への適用を想定した水平電極配置をもつ水田型 EK 試験器 (Fig.14) を試作し、供試土壌 A を充填して実験を行った。本実験の目的は、試験をカラム試験より規模を大きくするとともに、水田への適用を念頭においた水平電極配置構造を採用した室内試験で、EK 法の適用を試みることである。

試験器はアクリル製で、土壌槽の容積は 45L (横 150cm, 高さ 30cm, 幅 10cm) とし、土壌槽上部の湛水中に陽電極、暗渠を模した陰極槽中に陰電極を設置した。土壌槽と陰極槽の仕切りは、アクリル製とし一定間隔で小孔を開けたスノコ状の板とその上に敷いた定性濾紙 (Advantec No.2) によって行った。また、陰電極の直上に陰極槽内で発生するガス (主に水素ガス) を集める塩ビ製ガイドを設置し、それにより集められたガスを装置外に排出するためのガス抜き孔を設置した。

陰極槽内には電極液を中和し酸性を保持する pH 調整を目的として、クエン酸水溶液 ( $1\text{molL}^{-1}$ ) を定量ポンプにより連続的またはタイマー制御によって間欠的に投入した ( $\text{Q}_2$ )。クエン酸の投入速度は、陰極槽内の pH を概ね 3 以下に保つよう、陰極槽内の pH 値を参照

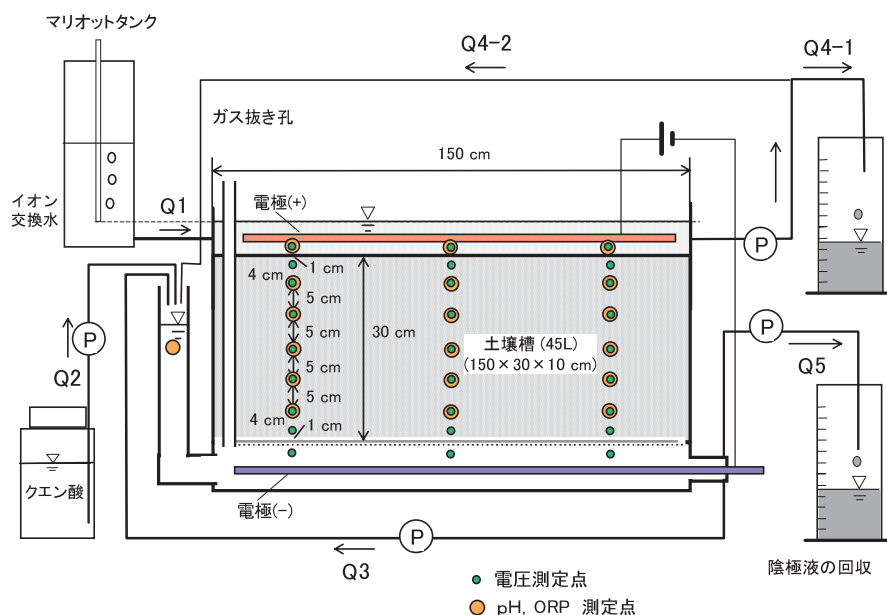


Fig.14 実験装置

Schematic diagram of laboratory setup

しながら必要に応じて調節した。また、陰極液を混合し陰極槽内の中和反応を促進して、沈殿の発生を減じるため、定量ポンプを用いて陰極液を循環 ( $Q_3$ ) させた。電極液の回収は陽極槽 ( $Q_{4,1}=0.73\text{Ld}^{-1}$ , 平均), 陰極槽 ( $Q_5=2.27\text{Ld}^{-1}$ , 平均) とした。

試験器への土壌充填は以下の要領で行った。まず、厚さ 2.5cm 毎に土壌を敷き詰めた後、直径約 5cm の塩ビ製の棒でおよそ 2kgw の力で土壌面全体をまんべんなく約 90 回突き、その後ブラシで表面を荒らして、次層の土壌を投入した。その後、同様の手順を繰り返し、合わせて 12 層を積み重ねて厚さ 30cm の土壌槽を充填した。土壌の充填密度は  $1.04\text{gcm}^{-3}$  であった。土壌は下部よりイオン交換水を供給して毛管飽和させた。土壌槽の側面には Fig.14 に示すように片面に電圧測定電極を配置し (9 本  $\times$  3 列), 裏面には直径 13mm の観測孔 (5 個  $\times$  3 列) を設け pH の測定に供した。

同じ供試土壌を用いたカラム試験 1 との実験上の主な相違点は、①地表面 (陽極槽) から暗渠 (陰極槽) に向けた鉛直浸透 (平均  $15.0\text{mmd}^{-1}$ ) が生じるよう流量設定を行ったこと、②陰極槽の pH 調整に硝酸ではなくクエン酸を使用したこと、③陰極槽内の電極液をポンプで循環させたこと、である。

通電期間は 24 日間とした。実験は屋内実験施設内で実施したが、実験中の温度環境は気温変動等の影響を受け、概ね  $15 \sim 22^\circ\text{C}$  の範囲で変動した。

通電終了後、土層を深さ 5cm 毎に採取し、風乾させた後、0.1M HCl 抽出により重金属含量の評価を行った。なお、土壌を採取する際には、電極液を排水してから行ったため、土壌中の自由水は下方に移動し、それに伴って溶存成分の一部も移動した可能性がある。また、風乾土の調整にあたっては、土壌水は土壌とともに乾燥されたため、土壌の分析値には溶存・吸着両成分が反映されている。

## 2 結果

### a 実験中の諸条件

実験期間中の土壌内の電圧分布と電流の変化を Fig.15 に示す。電圧分布の経時変化は同じ供試土壌を用いたカラム試験 1 で得られた電圧分布 (Fig.2) における 15 ~ 20 日目までの結果との類似性がみられる。一方、相違点としては、陰極槽と土壌の接面における電圧降下量 (電気抵抗) である。Fig.2 をみると、陰極槽と土壌間の電圧降下 (27.5cm from anode tank ~ cathode tank 間) は数 V に過ぎないが、Fig.15 における電圧降下 (29cm from anode tank ~ cathode tank 間) は、全般に 10V を上回っている。カラム試験 1 の装置との比較から、これには試験装置の構造に関係し、土壌と電極液の間の接触性が、水田型 EK 試験器でやや劣っていたことが原因の一つであると推察された。本実験装置では、土壌槽と陰極槽の仕切りに用いたスノコ板の開口率の増加と、開口率の不足を緩和するための構造的な工夫が課題であろう。このように、対象元素の移動以外に消費される電力を減らすことは、EK 法の施工時のコストや処理時間に直結するので、EK 技術の実用化を図る際には重要な検討課題のひとつになる。

### b 重金属の移動

試験後の土壌中の 0.1M HCl 抽出量の測定から得られた、EK 法による重金属の移動について Figs.16 に示す。ここでは、カラム試験 1 で主に検討した Mn, Fe, Zn に加えて、分析を行った 9 種類の重金属成分について実験前後における重金属の深さ方向の変化を示した。グラフ中に縦線で示された変動範囲は、試験後の土壌を深さ毎に 3 等分し、それぞれについて重金属 0.1M HCl 抽出量の最大および最小値の範囲を示している。なお、最上部の土層 (0 ~ 5cm) は分割せずに測定したため、値のばらつきは示されていない。また、Figs.16(j) に土壌 pH (KCl 抽出) の分布を示した。

まず、土壌 pH は通電前に 5.4 であったが、通電後は

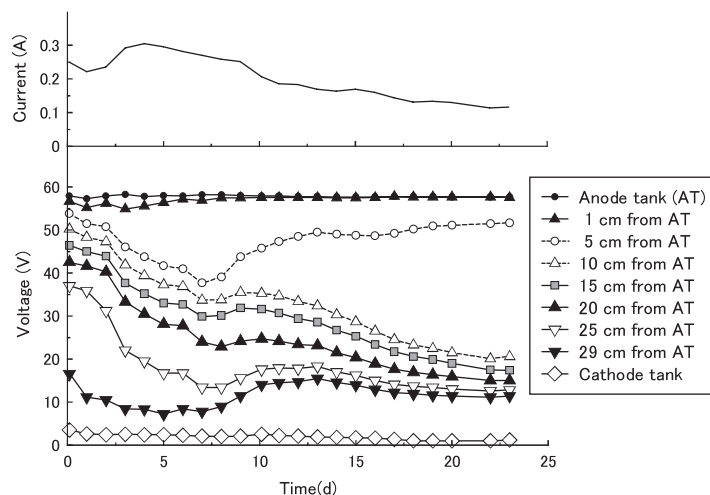
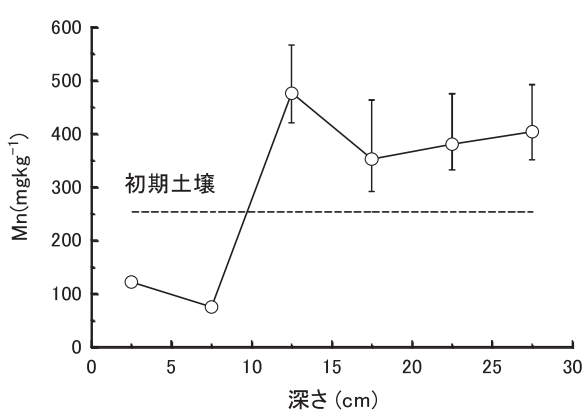
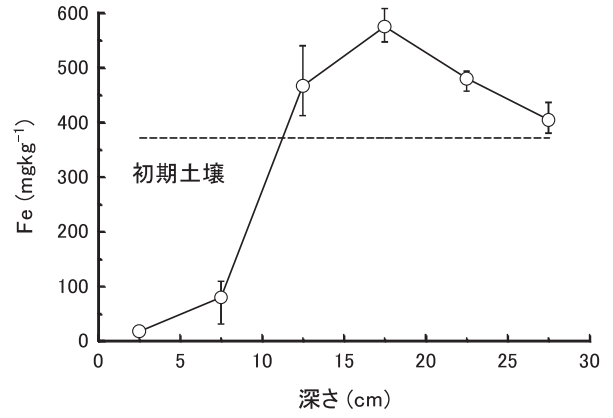


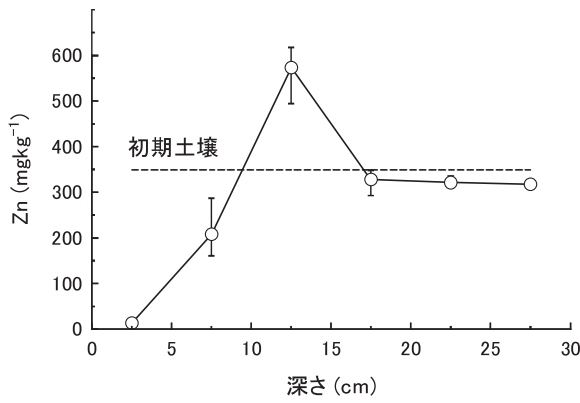
Fig.15 電流と電圧分布 (水田型 EK 試験)  
Current and distribution of voltage



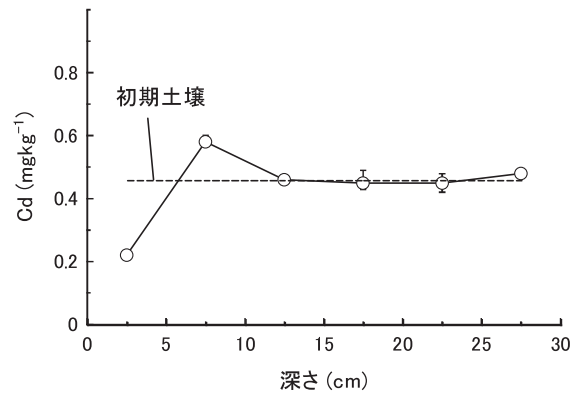
(a) Mn



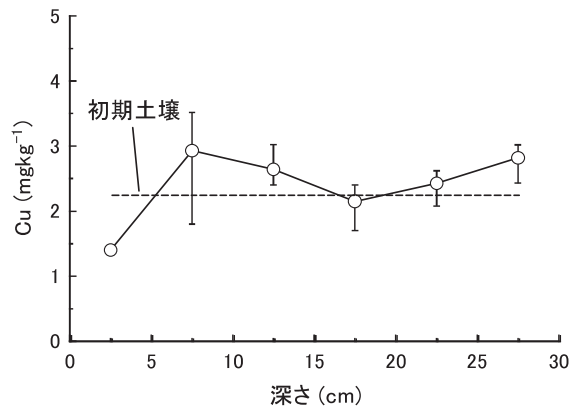
(b) Fe



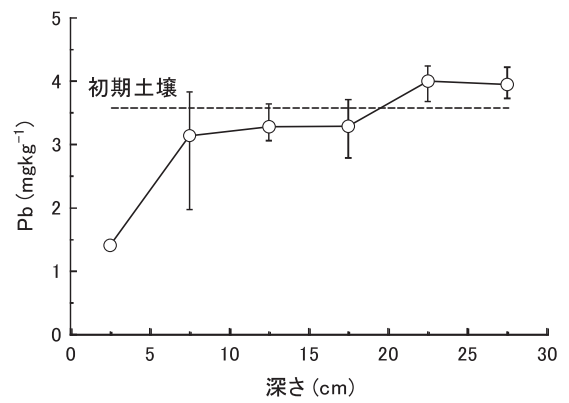
(c) Zn



(d) Cd



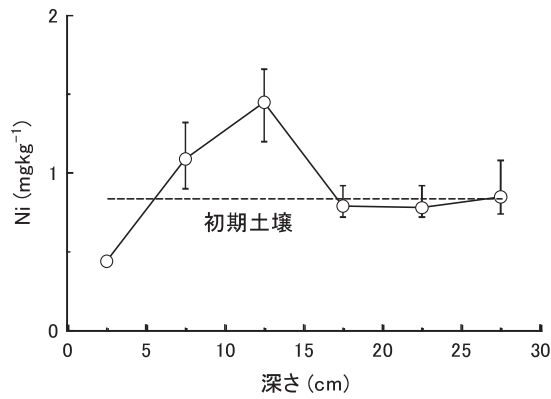
(e) Cu



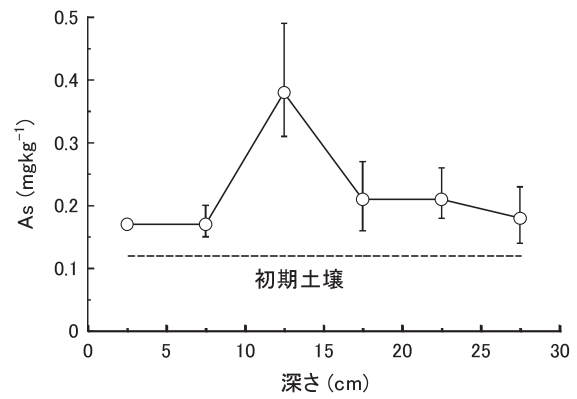
(f) Pb

**Figs.16** 水田型 EK 試験による重金属の移動  
Distribution of heavy metals before and after the EK treatment

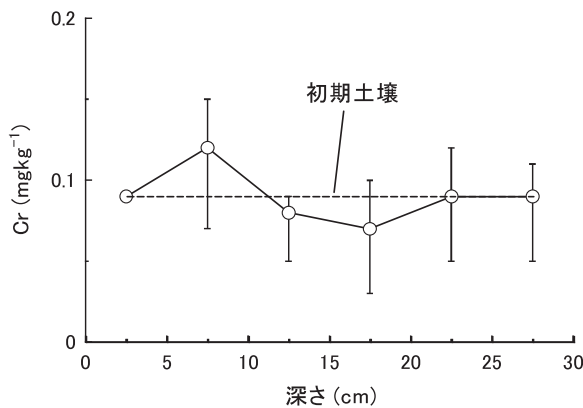




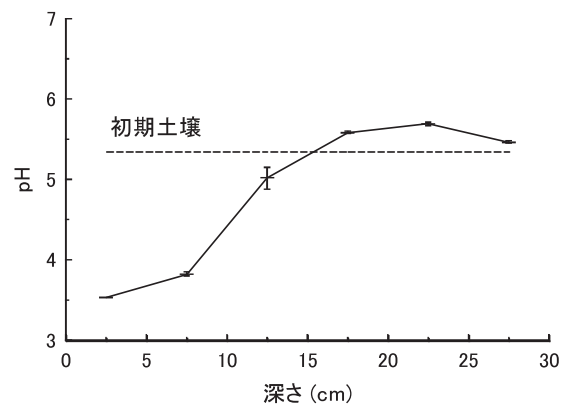
(g) Ni



(h) As



(i) Cr



(j) 土壌 pH(KCl 抽出)

Figs.16 水田型 EK 試験による重金属の移動 (続き)

Distribution of heavy metals before and after the EK treatment (continued)

0～10cmの範囲で pH4 以下に低下し、10～15cmでは 5.0 となった (Figs.16(j))。また、20cm 以深は 5.5～5.7 となり通電前と比べるとやや増加した。次に、Mn と Fe および Zn についてみる。Mn は深さ 0～10cm までの層で浄化が進み 10～30cm までで Mn の増加がみられた。また、Mn の 0.1M HCl 抽出量は場所によるばらつきが大きいことがわかる。Fe も 0～10cm で Fe 含量が初期土壌と比較して大きく低下し、その下部に位置する 10～30cm の層で増加した。場所によるばらつきは Mn より小さい。Zn は 0～10cm で 0.1M HCl 抽出量が減少したが、このうち 5～10cm では Mn や Fe ほどの低下はみられず、また、その次層である 10～15cm の層で 0.1M HCl 抽出量が大きく増加した。さらにその下位の 15～30cm では初期土壌とほとんど変わらないことがわかった。このように土壌 pH が 4 以下に低下した領域で、Mn、Fe、Zn の低下がみられた。

Cd は 0～5cm で 0.1M HCl 抽出量が低下し、次層である 5～10cm に集積した。それらの下位の 10～30cm では 0.1M HCl 抽出量の変化はみられなかった。土壌 pH は 0～5cm の層で 3.5、5～10cm の層で 3.8 であったが、状況を見る限り、pH3.5 の領域でイオン化して除去が進

んだが、pH3.8 の次層に集積している結果が得られた。

以上のように、Fe、Mn、Zn、Cd の土壌断面中の分布の比較から、EK 法による物質別の移動順序に着目すると、カラム試験 1 で得られた傾向 (Fe>Mn>Zn>Cd) と一致する結果が得られた。

また、Cu、Pb、Ni は 0～5cm の 0.1M HCl 抽出量において若干の減少が認められたが、Cr については EK 処理による明確な傾向はみられず、As では 0.1M HCl 抽出量がやや増加する傾向がみられた。

なお、本実験では、鉛直浸透を生じさせたが、比較試験を行っていないため鉛直浸透の効果を見ることができなかった。鉛直浸透に期待される効果は、①陽極側からの H<sup>+</sup> の供給促進による陽イオン交換の促進と②移流による移動促進、さらに③地表面からの酸素供給の促進による酸化領域の拡大、などがある。鉛直浸透の制御によるこれら効果の検証については今後の課題としたい。

## V 考察

本研究では、実際の農地土壌を用いて EK 法による重金属浄化試験を行った。

カラム試験1では、約 $0.4\text{mgkg}^{-1}$ のCd濃度を有し、 $\text{ZnSO}_4$  (Znとして約 $350\text{mgkg}^{-1}$ )が添加された人工汚染土壌(土壌A)を対象に、カラム試験2では、約 $13\text{mgkg}^{-1}$ のCd汚染土壌(土壌B)を対象として、重金属の除去特性を調べた。その結果、EK法がCdとZnについて、実際の水田土壌において有効に働くことが明らかになった。特にカラム試験1では、比較的高濃度で含まれるZnだけでなく、 $1\text{mgkg}^{-1}$ 以下の低濃度Cdに対してもEK処理によりCdが除去される可能性が示された。

ここで先行研究との比較を行いたい。新苗ら(2001b)は、1:1粘土鉱物であるカオリナイトと硝酸カドミウムを用いて作成したCd汚染土壌に対して、一定の印加電圧の下で陰極槽のpHを中性付近に保持する条件でカラム試験を実施した。電極液には硝酸ナトリウム溶液を用いるとともに希硝酸により陰極液のpHを7に保つよう制御している。その結果、土壌pHは当初4.5であったものがカラム全域で2前後まで低下し、土壌中のCdは336時間後には土壌中からほぼ除去されたことを報告している。この試験ではカラムに $100\text{Vm}^{-1}$ を印加し、これにより14日後にはCdが陰極側にほぼ全量が除去されているが、本研究のカラム試験のうち、比較的速度やかにCdが除去された土壌Bの試験では、印加電圧が $30\sim 120\text{Vm}^{-1}$ でCdがほぼ除去される(除去率97%)までに20日以上時間を要している。また、土壌Aの試験では、試料長が30cmと長いものの $166\text{Vm}^{-1}$ を印加し、72日間の時点においてもCdを土壌カラムから取り去るには至っていない(除去率10%)。土壌Bについては、厳密な比較は難しいものの、新苗ら(2001b)と比較すると土壌Aについては明らかに本実験の方が処理に時間を要している。

この要因としては、単一の粘土鉱物ではなく、実際の農地土壌を対象とした場合、酸化鉄鉱物や有機物、アロフェン質火山灰などが持つ吸着サイトの存在や、土壌中に共存する多量の陽イオンまたは陽イオンに変わりうる物質の存在が影響していると考えられる。共存物質の影響としては、本研究からCdを除去対象物質とした場合、Fe、Mn、Znが先行して除去されることがわかった。そのため、FeやMnの含有量の大小が、浄化時間に影響を与える可能性が指摘される。

また、川地(2006)は実汚染土を用いたカラム通電試験を実施している。その際、陰極部のアルカリ化を防ぐため木酢液の連続滴下により中和した条件で、土壌中のCdを土壌表層に集めることに成功している。本研究の2つのカラム試験では、陰極槽に希硝酸を投入して酸性条件に保つことで、土壌内のZn(カラム試験1)およびCd(カラム試験2)の過半を土壌内の一部に集めるだけでなく土壌全域から除去することができた。さらに、Fe、Mn等他の共存する重金属元素や交換性塩基の動態について追跡したことが本研究の特徴といえる。

前述のように、土壌中に共存する重金属元素の除去の

順序は、最初にFeが除去され、それに引き続いてMn、Zn、Cdが順に除去される。また、CuやPb、Niは上述の4項目よりさらに浄化に時間を要する結果であった。このようにEK法による重金属の除去には元素の違いによる選択性が確認された。

ところが、そもそもEK法の主要な駆動力の一つである電気泳動によるイオンの移動性には大差がない。イオンの電気泳動移動度(例えば、和田・中川, 2002)は $\text{Cd}^{2+}$ が $7.36 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{Vs})$ であるのに対して $\text{Cu}^{2+}$ で $5.80 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{Vs})$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ が $5.60 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{Vs})$ など、 $\text{H}^+$ を除くと差は小さい。戸上ら(2005)によれば、微量重金属の移動性は、酸化・還元、硫化水素の存在、pH、および鉄酸化物に大きく影響される。EKによる実際の土壌中における重金属の移動には、重金属の存在形態や吸着サイトの特性が影響しているものと考えられる。土壌中の酸化鉄鉱物等による重金属イオンの吸着はpHに依存しており、例えばCuとZnを比較するとZnは比較的高いpHで吸着率が低下するのに対して、CuではpHがより低く下がらないと吸着率が低下しない(McKenzie, 1980)。そのため、pHの低下に従ってZnが先にイオン化して移動を開始し、CuはよりpHが低下した状態でイオン化し移動を始めるものと考えられる。EK法では、陽極側から徐々に酸性化と酸化が進行するため、土壌の位置によって異なる反応が生じていることが推察される。

## VI 結 言

本報では、重金属汚染農地対策の一環として、動電学的土壌浄化手法の農地土壌への適用性について、2種類の水田土壌を供試土壌としたカラム試験と、新たに考案した水田型EK試験により検討した。結果をまとめると次の通りである。

- i) CdやZnによる重金属汚染がみられる2種類の水田土壌に対して、高濃度(Znで数 $100\text{mgkg}^{-1}$ )から低濃度(Cdで $0.4\sim 13\text{mgkg}^{-1}$ )の範囲でEK処理が有効に働く可能性が示された。
- ii) EK処理による重金属の移動の順序は、 $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cd}$ であった。そのため、Cdの浄化を計画する場合、土壌中のFeやMn、Znの含量がCdの浄化効率やEKの処理時間等に影響することが推察された。
- iii) CuやPb、NiはZnやCdより浄化効率が悪いことが予想され、CrとAsについては明確な効果はみられなかった。
- iv) EK処理により土壌pHの顕著な低下が進行するとともに、CaやMg、Kなどの交換性塩基が失われることがわかった。

以上のように、本研究によりEK法の適用にあたって当初懸念されていた農地の重金属汚染の特殊性、すなわ

ち低濃度汚染に対しても有効に働く可能性が示された反面、処理後の土壌のpH矯正や交換性塩基量の回復等の土壌改良が課題となることが明らかになった。その他にも、実用化を念頭におくと解決すべき問題は少なくない。実用化のための課題を整理すると、①亀裂など構造のある土壌や土層構造に対する適用性などに関する基礎的研究、②全国の異なるタイプの重金属汚染土壌に対する適用性や処理土壌の改良技術、そして作物栽培試験などの現地適用研究、さらに、③圃場における電源の確保やシステム設計、圃場における施工などを含めたシステム設計や施工技術に関する研究、である。その上で普及技術とするためには、ファイトレメディエーションや土壌洗浄法など、既に開発された技術との棲み分けが必要であるととも、低コスト化の推進も必要であるなど道のりはまだ長い。

しかし、食品のカドミウム汚染対策は、食の安全・安心の観点から世間の注目を集めており、行政施策上も対応が求められている。そのような中で食料の生産基盤となる農地の工学的浄化手法についての技術の確立に向けて引き続き検討を行う必要があるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 秋田 憲・佐々木智彦・山田隆生・小寺秀則・村上讓二・三重野俊彦 (2004) : 電気修復法による重金属汚染土壌の原位置浄化実証試験, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第10回講演集, 443-445
- 2) 浅見輝男 (2001) : データで示す - 日本土壌の有害金属汚染, アグネ技術センター, p.7
- 3) 張 銘・駒井 武・小野 暁 (2008) : 動電学的手法による地質汚染浄化について: その現状と展望, 環境地質学シンポジウム論文集, 18, 111-116
- 4) Lageman R., Pool W. and Seffinga G. (1989): Electro-Reclamation : Theory and Practice, *Chemical & Industry*, **18**, 585-590
- 5) 梶原親信・米川公一 (1983) : 重金属等による土壌汚染の現状と対策, 農土誌, 51(11), 1025-1030
- 6) 川地 武 (2006) : 電気泳動技術を用いた重金属汚染土壌の修復, 農林水産技術研究ジャーナル, 29(10), 34-37
- 7) 川地 武 (2008) : 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 6. 電気泳動による汚染土壌の修復技術, 土肥誌, 79(2), p.209-211
- 8) McKenzie, R.M. (1980): The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Aust. J. Soil Res.*, **18**, 61-73
- 9) 中川 啓・磯山真宏・和田信一郎・初井和朗 (2003) : 電位勾配下における土壌の水理化学特性についての実験的考察, 水工学論文集, 47, 325-330.
- 10) 新苗正和・青江 崇・菅野 強・青木謙治 (2001a) : 定電流密度条件下での動電学的手法による土壌からのカドミウムの浄化, 資源と素材, 117, 653-657
- 11) 新苗正和・青江 崇・菅野 強・青木謙治 (2001b) : 陰極槽のpHを中性に保持した下での動電学的手法による土壌からのカドミウムの浄化, 資源と素材, 117, 127-132
- 12) 新苗正和・青木憲治 (2003) : 動電学的手法による汚染土壌の浄化修復, 資源と素材, 119, 142-148
- 13) 新苗正和・岩本智史・青木謙治 (2002) : 動電学的手法によるカドミウム除去への錯形成反応の利用, 資源と素材, 118, 559-563
- 14) Reed B.E., Berg M.T., Thompson J.C. and Hartfield J.H. (1995): Chemical conditioning of electrode reservoirs during electrokinetic soil flushing of Pb-contaminated silt loam, *J. Environmental Engineering*, **121**, 805-815
- 15) 塩濱圭治 (2005) : 重金属汚染土壌の原位置浄化技術 電気修復法 (Electro-Remediation), 土地改良, 245, 48-50
- 16) 戸上和樹・中井 信 (2005) : 土壌の斑紋形成と重金属の移動集積, 土壌生成と重金属動態, 日本土壌肥料学会編, p.133
- 17) 和田信一郎・中川 啓 (2002) : 動電学的手法による浄化技術 - その可能性と限界 -, 土と基礎, 50(10), 13-15
- 18) Wada and Umegaki (2001): Major ion and electrical potential distribution in soil under electrokinetic remediation, *Environmental Science and Technology*, **35**(11), p.2151-2155
- 19) 山田信明 (2007) : 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 2. 客土による土壌汚染対策技術と客土効果の持続性, 土肥誌, 78(4), 411-416

# Evaluating Heavy Metal Removal in Paddy Soil by Electrokinetic Remediation

KUBOTA Tomijiro, HITOMI Tadayoshi, HAMADA Koji,  
SHIRATANI Eisaku, MIENO Toshihiko and SHIOHAMA Keiji

## Summary

In this study, laboratory experiments were conducted to characterize heavy metal (HM) removal in paddy soil by electrokinetic (EK) remediation. Two paddy soils obtained from the plow layer of rice fields (fine grey lowland soil from the Tohoku region, Soil A; and fine gley soil from the Kyushu region with Cd and Zn contamination, Soil B) were subjected to EK remediation in bench-scale tests.

Significant removal or migration of Cd was observed in both paddy soils, even for low initial Cd concentrations. Cd removal near the anode tank employed in the EK remediation was markedly reduced, and the average removal ratio of Cd was 10% for Soil A and 97% for Soil B.

EK remediation was conducted on a lab-scale rice paddy field of Soil A before and after the treatment with analysis of soil layers in 5-cm increments. Following the EK treatment, Zn migrated from the upper layers (0-10 cm) to the layer at 10-15 cm while Cd only migrated from the top layer (0-5 cm from anode tank) to the next layer (5-10 cm). Removal of HMs from the soil both before and after the spike was as follows: Fe>Mn>Zn>Cd. This suggests that the efficiency of Cd removal might be influenced by the concentrations of Fe, Mn and Zn.

Soil pH and cation exchange ability were markedly decreased by EK treatment.

**Keywords :** electrokinetic soil treatment, heavy metals, farmland soil, cadmium



# 農業排水を対象とした水質浄化装置内での 脱窒反応とキノン組成の関係

濱田康治\*・藤田昌史\*\*・人見忠良\*・久保田富次郎\*・白谷栄作\*

## 目 次

I 緒言	101	2 脱窒活性確認試験	103
II 実験方法	102	3 キノン分析結果	104
1 ライシメータでの水質浄化実験	102	IV 考察	104
2 水質浄化装置	102	1 水質浄化装置内の微生物群集構造の変化	104
3 脱窒活性確認試験	102	2 脱窒反応と微生物群集構造	105
4 水質分析	103	V 結言	107
5 キノン分析	103	参考文献	108
III 結果	103	Summary	109
1 水質浄化装置による浄化試験	103		

## I 緒言

一般に、自然浄化と微生物の関係は非常に強い。しかしながら、農業地域での水質浄化における微生物の役割に着目した研究は少なく、従来は農業地域における浄化機構をブラックボックスとして扱うことが主流であったため、浄化に寄与する微生物の種類やその群集構造に関する検討がほとんどなされていなかった。例えば、水田が生物反応による窒素除去能を持つことは広く知られているが、そこでの微生物の挙動はほとんど解明されていない。

三浦ら(2006)は、水田レベルで栄養塩・有機物の除去を達成することを目指した木炭を利用した水質浄化装置を考案し、その浄化作用を検証した。三浦ら(2006)や濱田ら(2007)により水質浄化装置が有機物や栄養塩類の除去が可能であることが既に報告されている。木炭を利用した水質浄化の場合、長期に利用する場合には物理吸着だけでなく微生物による浄化作用も大きい。木炭表面の細孔は微生物にとって恰好の生息場となる。よって、木炭は吸着剤としてだけでなく、微生物付着固定化担体としての機能も発揮する。よって、木炭の単位表面積あたりの水処理能力は、短期的には物理的吸着のみに

よるが、長期的には木炭表面の微生物も密接に関係すると考えられる。よって、微生物による浄化を利用すると、木炭の寿命を伸ばしたり、使用量を減らしたりして、コストを削減できる可能性がある。

微生物はその呼吸鎖の補酵素としてキノンを利用している。キノンは呼吸鎖や光合成電子伝達鎖の必須成分として生物界に広く分布しており、微生物が持つキノンの種類はそのエネルギー代謝機構や微生物種に依存するため、環境中の微生物からキノンを抽出してその組成を調べることで、その環境でのエネルギー代謝の酸化還元レベルや優占微生物種ならびに微生物群集構造を把握することが可能となる。キノンをバイオマーカーとして利用する微生物群集構造解析法であるキノンプロファイル法は、化学分析のみに基づいた手法であり、培養などの微生物学的な専門知識を必要としないため、比較的容易に利用可能であり、排水処理や底泥観測などの分野において微生物群集構造の評価に活用されている(藤田ら, 2002, 藤田ら, 2003)。

本研究では、農地排水を対象とした水質浄化装置に充填されている木炭表面に付着している微生物のキノン組成を利用して、木炭を利用した水質浄化装置内の微生物群集構造を評価するとともに、脱窒活性と関係の深いキノン種の特定を試みる。また、透明素材と遮光素材で作成した2種類の水質浄化装置を製作し光条件が脱窒活性に与える影響を評価した。

\* 農村環境部 水環境保全研究室

\*\* 茨城大学工学部

平成21年12月14日受理

キーワード：窒素除去, キノンプロファイル, バイオマーカー, 光条件, 水田排水

## II 実験方法

### 1 ライシメータでの水質浄化実験

ライシメータ (3 m × 3 m) に水質浄化装置を設置した (Fig.1)。図に示したとおり、ライシメータへは水田の真ん中から給水しており、水田の流出口 (水尻) に水質浄化装置を設置した。装置は2007年7月3日に設置した。水質浄化装置への流入直前の地点 (流入地点) と流出直後の地点 (流出地点) において定期的に採水した。採水したサンプル中の溶存態有機炭素 (DOC) 濃度、溶存態窒素 (DN) 濃度を測定した。

対象のライシメータでは、水稲移植後から中干しまではかけ流しで水管理されており、水田内の水深は水尻に設置された堰板 (欠口) 高さにより決定されていた。中干し後は間断灌溉がなされており、水田からの排水が降雨時を除いて観察されなかった。対象としたライシメータでは下方浸透が無い為、水質浄化装置内への流入水量は、水田への流入水量、降雨量、田面からの蒸発散量の差引とした。蒸発散量は Makkink 式により気温と日射量を元に算出した (永井, 1993)。降水量、気温、日射量は、試験地に最寄りのアメダス (つくば) の値を使用した。

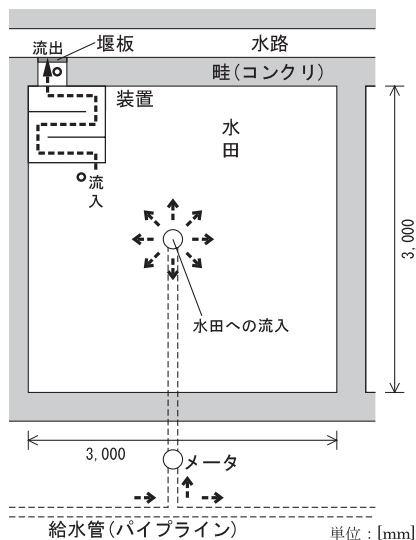


Fig.1 水質浄化装置の水田内への設置状況 (○: 採水地点)  
Set point of the water treatment apparatus in the paddy

### 2 水質浄化装置

水質浄化装置は幅 300mm × 奥行き 300mm × 高さ 300mm のアクリル製で、内部が中仕切りによって3段に分けられている (Fig.2)。上流側の段から順に木炭チップが見かけの容積率で 50% (第1段)、70% (第2段)、90% (第3段) の割合で充填されている。図に示したように、流入した水は木炭が充填された装置内部をジグザクに流れる。装置の開口部と中仕切りの開口部にはナイロン網 (NB90) が張ってあるため、木炭の外部への流

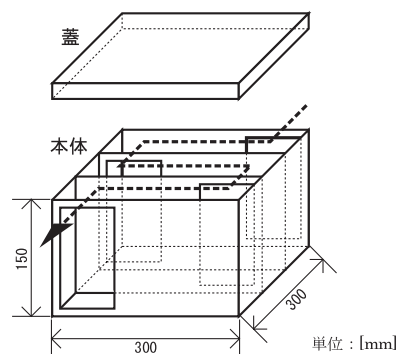


Fig.2 水質浄化装置の概要 (破線矢印は水の流れ)  
Outline of the Water treatment apparatus

Table 1 水質浄化装置に充填した木炭量  
Charcoal volume in the water treatment apparatus

	木炭の 体積充填率 [%]	木炭充填量	
		遮光 [kg]	透明 [kg]
1段	50	0.30	0.30
2段	70	0.40	0.42
3段	90	0.54	0.54

出や、装置内での偏在が生じない。また、取り外し可能な蓋により、装置上部からの水の侵入がない。装置は、透明なアクリルで作成したもの (以後は透明装置と表記) と光を通さない黒色アクリルで作成したもの (以後は遮光装置と表記) の2種類のライシメータに、それぞれを設置した。これは、硝化反応などの生物反応にかかる菌群などが光阻害を受けることが知られているためである。

Table 1 に水質浄化装置に充填した木炭の重量を示す。木炭は三浦ら (2007) により最も有機物除去能力が高いとされた 1050℃ で焼成されたスギの再生炭を利用した。また、水質浄化装置に充填した木炭は、水質浄化装置設置後に、装置から木炭の極細粒が流出するのを予防するために、蒸留水による洗浄で極細粒の木炭を除去した後、環境制御室 (30℃) において乾燥させたものである。乾燥後の木炭は含水率 6% であった。

### 3 脱窒活性確認試験

圃場に設置してある水質浄化装置から、装置の設置から約1ヶ月後 (2007年8月6, 7日)、約2ヶ月後 (2007年9月2, 3日)、約3ヶ月後 (2007年10月9, 11日) に微生物が付着している木炭を採取した。木炭は装置の第1段、第2段、第3段の3カ所から採取した。採取に際しては、装置上部からみて各段の中心位置において鉛直方向に偏りのないよう採取した。採取した木炭を湿潤状態で 100g を目安に、1L のガラス製三角フラスコに投入した。木炭が入った三角フラスコに活性試験用の基質を 300mL 添加した。実験中は窒素を通気し無酸素条

件を保持させ、液相を対流させた。実験中は、実験開始時、実験開始から1, 3, 6, 9時間後の計5回採水して、サンプル中の $\text{NO}_3^-$ -N濃度を測定した。

脱窒活性確認試験回分実験に使用した基質の組成は、基質1Lあたり $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ : 113.3 mg (45 mg-C),  $\text{KNO}_3$ : 101.1 mg (10 mg-N),  $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 10.7 mg,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ : 1.82 mg,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ : 7.17 mg,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : 9.0 mg,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 1.4 mg,  $\text{KCl}$ : 3.6 mg,  $\text{EDTA}$ : 0.3 mg,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ : 45  $\mu\text{g}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ : 4.5  $\mu\text{g}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ : 0.9  $\mu\text{g}$ ,  $\text{KI}$ : 0.9  $\mu\text{g}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ : 3.6  $\mu\text{g}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 1.8  $\mu\text{g}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : 3.6  $\mu\text{g}$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ : 4.5  $\mu\text{g}$ とした。

#### 4 水質分析

水溶液中のDOC, 溶存態窒素濃度は、メンブレンフィルタ(孔径0.2 $\mu\text{m}$ , Advantec)でろ過した後のろ液中の濃度とした。DOCはTN測定器付きTOC計(TOC-V<sub>CPN</sub>, 島津製作所)でNPOCとして、 $\text{NO}_3^-$ -Nはイオンクロマトグラフ(DX-320, Dionex)で、DNはTN測定器付きTOC計(TOC-V<sub>CPN</sub>, 島津製作所)で分析した。

#### 5 キノン分析

脱窒活性確認実験と同時に、採取した木炭表面からキノンを抽出・測定した。キノンは乾燥重量を量った木炭にクロロホルム・メタノール混合液(2:1,v/v)を添加して一晩振とうして抽出した後、抽出液をロータリーエバポレータ(RE400, Yamato)にて乾固させた。乾固物をヘキサンで抽出した後、固相抽出カートリッジ(Sep-Pac Plus Silica, Waters)に吸着させた。固相抽出カートリッジに吸着させたキノンから、2%ジエチルエーテル・ヘキサン溶液によりメナキノンを、10%ジエチルエーテル・ヘキサン溶液によりユビキノンを回収した後、再度ロータリーエバポレータで乾固させた。乾固した各キノンをアセトンで回収した。アセトンで回収したキノンをODSカラム(HPLC Column ZORBAX ODS (4.6  $\phi$  × 250mm), Agilent Technologies)を装着した高速液体クロマトグラフィー(SCL-10AVP, 島津製作所)により分離して、フォトダイオードアレイ検出器(SPD-M10A, 島津製作所)によりメナキノンは270 nm, ユビキノンは

275nmの吸光度にて定量した。

木炭表面からキノン類は、キノンの含有量を木炭の単位重量当たりの含有量(抽出量)として整理した。

### III 結果

#### 1 水質浄化装置による浄化試験

Fig.3に、小型ライシメータに設置した水質浄化装置への流入水両と装置の上流側(流入)と下流側(流出)におけるDOCとDN濃度の変化を示す。装置への流入水量が安定していた2007年7月3日~19日では上流側と下流側の濃度の差から各物質の除去率を求めると、DOCでは透明装置が平均17.7%, 遮光装置が平均23.7%と、DNでは透明装置が平均11.3%, 遮光装置が平均23.2%と、遮光装置への流入水量が透明装置のそれに比較して多く、滞留時間が短かったにもかかわらず、DOC, DNともに高い除去率を達成していた。ここで、装置への流入水量が少なく、装置内の滞留時間がそれまでに比較して長くなった期間は除去率の計算対象から除外したが、装置の前後でDOC, DN濃度を比較した場合、遮光装置よりも透明装置を経ると各濃度の低下率が高い傾向が見られた。なお、9月3日以降は水田への灌漑水の供給がほとんどなかったため、装置内での水の水平方向の流れはわずかであったと考えられる。

#### 2 脱窒活性確認試験

回分実験により生物学的な反応である脱窒速度を測定した。木炭と $\text{NO}_3^-$ を含む基質を混合して無酸素条件とした脱窒活性確認試験において経時的な $\text{NO}_3^-$ -N濃度の低下を確認した。木炭は $\text{NO}_3^-$ をほとんど吸着しないと報告があるため(例えば、森・小野(1995)), これは装置内の木炭表面に付着した微生物が生物学的な脱窒活性を有していることを示しているといえる。また、実験開始から時間が経過するに従い $\text{NO}_3^-$ -N濃度やDOC濃度の低下速度、つまり、脱窒速度が低下している様子が観察されたため、本研究では実験毎に観測された最も高い脱窒速度を脱窒速度とした。Table 2に木炭重量当たりの脱窒速度をまとめる。表中での脱窒速度は木炭の乾

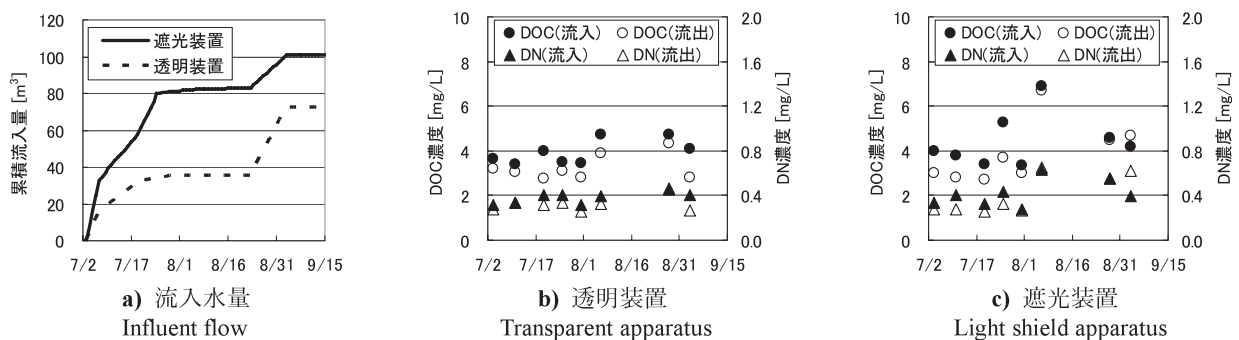


Fig.3 水質浄化装置への流入水量と水質浄化効果  
Water treatment activities of the water treatment apparatus

**Table 2** 回分実験による脱窒速度のまとめ  
Results of denitrification batch experiments

		1月後	2月後	3月後
透明装置	第1段	—	0.43	0.60
	第2段	—	0.42	0.38
	第3段	—	0.74	0.37
遮光装置	第1段	1.15	0.98	0.81
	第2段	1.33	0.44	0.69
	第3段	0.46	1.03	0.61

単位：[mg/g-SS/d]

乾燥重量当たりの速度とした。表中での脱窒速度は木炭の乾燥重量当たりの速度とした。透明装置の設置から1月後のデータは、試験において有意なNO<sub>3</sub>-N濃度の低下が確認されなかったためデータなしとした。木炭重量あたりの脱窒速度は、透明装置に比較して遮光装置が高い傾向にあった。

### 3 キノン分析結果

脱窒活性確認試験と同時に、水質浄化装置から採取した木炭表面からキノン類を抽出し、キノンの含有量を木炭の単位重量当たりの含有量（抽出量）で評価した。Table 3に木炭から抽出・測定したユビキノンとメナキノンを示す。一般に微生物は好気呼吸をする際にはユビキノンを、嫌気呼吸をする際にはメナキノンを利用すると言われている。ユビキノンは、遮光装置内の木炭表面に比較して、透明装置内の木炭表面から抽出されたキノン量が高い傾向にあった。呼吸レベルを示す指標として使用されるメナキノンとユビキノンのモル比であるMK/Q比は透明装置で1.41～3.38、遮光装置で1.49～5.13であった。2つの装置のMK/Q比に明確な差は見いだせなかった。MK/Q比は、一般的な水環境では0.14～0.54、

土壌環境では2.5～3.4との報告がある（平石，1992）。木炭表面の環境は、土壌環境に近い環境であると考えられる。

キノン分析の結果、3種類のユビキノンと11種類のメナキノンが検出・定量された。Fig.4に水質浄化装置各段の木炭から回収したキノンの分析結果を示す。透明装置第2段の3月後での優占キノンがQ-10だったことを除けば、透明装置と遮光装置ともに優占キノンはMK-6であった。また、透明装置では、ユビキノンはQ-10 > Q-8 > Q-9となる傾向が、遮光装置では、Q-10とQ-8が同程度に高く、次いでQ-8となる傾向が見られた。メナキノンではMK-6、MK-7、MK-8、MK-8(H<sub>2</sub>)の含有量が高い傾向にあった。活性汚泥法などを利用した都市下水などの好気処理にみられる一般的な傾向として、ユビキノンの分布比率はQ-8 > Q-10 > Q-9の順であり、メナキノンではMK-7やMK-8の優占頻度が高いとされており（平石，1992）、遮光装置と透明装置を比較すると遮光装置が活性汚泥のキノン構造に近いといえる。

## IV 考察

### 1 水質浄化装置内の微生物群集構造の変化

微生物の群集は、場所的、時間的に違いがあることが考えられる。キノンを利用した微生物群集構造解析では、非類似度という指標を利用して微生物群集の違いを定量的に評価されることが多い。そこで、キノン分析結果をもとに非類似度を算出した。非類似度(D)は式(1)に従い2試料間の同一キノン分子種についてモル%の差を絶対値として求め、全分子種におけるその値の総和(総計の最大値を100とするため2で割る)であり、プロファ

**Table 3** 木炭表面のキノンの含有量  
Quinone content on the Charcoal

		a) 透明装置 Transparent apparatus								
		第1段			第2段			第3段		
		1月後	2月後	3月後	1月後	2月後	3月後	1月後	2月後	3月後
ユビキノン	[mmol/kg]	202	252	169	346	287	191	136	497	59
メナキノン	[mmol/kg]	466	560	516	1139	970	269	251	1429	191
全キノン	[mmol/kg]	668	812	685	1485	1256	460	386	1926	250
MK/Q比	[—]	2.31	2.22	3.06	3.29	3.38	1.41	1.84	2.88	3.25
		b) 遮光装置 Light shield apparatus								
		第1段			第2段			第3段		
		1月後	2月後	3月後	1月後	2月後	3月後	1月後	2月後	3月後
ユビキノン	[mmol/kg]	124	230	98	170	85	74	100	53	69
メナキノン	[mmol/kg]	185	671	328	426	434	255	176	144	147
全キノン	[mmol/kg]	308	901	426	596	518	329	276	197	215
MK/Q比	[—]	1.49	2.91	3.34	2.51	5.13	3.45	1.77	2.74	2.14



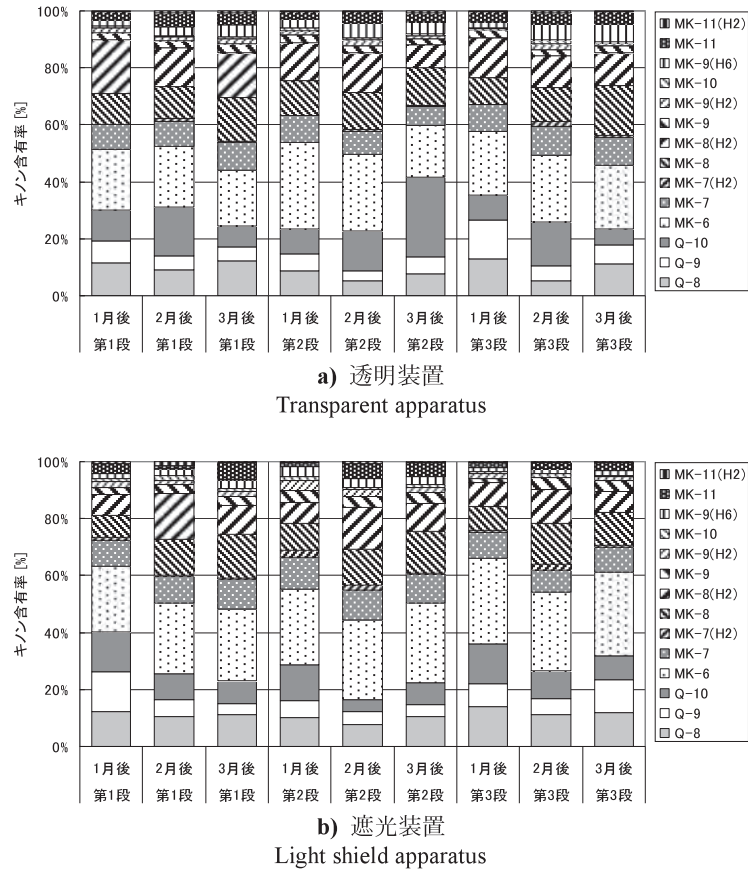


Fig.4 水質浄化装置内のキノン含有率  
Quinone content in the water treatment apparatus

イルの違いを定量的に評価できる。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q_i'|}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $Q_i$ ・ $Q_i'$ ：キノン成分  $i$  の物質質量 [モル%]， $n$ ：キノンの種類数。

Table 4 に水質浄化装置内の微生物群集の非類似度を示す。Table 4a には水質浄化装置の第1段，第2段，第3段の間の非類似度を，Table 4b には水質浄化装置内の時間変化による微生物群集の変化に対する非類似度を示した。D 値は 0～100 の値をとり，値が小さいほど類似性が高く，値が大きいほど類似性が低い。D 値が 20% を超えた場合には微生物群集構造に有意な差があるとされ，D 値が 10% 以下の場合には微生物群集構造に実質的な違いがないとされる。

同時期における水質浄化装置内の微生物群集構造の非類似度は小さく，3 月後の透明装置の第2段が第1段，第3段と微生物群集構造に有意な差が見られた以外は，同時期の装置内での微生物群集構造はどこでも類似性が高く，実質上の違いはないと考えられる。装置内の同位置における時間的な変化に関しても，透明装置の第2段で 23.1 という値がみられた以外は，他の非類似度の値は小さく，実質上微生物群集構造に違いがないと考えられる。つまり，透明装置，遮光装置ともに，それぞれの

装置の中の微生物群集構造は，場所的，時間的に安定しており変動が小さい。また，Fig.4 より遮光装置でのユビキノンの含有率は 1 月後に比較的高いものの，2 月後，3 月後には低くなる傾向が見られた。一方，透明装置でそうした傾向が見られるのは第3段のみであった。このことから，透明装置と遮光装置では，微生物群集構造の変遷には違いがあったといえる。

## 2 脱窒反応と微生物群集構造

脱窒速度とキノン組成を比較する場合，Table 2 に示した脱窒速度と Table 3 に示した木炭あたりのキノン含有率より，キノンあたりの脱窒速度に変換する必要がある。Table 5 にキノンあたりの脱窒速度を示す。ライシメータでの水質浄化試験では，流入水が連続的に供給されている条件では DN 除去率は遮光装置が高かったことから (Fig.3)，水質浄化装置のポテンシャルとしては，遮光装置の高い可能性がある。木炭あたりのキノンの含有率は透明装置が高い傾向にあったものの (Table 2)，Table 5 に示したキノンあたりの脱窒速度は遮光装置が高い傾向にあり，遮光装置内では脱窒反応に関与する微生物が優占的に存在していたと考えられる。しかしながら，装置内に流入水が流入せず，水が停滞するような環境では，透明装置での DN 除去率が高い傾向も見られたことから，そのような状況下ではライシメータに設置し

**Table 4** 水質浄化装置内の場所毎の非類似度  
Dissimilarity of quinone profiles in the water treatment apparatus

a) 装置内での場所の違いによる比較  
Comparison between differences of place

		透 明 装 置			遮 光 装 置		
		第1段	第2段	第3段	第1段	第2段	第3段
1 月 後	第1段	0.0			第1段	0.0	
	第2段	12.8	0.0		第2段	14.3	0.0
	第3段	10.1	13.5	0.0	第3段	10.7	12.1
		第1段	第2段	第3段	第1段	第2段	第3段
2 月 後	第1段	0.0			第1段	0.0	
	第2段	10.8	0.0		第2段	13.0	0.0
	第3段	9.1	7.4	0.0	第3段	10.3	13.5
		第1段	第2段	第3段	第1段	第2段	第3段
3 月 後	第1段	0.0			第1段	0.0	
	第2段	21.4	0.0		第2段	4.2	0.0
	第3段	8.8	22.6	0.0	第3段	13.8	11.1

b) 経過時間による変化  
Change by time

		透 明 装 置			遮 光 装 置		
		1月後	2月後	3月後	1月後	2月後	3月後
第 1 段	1月後	0.0			1月後	0.0	
	2月後	11.5	0.0		2月後	18.7	0.0
	3月後	11.6	13.0	0.0	3月後	18.9	11.1
		第1段	第2段	第3段	第1段	第2段	第3段
第 2 段	1月後	0.0			1月後	0.0	
	2月後	11.4	0.0		2月後	16.2	0.0
	3月後	23.1	19.2	0.0	3月後	12.2	8.4
		第1段	第2段	第3段	第1段	第2段	第3段
第 3 段	1月後	0.0			1月後	0.0	
	2月後	19.5	0.0		2月後	15.0	0.0
	3月後	14.9	14.5	0.0	3月後	10.0	12.0

**Table 5** キノン当たりの脱窒速度  
Denitrification rate per unit quinone

		1月後	2月後	3月後
透明装置	第1段	-	1.69	3.58
	第2段	-	1.46	2.00
	第3段	-	1.49	6.23
遮光装置	第1段	9.33	4.26	8.21
	第2段	7.81	5.15	9.37
	第3段	4.62	19.48	8.90

単位：g-N/mmol-quinone/d

た装置内での窒素除去機構には、本論文で対象としている生物学的脱窒反応とは別の現象の寄与が大きいことが示唆される。

次に、Table 5 に示したキノンあたりの脱窒速度に対する各キノンの相関関係を直線回帰により推定して、相関係数を算出した。解析の際には、透明装置と遮光装置

を区別せずに、両方の装置の結果をまとめて1セットのデータとして用いた。1セットのデータとして解析した理由は、両装置内で増殖する微生物が共に水田由来であることから、装置内に流入して装置内で増殖する微生物の種類は同じであり、それらの微生物群集の構造（組成割合）が変化することにより微生物あたり（ここではキノン当たり）の脱窒速度が変化していると考えられるからである。Table 6 に各キノンの平均、最小、最大含有率、脱窒速度に対する各キノン含有率の相関係数を示す。全体的に、個別のキノン含有率が脱窒速度との高い相関を示さなかった。その中でも、脱窒速度と正の相関が高かったのはQ-8、負の相関が高かったのはMK-7とMK-11であった。

さらに、脱窒速度確認実験により測定した脱窒速度を対象として、キノンの含有率を説明変数として式(2)に従い重回帰分析を変数増加法により実施した。

**Table 6** 脱窒速度に対するキノンの相関係数  
Correlation coefficients

	キノン含有率 [%]			相関係数
	平均	( 最小	- 最大 )	
Q-8	10.0	( 5.1	- 14.0 )	0.49
Q-9	6.3	( 3.6	- 13.9 )	-0.17
Q-10	11.7	( 4.1	- 28.0 )	-0.33
MK-6	24.9	( 18.1	- 30.1 )	0.08
MK-7	9.3	( 6.6	- 11.0 )	-0.64
MK-7(H <sub>2</sub> )	1.0	( 0.3	- 2.7 )	0.21
MK-8	12.6	( 7.7	- 17.7 )	0.02
MK-8(H <sub>2</sub> )	11.2	( 7.4	- 16.3 )	-0.13
MK-9	3.0	( 1.7	- 4.2 )	0.26
MK-9(H <sub>2</sub> )	1.6	( 0.0	- 3.4 )	-0.16
MK-10	1.0	( 0.4	- 2.0 )	0.29
MK-9(H <sub>0</sub> )	3.3	( 1.4	- 6.2 )	0.12
MK-11	3.6	( 1.0	- 6.2 )	-0.48
MK-11(H <sub>2</sub> )	0.5	( 0.2	- 1.3 )	0.05

$$DNR = \beta_0 + \beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_2 + \dots + \beta_m Q_m \dots \dots \dots (2)$$

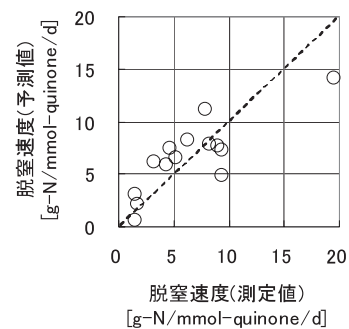
ここで、DNR：脱窒速度、 $\beta_i$ ：重回帰係数、 $m$ ：説明変数として使用したキノンの種類数。重回帰分析の際、説明変数同士の相関が高いと多重共線性が問題となる。そこで、各キノンの含有率同士の相関を調べた。相関係数の絶対値が0.5以上の場合に相関が高いと判断して、重回帰分析の際にその両方のキノンが説明変数とならないようにした。相関が高いキノンのどちらを説明変数とするかを選ぶ際には、平均含有率を比較してより高いキノンを説明変数とした。さらに、解析の結果で相関係数と重回帰係数の符号が一致しない場合には、変数の選定に問題があると判断して、変数から取り除いて再度解析を試みる変数減少法により脱窒速度に対する説明変数を決定した。解析を繰り返した結果、説明変数を Q-8, MK-6, MK-7(H<sub>2</sub>), MK-8 の4つとして下記式が得られた。

$$DNR = -27.86 + 1.10Q_{Q-8} + 0.40Q_{MK-6} + 3.57Q_{MK-7(H_2)} + 0.75Q_{MK-8} \dots \dots \dots (3)$$

**Fig.5** に得られた重回帰式により予測される脱窒速度と観測された脱窒速度の比較を、**Table 7** に重回帰分析の結果を示す。補正 R<sup>2</sup> が 0.51 であり、**Fig.5** に示した観測値と予測値の比較はまずまずの一致である。t 値は重回帰係数を標準偏差で除した値であるが、t<sup>2</sup> 値はいずれも 2 以上の値が得られた。MK-6 と MK-8 に対する P- 値が 0.15 と 0.06 とやや高い値を示したが、それ以外は 0.05 以下であった。信頼係数がやや小さかったが、解析の対象としたデータ数が説明変数に比較してそれ程大きくないことが理由と考えられる。重回帰分析により説明変数として採択された4種類のキノン種の重回帰係数は全て正の値であった。これらのキノン種は微生物群集の脱窒速度に大きく関係すると考えられる。説明変数とした

**Table 7** 脱窒速度に対する重回帰分析の結果  
Result of multiple linear regression analysis

	重回帰分析		
	係数	t値	P-値
Q-8	1.10	2.99	0.01
Q-9			
Q-10			
MK-6	0.40	1.56	0.15
MK-7			
MK-7(H <sub>2</sub> )	3.57	2.64	0.02
MK-8	0.75	2.10	0.06
MK-8(H <sub>2</sub> )			
MK-9			
MK-9(H <sub>2</sub> )			
MK-10			
MK-9(H <sub>0</sub> )			
MK-11			
MK-11(H <sub>2</sub> )			
切片	-27.86	-2.98	0.01
R <sup>2</sup>		0.65	
補正R <sup>2</sup>		0.51	



**Fig.5** 脱窒速度と観測値と重回帰分析による予測値の比較  
Comparisons between observed denitrification rate and values predicted by multiple linear regression analysis

キノンのうち Q-8, MK-6, MK-8 の3種の平均含有率は10%を超えておりキノン組成において主要なキノン種であったが、MK-7(H<sub>2</sub>)の平均含有率は1.0%と非常に小さかった。微生物のキノン含有総量が種別間で大きな差がないとすると、微生物群集のなかでの含有率がより高いキノンが、脱窒速度により大きく関係していると考えられるため、解析結果から Q-8, MK-6, MK-8 の3種のキノンが本装置内での脱窒速度と大きく関係すると考えられ、これらのキノン種を利用する微生物群が本水質浄化装置内での脱窒速度に強く関与していることを示している。

## V 結 言

木炭を利用した水質浄化装置の現地での水質浄化活性確認実験と、室内での脱窒速度確認試験により、水質浄化装置の活性を評価すると共に、装置内の微生物群集構

造をキノン組成で評価した。これらの結果を比較することにより、

- 1) キノンあたりの脱窒速度は透明装置に比較して遮光装置が高いこと、
- 2) 水質浄化装置の中の微生物群集構造は、場所的、時間的に安定しており変動が小さいこと、
- 3) Q-8, MK-6, MK-8 を含む微生物が水質浄化装置内での脱窒速度に大きく関与する可能性が高いこと

が示された。本研究により脱窒活性との強い関係が指摘されたキノン種を利用する微生物群が脱窒活性に直接的に関与する可能性が高く、脱窒活性の有用な指標となる可能性が高い。しかしながら、現段階では解析対象としたデータが限られており、今後、様々なサンプルを対象としてデータを蓄積することで精度を徐々に高めていく必要がある。

### 参考文献

- 1) 藤田昌史・古米弘明・中島典之 (2002) : ショ糖溶液を用いて比重分画した実下水処理リン除去汚泥のキノンプロファイル解析, 水環境学会誌, 25(12), 57-61.
- 2) 藤田昌史・鯉淵幸生・Udin HASANUDIN・小倉久子・藤江幸一・磯部雅彦 (2003) : 東京湾における水質動態と底質微生物群集構造の解析, 海岸工学論文集, 50, 996-1000.
- 3) 濱田康治・三浦 麻・吉永育生・人見忠良・高木強治 (2007) : 木炭を利用した水質浄化装置内の微生物群集構造, 平成 19 年度農業農村工学会大会講演要旨集, 618-619.
- 4) 平石 明 (1992) : 呼吸鎖キノンをバイオマーカーとして用いる廃水処理系微生物群集の動態解析, 水環境学会誌, 15, 558-563.
- 5) 三浦 麻・吉永育生・人見忠良・濱田康治・高木強治・白谷栄作 (2006) : 水田排水浄化実験における再資源炭使用量の検討, 平成 18 年度農業土木学会九州支部大会講演要旨集, 186-187.
- 6) 三浦 麻・白谷栄作・人見忠良・吉永育生・高木強治・濱田康治 (2007) : スギ再資源炭による難分解性溶存有機物の除去特性, 水環境学会誌, 30, 39-44.
- 7) 森 昭憲・小野信一 (1995) : 木炭の塩化鉄処理による硝酸イオンの吸着能の発現, 日本土壤肥料科学雑誌, 66(4), 415-417.
- 8) 永井明博 (1993) : Makkink 式による計器蒸発量の推定と考察, 水文・水資源学会誌, 6(3), pp.238-243.



# Comparison between Denitrification Activity and Quinone Content in the Water Treatment Apparatus for Paddy Drainage Treatment

HAMADA Koji, FUJITA Masafumi, HITOMI Tadayoshi,  
KUBOTA Tomijiro and SHIRATANI Eisaku

## Summary

Two apparatuses, a transparent apparatus and a light shield apparatus, for water conservation that uses charcoal media were adapted to remove nutrients from paddy field drainage. Quinone contents of microorganisms on the charcoal media in the water treatment apparatus were analyzed to compare the denitrification activity and quinone profiles. Q-8 content, the highest ubiquinone, had the strongest correlation coefficient between the denitrification rate and the detected ubiquinone. Three results as follows were obtained in this study.

- i) Denitrification rate per quinone in the transparent apparatus was higher than that in light shield apparatus,
- ii) Microorganisms community structure was stable toward time and place,
- iii) Ubiquinone Q-8, menaquinone MK-6 and/or menaquinone MK-8 containing microorganisms acted the important roll in the denitrification rate in the water treatment apparatus.

**Keywords :** nitrogen removal, quinone profiling, biomarker, light condition, paddy drainage

## 水田農業の営農変化に伴う用水需要変化に関する一考察

友正達美\*・山下 正\*

## 目 次

I 緒 言	111	5 高温障害対策と用水需要	115
II 水田農業の営農変化	111	IV 用水需要の変化への対応の方向	115
1 水田の活用に向けた技術的な対応	111	1 用水需要の変化と水田灌漑用水量への影響	115
2 転作作物としての水稲栽培の促進	112	2 灌漑期間の拡大, 期別用水量の増大への対応	116
III 水田農業の営農変化に伴う用水需要への影響	112	3 高温障害対策への対応	117
1 用水需要へ影響する主な要因	112	4 普及側と用水供給側の連携による対応	117
2 作期の分散と用水需要	113	V 結 言	118
3 直播栽培の導入と用水需要	113	参考文献	118
4 転作作物としての新規需要米, 稲発酵粗飼料の導入と用水需要	114	Summary	119

## I 緒 言

近年, 水稲の高温障害対策としての掛け流し灌漑等の用水管理による対策が農業改良普及センター等の普及側によって指導されている。しかし, 土地改良区等の用水供給側は, 水利権や水利施設容量による制約から, 高温障害対策による用水需要, すなわち灌漑期間や灌漑用水量の変化に十分対応できないことが多く, 特に高温障害対策としての掛け流し灌漑が, 極めて大きな用水需要を発生させるという問題が生じている。これに対して, 筆者らは, 用水の需給バランスを考慮した高温障害対策を実施するための, 普及側と用水供給側が連携した用水管理の検討手順 (Fig.1) を提案した (友正, 山下, 2009)。

この検討手順では, 用水供給側の検討内容に, 水利施設の改造等や, 水利権の変更も含まれるが, こうした用水供給に関する条件の変更は, 通常, 短期間に頻繁に行うことは困難である。水利施設の改造等は, ストックマネジメントにより長期的な視野から改修, 更新が行われ, また, 水利権の変更は適宜変更申請は可能であるが, 通常 10 年ごとに行われる水利権の更新に合わせて検討されるのが一般的と考えられる。

現在, 農業政策において, 食料供給力の向上のために水田を利活用した, 新規需要米や稲発酵粗飼料の本格的

な導入が進められようとしている。転作作物が麦, 大豆等の畑作物だけでなく水稲作にも拡大することは, 生産調整と用水需要の関係を大きく変化させ, 用水需要と用水供給に新たに大きなインパクトを与える可能性がある。用水需給に不均衡を生じた場合, 農業政策が意図する水田利活用に支障をきたすことが懸念される。

今後の用水管理においては, 高温障害対策による用水需要の変化だけでなく, その他の営農変化によって現在起こっている, あるいは将来起こると予測される用水需要の変化への対応についても合わせて検討することが重要と考えられる。そのため, 転作を含めた水田で行われる農業 (以下, 水田農業と記す) の営農変化に伴う水稲栽培の用水需要の変化の方向を文献等に基づいて分析し, 今後の用水管理の対応の方向について考察した。

## II 水田農業の営農変化

## 1 水田の活用に向けた技術的な対応

農林水産省生産局 (2008) によれば, 水稲の生産費のうち大きな割合を占めるのは農機具費と賃借料及び料金 (共同乾燥施設の利用料金等) であり, また労働時間については, 育苗・田植作業の占める割合が高い。このことから, 農林水産省生産局では, 生産コスト縮減の基本的な考え方を, ①直播栽培の導入により育苗・田植等の春作業の省力化や生育期間が長くなり収穫時期が遅れることを利用した秋作業の分散を進める他, 早生・中生・晩生等の品種を組み合わせることにより, さらなる作期の分散を図り, 一層の規模拡大を推進, ②規模拡大, 農業機械の水稲・麦・大豆の汎用利用により農業機械 1 台

\* 農地・水資源部 用水管理研究室

平成21年12月14日受理

キーワード: 水田, 用水需要, 直播栽培, 新需要米, 稲発酵粗飼料, 高温障害, 用水管理

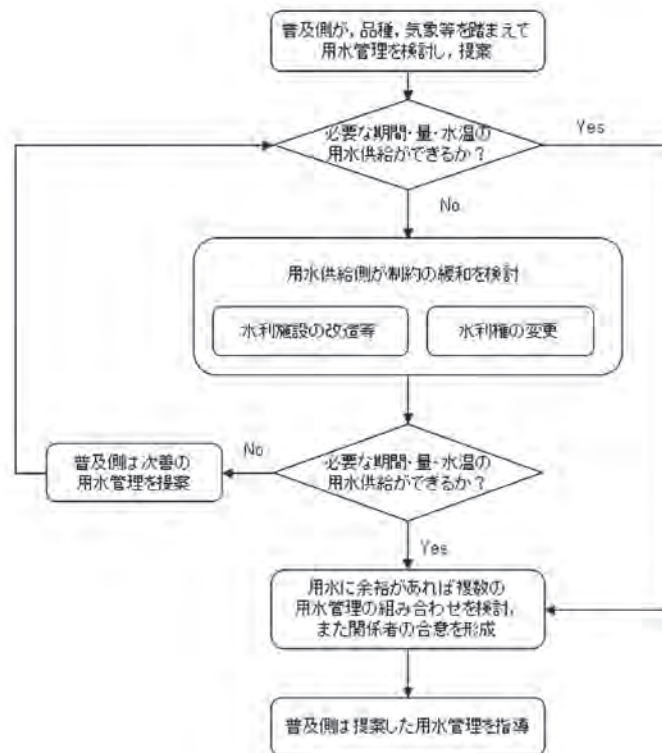


Fig.1 普及側と用水供給側が連携した用水管理の検討手順 (友正ら, 2009)

Procedure for water management against grain damage under high temperatures during ripening of rice with corporation of agricultural extension sector and agricultural water supply sector

当たり稼働面積の増加を図り、面積当たりの農機具費を低減する。また共同乾燥施設の利用料金については、荷受期間の拡大等により施設の処理量増加及び処理量当たりの施設経費の低減を図り、利用料金の値下げの取組を推進、③育苗管理作業が大幅に低減できるプール育苗や疎植栽培、防除が軽減できる病害虫抵抗性品種の導入、移植と同時に施肥ができる側条施肥や追肥作業が省略可能な全量基肥施用等の導入により、省力化を推進、の3つに整理している。

「平成21年農業技術の基本方針」(農林水産省, 2009a)では、水田の活用に向けた技術的対応として、新規転作田、調整水田等における米粉・飼料用米、麦、大豆、飼料作物等の需要に応じた生産拡大、二毛作の導入等を推進することとし、特に水稲については、①主食用米の低コスト生産体制の確立、特に水稲直播栽培の推進、②米粉・飼料米等の低コスト生産、③高温障害対策の推進を主要な技術対策としている。高温障害対策が主要な技術対策として取り上げられているのは、西日本を中心に東北以南の広い地域で、米の品質低下が農家に経済的な損失をもたらし、大きな問題となっていることから、その対策が急がれているためである。

## 2 転作作物としての水稲栽培の促進

認定農業者等の担い手への農地の利用集積が進められたことから、2007年度には全耕地面積の45%、210万haが担い手によって経営されるようになった。これま

で、国内農業の食料供給力を強化するための水田活用の取り組みとして、自給率の低い麦、大豆、飼料作物等の生産が推進され、これらの生産に適さない地域では、新規需要米(米粉用米、飼料用米等)や稲発酵粗飼料等の生産が促進されてきた(農林水産省, 2009b)。

また、今後の実施が検討されている戸別所得補償制度(農林水産省, 2009c)において、水田利活用自給力向上事業として、自給力の向上を図るため、水田を有効活用して飼料用米等の戦略作物の生産を行う販売農家に対して、主食用米並の所得を確保し得る直接支払を行うことが構想されている。この中では、麦、大豆、飼料作物とは別に、新規需要米として、米粉用米、飼料用米、バイオ燃料用米、WCS用稲(発酵粗飼料用稲)が、交付対象作物となっており、平成22年度概算要求時点の案では、交付額は10a当たり8万円が検討されている。なお、大臣記者会見(農林水産省, 2009d)によれば、戸別所得補償は、大規模化、集約化、効率化、機械化を進める手法の一つとして位置づけられている。このことから、従来からの農地の利用集積を進める政策に変更はないと考えられる。

## III 水田農業の営農変化に伴う用水需要への影響

### 1 用水需要へ影響する主な要因

IIで述べた水田農業の営農変化の中で、特に用水需要への影響が大きいと考えられるのは、①作期の分散、②

水稲直播栽培の導入、③転作作物としての新規需要米、稲発酵粗飼料の導入、④水稲作における高温障害対策である。特に③については、戸別所得補償制度の今後の導入に対応して、水田としての利用面積の拡大により大きな用水需要の増加をもたらすものである。また、④の高温障害対策については、緒言で述べたとおり、普及側の掛け流し灌漑の指導による極めて大きな用水需要の発生が、需給のアンバランスとして顕在化している（友正、山下，2009）。本章では、上記の水稲作の変化について用水需要への影響を検討する。

## 2 作期の分散と用水需要

水稲作における作期の分散は、ある農業経営体における規模拡大に伴う春作業の集中を緩和するだけでなく、他の農業経営体との作業時期の競合や、水利用の競合を避ける効果も持っている。筆者らが2008年10月に行った宮城県亘理町の大規模農家（水稲経営面積53ha）への聞き取り調査では、この農家は兼業農家が集中的に田植えを行う4月末期から5月上旬にかけてのゴールドウィーク（GW）が終わってから田植えを行い、更にこの時期に稚苗と中苗移植を併用して作業時期の分散を図っていた。また、佐久間、佐藤、藤井（2002）、河野、佐藤（2003）が、茨城県新治郡の大規模請負農家（水稲経営面積28ha）の作業の実態を調査した事例では、代かきから田植えまでの作業について、水利用が集中するGWの前半は、排水路からの揚水で水を確保し、それ以降は他の農家の作業と作業時期をずらすことで対応していた。これらの事例では、大規模経営体による代かき・田植え期の拡大によって、兼業農家の代かき・田植えが集中するGWの用水需要のピークを緩和していると考えられる。他方、これらの事例では、同一品種の移植栽培で春作業を分散しているため、水稲の収穫時期は同じであり、収穫作業の分散は図ることができない。秋

の収穫作業の分散を図るには、収穫時期の異なる品種、栽培方法を導入する必要がある、用水についてもこれに見合った灌漑期間が必要となる。

## 3 直播栽培の導入と用水需要

直播栽培は、①育苗・田植作業の省略による春作業の軽減、②生育ステージのずれによる収穫作業等の秋作業の分散等による省力化と低コスト化がそのメリットとされ、ここ10年で徐々に普及が進みつつあり（Fig.2）、2007年には全国で約1万7千haに導入されている（農林水産省生産局農産振興課，2008）。

直播栽培は、水田に入水しない状態で播種する乾田直播と、代かきを行ってから播種する湛水直播に大別され、更に播種の方法等により様々に分類される。梅本（2008）は経営組織類型別に見た直播導入事例の播種様式と導入効果をそれぞれTable 1、Table 2のように整理している。現在の普及状況は、播種作業が天候に左右されない等の理由から乾田直播より湛水直播が多くなっている。直播栽培導入の効果について、全体では省力化に次いで、作期拡大・作業分散の効果が強く認識されている。また、大規模水田作経営では、作期拡大・作業分散の効果が最も強く、次いで面積拡大の効果が強く認識されている点は注目される。

直播栽培導入における用水需要への影響としては、乾田直播、湛水直播いずれの場合も、収穫時期が移植栽培に比べて7～10日程度遅くなることから、登熟後期に水を確保するためにより長い灌漑期間が必要となる。また、乾田直播の場合は代かきを行わないため、代かき・田植え期のピーク用水量を低減させる。一方、不耕起乾田直播では、収穫後に耕起・代かきを行うため、収穫後に代かきを行うための用水が必要となる。ただし、この収穫後の代かきは、春作業のように短期間に集中して行う必要はない。

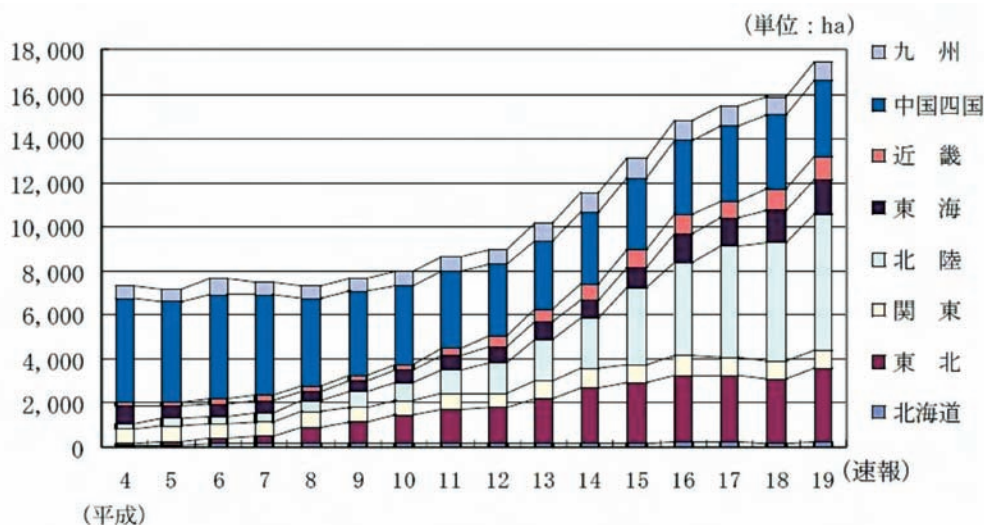


Fig.2 水稲直播栽培の面積の推移（農林水産省，2009b）  
Introduced area of direct seeding rice cultivaton



**Table 1** 経営組織類型別に見た直播導入事例の播種様式  
Types of introduced direct seeding rice cultivation

(単位：事例数)

経営組織類型	乾田直播		湛水直播		
	耕起	不耕起	散播	条播	点播
大規模水田作経営	4	5	17	10	2
水田複合経営	5	2	7	4	0
生産組織・協業組織	2	2	2	7	0
地域営農組織・公社	1	0	4	10	0

(梅本, 2008)

**Table 2** 経営類型別に見た水稲直播栽培の導入効果 (梅本, 2008)  
Recognised effects of introduction of direct seeding rice cultivation

(% : 複数回答)

経営組織類型	省力化	作業負担軽減	面積拡大	複合部門導入強化	ワンマンオペレーション化	作業受諾拡大	コスト低減	作期拡大・作業分散	労働ピーク分散	転作カウント
大規模水田作経営	21	24	34	14	7	10	17	41	10	3
水田複合経営	26	5	11	58	0	16	5	21	5	5
生産組織・協業組織	56	25	13	31	0	25	25	44	38	6
地域営農組織・公社	80	0	7	13	0	0	27	47	7	13
全体	38	17	18	26	2	12	21	37	13	6

#### 4 転作作物としての新規需要米, 稲発酵粗飼料の導入と用水需要

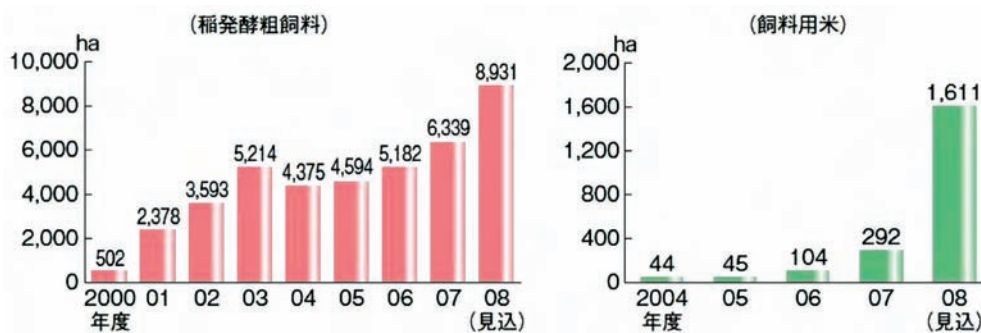
前述のように新規需要米, 稲発酵粗飼料は新たな転作作物としての導入が期待されており, 近年, 作付面積が計1万haを超える規模にまで拡大している (Fig.3) (農林水産省, 2009b)。新規需要米, 稲発酵粗飼料の水稲品種は, 主食用米とは作期に大きな違いがある。Table 3に主要な米粉米, 飼料用米, 稲発酵粗飼料品種の作期に関する特性を文献 (農林水産省, 2009e) に基づき整理した結果を示す。これらの品種は, 同じ地域の代表的な主食用米と比べて収穫時期が遅いものも多く, 移植栽培の場合で1~3旬, 直播栽培の場合は, 更に収穫時期が遅くなる。

なお, 稲発酵粗飼料として子実と茎葉の全体を収穫する場合と, 飼料米として子実を利用する場合では適切な落水の時期が異なり, 前者の場合は出穂後約3週間, 後

者は出穂後4週間ぐらいが適切な落水時期とされている (農山漁村文化協会, 2008)。

新潟県西蒲原郡における飼料イネの栽培事例では, 有限会社により稲発酵粗飼料用の飼料イネ6.9haが栽培されているが, 乾田直播と移植栽培を組み合わせ, 更に主食用米 (コシヒカリ) の収穫作業と競合しないよう, Table 4のような栽培体系が組み立てられている (農山漁村文化協会, 2008)。

このような新規需要米, 稲発酵粗飼料の導入による用水需要への影響について考察すると, 前述のように, 転作としての水稲作であることから, 畑作物から切り替わった場合や, 休耕地, 耕作放棄地を活用して作付した場合には用水需要が増大する。これまで転作や休耕等による用水需要の低減が, 用水供給のゆとりとなり, 兼業農家を中心とした代かき・田植えのGWへの集中を可能にしていた場合, 転作としての水稲作の普及は, 代かき期の用水需給を逼迫させることも懸念される。また,



**Fig.3** 稲発酵粗飼料, 飼料用米の作付け面積の推移 (農林水産省, 2009b)  
Planted area of whole crop rice silage and rice for grain feed

**Table 3** 主要な新需要米、稲発酵粗飼料品種の作期に関する特性  
 Cropping season characteristics of rice varieties for new demand and whole crop rice silage

品種名	用途	栽培適地	早晚性	出穂期	成熟期	収穫期		
						移植	直播	(食用品種)
きたあおば	飼料用米・WCS 兼用	北海道	晩生の早	8月1日	9月27日	9月下旬	9月下旬	9月下旬
ふ系211号	飼料用米	東北北部及び中山間地	中生	8月4日	9月27日	9月下旬	10月中旬	9月下旬
べにごのみ	飼料用米・WCS 兼用	東北中部以南	早生の早	7月25日	8月31日	9月上旬	9月下旬	9月下旬
ふくひびき	飼料用米	東北中部以南	中生の中	8月9日	9月23日	9月下旬	9月下旬	9月中旬
べこあおば	飼料用米・WCS 兼用	東北中部以南	中生の晩	8月7日	9月24日	9月下旬	10月中旬	9月下旬
クサユタカ	飼料用米・WCS 兼用	東北中南部、北陸、関東以西	中生の中	7月30日	9月18日	9月上旬	9月中旬	9月中旬
夢あおば	飼料用米・WCS 兼用	東北中南部、北陸、関東以西	早生の晩	7月30日	9月10日	9月上旬	9月中旬	9月中旬
北陸193号	飼料用米	北陸、関東以西	晩生の晩	8月16日	10月4日	10月上旬	不適	9月中旬
モミマロン	飼料用米・WCS 兼用	関東以西	晩生の早	8月15日	10月9日	10月上旬	10月下旬	9月中旬
クサホナミ	飼料用米・WCS 兼用	関東以西	極晩生	8月24日	10月16日	10月中旬	10月中旬	9月中旬
クサノホシ	飼料用米・WCS 兼用	関東以西	晩生	8月28日	10月17日	10月中旬	10月中旬	9月下旬
タカナリ	飼料用米	関東以西	中生の早	8月13日	10月1日	10月上旬	不適	9月中旬
ホシアオバ	飼料用米・WCS 兼用	東北南部、関東以西	中生の中	8月14日	10月2日	10月上旬	10月中旬	10月上旬
西海203号	飼料用米・米粉用米	九州	晩生の早	9月2日	10月31日	11月上旬	11月上旬	10月上旬

ハッチングは食用品種より収穫期が遅れるもの

※農林水産省(2009a)：新しい多収米品種より著者作成

**Table 4** 稲発酵粗飼料の栽培体系の事例(新潟県)  
 A crop calendar of rice production including whole crop rice silage in Niigata pref.

作目	栽培法	面積	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
稲発酵粗飼料	乾田直播	4.9ha	堆肥散布・・・播種・・・除草剤・・・追肥・・・出穂・・・収穫 種子予措 5/16, 17 8/31 9/30 ~ 10/14							
	移植	1.5ha	堆肥散布・・・耕起代かき移植・・・除草剤・・・追肥・・・出穂・・・収穫 育苗 6/2 ~ 中干し 9/1 10/1 ~ 10/6							
主食用米 (コシヒカリ)	移植	20.6ha	耕起代かき移植・・・除草剤・・・追肥・・・出穂・・・収穫・・・堆肥散布 育苗 5/2 ~ 中干し 8/2 9/10 ~ 9/25							

※農山漁村文化協会(2008)を一部修正

水田の汎用化による減水深の増加、長期間通水していなかった用水路からの漏水の増加、高齢化や農業人口の減少に伴う用水管理の粗放化から、普通期を含めてた用水量総量が増加することも考えられる。更に、前述のように品種や栽培方法によっては収穫時期が遅くなることから、主食用米よりも長い灌漑期間が必要となり、新たな水利権の取得が必要となる場合がある。

一方、三重県津市における稲発酵粗飼料の導入事例では、収穫が10月12日に行われたが、地域の主要な主食用米であるコシヒカリは8月下旬に収穫が終了し、用水の利用時期が異なることから、近くのため池からポンプによる給水を行ったことが報告されている(農林水産省東海農政局, 2006)。

### 5 高温障害対策と用水需要

近年、西日本を中心に東北以南の広い地域で、高温障害による米の品質低下が問題となっている。現在提案されている高温障害対策のうち、水管理に関連するものの内容と用水需要への影響を整理した結果をTable 5に示す(友正, 山下, 2009)。

予防的技術は通常の用水管理に組み込まれ、毎年用水

需要が発生するが、対症療法的技術は、高温障害発生の危険がある場合にのみ用水需要が発生する。また高温回避技術は、出穂の時期を高温期とずらすか、高温期に水稻の温度を下げることを目的としており、前者では灌漑期間が変化し、後者では高温期の用水需要が変化する。特に対症療法的・高温回避技術としての掛け流し灌漑は、用水管理による高温障害対策の代表的な方法と考えられているが、極めて多量の用水量を必要とする(友正, 山下, 2009)。

## IV 用水需要の変化への対応の方向

### 1 用水需要の変化と水田灌漑用水量への影響

現在、戸別所得補償の検討など、農業政策は大きな転換点を迎えており、今後の水田農業における規模拡大や、水田面積の約4割で行われている生産調整とそれに伴う転作作物の生産がどのように推移するかは正確には予測し難く、その関連は定性的な記述にとどまらざるを得ないが、上記のような水田農業の変化の用水需要量への影響をFig.4にまとめた。規模拡大、転作作物としての新規需要米や稲発酵粗飼料の生産いずれの場合にも、灌漑

**Table 5** 用水管理に関する高温障害対策とその用水需要への影響 (友正ら, 2009)  
Water management techniques for high temperatures during ripening of rice and influences of them on water demand

高温障害対策	技術の性格		技術の内容	用水需要への影響
遅植え	予防的	高温回避	田植えを遅くして出穂期の高温を回避する。	用水ピークを形成する代かき期を含め灌漑期間が全体に遅くなる。
直播	予防的	高温回避	直播では出穂期が遅くなることを利用して、出穂期の高温を回避する。	灌漑期間が全体に変化する。乾田直播の場合には初期かん水量が大きく変化する。
晩生品種の利用	予防的	高温回避	晩生品種を作付けることにより出穂期を遅らせる。	品種の生育期間に応じて灌漑期間が長くなる。
高温耐性品種の利用	予防的	高温耐性強化	高温耐性の高い改良された品種を作付けする。	高温耐性品種の早晩性に応じて灌漑期間が変化する。
中干し	予防的	高温耐性強化	中干しの徹底により、落水期間を延長した場合の地耐力を確保する。	標準的な水管理に中干しが含まれている場合には用水需要は変化しない。
深水管理	予防的	高温耐性強化	分けつ期に深水管理を行うことで、白未熟粒の発生が抑制される。	イネの成長に応じて3～10cmの深水管理とした場合、湛水深の増加分100mmの用水需要が発生する。
掛け流し灌漑	予防的、 対症療法的	高温回避、 高温耐性強化	気温より低い用水を掛け流すことにより、水温及び地温を湛水状態よりもかなり低く抑えることができる方法。気温より低い用水の確保と用水量の確保が必要である。またイネの活力維持も目的としている。	宮城県等の指針によれば、掛け流し灌漑には10a当たり毎分200～300リットルの用水が必要である。これは288～432mm/dayに相当する。
昼間深水・ 夜間落水管理	対症療法的	高温回避	晴天時の高温時において、昼間はできるだけ深水管理とし夜間は逆に落水管理とする水管理方法。午前9時～10時頃かん水し、気温が用水量を下回り始める午後4時頃に落水する。掛流しよりは、地温水温低下の効果は低い。	昼間12cmの深水管理とした場合、120mm/dayの用水需要が発生する。
飽水・保水管理	対症療法的	高温回避	湛水せずに、土壌を常に湿潤状態に保つ方法(足跡に水が残る程度の水を保つ)。掛け流し程の効果は得られないが、出穂後の水管理を保水で保つことにより、乳白粒、胴割粒の発生が少なくなるデータがある。根に酸素を供給し、株元の温度及び地温が下がることで、稲及び根の活力維持に効果が有る。	節水的な水管理であり、用水需要は減少すると考えられる。
落水期間の延長	対症療法的	高温回避	落水期間を延長することにより、急激な乾燥による胴割粒の発生を抑制する。	落水期間の延長日数分、灌漑期間が長くなる。

森田 (2008b)、宮城県 (2008)、農林水産省水稲高温対策連絡会議対策推進チーム (2006) を参考に著者作成

期間の拡大や代かき用水量、普通期の用水量の増加が予測される。

このような用水需要の変化は、水利権および水源施設の貯水能力、用水路の送水能力に関係する。水田灌漑用水量の構成 (農林水産省構造改善局, 1993) に踏まえて、営農変化の影響を整理した結果を Fig.5 に示す。水稲作付け面積の拡大は、その水田内の用水だけでなく、送水のための施設管理用水量の増大をもたらす。これまで生産調整により通水していなかった水路にも配水するようになることによる配水管理水量の増大の他、長期間通水していなかった用水路からの漏水の増加や、農業人口の減少に伴う用水管理の粗放化に伴う送水損失水量の増大も懸念される。また、汎用水田化による減水深そのものが従前より増大していることも考えられる。このように用水需要の変化は、圃場内だけでなく送配水過程での用

水需要へも波及して地区レベルでの水田灌漑用水量に影響する点に留意する必要がある。

## 2 灌漑期間の拡大、期別用水量の増大への対応

灌漑期間の拡大は、調整池等による水利施設内のバッファ機能の強化によってもある程度可能であるが、数日を超える旬単位の用水需要をまかなうだけの貯水機能を整備することは一般に難しいことから、その実現の機会としては、水利権の更新時が最も現実的と考えられる。前述のように、規模拡大に伴う作業時期の分散はピーク用水量の低減をもたらすことがある。水利権上の灌漑期間を拡大する場合に、総取水量の制約等から、灌漑期間中の期別取水量を低減させる必要がある場合や、気候変動に伴う春期の河川流量の減少に対応する必要に迫られた場合に、このような特性を利用することが考えられる。



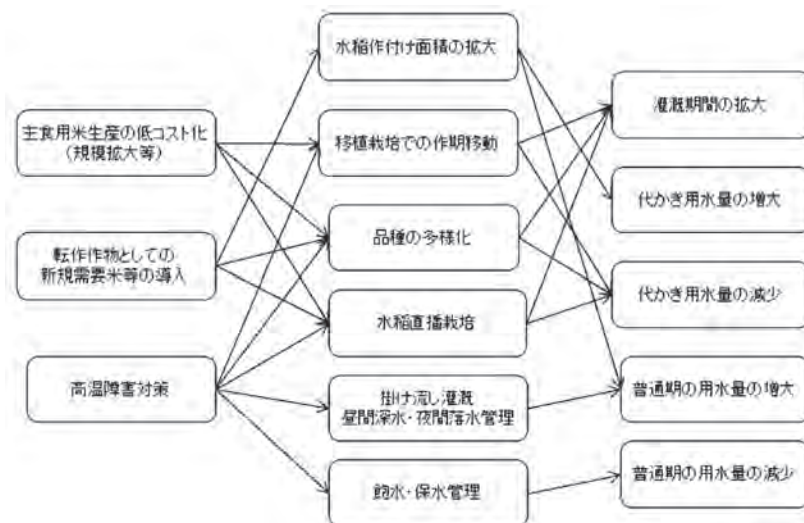


Fig.4 水田農業の営農変化に伴う用水需要への影響  
Changes of paddy field agriculture and its influences on agricultural water demand



Fig.5 水田灌漑用水量の構成と水田農業の営農変化に伴う影響  
Components of paddy field irrigation water and impacts of rice production changes

また、代かき期および普通期の期別用水量の増加については、用水計画には必要な水源と、一般に代かき期に発生するピーク用水量に対応する送水能力が確保されているが、上述のような減水深の変化や用水管理の粗放化、更には実際の水利用が計画と乖離してGW等へ作業期間が著しく集中している現状から、水管理システム等を活用した地区レベルでの用水管理の一層の適正化に加え、水利施設内のバッファ機能の強化が必要と考えられる。具体的なバッファ機能の強化の方法としては、排水を再利用する用水反復利用施設の設置、調整地の設置、チェックゲート等による水路内貯留能力の向上などがある。圃場レベルでも、水位の自動調整機能を持つ末端水管理施設（例えば藤森，若杉，小倉，2007）の整備を進めることで、農業労働力の減少のもとでも無効放流を減少させることが可能になる。

### 3 高温障害対策への対応

高温障害対策としての掛け流し灌漑や昼間深水・夜間落水管理によるピーク用水量の増大は、気象災害に対す

る対処療法的な用水管理であることから、毎年ではなく確率的に、代かき用水量をはるかに超える大きな用水需要を発生させるという、特異な性格を持っている。用水需給のアンバランスが表面化しやすいため、地域で問題が認識されやすい反面、用水の温度や水量、更に水利施設の送水能力の面から、灌漑地区の全域で、掛け流し灌漑や昼間深水・夜間落水管理を行うだけの水源が確保できることは希であろう。Fig.1の手順で検討した場合には、水利権や水利施設の改造によるハード面での制約の緩和よりも、普及側と用水供給側が連携した次善の用水管理の選択など、ソフト面での対応の重要性が高くなるであろう。例えば、飽水・保水管理は掛け流し灌漑や昼間深水・夜間落水管理に比べて、高温障害対策としての効果はやや低いですが、節水的な用水管理であり、用水供給に制約がある地区でも適用可能である（友正，山下，2009）。

### 4 普及側と用水供給側の連携による対応

水田農業では、ある品種や栽培技術の普及は、その地



域における用水供給の制約の範囲内でしか進まない。そのため、ある地域において直播栽培や新規需要米等の普及を推進する場合、それらを導入する動機が農家にないのか、用水供給の制約から導入できないのか、実績のトレンドでは判断できない。また、このような変化が地域内のどこで起こるか、集団的にか分散的にか、その場所や分布によって、地区レベルの用水量への影響は異なってくる。

灌漑期間の拡大や期別用水量の増加を、どの程度の期間、どの程度の水田面積で、どの場所を対象として想定すればよいかについては、地域の水田農業の将来像を、農業改良普及センター等の普及側と土地改良区等の用水供給側は十分協議する必要がある。

高温障害は将来の課題ではなく既に発生している問題であるが、これまでの対策から、普及側と用水供給側の連携は、あまり一般的とは言えない実情が明らかになっている。今後の用水管理については、まず現在の重要問題である高温障害対策などの新たな用水管理手法の導入に、普及側と用水供給側が連携して取り組むことが喫緊の課題である。そしてこの連携関係を通じて、地域の水田農業と用水需給の現状について相互理解を深め、中長期的な水田農業の変化に即し、労力や維持管理費を充分考慮した上での用水管理技術の導入、水利権の更新及び水利施設の改修へと展開させていくことが、現実的で望ましい一つの方向と考えられる。

## V 結 言

水田農業の営農は、新品種の導入など常に変化しており、用水需要もそれに応じて変化する。これに対応した用水供給側の対応はこれまでも様々な形で行われてきた。しかしながら、現在の農業政策の変化は、転作作物が麦、大豆等の畑作物から水稲作にも拡大することによって、水田農業における用水需要にこれまでにない大きな影響を及ぼす可能性がある。需要と供給の不均衡は、顕在化した時に直ちに解決することは難しい。また、長期的にも、ダム開発が抑制されている現在、大規模な水源開発は難しく、需要と供給のバランスを図る上で、用水管理、水利権の更新及び水利施設の改修の役割はますます重要になると考えられる。そのため、地域における水田農業の営農変化の方向と、用水供給の現状について、普及側、用水供給側の双方が認識を共有し、今後の対応のあり方を検討することが重要であろう。

## 参考文献

1) 友正達美・山下 正 (2009)：水稲の高温障害対策における用水管理の課題と対応の方向，農村工学研究所技報，第209号，131-138

2) 農林水産省生産局 (2008)：品目別生産コスト縮減戦略～生産現場の取組のヒント～，第7回 食料供給コスト縮減検証委員会配布資料，[http://www.maff.go.jp/www/council/council\\_cont/sougou\\_syokuryou/cost/07/ref\\_data1.pdf](http://www.maff.go.jp/www/council/council_cont/sougou_syokuryou/cost/07/ref_data1.pdf)

3) 農林水産省 (2009a)：平成21年農業技術の基本方針，農林水産省，[http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/gijutusidou/files/00\\_zenbun.pdf](http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/gijutusidou/files/00_zenbun.pdf)

4) 農林水産省 (2009b)：平成20年度食料・農業・農村の動向，農林水産省

5) 農林水産省 (2009c)：プレスリリース 戸別所得補償制度に関する意見の募集について，[http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo01/091023\\_1.html](http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo01/091023_1.html)

6) 農林水産省 (2009d)：平成21年10月23日赤松農林水産大臣記者会見概要，<http://www.maff.go.jp/j/press-conf/min/091023.html>

7) 佐久間泰一・佐藤政良・藤井志乃：用水不足が大規模稲作経営の植付け作業に及ぼす影響，平成15年土農業土木学会大会講演会講演要旨集，542-543

8) 河野 賢・佐藤政良：大規模請負農家の作業管理に対する水利条件の影響，平成15年土農業土木学会大会講演会講演要旨集，772-773

9) 農林水産省生産局農産振興課 (2008)：水稲直播栽培の現状について

10) 梅本 雅 (2008)：転換期における水田農業の展開と経営対応，農林統計協会，84-85

11) 農林水産省 (2009e)：新しい多収米品種－加工用米及び飼料用米等，新規需要米の生産に向けて－，1-29

12) 農林水産省東海農政局 (2006)：稲発酵粗飼料（ホールクロップサイレージ）で耕畜連携，<http://www.maff.go.jp/tokai/somu/joho/genchi/2006/jikyu/j200612-13.html>

13) 農山漁村文化協会 (2008)：年版農業技術 作物2008，農山漁村文化協会，279-288

14) 森田 敏 (2008)：高温登熟障害の克服技術，年刊農業技術2008，農文協，237-245

15) 宮城県 (2008)：宮城の稲作指導指針（基本編）

16) 農林水産省水稲高温対策連絡会議対策推進チーム (2006)：水稲の高温障害対策の克服に向けて（高温障害対策レポート），<http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/kouon/report.pdf>

17) 農林水産省構造改善局 (1993)：土地改良事業計画設計基準 計画 農業用水（水田），33

18) 藤森新作・若杉晃介・小倉 力 (2007)：水田のかんがい水位を自動管理する低コストな水位管理者，平成19年度農村工学研究所成果情報，[http://ss.nkk.affrc.go.jp/library/publication/seika/seikajyoho/2007/1\\_6.pdf](http://ss.nkk.affrc.go.jp/library/publication/seika/seikajyoho/2007/1_6.pdf)

# **Policy Dimension of Paddy Field Agriculture and its Influences on Agricultural Water Management**

TOMOSHO Tatsumi and YAMASHITA Tadashi

## **Summary**

Correct policy dimension of paddy field agriculture and its influences on agricultural water management are discussed by literature study. Extension of rice cropping season caused by diversification of rice variety, introduction of direct seeding rice cultivation, introduction of rice cultivation for new demand including whole crop rice silage, and countermeasures against grain damage under high temperatures during ripening of rice are driving force of agricultural water demand changes. The present problem is inappropriate water management against grain damage under high temperatures during ripening of rice with corporation of agricultural extension sector and agricultural water supply sector. Adequate renewal of water right and water supply infrastructure is medium and long term problem.

**Keywords :** paddy field, agricultural water demand, new demand rice, whole crop rice silage, grain damage under high temperature during ripening of rice, agricultural water management, direct seeding rice cultivation

## 変換バイオマスの農地施用効果の評価のための サトウキビ生育調査結果

陳 媽\*・平良正彦\*\*・前田剛希\*\*\*・比嘉明美\*\*\*\*・久場峯子\*\*\*\*・凌 祥之\*

### 目 次

I 緒 言	121	2 バガス炭と消化液の施用が土壌理化学 特性に与える影響	126
II 試験の概要と方法	122	3 バガス炭と消化液の施用がサトウキビ生育に 与える影響	129
1 供試したバガス炭と消化液	122	IV 結 言	133
2 試験区の概要および試験方法	122	参考文献	134
III 試験結果と考察	126	Summary	135
1 栽培期間中の降雨と気温	126		

### I 緒 言

宮古島は沖縄本島から南西約 300km に位置する。年平均気温は 23.3℃、年降雨量は約 2000mm で海洋性亜熱帯気候に属する。島全体の起伏が少なく、平坦であり主要な河川がない。地表面は透水性が高く、保水性に乏しい島尻マージ土壤に覆われており、その下に琉球石灰岩（帯水層）があり、さらに下には不透水性の島尻層群があるため、降雨の約 4 割が地下水として上下 2 層の間の帯水層にたまり、生活および農業用水のほとんどをこの地下水に依存している。近年、化学肥料の過剰施用と畜産廃棄物の不適切な管理によって地下水の水質が悪化していることが報告されている（田代・高平，2001；中西ら，2001）。安全な飲料水確保のため、化学肥料の適切施用や畜産廃棄物の有効利用対策を早急に立案する必要がある。その対策として、家畜ふん尿など島固有のバイオマスを利用した減肥栽培システムの確立が考えられる。減肥栽培システムとして、畜産廃棄物のメタン発酵によるエネルギーの回収と副産物である消化液の農地利用が注目されている。

沖縄の方言で「ウージ」とよばれるサトウキビは、宮古島の気候に適し、宮古島市におけるサトウキビの栽培

面積は全畑地面積の約 80% を占めている。サトウキビの作柄は宮古島の経済を大きく左右している。サトウキビは、根で吸収した養・水分と葉で光合成した炭水化物を使って、成長しながら糖分を茎に蓄積する作物である（角ら，2001）。従ってサトウキビの収量と品質は、圃場の養・水分含量によって左右される。安定かつ良質なサトウキビを得るためには、保水性に乏しい島尻マージ土壤の改良による有効水分量の保持を行う必要がある。

陳・凌（2005）の既存研究では、サトウキビの搾りかす（バガス）を炭化したバガス炭は、多孔質な内部構造を持ち、農地に施用すると土壤の保水性を向上させ、浸透流出水の硝酸態窒素を除去させることができると報告されている。さらに、陳ら（2008）は、消化液とバガス炭との混合施用がサトウキビ生育および硝酸態窒素の浸透流出に及ぼす影響について、室内ライシメーターのサトウキビ夏植え栽培試験で検討した。その結果、バガス炭の施用による浸透流出水中の硝酸態窒素の濃度低下が明らかにされた。また、消化液とバガス炭の施用によって、サトウキビの糖度や原料茎重が増加し、可製糖量が高くなる可能性も示唆された。しかし、室内ライシメーターの天井の高度制限により、実験上の栽培期間（7ヶ月）は一般的なサトウキビ夏植え栽培期間（1年半）より短く制限された。また、室内ライシメーター栽培で台風の影響を受けていないことから、自然条件下における消化液とバガス炭との混合効果は未解明である。

夏植え栽培は、春植え栽培や株出し栽培に比較して、台風や干ばつの影響が少ないため、宮古島地域のサトウキビ栽培は、夏植えが 93%、春植えが 5%、株出しが 2% で、夏植えが大部分である。しかし、2年1作で土地利用効率が低いことから、栽培コストの低減、生産性の向

\* 農地・水資源部農地工学研究室

\*\* 沖縄県南部農業改良普及センター

\*\*\* 沖縄県農業研究センター宮古島支所

\*\*\*\* 沖縄県農業研究センター土壌環境班

平成21年11月5日受理

キーワード：消化液，バガス炭，サトウキビ栽培，可製糖量，有効水分量

上のため、春植え株出し型栽培への移行が求められている。ただし、かんがい設備の未整備地域では干ばつの影響が大きく、サトウキビ春植えの生産が不安定であるため、バガス炭の保水効果による春植え栽培転換の可能性についても検証する必要がある。

そこで、本研究では、実用化に向けて、牛ふんメタン発酵の副産物である消化液および600℃で炭化された保水性に富むバガス炭などのバイオマス変換物がサトウキビの栽培に及ぼす影響を解明するため、サトウキビの春植えおよび夏植え圃場栽培試験を行い、消化液の肥料効果やバガス炭の保水効果を検証した。

なお、本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発（バイオマス利用モデルの構築・実証・評価）」において行われた。同プロジェクト研究の関係者の方々、消化液およびバガス炭を提供いただいた非営利特定活動法人亜熱帯バイオマス利用研究センターに感謝致します。

## II 試験の概要と方法

### 1 供試したバガス炭と消化液

供試した炭化物は、サトウキビの絞りかす（バガス）を温度600℃（外熱式スクリュウ3段型炭化炉）で炭化したものである。バガス炭はFig.1を示しているように細かい小粒状で、棒状の木炭片とは異なる形状をしている。バガス炭は保水性が木炭に比べても高く、吸水率は約500%であると報告されている（上野ら, 2006）。細かい繊維状であるバガス炭の乾燥密度は0.078g/cm<sup>3</sup>と小さい。また、バガス炭の全窒素、全炭素、リン、カリの含有量はそれぞれ0.37%、63.2%、0.8mg/kg、19.9mg/kgであった。

供試した牛ふん由来の消化液は、非営利特定活動法人亜熱帯バイオマス利用研究センターで製造されたものであり、N、P、Kの含有量は各々0.08%、0.009%、0%あるいは0.09%、0.036%、0.024%程度であった（生産日、

原料の違いによって生産される消化液のN、P、Kの含有量は多少異なる）。また、消化液はFig.2に示すように黒褐色を呈し、粘性は小さく、大きな沈殿物も見あたらない。

### 2 試験区の概要および試験方法

#### a 試験圃場

沖縄県農業研究センター宮古島支所の圃場において2007年4月～2009年1月の期間に栽培試験を行った。圃場土壌は琉球石灰岩を母材とする島尻マージ土壌で、有効土層厚は約60cmである。宮古島支所および試験圃場の位置図をFig.3に示す。

#### b 試験設定

春植え1回目、2回目および夏植え栽培試験の試験条件と施肥設計をTable 1とTable 2に示す。

#### c サトウキビ生育の調査方法

定期的に全茎数、仮茎長および生葉数などを観測し、葉面積と葉のSPADを測定した。収穫時には、収穫したサトウキビについて、ランダムに10本を選定し、収量調査（茎重、茎長、茎径）と蔗汁分析（Brix、検糖読み、バガスの重量）を行った。なお、全茎数と全茎重について、すべての茎を収穫して測定した。各測定項目は以下の通りである。

- ①仮茎長：発芽位置から+1葉（最上展開葉）の肥厚帯までの長さ
- ②生葉数：全葉身面積の半分以上緑色に呈し、ロール葉を除いた半展開以上の葉の数
- ③葉面積：第3展開葉の葉長と葉幅を測定し、葉面積 = 0.643 × 葉長 × 葉幅で計算した
- ④茎長：完全展開+5葉の着生節部から刈り取り部までの長さ
- ⑤茎重：梢頭部を除いた茎の重量
- ⑥茎径：茎長を測定した茎の中心に当たる節間の中央部の直径



Fig.1 バガス炭

Photo of bagasse charcoal



Fig.2 消化液

Photo of digested slurry





Fig. 3 沖縄県農業研究センター宮古島支所の位置と試験圃場の状況  
Surrounding of Miyago island branch of Okinawa prefectural agricultural research center and experimental field

Table 1 試験の条件  
Condition of experiment

	春植え 1 回目	春植え 2 回目	夏植え
植え付け本数	24000 本 /ha (換算)		
かんがい	自然降雨 + かんがい (不定時)		
供試品種	農林 15 号 (Ni15)	農林 8 号 (Ni8)	農林 15 号 (Ni15)
栽培期間	2007.4.6 ~ 2008.1.16	2008.3.25 ~ 2009.1.14	2007.9.6 ~ 2009.1.14
試験区	A. 化学肥料区 B. 化学肥料 + 1% バガス炭区 C. 化学肥料 + 消化液 + 1% バガス炭区 D. 化学肥料 + 2% バガス炭区 E. 化学肥料 + 消化液 + 2% バガス炭区	A. 無施肥区 B. 減肥区 C. 化学肥料区 D. 化学肥料代替区 E. 化学肥料代替 + バガス炭区 F. 化学肥料上乗せ + バガス炭区	A. 化学肥料区 B. 化学肥料 + バガス炭区 C. 消化液代替 + バガス炭区
区画・反復	畦幅 130cm A 区 20m <sup>2</sup> , 4 反復 B,C,D,E 区 10m <sup>2</sup> , 3 反復	畦幅 130cm A 区 5m <sup>2</sup> , 4 反復 B 区 5m <sup>2</sup> , 6 反復 C,D,E,F 区 20m <sup>2</sup> , 3 反復	畦幅 130cm, 1 区 20m <sup>2</sup> 反復 1 は前作なし圃場 反復 2,3 は前作あり圃場
基肥 (芽出肥) 追肥 1・培土 追肥 2・培土	2007.4.6 : N,P,K : 60,33.8,33.8 kg/ha 2007.6.6 : N,P,K : 60,33.8,33.8 kg/ha 2007.7.11 : N,P,K : 80,45,45 kg/ha	2008.5.7 : N,P,K : 66,37.5,37.5 kg/ha 2008.6.20 : N,P,K : 70,39.4,39.4 kg/ha 2008.7.11 : N,P,K : 70,39.4,39.4 kg/ha	2007.9.7 : N,P,K : 72,40.5,40.5 kg/ha 2007.10.25 : N,P,K : 48,27,27 kg/ha 2008.2.19 : N,P,K : 120,67.5,67.5 kg/ha
消化液施用	5000 L/ha (窒素含量 4kg/ha) 消化液を 2007.7.26 に C,E 区に施用	76300L/ha (窒素含量 68kg/ha) あるいは 64000L/ha (窒素含量 58kg/ha) 2008.6.20 と 7.11 に D,E,F 区に追肥として施用	9000 L/ha (窒素含量 7.2kg/ha, 肥効率を考慮すると 3.6kg/ha) を考慮すると 3.6kg/ha) 2007.9.6 に C 区に基肥として施用 81000 L/ha (窒素含量 64.8kg/ha, 肥効率を考慮すると 32.4kg/ha) 2007.12.28 に追加施用

注：バガス炭の施用は地中 30cm までに土壌の乾燥重量の 1%, 2% のバガス炭 (9, 18t/ha) を施用。春植え 1 回目の 1% 区を除いて、すべて 2% 施用。バガス炭施用量の換算: 1t/m<sup>3</sup> (土壌の乾燥重量) × 0.3m (施用土層深) × 10000m<sup>2</sup> (1ha) × 1% × (1-70% (バガス炭含水比)) = 9t/ha

**Table 2** 施肥設計  
Design for fertilizer application

春植え 1 回目 (単体肥料使用)

試験区	基肥		追肥 1		追肥 2	
	化肥量 (N,P,K) (kg/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 (N,P,K) (kg/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 (N,P,K) / 消化液 (kg/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)
A	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	381, 265, 75 / 0	80, 45, 45
B	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	381, 265, 75 / 0	80, 45, 45
C	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	381, 265, 75 / 5000	84, 45.5, 45
D	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	381, 265, 75 / 0	80, 45, 45
E	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	286, 199, 56	60, 33.8, 33.8	381, 265, 75/5000	84, 45.5, 45

注：単体肥料は N, P, K は硫安 (21%), 過磷酸石灰 (17%), 塩化カリ (60%) を使用  
消化液の N,P,K 含量は 0.08%, 0.009%, 0% であった  
計算ミスで、消化液は予定量の 1/15 しか施用していなかった

春植え 2 回目 (複合肥料使用)

試験区	基肥		追肥 1		追肥 2	
	化肥量 (kg/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 / 消化液 (kg/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 / 消化液 (kg/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)
A	0	0	0 / 0	0	0 / 0	0
B	412.5	66, 37.5, 37.5	223.0 / 0	36, 20.1, 20.1	223.0 / 0	36, 20.1, 20.1
C	412.5	66, 37.5, 37.5	437.5 / 0	70, 39.4, 39.4	437.5 / 0	70, 39.4, 39.4
D	412.5	66, 37.5, 37.5	223.0 / 76300	104, 26.9, 20.1	223.0 / 76300	104, 26.9, 20.1
E	412.5	66, 37.5, 37.5	223.0 / 76300	104, 26.9, 20.1	223.0 / 76300	104, 26.9, 20.1
F	412.5	66, 37.5, 37.5	451.2 / 64000	130, 46.3, 40.6	451.2 / 64000	130, 46.3, 40.6

注：複合肥料の N, P, K は 16%, 9%, 9% である  
消化液の N,P,K 含量は 0.09%, 0.036%, 0.024% であった

夏植え (複合肥料使用)

試験区	基肥		追肥 1		追肥 2	
	化肥量 / 消化液 1 / 消化液 2 (kg/ha / L/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 (kg/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)	化肥量 (kg/ha / L/ha)	施用量 (N,P,K) (kg/ha)
A	450 / 0 / 0	72, 40.5, 40.5	300	48, 27, 27	750	120, 67.5, 67.5
B	450 / 0 / 0	72, 40.5, 40.5	300	48, 27, 27	750	120, 67.5, 67.5
C	0 / 9000 / 81000	72, 32.4, 21.6	300	48, 27, 27	750	120, 67.5, 67.5

注：複合肥料の N, P, K は 16%, 9%, 9% である  
消化液の N,P,K 含量は 0.08%, 0.009%, 0% であった  
計算ミスで、1 回目の消化液の施用量が不足したため、1 回目の追肥よりも遅い時期に 2 回目の消化液を追加施用した

- ⑦葉の SPAD：SPAD 計の読み値 (作物体の窒素含量が多くなると、葉緑素含量も多くなり、葉の緑色が濃くなる。SPAD 計は、葉緑素含量を客観的に数値で正確にデジタル表示する器具である)
- ⑧絞り汁の Brix (ブリックス)：糖度計 (屈折計) の測定表示値
- ⑨検糖読み：検糖器で表示された数字 (糖度 (絞り汁中に糖分が何 g 含まれているかといった糖分の濃度を示す値) は検糖読み値から求められる)
- ⑩バガスの重量：圧搾後と残留砂糖成分を煮詰め出し

たものを乾燥した後の重量

⑪可製糖量を以下の式に従い計算

$$\text{可製糖量} = \text{原料茎重} \times \text{可製糖率} / 100 \quad (1)$$

$$\text{可製糖率} = \text{純糖率 (糖度 / Brix)} \times \text{甘蔗糖度 (糖度} \times \text{ジャワ比)} \quad (2)$$

$$\text{繊維分} = (\text{圧搾後バガス重} / \text{供試キビ茎重}) \times (\text{乾燥バガス重} / \text{バガス重 (100g)}) \quad (3)$$

ジャワ比は計算された繊維分の値をジャワレーシヨ表 (日本分蜜糖工業会製糖技術研究会, 1983) に代入して求めた。

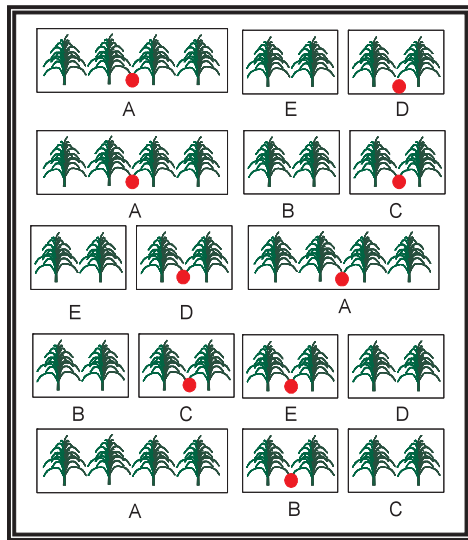
すべての項目について、反復の平均値を求め、各試験区におけるサトウキビの生育の状況を比較した。

d 土壤理化学特性調査

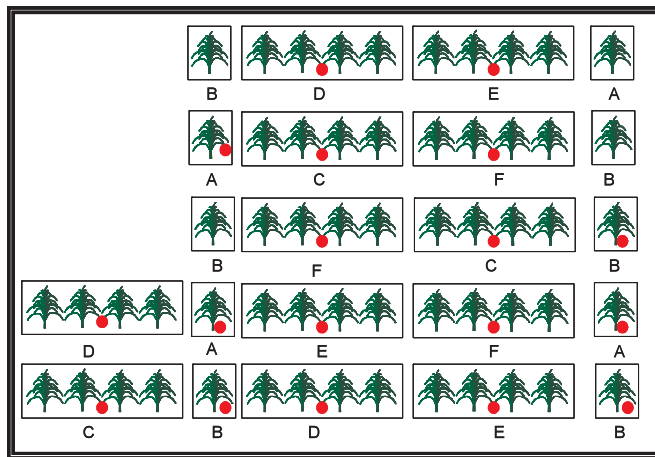
春植え 1, 2 回目, 夏植えの試験区の配置と採土ポイントを Fig.4 に示した。

春植え 1 回目については、肥料やバガス炭施用前の攪乱土を採取し、土の炭素と窒素の含有量を NC アナライザー NC-220F 用いて乾式燃焼法で測定した。収穫後、

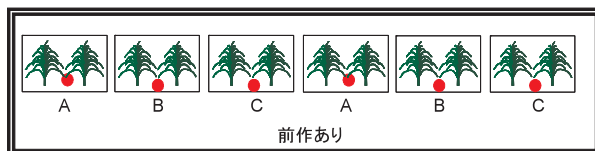
各試験区について表層 10cm までの不攪乱土と攪乱土を採取し、土の乾燥密度, 含水比, 透水性, 有効土壌水分量, 炭素・窒素含量を測定した。なお、土の乾燥密度と含水比は乾燥法で、透水性は変水頭法で、pF1.6-3.0 間の有効土壌水分量は加圧板法で測定した。さらに、降雨による土壌の水分変化を明らかにするため、0-10cm, 10-20cm までの土壌の体積含水率は差し込み式の Hydrosense 社のハンディー型土壌水分計を用いて測定した。



- a) 春植え 1 回目
- A. 化学肥料区
  - B. 化学肥料+1%バガス炭区
  - C. 化学肥料+消化液+1%バガス炭区
  - D. 化学肥料+2%バガス炭区
  - E. 化学肥料+消化液+2%バガス炭区
- 採土ポイント
- 5 m<sup>2</sup>



- b) 春植え 2 回目
- A. 無施肥区
  - B. 減肥区
  - C. 化学肥料区
  - D. 化学肥料代替区
  - E. 化学肥料代替+バガス炭区
  - F. 化学肥料上乘せ+バガス炭区
- 採土ポイント
- 5 m<sup>2</sup>



- c) 夏植え
- A. 化学肥料区
  - B. 化学肥料+バガス炭区
  - C. 消化液基肥代替+バガス炭区
- 採土ポイント
- 10 m<sup>2</sup>

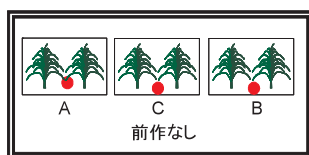


Fig. 4 試験区の配置と採土ポイント  
Place of sugarcane experimental plots and sampling point

春植え2回目については、土壌の物理性の変化を明らかにするため、栽培開始1ヶ月後の栽培初期のC.化学肥料区、D.化学肥料代替区、E.化学肥料代替+バガス炭区、F.化学肥料上乘せ+バガス炭区と収穫後のすべての試験区の表層10cmまでの不攪乱土を採集し、土の乾燥密度、含水比、透水性、有効水分量を測定した。また、土壌の化学性の変化を明らかにするため、栽培開始1ヶ月後のC.化学肥料区、D.化学肥料代替区、E.化学肥料代替+バガス炭区、F.化学肥料上乘せ+バガス炭区と1回目追肥後のすべての試験区の表層10cmまでの攪乱土、収穫後のすべての試験区の0-20cm、20-50cmの攪乱土を採取した(各試験区に3地点)。pHとECおよび窒素、可給態リン酸、カリ、炭素などの含有量を測定した。なお、pHはHORIBA社のpH Meter M-12で、ECはTOADKK社のEC Meter CM-30Gで、可給態リン酸はHITACHI U-2000を用いてトルオーグ法で、交換性塩基は1M酢酸アンモニウムで抽出後にVISTA-MPXを用いてICP法で、炭素と窒素の含有量はSUMIGRAPH NC-22Fを用いて乾式燃焼法で測定した。

夏植えについては、3つの反復のうち2つは前作あり、1つは前作なしと異なっているため、肥料やバガス炭施用前と収穫後に、Fig.4に示した採土ポイントの攪乱土を採取し、土の炭素と窒素の含有量をNCアナライザー

NC-220F用いて乾式燃焼法で測定した。

### III 試験結果と考察

#### 1 栽培期間中の降雨と気温

Fig.5に気象統計情報(気象庁、閲覧日:2009年10月10日)に記録された栽培期間中および平年における宮古島の月降雨量と月平均気温を示した。全栽培期間中の月平均気温は平年並みであった。春植え栽培1回目の作付け期間中の総降雨量は平年並みであったが、サトウキビの成長旺盛期に当たる7月に降雨が少なかった。春植え栽培2回目の作付け期間中の総降雨量は平年より300mmが少なく、さらにサトウキビの成熟期に当たる12月にも降雨が少なかった。夏植え栽培の作付け期間中の総降雨量は平年並みであった。また、全栽培期間中に直撃の台風がなく、日降雨量が100mmを超える日は無かった。

#### 2 バガス炭と消化液の施用が土壌理化学特性に与える影響

##### a 土壌含水比に与える影響

春植え1回目収穫後、春植え2回目栽培初期と収穫後に採取した表層不攪乱土の土壌含水比をFig.6に示した。

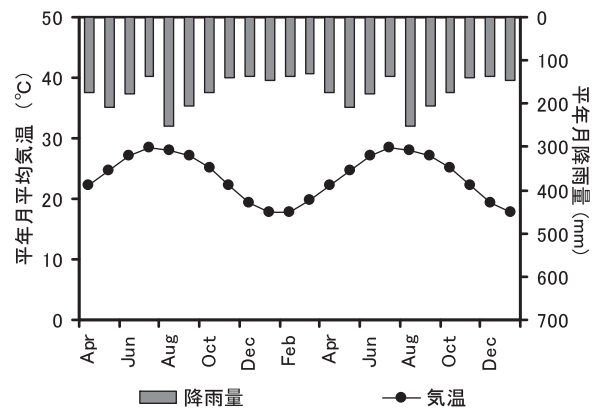
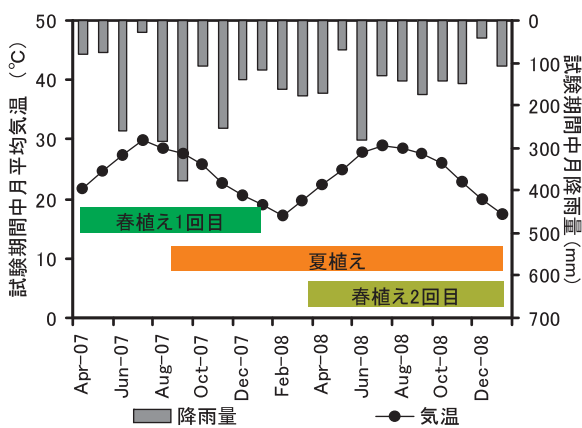


Fig.5 月降雨量と月平均気温  
The rainfall and temperature of each month

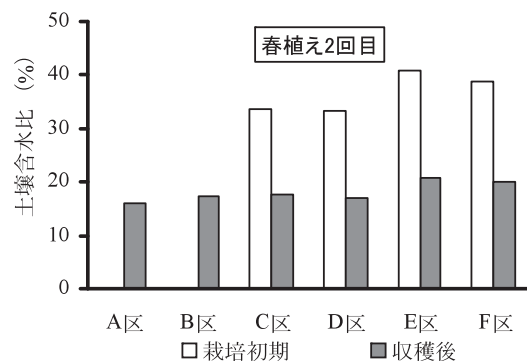
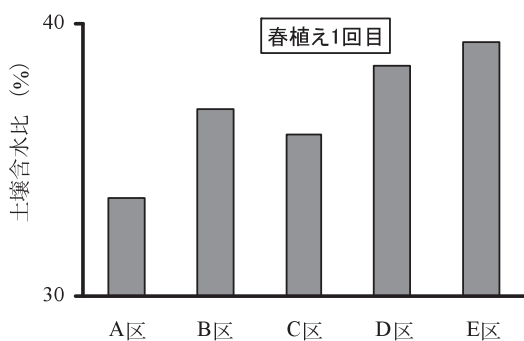


Fig.6 各試験区の土壌水分  
Water content of soil in each experimental plot



栽培初期、収穫後におけるバガス炭施用区の土壤水分はバガス炭無施用区を6～20%上回った。また、1回目収穫後および2回目栽培初期における各試験区土壤含水比は30%以上だったのに対して、2回目収穫後における各試験区土壤の含水比は20%以下であった。これは収穫前の降雨が少なかったためと考えられる。

春植え栽培1回目のサトウキビの蒸散の影響が少ない栽培初期におけるバガス炭無施用のA.化学肥料区、バガス炭1%施用のB.化学肥料+1%バガス炭区とバガス炭2%施用のD.化学肥料+2%バガス炭区の24mmの降雨前後の土壤体積含水率の変化をFig.7に示した。バガス炭施用区の表層10cmまでの土壤体積含水率はバガス炭無施用区を大きく上回った。深度10～20cmにおいても、バガス炭2%施用区の土壤体積含水率はバガス炭無施用区を大きく上回った。2%以上のバガス炭の施用は土壤水分の保持に有効であることが明らかである。

**b 土壤乾燥密度に与える影響**

春植え栽培1回目収穫後、春植え栽培2回目栽培初期と収穫後の土壤乾燥密度をFig.8に示した。春植え1回目収穫後における1%、2%バガス炭施用区の土壤乾燥密度はそれぞれバガス炭無施用区の96%と93%であった。春植え2回目における栽培初期と収穫後のバガス炭施用区の土壤乾燥密度はそれぞれバガス炭無施用区

の93%と91%であった。農作業により収穫後の土壤乾燥密度は栽培前より高くなったが、バガス炭施用区の乾燥密度増加は無施用区より少なかった。バガス炭の施用によって表層土壤の圧密程度を下げられた。肥料成分が多い柔らかい表層は、太くて広い根群の形成に好条件であった。

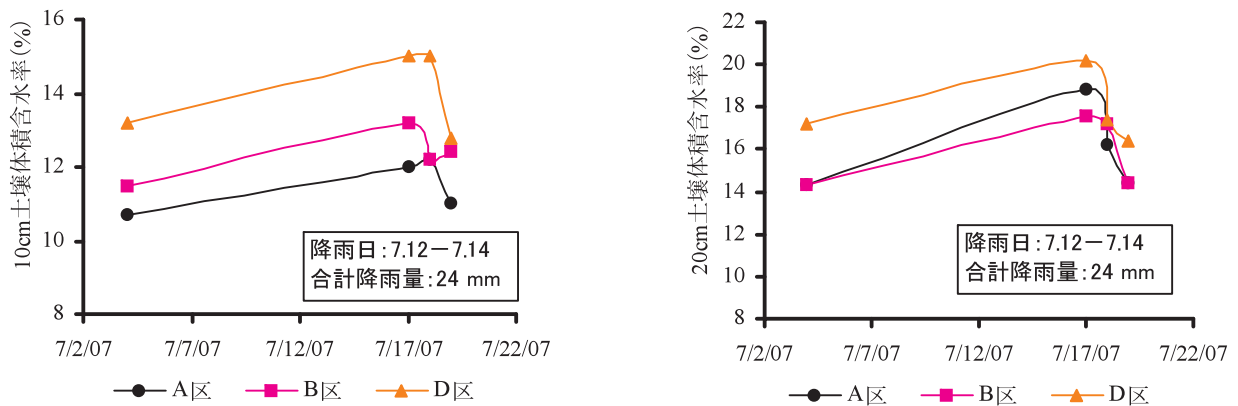
**c 土壤飽和透水係数に与える影響**

春植え1回目収穫後、春植え2回目栽培初期と収穫後の土壤飽和透水係数をFig.9に示した。各試験区にはあまり差が見られず、バガス炭や消化液の施用が土壤透水性に与える影響は明らかでない。

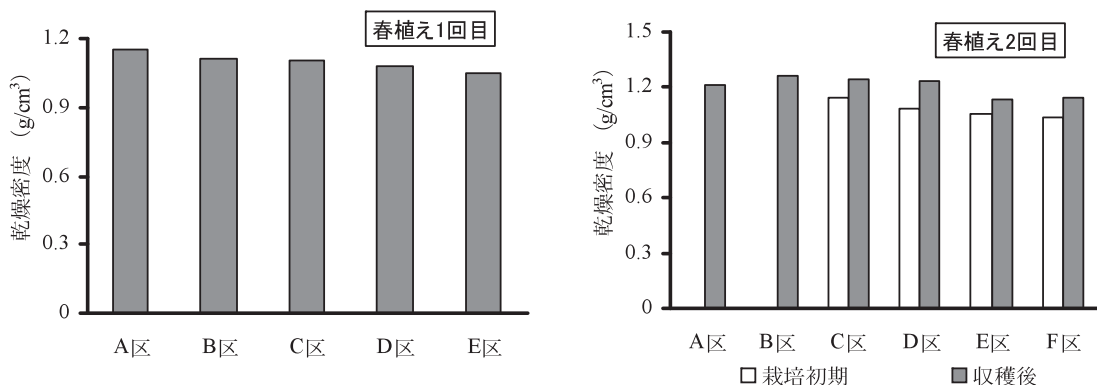
**d 有効土壤水分量に与える影響**

春植え1回目収穫後、春植え2回目栽培初期と収穫後の有効土壤水分量をFig.10に示した。春植え1回目収穫後における1%、2%バガス炭施用区の有効土壤水分量は各々バガス炭無施用区の1.2倍、1.5倍であった。春植え2回目における栽培初期と収穫後のバガス炭施用区の有効土壤水分量は各々バガス炭無施用区の約1.1倍、1.3倍であった。バガス炭の施用は有効土壤水分量を増加させた。また、春植え2回目の収穫後の有効土壤水分量が栽培初期より多くなった理由は、pF1.6-2.3間の細間隙が増加したためと考えられる。

春植え2回目の収穫後におけるバガス炭無施用のC.化



**Fig.7** 降雨に伴う各試験区の土壤体積含水率変化  
Changes in water content of soil in each experimental plot due to rainfall



**Fig.8** 各試験区の土壤乾燥密度  
Dry density of soil in each experimental plot

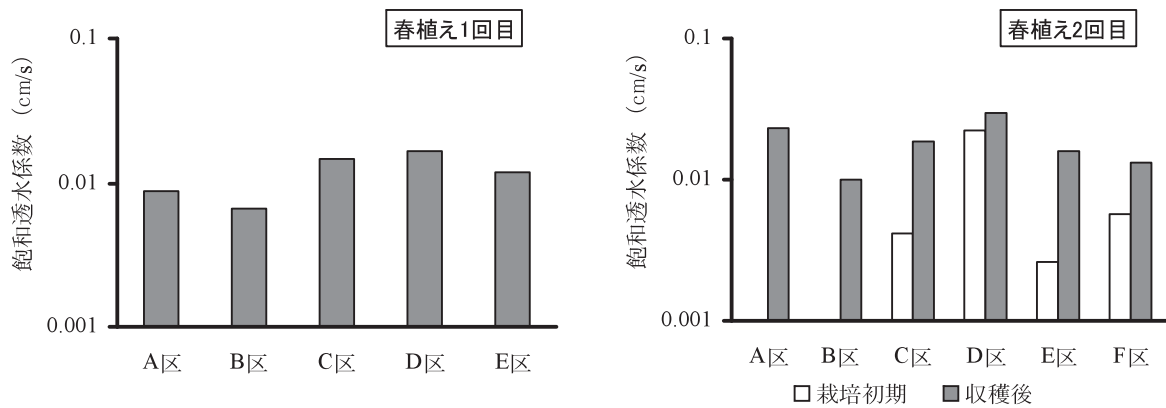


Fig.9 各試験区の土壤透水性  
Soil permeability in each experimental plot

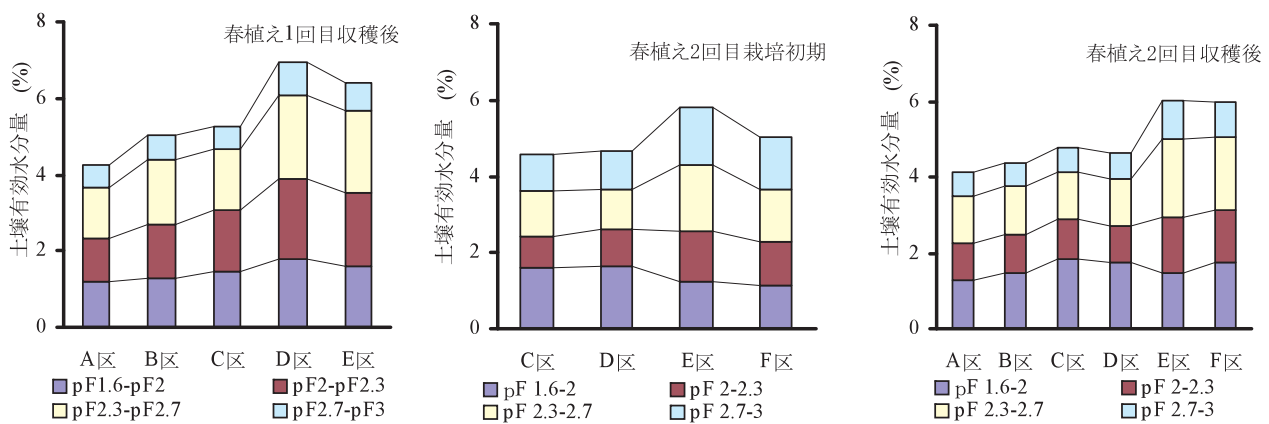


Fig.10 各試験区の有効土壤水分量  
Soil available moisture in each experimental plot

学肥料区とD.化学肥料代替区の有効土壤水分量にはあまり差がないことや、バガス炭施用で、消化液の施用量が異なったE.化学肥料代替+バガス炭区とF.化学肥料上乗せ+バガス炭区の有効土壤水分量には差がないことから、消化液の施用は土壤有効水分の増加に効果がないと考えられる。

e 土壤化学性に与える影響

春植え1回目施肥前と収穫後の表層10cm土壤の窒素と炭素含量の変化をTable 4に示した。バガス炭の窒素、炭素、カリの含有量は0.37%、63.2%、19.9mg/kg

であり、1%のバガス炭を施用すると、土壤の窒素、炭素、カリの含有量は0.0037%、0.632%と0.199mg/kgを増加する単純計算となり、2%のバガス炭を施用すると、土壤の窒素、炭素とカリの含有量を0.0074%、1.264%と0.398mg/kg増加する単純計算となる。収穫後と施肥前の窒素と炭素の増加量はA.化学肥料区では0.003%と0.071%であり、1%バガス炭施用のB.化学肥料+1%バガス炭区とC.化学肥料+消化液+1%バガス炭区の平均値は0.017%と0.747%で、2%バガス炭装用のD.化学肥料+2%バガス炭区とE.化学肥料+消化液+2%バガ

Table 4 春植え1回目の土壤化学性の変化  
Change in soil chemical properties of spring planted (First)

処 理 区	窒 素 (%)			炭 素 (%)		
	施肥前	収穫後	差	施肥前	収穫後	差
A. 化学肥料区	0.153	0.156	0.003	1.295	1.365	0.071
B. 化学肥料+1%バガス炭区	0.153	0.170	0.017	1.331	2.212	0.881
C. 化学肥料+消化液+1%バガス炭区	0.150	0.166	0.016	1.248	1.865	0.613
D. 化学肥料+2%バガス炭区	0.155	0.175	0.020	1.269	2.903	1.634
E. 化学肥料+消化液+2%バガス炭区	0.148	0.175	0.026	1.878	3.523	1.645

ス炭区の平均値は0.023%と1.640%であった。収穫後におけるバガス炭施用区の窒素と炭素の増加量は化学肥料施用による増加量とバガス炭施用による窒素と炭素の増加量の合計を上回った。これは、バガス炭による窒素吸収があったためと推測した。

春植え2回目栽培初期の2008年4月28日、1回目の追肥後の2008年7月10日の表層10cmまでの土壌、および収穫後の2009年1月14日の0-20cm(20cmと称す)、20-50cm(50cmと称す)の土壌のpHとECおよび全窒素、可給態リン酸、カリ、炭素の含有量をFig.11に示した。pHについては、各試験区の間には差が見られず、1回目の追肥後に一時各試験区のpHが下がったが、収穫時にはまた元に戻った。ECについては、各試験区の間には差が見られず、1回目の追肥後に一時各試験区のEC上がったが、収穫時にはまた元に戻った。特にC.化学肥料区と多施肥のF.化学肥料上乘せ+バガス炭区では、ECの増加現象は顕著であった。サトウキビの成長

に伴って、土壌中の可給態リン酸とカリ濃度が下がったが、カリ含有量が19.9mg/kgのバガス炭を施用したことで、E.化学肥料代替+バガス炭区とF.化学肥料上乘せ+バガス炭区のカリ濃度は高い水準を維持した。

夏植え施肥前と収穫後の表層土壌の窒素と炭素含量の変化をTable 5に示した。前作あり圃場における収穫後と施肥前の窒素増加量はA.化学肥料区は-0.016%に対し、B.化学肥料+バガス炭区は0.015%であった。収穫後におけるバガス炭施用区の窒素増加はバガス炭施用による窒素の単純増加量を上回った。これは、バガス炭による窒素吸収があったためと推測した。

### 3 バガス炭と消化液の施用がサトウキビ生育に与える影響

#### a 春植え1回目の調査結果

Fig.12は春植え1回目の定期調査におけるサトウキビの仮茎長、生葉数とSPAD値を示している。各試験区に

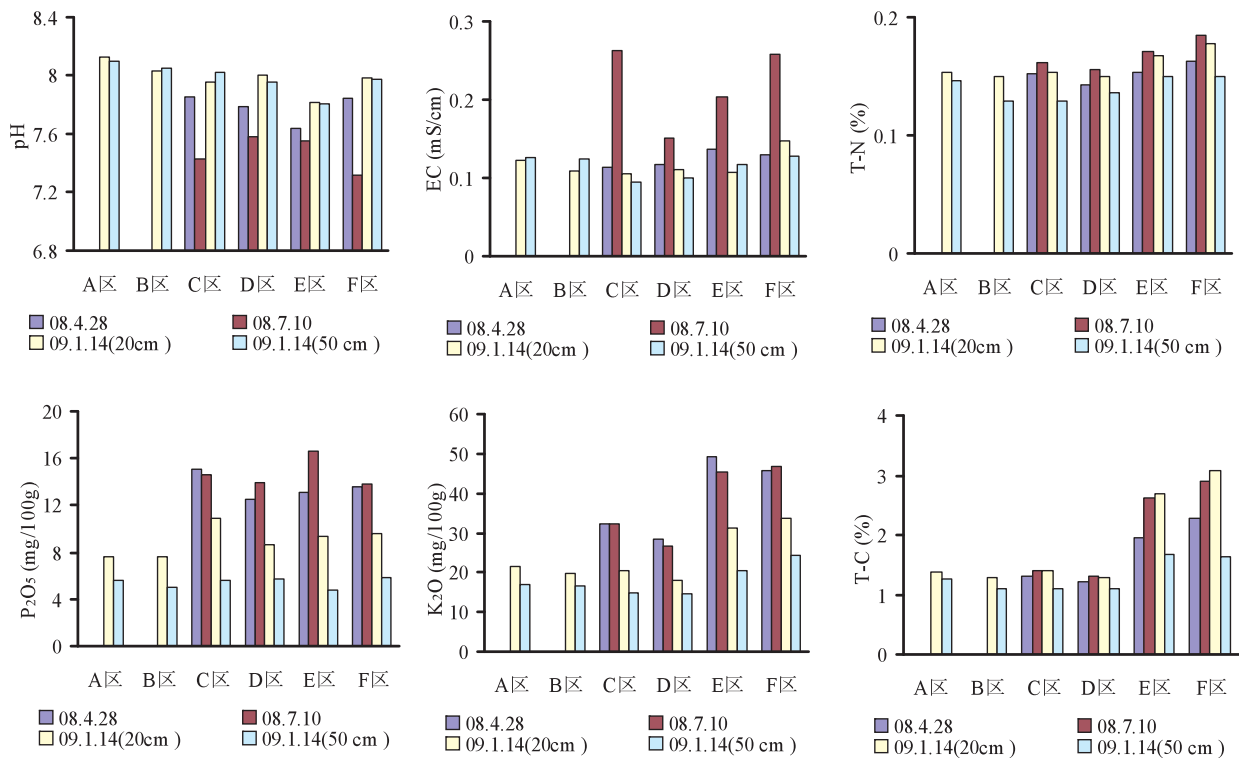


Fig. 11 春植え2回目の土壌化学性の変化  
Change in soil chemical properties of spring planted (Second)

Table 5 夏植えの土壌化学性の変化  
Change in soil chemical properties of summer planted

処 理 区	前作あり				前作なし			
	T-N (%)		T-C (%)		T-N (%)		T-C (%)	
	施肥前	収穫後	施肥前	収穫後	施肥前	収穫後	施肥前	収穫後
A. 化学肥料区	0.176	0.160	1.536	1.514	0.149	0.148	1.018	1.155
B. 化学肥料+バガス炭区	0.182	0.197	1.415	3.830	0.158	0.159	1.160	2.672
C. 消化液代替+バガス炭区	0.189	0.180	1.458	2.722	0.160	0.159	1.133	3.197

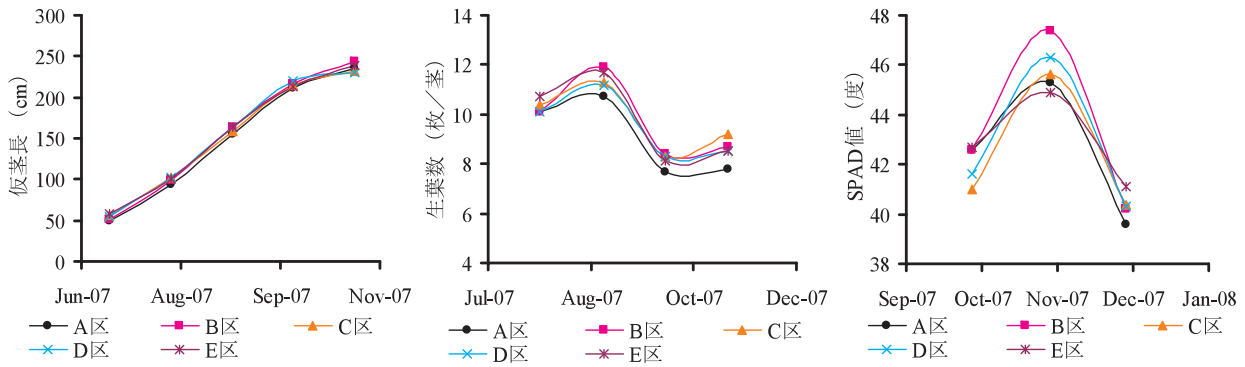


Fig. 12 春植え 1 回目サトウキビの仮茎長、生葉数と SPAD 値の時間的変化  
Change in stalk length, leaves number and leaf color of spring planted sugarcane (First)

おける仮茎長について差が見られなかった。光合成可能量を表わす生葉数とサトウキビの窒素含量を表わす SPAD 値などの項目については、バガス炭施用区は化学肥料区より上回り、B. 化学肥料 + 1%バガス炭区は最も高い値を示した。バガス炭の施用はサトウキビの生育に良好な効果を与えたことが認められた。

春植え 1 回目で収穫したサトウキビの茎長、茎径、葉面積、一茎重、SPAD 値、Brix 値、糖度、繊維分、可製糖率、原料茎重、可製糖量を Table 6 に示した (3 反復の各項目のバラツキは 25% 以内であった)。

各試験区の Brix や糖度などの品質には差が見られなかった。B. 化学肥料 + 1%バガス炭区のサトウキビ茎長、茎径、茎重などの指標が高かったが、各試験区のサトウキビ茎数を揃えたにも関わらず、E. 化学肥料 + 消化液 + 2%バガス炭区のサトウキビの分けつが多く、原料茎数が最も多いため、原料茎重が最も重かった。E. 区の

可製糖量は A. 化学肥料区の 1.14 倍、C. 化学肥料 + 消化液 + 1%バガス炭区の 1.07 倍であった。消化液の施用量が僅かであったため、収量の増加はバガス炭の影響と考えられる。サトウキビは、根で吸収した養・水分と葉で光合成した炭水化物を使って、成長しながら糖分を茎に蓄積する作物であるため、バガス炭の施用による有効土壌水分量の増加はサトウキビ収量増加の要因と考えられる。

b 春植え 2 回目の調査結果

Fig.13 は春植え 2 回目の定期調査におけるサトウキビの茎数、仮茎長と茎径を示している。各試験区における茎数と仮茎長については、差が見られなかった。一茎重に関連する指標の茎径について、F. 化学肥料上乘せ + バガス炭区の茎径は最も太かった。また、同じ栽培開始から 7 ヶ月後の時期で、1 回目春植えの平均 240cm の仮茎長に対し、2 回目春植えの平均仮茎長は 210cm 未満で

Table 6 春植え 1 回目のサトウキビ生育  
Growth of spring planted sugarcane (First)

処理区	Brix (%)	糖度 (%)	繊維分 (%)	可製糖率 (%)	原料茎重 (kg/a)	可製糖量 (kg/a)	標準比 (%)
A. 化学肥料区	20.4	18.9	11.1	15.0	851.9	127.5	100.0
B. 化学肥料 + 1%バガス炭区	20.2	18.6	10.7	14.8	957.4	141.1	110.7
C. 化学肥料 + 消化液 + 1%バガス炭区	20.0	18.6	11.0	14.8	912.8	135.5	106.3
D. 化学肥料 + 2%バガス炭区	20.4	18.8	11.3	14.8	900.4	133.6	104.8
E. 化学肥料 + 消化液 + 2%バガス炭区	20.3	18.9	11.3	15.0	969.0	145.6	114.2

処理区	茎長 (cm)		茎径 (cm)		葉面積 (cm <sup>2</sup> )		SPAD		原料茎数 (本/a)		一茎重 (g)	
	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±
A	227	11	2.45	0.14	259	66	39.7	3.2	853	99	1003	88
B	238	17	2.48	0.13	262	52	40.1	3.5	867	81	1106	45
C	230	18	2.41	0.16	261	50	39.9	4.7	893	103	1033	142
D	234	15	2.51	0.14	257	63	39.8	3.2	880	40	1023	40
E	231	18	2.40	0.15	278	47	39.5	3.6	913	58	1063	43



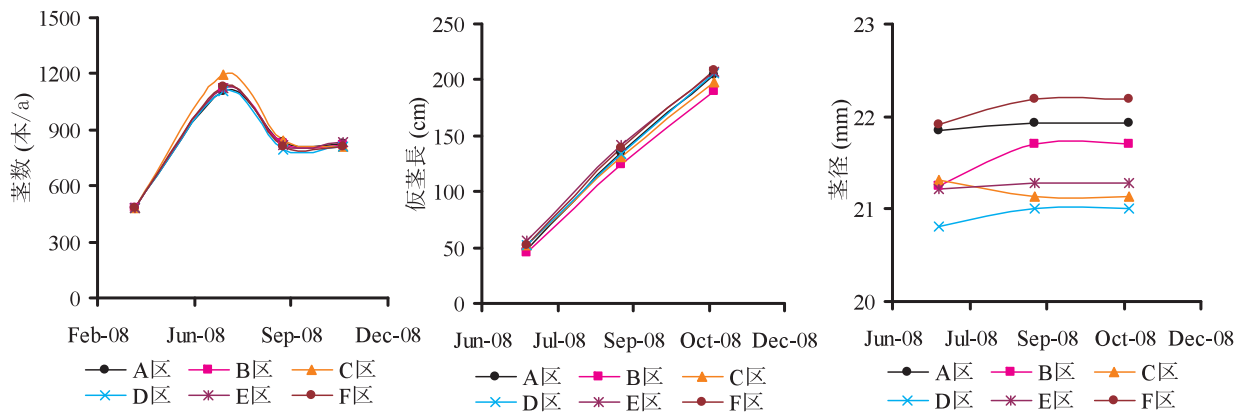


Fig. 13 春植え2回目サトウキビの茎数、仮茎長と茎径の時間的変化  
Change in stalk number, stalk length, stalk diameter of spring planted sugarcane (Second)

あった。これは、茎長が最も伸びる8、9月には、春植え1回目のサトウキビは110cmに伸びたのに対し、春植え2回目のサトウキビは80cmしか伸びなかったためである。春植え1回目における8、9月間の降雨が660mmに対し、春植え2回目の降雨は310mmしかなかった。仮茎長が伸びなかった原因は水分不足と考えられる。

春植え2回目で収穫したサトウキビの茎長、茎径、葉面積、一茎重、SPAD値、Brix値、糖度、繊維分、可製糖率、原料茎重、可製糖量をTable 7に示した(3反復の各項目のバラツキは15%以内であった)。

A. 無施肥区を除いて、各試験区のBrixや糖度などの品質に差が見られなかったが、D. 化学肥料代替区、E. 化

学肥料代替+バガス炭区、F. 化学肥料上乘せ+バガス炭区の繊維分が多いため、可製糖率がC. 化学肥料区より低かった。但し、D, E, F区のいずれも原料茎重がC区より高いため、各区の可製糖量はC区と差が無かった。また、バガス炭施用のE, F区の原料茎重が他の区より高いことから、干ばつ状態で、バガス炭の保水効果はサトウキビの原料茎重に影響を与えていたと考えられる。さらに、A. 無施肥区やB. 減肥区と比較して、D. 化学肥料代替区は原料茎重が高く、可製糖量も増加したことから、消化液の肥料代替効果が確認できた。

春植え1回目と2回目の栽培期間がほぼ同じであるのに、1回目の化学肥料区の可製糖量は128 kg/aに対し、

Table 7 春植え2回目のサトウキビ生育  
Growth of spring planted sugarcane (Second)

処理区	Brix (%)	糖度 (%)	繊維分 (%)	可製糖率 (%)	原料茎重 (kg/a)	可製糖量 (kg/a)	標準比 (%)
A. 無施肥区	20.4	18.3	12.2	14.0	310.3	43.4	67.4
B. 減肥区	19.8	17.8	11.9	13.7	356.4	48.8	75.9
C. 化学肥料区	19.9	17.6	11.2	13.6	473.4	64.3	100.0
D. 化学肥料代替区	19.5	17.2	11.5	13.2	489.5	64.5	100.2
E. 化学肥料代替+バガス炭区	19.9	17.3	11.7	13.2	520.2	68.5	106.6
F. 化学肥料上乘せ+バガス炭区	19.1	16.9	11.7	13.0	508.8	66.3	103.0

処理区	茎長 (cm)		茎径 (cm)		節数		原料茎数 (本/a)		一茎重 (g)	
	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±
A	183.3	16.0	2.10	0.16	17.1	2.4	487.2	68.4	652.1	80.9
B	178.8	18.8	2.09	0.16	16.3	2.8	532.1	47.0	672.5	27.5
C	185.5	17.3	2.00	0.16	16.9	2.2	618.6	55.6	771.4	64.0
D	186.9	21.4	1.98	0.22	16.7	2.7	628.2	10.7	779.0	13.3
E	200.4	16.0	2.13	0.13	17.0	2.4	641.0	29.9	811.9	7.9
F	196.9	13.3	2.16	0.15	17.5	1.9	592.9	29.9	855.7	77.5

2回目の化学肥料区の可製糖量は64 kg/aで、1回目の約半分であった。春植え1回目栽培に比べ、2回目の期間中に降雨が少ないことや、栽培品種が異なっていることが原因と考えられる。干ばつが発生する春植え期間中においては、水管理が収量を上げるために重要であると考えられる。

c 夏植えの調査結果

Fig.14は夏植えの定期調査における、前作ありと前作なし反復圃場のサトウキビの茎数、仮茎長と茎径を示している。前作なし反復では、茎数と仮茎長について、A.化

学肥料区は他の二区より高い傾向を示した。茎径については、C.消化液代替+バガス炭区はやや高い傾向を示した。前作ありの反復では、各試験区における茎数について、A.化学肥料区は他の二区より高い傾向を示した。仮茎長と茎径については、差が見られなかった。施肥前の前作あり圃場の平均窒素含量は0.182%、炭素含量は1.47%に対し、前作なし圃場の平均窒素含量は0.156%、炭素含量は1.10%であった。選定した圃場の土壌窒素含量の違いは茎数の差として、栽培試験結果に現れることを確認した。また、基肥の窒素成分の不足はサトウキビ

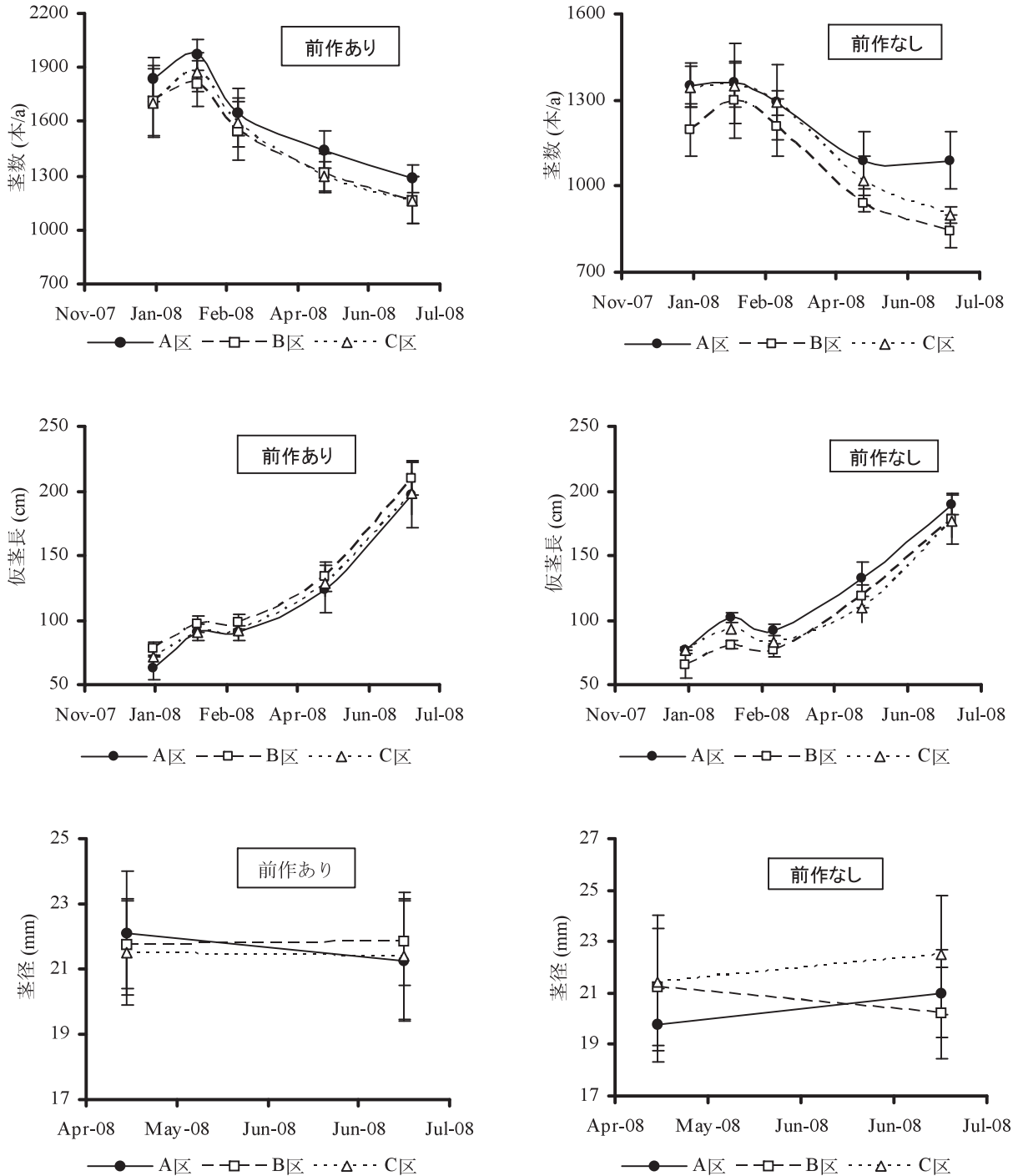


Fig.14 夏植えサトウキビの茎数、仮茎長と茎径の時間的変化  
Change in stalk number, stalk length, stalk diameter of summer planted sugarcane

の生育に悪影響を与えたことが明らかとなった。

茎数、仮茎長、茎径のいずれの項目について、前作ありの反復は前作なしの反復より高い。試験開始前の前作あり圃場の窒素と炭素含量はいずれも前作なし圃場より高いことから、前作の残留肥料が基肥不足を緩和したと考えられる。以上のような同じ施肥設計を行った圃場でも、前作のあり、なしによって、サトウキビの生育に違いが見られたことから、試験結果の整理は前作あり、なしに区分する。

夏植え前作ありと前作なし圃場で収穫したサトウキビの茎長、茎径、葉面積、一茎重、SPAD 値、Brix 値、糖度、繊維分、可製糖率、原料茎重、可製糖量を Table 8 と Table 9 に示した (3 反復の各項目のバラツキは 20% 以内であった)。

前作ありと前作なし圃場において、各試験区の Brix や糖度などの品質に差が見られなかった。前作あり圃場では、B. 化学肥料+バガス炭区、C. 消化液代替+バガス炭区の原料茎数が減少したため、原料茎重と可製糖量は減少した。前作なし圃場では、さらに B、C 区の一茎重も下がったため、B、C 区可製糖量は A. 化学肥料区の

74%、76% になった。台風の影響が小さく、雨水にも恵まれていた夏植え栽培には、バガス炭の保水効果によるサトウキビ収量の増加が見られなかった。

また、夏植えの化学肥料区の可製糖量は 177kg/a に対し、春植え 1 回目の化学肥料区の可製糖量は 128 kg/a であった。同じ品種のサトウキビ栽培において、干ばつが発生する春植え期間中の水管理を適切にすれば、2 年間で 2 回の春植え栽培は 1 回の夏植え栽培より増収することが明らかになった。

#### IV 結 言

宮古島では、サトウキビの夏植え栽培は、春植え栽培や株出し栽培に比較して台風や干ばつの影響が少なく、夏植えが一般的であるが、2 年 1 作で土地利用効率が低いことから、栽培コストの低減、生産性の向上のため、春植え株出し型栽培への移行が求められている。しかし、かんがい設備の未整備地域では干ばつの影響が大きく、サトウキビ春植えの生産が不安定であるため、土壤改良による保水能の増加が春植え栽培普及上必要である。ま

**Table 8** 夏植えのサトウキビ生育 (前作あり)  
Growth of summer planted sugarcane (have front-planning)

処理区	Brix (%)	糖度 (%)	繊維分 (%)	可製糖率 (%)	原料茎重 (kg/a)	可製糖量 (kg/a)	標準比 (%)
A. 化学肥料区	21.0	19.2	11.6	15.0	1182.7	176.9	100.0
B. 化学肥料+バガス炭区	20.6	19.1	12.0	14.8	1093.8	161.9	91.5
C. 消化液代替+バガス炭区	20.8	18.8	11.7	14.6	1054.8	153.7	86.9

処理区	茎長 (cm)		茎径 (cm)		節数		葉面積 (cm <sup>2</sup> )		SPAD		原料茎数 (本/a)	一茎重 (g)
	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±		
A	281.8	44.7	2.01	0.21	34.3	5.3	1422.8	114.0	40.0	3.2	1187.5	995.9
B	299.7	25.9	2.06	0.14	39.9	4.8	1418.9	234.6	40.0	4.2	1048.1	1044.7
C	279.4	24.7	2.00	0.14	37.8	3.1	1439.9	110.8	40.5	2.0	1062.5	995.4

**Table 9** 夏植えのサトウキビ生育 (前作なし)  
Growth of summer planted sugarcane (no front-planning)

処理区	Brix (%)	糖度 (%)	繊維分 (%)	可製糖率 (%)	原料茎重 (kg/a)	可製糖量 (kg/a)	標準比 (%)
A. 化学肥料区	21.3	19.1	12.5	14.4	1030.8	148.8	100.0
B. 化学肥料+バガス炭区	20.3	18.4	12.2	14.1	782.7	110.0	73.9
C. 消化液代替+バガス炭区	21.4	19.6	12.5	15.0	749.0	112.5	75.6

処理区	茎長 (cm)		茎径 (cm)		節数		葉面積 (cm <sup>2</sup> )		SPAD		原料茎数 (本/a)	一茎重 (g)
	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±	平均	±		
A	278.2	21.3	1.97	0.14	39.2	2.7	1365.7	116.6	41.3	4.2	1028.8	1001.9
B	265.2	25.8	2.16	0.11	43.2	2.5	1465.4	214.3	41.1	2.2	846.2	925.0
C	250.9	17.3	2.04	0.22	38.1	2.4	1174.5	104.9	39.4	0.9	817.3	916.5

た、水資源である地下水の水質保全のため、硝酸態窒素の低減対策として家畜ふん尿の処理と化学肥料の適正施用を両立することができる減肥栽培システムの確立が重要である。

本研究では、牛ふんメタン発酵の副産物である消化液および600℃で炭化された保水性に富むバガス炭などのバイオマス変換物がサトウキビ栽培に及ぼす影響を解明するため、サトウキビの春植えおよび夏植え圃場栽培試験を行い、消化液の施肥効果やバガス炭の保水効果を検証した。

その結果、以下の事項が明らかとなった。

- ① バガス炭の施用は土壌の保水性を高め、適切な水分含量を保持した。水分保持の観点から、バガス炭施用の適量は重量比2%以上である。
- ② 干ばつが発生した春植え栽培では、バガス炭の施用がサトウキビの原料茎重増加に貢献した。
- ③ 消化液は有機肥料とみなされ、その施用による土壌の物理性改良効果は見られなかった。
- ④ 春植え栽培において消化液による窒素成分の代替は有効である。
- ⑤ 降雨が十分あり、台風の影響が小さく、天候に恵まれていた夏植え栽培では、バガス炭のサトウキビ増産効果が少なかった。
- ⑥ 夏植え栽培では、農地土壌の肥料残留の有無がサトウキビの生育に大きな影響を与えた。
- ⑦ 干ばつの影響を受け易い春植え期間中の水管理は極めて重要であり、水管理を適切に実施すれば、2年間で2回の春植え栽培は1回の夏植え栽培より増収することが明らかとなった。

以上のように、本研究では、バガス炭の圃場全面施用は土壌の保水性を高め、適切な有効水分量を保持したことが明らかになった。しかし、全面施用におけるバガス炭の需要量が18t/aと大量であるので、畝施用など小面積の実施が土壌の保水性に与える影響を検証する必要がある。今後、施用コストと施用効果の持続性の調査を行うことより、バガス炭の施用による畑地かんがいの省力化技術の確立が期待される。また、本研究では、夏植え栽培におけるバガス炭の施用効果が見られなかった。これは夏植え栽培の栽培期間が長く、いろいろな影響が受

けるためと考えられる。今後試験例を増やして、夏植え栽培におけるバガス炭の施用効果を明らかにする必要がある。

バガス炭の農地施用による硝酸態窒素負荷の抑制や消化液利用による化学肥料の削減などバイオマス利用によるさまざまな波及効果が期待されている。これらの研究成果に基づいて、現在バイオマス利用によるエネルギー、温室効果ガス排出量およびコストの削減効果に関して宮古島において研究開発を進めている。

## 参考文献

- 1) 陳 嫣・凌 祥之 (2005)：バイオマス変換物の農地施用が作物生育および土壌の理化学特性に与える影響の解明－島尻マーヅ土壌を用いた例－，農業土木学会論文集，240，p.89-95.
- 2) 陳 嫣・平良正彦・上野正実・凌 祥之 (2008)：島尻マーヅ土壌における消化液やバガス炭の施用効果について－地下水質を考慮したサトウキビ，ソルガムの輪作栽培－，農業土木学会論文集，254，p.31-37.
- 3) 角 明夫・林 満・片山忠夫 (2001)：土壌水分に対するサトウキビ品種の生育反応の比較，日本作物学会紀事，70(2)，p.202-208.
- 4) 気象庁：気象統計情報，<http://www.data.jma.go.jp/> (確認日：2009/10/10)
- 5) 中西康博・高平兼司・下地邦輝 (2001)：地下水窒素汚染における起源別窒素負荷率の重回帰法による推定，日本土壤肥料学雑誌，72(3)，p.365-371.
- 6) 日本分蜜糖工業会製糖技術研究会 (1983)：製糖化学便覧 (化学管理法)，日本分蜜糖工業会製糖技術研究会，p.3-22.
- 7) 田代 豊・高平兼司 (2001)：宮古島における窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の長期的推移，水環境学会誌，24(11)，p.733-738.
- 8) 上野正実・川満芳信・小宮康明 (2006)：サトウキビを主体にした島嶼農業の再生とバガスの炭化，農業機械学会誌，68(3)，p.13-17.



## Impact of the Application of Converted Biomass to Upland Soil and Sugarcane Growth

CHEN Yan, TAIRA Masahiko, MAEDA Goki, HIKA Akemi,  
KUBA Mineko and SHINOBI Yoshiyuki

### Summary

This study dealt with the influences of application of digested slurry and bagasse charcoal to Shimajiri-maji soil on sugarcane growth. Digested slurry and bagasse charcoal were incorporated into Shimajiri-maji soil. Spring and summer planted sugarcanes were cultivated on Shimajiri-maji soil. The indexes of the Sugarcane growth, such as the stem diameter and length, yield, Brix of sugarcane in each experiment plot were clarified. Changes in soil chemical properties such as pH, EC, concentrations of total nitrogen, total carbon, potassium and phosphoric, and soil physical properties such as water content, dry density, permeability and available moisture in soil between planting and harvesting were observed.

The results indicate that the bagasse charcoal increased available soil moisture in Shimajiri-maji soil. It became clear that maintaining an appropriate level of water content in soil has resulted in increased yields of sugarcane. In addition, application of the bagasse charcoal increased the soil nitrogen absorption. It can be concluded that the application of bagasse charcoal is able to reduce the volume of nitrogen percolation.

Keeping the appropriate irrigation and restocking the death stem is very important on spring planted sugarcane crop. It was clear that in two years, twice spring planted can increase crops than once summer planted.

Digested slurry is effective in substituting nitrogen fertilizer. The appropriate fertilization efficiency of digested slurry is 0.5.

**Keywords :** digested slurry, bagasse charcoal, sugarcane cultivation, commercial cane sugar production, available moisture

# 氾濫解析を用いたため池決壊に伴う下流域の被害算定法

谷 茂\*・井上敬資\*\*

## 目 次

I 緒 言	137	2 ため池氾濫解析への適用上の留意点	140
II 「ため池氾濫解析システム」の概要	137	IV 農地被害及び周辺被害に対する算定評価案	140
1 「ため池氾濫解析システム」を用いた氾濫解析の手順	137	1 農地被害及び周辺被害に対する算定評価案	140
2 「ため池氾濫解析システム」の氾濫解析の手法	138	2 農地被害及び周辺被害を考慮した場合の今後の課題	143
III 経済損失の評価概要	139	V 結 言	143
1 治水経済調査マニュアル（案）（2005）について	139	参考文献	143
		Summary	144

## I 緒 言

地震や豪雨によってため池のような貯水構造物が決壊し、下流域に2次災害を引き起こすことがある。人的被害は完全に防止しなければならないが、事前に氾濫域の把握および経済的被害についても評価しておくことが重要である。氾濫域の解析は文献（谷・井上，2007）に述べているように地理情報と開発した「ため池氾濫解析システム」を利用することにより、簡便な解析が可能になっている。この解析結果を利用して、ため池氾濫解析による下流域の被害想定を行うことが可能になる。

本報告は開発した「ため池氾濫解析システム」により想定される被害範囲や最大水深、最大流速等の被害状況を基本データとして、ため池決壊によって下流に発生する被害額を算定、評価するために必要となる基本的な算定項目、算定方法、評価方法を検討、整理したものである。

## II 「ため池氾濫解析システム」の概要

### 1 「ため池氾濫解析システム」を用いた氾濫解析の手順

「ため池氾濫解析システム」を用いた氾濫解析は以下の手順で実施される。「ため池氾濫解析システム」の概要を Fig.1 に示す。Fig.2 は氾濫解析の領域選定の画面を、Fig.3 は WEB GIS による氾濫解析の概要をそれぞれ示し

たもので、この解析により下流域の湛水深、継続時間等が求まる。

- ① Fig.2 に示すように氾濫解析領域を WEB GIS 上で矩形の領域で選択する。
- ② ため池データベースからため池諸元、農村工学研究所に設置した空間情報を収納したサーバ（以下、データセンターと呼ぶ）から解析領域に関する画像データ、数値地図（2万5千分の1地形図）、標高データ（10m, 1m メッシュ）などが切り出され、解析に必要なデータセットが自動的に作成される。
- ③ 初期値として設定されている値（流域の粗度係数等）を使用して、浅水方程式を用いた氾濫解析が行われる。
- ④ 数値解析結果の GIS データへの変換および必要な解析結果のファイル出力がなされる。

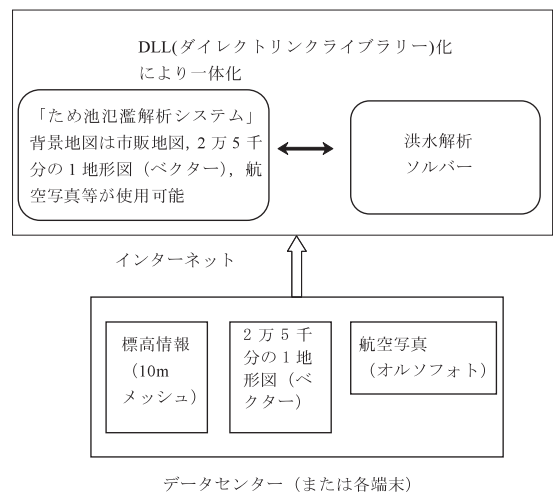


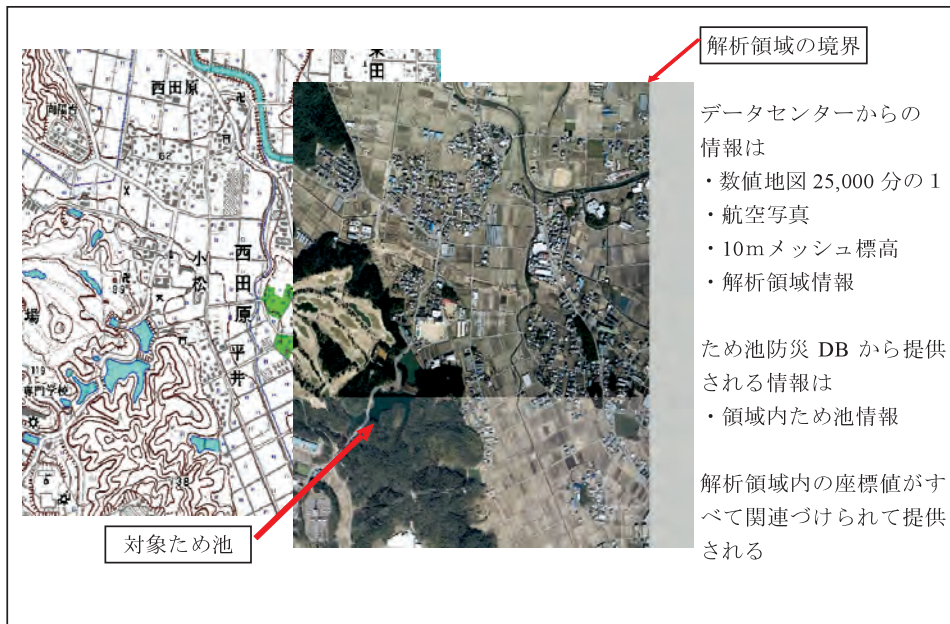
Fig.1 「ため池氾濫解析システム」の概要  
General flowchart of inundation analysis system

\* 施設資源部長

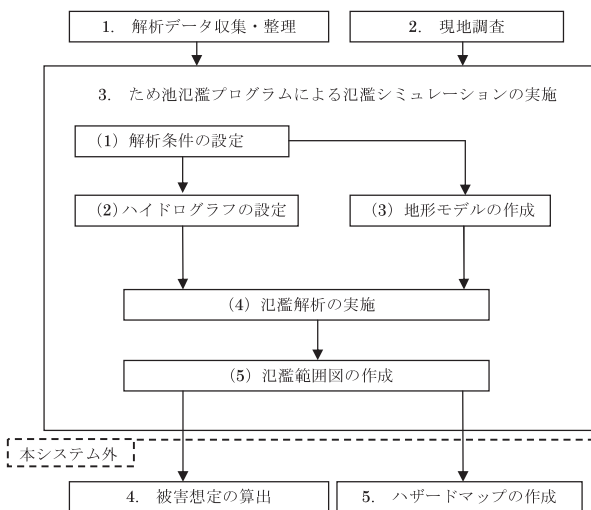
\*\* 農村総合研究部広域防災研究室

平成21年12月14日受理

キーワード：ため池，フィルダム，氾濫解析，経済損失，被害



**Fig.2** 解析領域の設定  
The way of choosing the region for inundation analysis



**Fig.3** 氾濫解析の手順の概要  
(開発したシステムでは自動的にこの操作が行われる)  
Flowchart of the procedure of inundation analysis  
(this procedure is activated automatically in the developed system)

⑤最大水深、最大流速、歩行困難度などの時系列結果を表示及びファイル出力がなされる。これらの結果から、氾濫による被害想定域の決定を行う。

従来であれば、これらの解析に必要な標高情報、オルソフォト、地形図およびため池の諸元（堤高、貯水量）等のデータは別途に収集し、GIS上で位置合わせなどを行っていくプロセスが必要であったが、本システムでは画面上で解析領域を矩形で選択（Fig.2）することだけで、必要な標高情報、ため池の諸元、背景図等のデータは‘データセンター’から自動的に切り出してきて、解析の為のファイルが自動的に作成され、氾濫解析についても自動的に進められ、解析結果ファイルが作成される。

現時点ではため池 11 万箇所の位置、堤高、満水面積、貯水量等、氾濫解析に必要なデータはすべてデータベース化されている。標高については 10m メッシュ (1m メッシュのデータも民間企業より取得可能)、オルソフォト、2 万 5 千分の 1 地形図 (ベクター、およびラスター) を収納するようになってきているが、今までにモデル的にある 3 県について、上述したすべてのデータを実装し、運用上の課題を検討した。その結果、自治体等では、安全性の問題からインターネットを通じた大量のデータのやりとりが制限されていることから、WEB GIS を用いた本解析システムの運用が困難であることが判明した。このため、現時点では解析に必要なデータを、各端末で入力するシステム (スタンドアロン方式) も平行して使用できるように改良を行っている。つまり、本システムで定められたデータ様式であれば、スタンドアロン方式でも WEB GIS システムと同様に自動的にデータセットが作成され、自動解析が可能になっている。

氾濫解析はため池のように氾濫域が小さい場合、たとえば解析領域が数平方 km<sup>2</sup> であれば数時間以内程度の短時間で完了する。解析結果は画面上で時間毎の水深、流速、最大水深、最大流速、歩行困難度を表示できる。解析結果のシェープファイルが自動的に作成されるため、解析結果は他の GIS ソフトでも簡単に利用可能である。

なお、同時に複数のため池を氾濫解析することはこのシステムではできない。また解析メッシュの上限は 100 万メッシュである。以下に「ため池氾濫解析システム」の氾濫解析の手法について述べる。

2 「ため池氾濫解析システム」の氾濫解析の手法

ため池氾濫解析プログラムは、解析の対象とするため

池の位置、総貯水量、湛水面積を元に擬似的な貯水池を自動的に生成し、擬似貯水池の壁面の一部をダムブレイク方式で破堤・流出計算を行うことにより、破堤ハイドログラフを生成する。氾濫域での計算は浅水方程式を用いた以下の式で二次元不定流計算を行う。解析モデルは、高さ $z$ を変数として持つ二次元の空間で定義される。解析手法の概要は、以下の通りとなる。

- (1) 二次元氾濫解析モデルの初期条件
  - 1) 初期河床位： $z^{init}$
- (2) 二次元氾濫解析モデルの境界条件
  - 1) 流入境界：流入点勾配： $I_m = \tan\theta_m$   
 流量時刻歴と方向： $Q_{mx}^n, Q_{my}^n$   
 流動深時刻歴： $h_m^n$   
 流入土砂組成： $p_m^n$
  - 2) 壁境界：流れの方向の拘束： $M = 0$  or  $N = 0$
  - 3) 外周部の境界：河床変位量の拘束： $\Delta z = 0$   
 流量の拘束： $M = 0, N = 0$

数値計算においては、 $h, z$  は格子点上で評価し  $M, N, u, v, q_{Bx}, q_{By}$  などは、格子点と  $\Delta l/2$  ずれた地点で評価される(直交スタaggerドメッシュ)。Fig.4に直交スタaggerドメッシュの概念図を示す。

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - f_{sx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - f_{sy} \quad (3)$$

$$\text{マンニングの式} \quad f_{sx} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad f_{sy} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

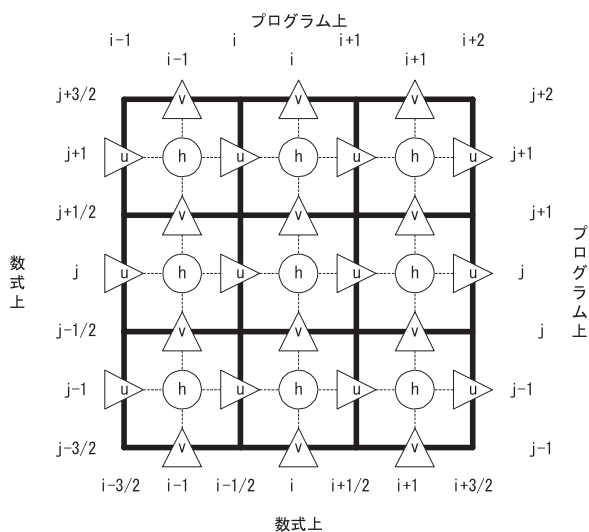


Fig.4 直交スタaggerドメッシュの概念図  
Conceptual diagram of quadrature staggered mesh

ここに、

- $h$  : 水深 (m)
- $H$  : 水位 (m)
- $x, y$  :  $xy$  直交座標
- $t$  : 時刻
- $u$  : X 方向流速 [L/T],  $v$  : Y 方向流速 [L/T],  
 $M = hu$  : X 方向流量 [L<sup>2</sup>/T],  $N = hv$  : Y 方向流量 [L<sup>2</sup>/T],  
 $g$  : 重力加速度 [L/T<sup>2</sup>],  
 $f_{sx}$  : X 方向の底面摩擦力 [L<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>],  
 $f_{sy}$  : Y 方向の底面摩擦力 [L<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>],  
 $n$  : マニング粗度の係数 [T/L<sup>1/3</sup>]  
 $q$  : 流体湧き出し量 (ハイドログラフに相当)

### III 経済損失の評価概要

河川、土石流の氾濫による被害算定は従前から行われているが、以下にその概要について述べる。

#### 1 治水経済調査マニュアル(案)(2005)について

現在多くの機関で実施されている費用便益分析の手順は、国土交通省河川局による治水経済調査マニュアル(案)(2005)(以下、治水経済調査マニュアル(案))をベースとして道路、地すべり、砂防、河川など、それぞれの災害に対応したマニュアルが作成され、各マニュアルに基づいて実施されている。ため池災害についても基本的には治水経済調査マニュアル(案)に準じてよいと考えられるが

- ① 農地被害に対する算定方法や評価では、田畑の調整池的な効果や資産の季節的な変動などを考慮することが望ましい。
- ② ため池被害の特徴として、想定される被災範囲が中山間部の狭い地域に限定されることが多いなどの点を考慮する必要がある。

以下に治水経済調査マニュアル(案)から抜粋した手順を示す。Fig.5中に必要とするデータの名称を加筆した。Table 1には治水経済調査マニュアル(案)から抜粋した、治水経済調査要綱(建設省, 1970)からの主な変更点を示す。治水経済調査マニュアル(案)は、国土交通省のホームページ、[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/seisaku\\_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf)より入手可能である。

治水経済評価マニュアル(案)では

- ① 被害を直接被害と間接被害とに分けている。
- ② 直接被害に対する抑止効果を資産被害抑止効果と人身被害抑止効果とに分け、資産被害に対してのみ具体的なデータ入手および解析手法を提示している。
- ③ 間接被害に対しては客観的、合理性のある被害額を算定するものとし、具体的には直接被害をベースとして諸係数を掛けて営業停止損失、家庭における応急対策費用、事業所における応急対策費用の算出基準を示し



ている。

④人的被害その他の被害に対しては計測可能なものを評価するとしている。

したがって、被害算定の基礎となるデータは想定氾濫域の直接被害にあたる資産データである。治水経済調査マニュアル(案)では、資産データの調査方法として、「被害額の算出に必要な氾濫区域の資産および世帯数、従業員数等の数量を原則として氾濫シミュレーションの計算メッシュ単位として算定する」として、資産額の算出にデータとして地域統計メッシュ(財統計情報研究開発センター)等が提供する統計量の使用を提示している。治水経済調査マニュアル(案)が計算メッシュとして原則想定しているのは250mメッシュで、統計メッシュは一般的には1kmメッシュであることから1kmメッシュデータを250mメッシュに取り込む方法も提示している。また、財日本建設情報総合センターの100mメッシュの使用も提示している。

一方、ため池氾濫解析システムでの解析メッシュは、多くの場合氾濫範囲が中山間部の狭い範囲に限定されることから、最大でも10mメッシュの使用を前提としており、解析エリアは広くても $2\text{km}^2 \sim 4\text{km}^2$ を想定している。これらのことから、治水経済調査マニュアル(案)の標準的な手法である各種統計での資産評価をそのまま利用することはため池の決壊の様に小領域の被害の場合には分解能の点などで課題がある。このようなことを踏まえ、ため池氾濫解析への適用上の留意点について次に述べる。

## 2 ため池氾濫解析への適用上の留意点

ため池氾濫解析の経済評価システムでは、治水経済調査を行うためのデータから、被害額の算定に限定してため池の場合の被害額算定改良案を考える。被害額算定に用いる各種データを以下に示す。(Fig.5中の①～⑥に対応)

- ①財団法人 日本統計協会 (<http://www.jstat.or.jp/>) より 国勢調査メッシュ統計を入手する。
- ②国土地理院 空間データ基盤 (<http://sdf.gsi.go.jp/>) より 対象市区町村の数値地図を入手する。
- ③財団法人 日本建設情報総合センター (<http://www.jacic.or.jp/>) 建設コスト研究部より延床面積100mメッシュを購入する。
- ④財団法人 統計情報研究開発センター (<http://www.sinfonica.or.jp/>) より 地域メッシュ統計(国勢調査, 4次メッシュ約500m)を購入する。
- ⑤財団法人 統計情報研究開発センター (<http://www.sinfonica.or.jp/>) より 地域メッシュ統計(事業所・企業統計調査, 4次メッシュ約500m)を購入する。
- ⑥国土数値情報ダウンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) の土地利用メッシュの水田面積(3次メッシュ(約1km))を用いる。

ため池の規模によるが、ため池決壊による氾濫範囲の規模から、上記経済評価用のメッシュデータを参考に単純に細分化して適用すると現実的でない精度になることが考えられるため、浸水家屋数などは、住宅地や航空写真画像などからマニュアルでデータを拾うことがコスト、精度からはむしろ合理的であると思われる。以上より治水経済調査マニュアル(案)(2005)をベースとしたため池災害用経済評価フロー(案)をFig.5に示す。

## IV 農地被害及び周辺被害に対する算定評価案

### 1 農地被害及び周辺被害に対する算定評価案

被害額算定にあたっては、メッシュ毎に、資産額に最大浸水深により決まる被害率を乗じたもので評価を行う。ため池氾濫解析システムの結果を用いて農地被害を算定評価する場合は、解析メッシュサイズ10m以下の小規模氾濫域での被害評価が前提となることから、住宅地図や航空写真などからの家屋数取得など、目視による計測などの手作業を多く残した評価の方法となる。

- 1) 被害額は以下の直接被害額を求めるものとする。
  - (1) 家屋
  - (2) 家庭用品
  - (3) 農漁家償却資産・在庫資産
  - (4) 事業所償却資産・在庫資産
  - (5) 農作物
  - (6) 公共土木施設
- 2) 家屋被害額は 床面積×単位面積当たりの評価額×水深で定まる被害率で計算するものとする。
  - (1) 床面積は以下のように算出する。
    - ①浸水家屋を住宅地図、及び航空写真から拾い出す。
    - ②浸水家屋ごとの床面積を、被害額算定者が航空写真等から推測するものとする。
  - (2) 単位面積当たりの評価額は治水経済調査マニュアル(案)に記載されている値を用いるものとする。
  - (3) 浸水深は、航空写真とシミュレーション結果を重ね合わせ、被害額算定者が目視計測するものとする。
  - (4) 被害率は治水経済調査マニュアル(案)に記載されている値を用いるものとする。
- 3) 家庭用品被害額は 世帯数×世帯当たり家庭用品評価額×水深で定まる被害率で計算するものとする。
  - (1) 世帯数は浸水家屋を住宅地図、及び航空写真から拾い出した家屋数とする。
  - (2) 世帯当たり家庭用品評価額、水深で定まる被害率は治水経済調査マニュアル(案)に記載されている値を用いるものとする。
- 4) 農漁家償却資産・在庫資産被害額は 農漁家世帯

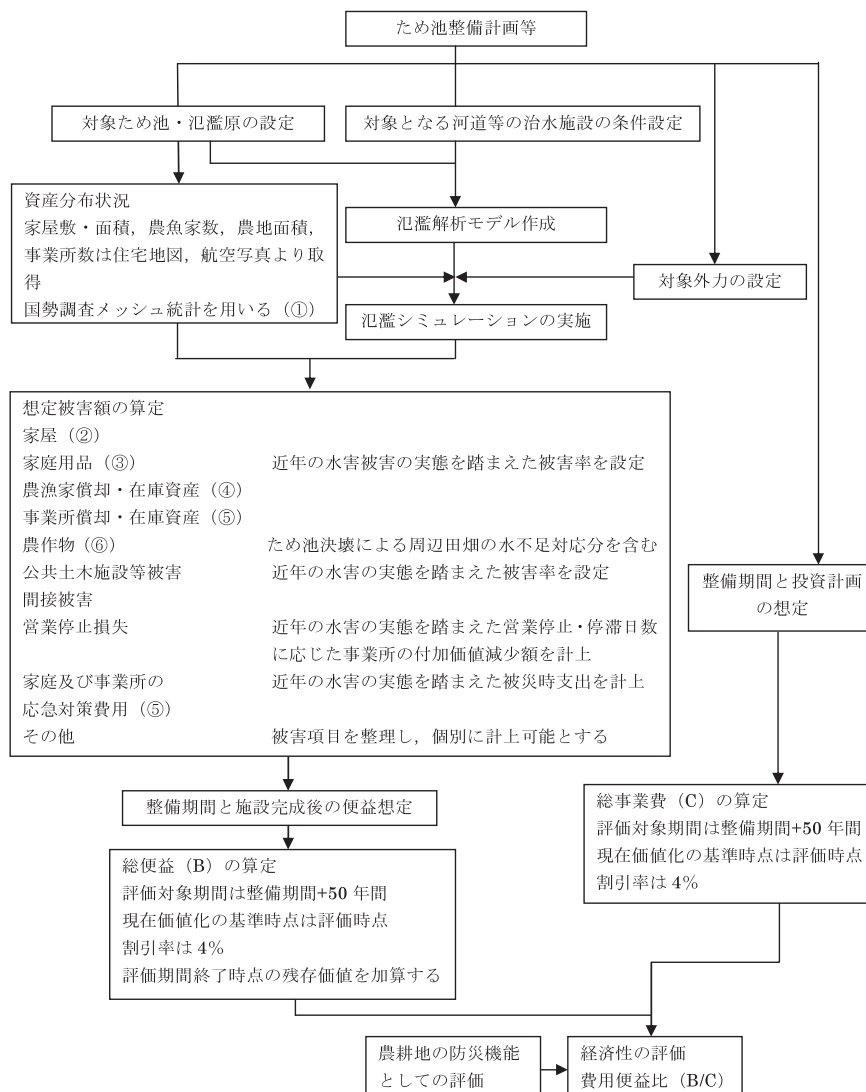


Fig.5 治水経済調査マニュアル（案）をベースとしたため池災害用経済評価フロー（案）

Flowchart of economic evaluation of disaster damage of small earth dams based on the manual of inundation economic survey

数×世帯当たり評価額×水深で定まる被害率で計算するものとする。

- (1) 農漁家世帯数は被害額算定者が情報源を見つけるものとする。どのように情報源を見つけるかは一例を検討し、ため池災害用経済評価マニュアル（案）（以下マニュアル）に記述する。
- (2) 世帯当たり評価額、水深で定まる被害率は治水経済調査マニュアル（案）に記載されている値を用いるものとする。
- 5) 事業所償却資産・在庫資産被害額は 産業分類ごとの従業員数×従業員一人当たりの評価額×水深で定まる被害率を足し合わせて計算することとする。
  - (1) 産業分類ごとの従業員数は被害額算定者が情報源を見つけるものとする。どのようなものが情報源となるかは一例を検討し、マニュアルに記載する。
  - (2) 従業員一人当たりの評価額、水深で定まる被害

率は治水経済調査マニュアル（案）に記載されている値を用いるものとする。

- 6) 農作物被害は 水田・畑面積×年収量×農作物価格×水深で定まる被害率で計算するものとする。
  - (1) 水田・畑面積、年収量、農作物価格は被害額算定者が情報を収集するものとする。どのようなものが情報源となるかは一例を検討し、マニュアルに記載する。
  - (2) 水深で定まる被害率は治水経済調査マニュアル（案）に記載されている値を用いるものとする。
- 7) 公共土木施設被害は 一般資産被害額×公益事業施設被害額の一般資産被害額に対する比率で計算するものとする。
  - (1) 一般資産被害額は家屋被害額、家庭用品被害額、農漁家償却資産・在庫資産被害額、事業所償却資産・在庫資産被害額の合計とする。
  - (2) 公益事業施設被害額の一般資産被害額に対する比率は治水経済調査マニュアル（案）に記載さ

**Table 1** 治水経済調査要綱からの主な変更点 (治水経済調査マニュアル (案) (平成17年4月) より抜粋)  
 The main changes between the outline of inundation economic survey (Ministry of Construction, May, 1970) and  
 the manual of inundation economic survey (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, April, 2005)

項目		治水経済調査要綱	治水経済調査マニュアル (案)	摘要	
資産データの調査		市町村別等で集計 (集計方法はとくに明記せず)	国勢調査メッシュ統計等を用いた統一的な方法とする (家屋及び家庭用品は再調達価格で評価)	4章	
氾濫シミュレーション	破堤地点	破堤地点の選定については特に明記せず	氾濫ブロック毎に被害額が最大となる地点を破堤地点として想定	3章	
	氾濫条件	上流の越水や氾濫による流量低減等については特に明記せず	流下能力のない箇所からの越水氾濫や氾濫に伴う下流の流量低減を考慮		
	解析方法	氾濫形態に応じた手法とされているが、その詳細は明記せず	氾濫形態に応じた方法を採用することとし、河道流と氾濫流を同時追跡		
便益計算	評価方式	年便益で評価	総便益評価の方法とする <ul style="list-style-type: none"> <li>・評価対象期間は整備期間+50年間</li> <li>・現在価値化の基準時点は評価時点</li> <li>・割引率は4%を用いる (建設省全体の統一的な取扱いを定めた「社会資本整備に係わる費用対効果分析に関する統一的運用指針」による)</li> </ul>	4章	
	一般資産被害 (家屋, 家庭用品, 事業所資産等)	昭和36~42年の水害被害実態調査における被害率を用いる	平成5~8年の水害被害実態調査における被害率を用いる		
	公共土木施設等被害 (公益事業, 農地等を含む)	昭和37~42年の防災白書, 水害統計等における被害率を用いる	昭和62~平成8年の水害統計等による被害率を用いる		
	間接被害	営業停止損失	一般資産額の6%		平成5~8年の水害被害実態調査における営業停止・停滞日数に応じた事業所の付加価値減少額を計上
		その他	算定方法は明記せず		家屋及び事業所における応急対策費用について, 平成7・8年の水害に関するアンケート調査に基づき計上 交通途絶による波及被害等のその他の項目についても, 個々の河川において合理的な計測が可能な場合は計上しても良い
残存価値	考慮せず	評価対象期間終了時点における残存価値を考慮し, 便益として計上 (ただし, 平成17年3月見直し前については, 総費用から控除) <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造物以外の堤防及び低水路等は, 減価しないものとする</li> <li>・護岸等の構造物は評価対象期間終了時点の残存価値を10%とする</li> <li>・ダムは法定耐用年数 (80年) による減価償却 (定額法) の考え方により, 評価対象期間終了時点の残存価値を算出する (ただし, それぞれ現在価値化を行う)</li> </ul>			
費用計算	評価方式	年費用で評価	総費用評価の方法とする <ul style="list-style-type: none"> <li>・評価対象期間は整備期間+50年間</li> <li>・現在価値化の基準時点は評価時点</li> <li>・割引率は4%を用いる</li> </ul>	5章	
	建設費	用地費を含む必要な事業費 (算定方法は, 特に明記せず)	費目を整理し, 費用算定方法を提示		
	維持管理費	事業費の0.5%/年 (年便益から差し引く)	毎年の定常的な維持管理費と突発的・定期的に支出される設備交換等の費用を積算する		

れている値を用いるものとする。

## 2 農地被害及び周辺被害を考慮した場合の今後の課題

農地被害算定の精度を上げるためには今後、以下のことを考慮・構築しておく必要がある。

- 1) 農作物被害の算定に季節的な変動を考慮するため、土地利用に作物種類と季節的な価値の変動を考慮しておく必要がある。
- 2) 各農作物に対して、被害が生じる冠水高と冠水時間を入力必須データとして定義する。
- 3) ため池決壊による周辺田畑水不足対応分を被害にそれぞれ含める。

## V 結 言

本報告は開発した「ため池氾濫解析システム」により想定される被害範囲や最大水深、最大流速等の被害状況を基本データとして、ため池決壊によって下流に発生す

る被害額を算定、評価する方法について、その基本的な算定項目、算定方法、評価方法を検討、整理したものである。また、農地被害に対する算定評価案では、ため池決壊による被害想定範囲が、経済評価を行う各種データメッシュ範囲に対してかなり小さい範囲と思われることから、被害算定・経済評価に関する各種データの利用は、解析毎にユーザーがマニュアルで指定することが効率的であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 谷 茂・井上敬資 (2007)：ため池決壊による氾濫解析システムについて、平成 19 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集
- 2) 治水経済調査マニュアル(案)(2005)：国土交通省河川局 [http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/seisaku\\_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf)
- 3) 治水経済調査要綱(1970)：建設省



# **Analysis of Inundation Caused by Failure of Small Earth Dams and the Way of Evaluation of the Damage in the Downstream Sites**

TANI Shigeru and INOUE Keisuke

## **Summary**

Earthquakes and heavy rains sometimes destroy water storage facilities such as small earth dams, and cause the second disasters in the downstream sites. Human suffering must be prevented completely, and it is important, in particular, to identify flood-prone areas and evaluate economic damage in advance. A system which is easy to analyze those things in the sites was constructed with WEB GIS and geographical information. Using this inundation analysis of small earth dams, consequently, enables to assume the damage in the downstream sites easily. In this paper, in addition, the authors figure out the amount of damage caused by floods and cost-benefit performance (B/C) in the case of countermeasure works, based on both the range of affected sites supposed using “Inundation Analysis System of Small Earth Dams”, which the authors developed before, and the indexes to show the damage such as maximum water depth and maximum velocity. As to the way of evaluation, its basic calculation items, calculation methods and evaluation methods are also examined and organized here.

**Keywords :** small earth dam, fill dam, flood analysis, economic damage, damage

## 老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した安全性評価法

谷 茂\*・堀 俊和\*

## 目 次

I 緒 言	145	IV 結 言	151
II 老朽化フィルダムの現状について	145	参考文献	151
III 検討手法および検討結果	145	Summary	152
1 解析条件	145	資料 老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した LCC (ライフサイクルコスト) 評価の 手引き<試案>	153
2 地震に対する損傷度曲線の算定	149		
3 ライフサイクルコストの評価	150		

## I 緒 言

近年、大規模地震に対する老朽化フィルダムの安全性の評価において、耐震補強対策の必要性、対策の合理性の説明が求められていること、仕様設計から性能設計へと移行していること等から、耐震補強する場合でも、耐震補強対策の程度と地震リスクを考慮したLCCの概念に基づく耐震補強対策の最適化が今後必要となると考えられる。本報告では仮想フィルダムを対象として、築堤材のばらつきを考慮し、性能目標を設定し、動的応答解析によりレベル2地震動における安全性の検討を行った。さらに地震動や地震ハザードの設定、および補強工法を仮定して耐震補強を行った場合の破壊確率を求め、大規模地震動のリスクを考慮した老朽化フィルダムのライフサイクルコストの評価を行った。本評価手法の詳細については資料として巻末に添付した「老朽化フィルダムの地震リスクを考慮したLCC評価の手引き(試案)」に述べているので参照されたい。

## II 老朽化フィルダムの現状について

築造年代の古い農業用フィルダム(堤高 $H \geq 15\text{m}$ で1945年以前に築造されたもの)は全国に約644箇所あるとされている(谷茂, 1989; 農林水産省, 2005)。これらの多くは、堤体が老朽化して波浪侵食や経年劣化により断面不足になっていたり、あるいは堤体や基礎地盤からの漏水によりパイピングの進行の危惧があるものも

ある。また、設計基準が制定される前に築造されていることから、地震力を考慮していないために地震時の安定性が十分でないものもあることが想定される。特に、このようなフィルダムが中央防災会議の想定した東海地震、宮城県沖の地震等の大規模地震の発生が予想されている地域に立地する場合には早急な耐震補強が求められる。**Fig.1**には、東海+東南海+南海地震が発生した場合の中央防災会議による震度分布予想図を示したものであるが、震度6以上の地区に限っても多くの農業用フィルダムが位置している。設計基準に基づいて設計されていなくとも、過去の地震被害の調査から耐震性は必ずしも低いとは言えないが、今後は耐震性についての照査が必要と考えられる。さらに耐震補強する場合においては、耐震補強対策の最適化が必要である。

## III 検討手法および検討結果

フィルダムでは築堤にあたっては築堤材の密度、強度管理は施工管理基準に従って厳格な管理がなされているが、老朽化フィルダムでは“ばらつき”を考慮する必要がある。本報告ではレベル2地震動のリスクを考慮した安全性の検証について述べる。破壊基準はモールクーロン則とし、モンテカルロシミュレーションによりFEMによる動的解析を行った。さらに地震ハザード評価、および既存状態、耐震補強を行った場合のフィルダム堤体の破壊確率を求め、決壊によるハザード額を洪水解析により評価して、LCC(ライフサイクルコスト)の観点から見た検討を行った。解析の概略の流れを**Fig.2**に示す。以下に検討方法の詳細について述べる。

## 1 解析条件

## a 解析対象としたフィルダム

フィルダムの形式は均一型とし、堤高は35m、堤頂

\* 施設資源部長

\*\* 施設資源部土質研究室

平成21年12月14日受理

キーワード: 老朽化フィルダム, 地震, リスク, 耐震性, 性能設計

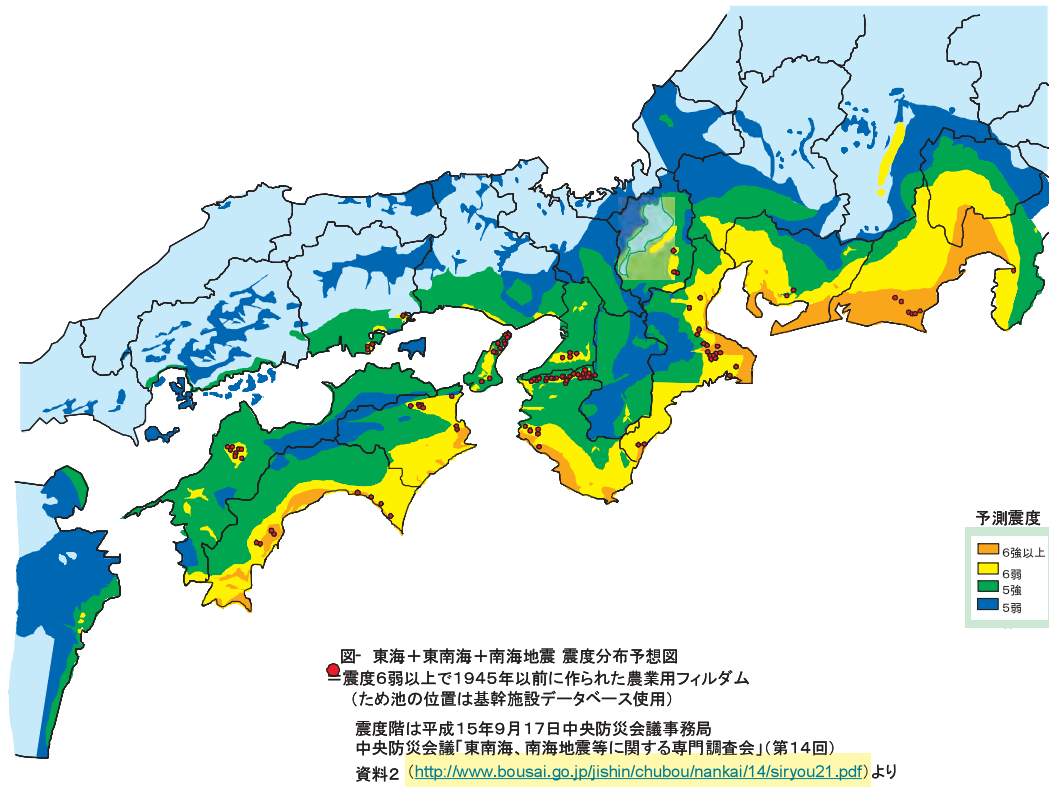


Fig.1 大規模地震動が想定される地域と老朽化フィルダムの位置  
 Location of fill-dam constructed before 1945

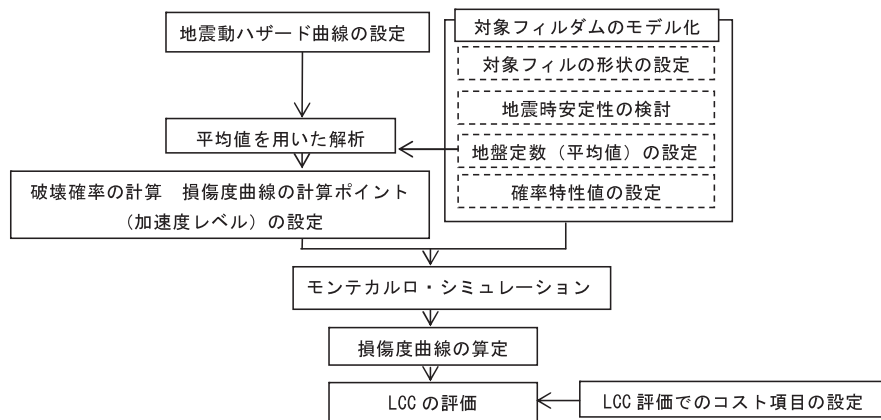


Fig.2 LCC 評価の流れ  
 Flow of LCC assessment

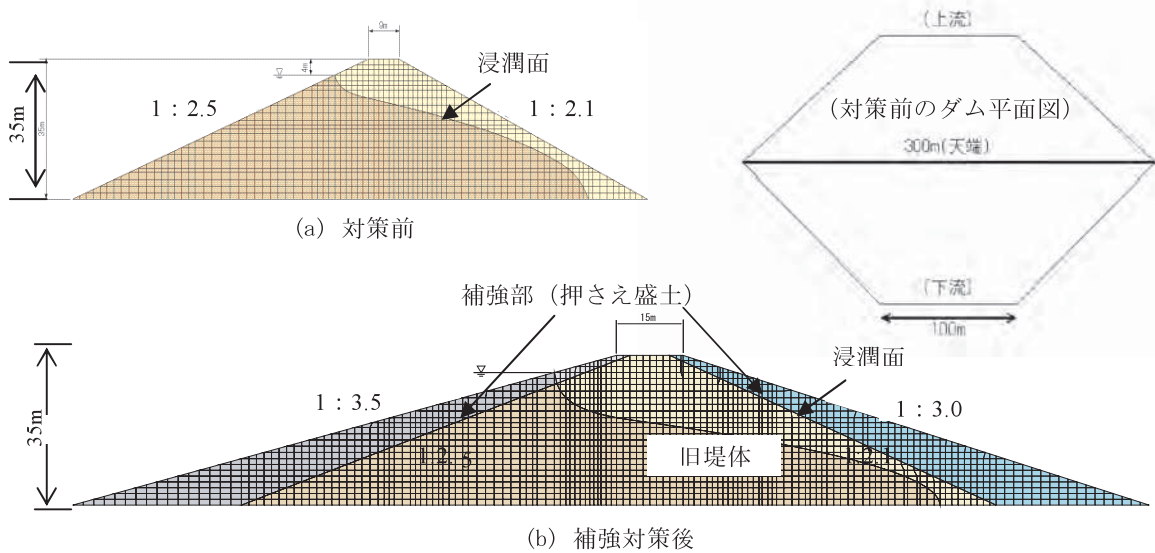
長は 300m で、勾配等は一般的なフィルダムの事例を参考にして定めた。その他の補強工法も考えられるが、ここでは 1 例としてこの押さえ盛土による対策工について検討した。Fig.3 にモデルフィルダムの標準断面を示した。耐震補強対策として、上下流斜面の押さえ盛土とし、勾配は上流斜面で 1:3.5、下流斜面で 1:2.5 の緩勾配とした。また、対象としたフィルダムは耐震設計基準が確立される以前の老朽化したものであると仮定し、耐震補強前のすべり安全率は 1.0 と仮定した。補強後の安全率は現行の日本のダム基準を満足するように、設計地盤震度を 0.18 とした場合すべり安全率が 1.20 以上となるように各々の地盤定数を定めた。解析に用いた地盤定数を

Table 1 に示した。

b 地盤定数の確率特性

(1) 確率変数と確率特性値

ばらつきを考慮する地盤定数は、砂質土の堤体材とフィルタの内部摩擦角  $\phi$ 、および粘性土のコアの内部摩擦角  $\phi$  と粘着力  $c$  とした。各地盤定数の確率特性値を Table 2 に示す。堤体とフィルタの内部摩擦角の変動係数は、日本の鉄道盛土で評価されているピーク強度の値 (7~12%) (地盤工学会, 2007) を参考にして 10% とした。堤体およびフィルタの粘着力の変動係数は文献 (地盤工学会, 2007: 堀内孝英他, 1977) でとりまとめられているものを参考にして 30% とし、確率密度関数は正規分



**Fig.3** 解析に用いたモデルダムの断面（堤体の下端は強固な基礎地盤と仮定した。補強対策費は23億円）  
 Cross-section of model dam used for analysis (Solid foundation is assumed for the bottom end of dam. Reinforcement cost is 2.3 billion yen.)

**Table 1** 解析に用いた地盤定数  
 Ground constants used in analysis

材料区分		N 値	Vs (m/s)	弾性係数 <sup>*2)</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 (t/m <sup>3</sup> )	φ (°)	C (kN/m <sup>2</sup> )	せん断剛性 (kN/m <sup>2</sup> )
堤体材	浸潤線以上		188	152,000	0.41	1.47	40	3	51,007
	〃 以下	8	170						53,754
コア	浸潤線以上		149	87,000	0.41	1.32	28	20	29,195
	〃 以下	4	133						30,778
フィルター	浸潤線以上		312	573,000	0.41	2.00	40	3	192,282
	〃 以下	—	(306) <sup>*1)</sup>						203,200

\* 1) せん断弾性係数 G と飽和密度 ϕ から求める  $V_s = \sqrt{\frac{q}{p}}$   
 \* 2) G とポアソン比 γ から求める  $E = 2(1+\nu)G$

**Table 2** 地盤定数の確率特性値  
 Random characteristic values of ground constants

材 料 区 分		平均値	変動係数	確率密度関数
堤体	内部摩擦角 φ	40°	10%	正規分布
		28°		
コア	粘着力 C	20 kN/m <sup>2</sup>	30%	

布と仮定した。コアの φ と c は独立と仮定した。

(2) 解析に用いる確率変数

(1) で設定した各地盤定数の確率特性値を用いて、モンテカルロシミュレーションで用いる確率変数を乱数を用いて作成した。標本数(モンテカルロシミュレーションの回数)を 50, 100, 200 としたときの各地盤定数(平均値, 変動係数)のばらつきを Fig.4 に示したが、標本

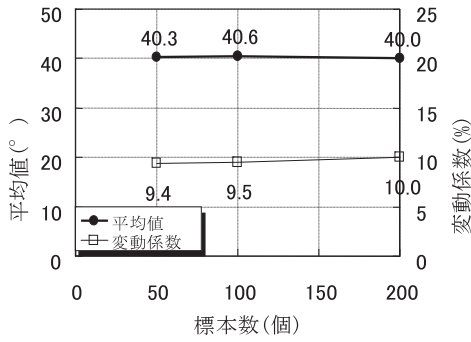
数が多いほど Table 2 の設定値に近似していくのがわかる。本研究の目的は、耐震補強前後での LCC の違いを示すことが目的であること、およびモンテカルロシミュレーションに要する計算時間を考慮して標本数を 50 とした。Fig.5 は地盤定数のばらつき(堤体の内部摩擦角の例)を示したものである。

(3) 地震動とハザード曲線

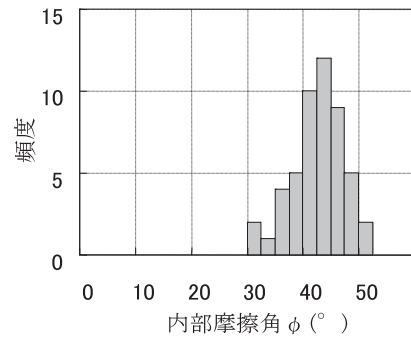
動的解析に用いる入力地震動はレベル 2 地震動(フィルダムのある地点で将来にわたって発生する可能性のある最も大きな地震動を想定)として、以下に示す 3 つの地震波を設定した。Fig.6 に地震波形を示す。

- ①宮城県沖地震～シナリオ地震動(1978年宮城県沖地震の断層モデルを用いて統計的グリーン関数法で作成された地震動)
- ②八戸波～下限スペクトルに適合する地震動(1968年十勝沖地震の八戸波(NS)を用いて作成した模擬地震動)





**Fig.4** 標本数（モンテカルロシミュレーションの回数）と確率特性値の関係（堤体の内部摩擦角）  
Relationship between Sample Numbers and Probabilistic Characteristics of Internal Friction Angle



**Fig.5** 解析で考慮した地盤定数のばらつき（堤体の内部摩擦角の例）  
Example of Internal Friction Angle Samples Applied for MSC

③川西波～下限スペクトルに適合する地震動（2004年中越地震の川西ダム（上下流方向）波を用いて作成した模擬地震動）

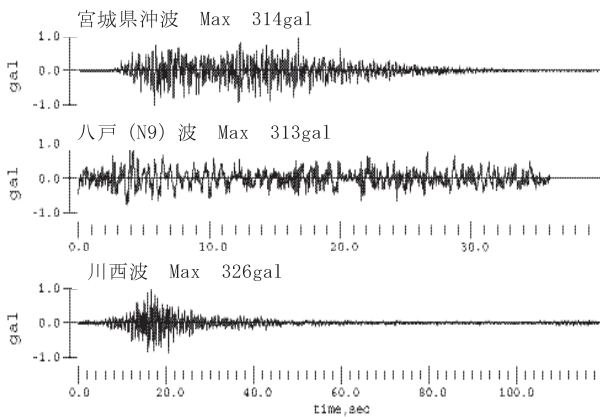
本検討で対象としているフィルダムは宮城県に存在すると仮定して、既往のデータから地震ハザード曲線を設定した。地震ハザード曲線とは、着目地点において、1年間に最大加速度がある値を超える確率をプロットしたものである。文献（原子力安全基盤機構，2006）では宮城県沖地震を想定して、同県に存在する原子力発電所立地地点での地震ハザード曲線が距離減衰式を用いて**Fig.7**のように評価されており、本論文では、この地震ハザード曲線を用いる。

(4) フィルダムの地震時の性能目標（谷茂，2009）

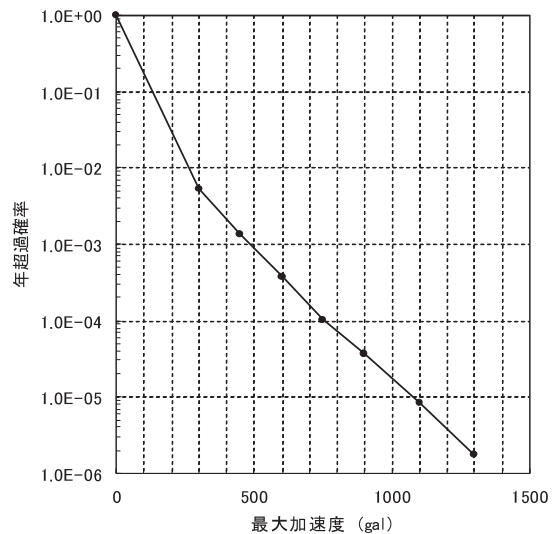
機能の維持と損傷の程度との関係は、構造物によっても異なるし、一義的に決めることが難しいのが現状である。土構造物は一般に極限解析法で安定性の評価を行っているが、レベル2地震動を考慮した場合には、たとえば盛土では安全率が1.0を下回り、崩壊することになり、'どの程度危険なのか、安全なのか'が説明出来ない。安全率が1.0を下回ったからといって、直ちに崩壊するわけではないので、堤体の変位量により'どの程度危険なのか、安全なのか'を知る必要が生じる。特に貯水構造物

のフィルダムでは、貯水位と沈下量の関係が重要となる。このための変位量を知るためには詳細解析，たとえば有限要素法解析などが必要になる。仮に正確な残留変位量が解析できたとしても、次にどの程度の残留変位が許容されるのか、性能目標を決める必要がある。性能目標については地震動との組み合わせで決めることになる。以下にフィルダムの性能目標について述べる。

フィルダムのような貯水構造物の要求される性能の指標としては天端沈下量と考えられる。ダムの機能の面から考えると、レベル2地震動に対しても貯水機能を保持出来る範囲の沈下量に納めなければならないことになる。地震後の天端標高が貯水位よりも下回らないこと、すなわち盛土の余裕高以内に沈下量が収まるように設計することが、最低限必要になってくる。貯水機能を最低限保持するためには貯水が堤体を越流しないことが必要になり、地震による波浪高さ等を加えた状態で、堤体の余裕高さの範囲内に収まればよいことになる。余裕高さの式はダム設計基準に定められている。この式から求まる数値が許容沈下量となり、堤高にかかわらずフィルダ



**Fig.6** 入力地震波（3波形）  
Input Ground Acceleration



**Fig.7** 地震ハザード曲線  
Applied Seismic Hazard Curve (JNES 2006)

ムでは最低 1.0m 以上は確保されている。

文献（土木研究所，2005）では下流斜面にすべりが想定されない場合には，パイピング破壊が生じる可能性はないとしていること，過去のフィルダムの地震被害でも，基礎地盤が液状化するなどの場合を除いては，既往の被害事例から見ても沈下量が 0.5m を超すケースはほとんど報告されていない，これらのことを考慮すると，安全側の判断として堤高にかかわらず沈下量が概ね 1.0m ぐらいを性能目標とした。さらに，解析の誤差，対象のフィルダムの重要度等を考え，工学的判断により概略 1.0m の 50%～100% 程度の沈下量 50cm を許容沈下量の目標と考えるが妥当と考える。

2 地震に対する損傷度曲線の算定

a 平均地盤定数を用いた解析結果

解析モデルは Fig.3 で示したもので，地震波は①宮城県沖地震，②八戸波，③川西波の 3 波である。土の構成則として弾塑性体モデル（Mohr-Coulomb モデル）を用いた。補修前と補修後の解析モデルに最大加速度を 200～1000gal まで 5 段階に変化させた地震応答解析を行った。すべての解析ケースの堤体上流端の沈下量と入力加速度の関係を Fig.8 に示した。沈下量は入力加速度が大きくなるにしたがい大きくなり，同一加速度レベルでは宮城県沖波，川西波，八戸波の順に大きくなっている。補修前と補修後の比較では，補修後の沈下量が大きく減少しているが，加速度の大きさ，入力地震動により，減少の割合は異なっている。どの地震波においても耐震補強により大幅に残留沈下量が減少していることがわかる。入力地震動のスペクトル特性の違いによるものと考えられる。

b モンテカルロシミュレーション（MS）

対象フィルダムの解析モデルを用いて，土の構成則に Mohr-Coulomb モデルを適用した，2 次元動的 FEM 解析の MS を行った。本検討における LCC の評価では，天端の沈下による越流を限界状態としていることから，MS による天端天端沈下量のばらつきを算出した。MS は補強前では加速度 300，600，900 (cm/s<sup>2</sup>)，補強後で

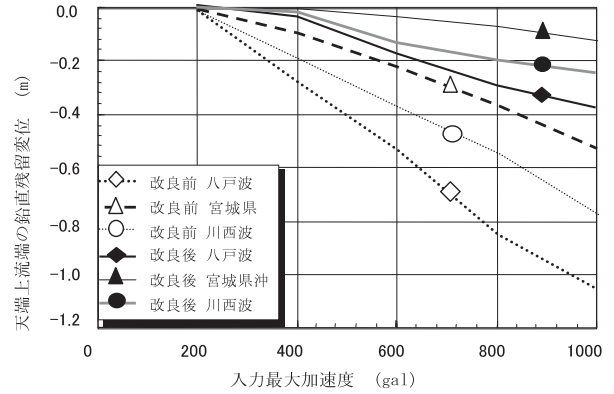


Fig.8 入力最大加速度と天端の沈下量の関係  
Relationship between input maximum acceleration and crest settlement

は 900，1100，1500 (cm/s<sup>2</sup>) に対して行い，それぞれの加速度に対して 50 回の試行回数とした。既存および耐震補強後で，八戸波に対する MS から得られた天端沈下量のばらつきを Fig.9 に示す。各最大加速度に対する超過確率は天端の許容沈下量（レベル 2 地震動における性能目標）を 50cm と仮定して，各加速度での試行回数に対し，これを越えた回数の比とした。

c 損傷度曲線の計算

上記のモンテカルロ・シミュレーションから得られる各最大加速度に対する天端沈下量のばらつきに基づいて，損傷度曲線を算定した。損傷度曲線の算出は Fig.10 に示すように，最大加速度と破壊確率の関係を対数正規確率の累積分布関数で回帰し，残差が最も小さくなるように，累積分布関数のパラメータである平均値，標準偏差を定めた。各最大加速度（同図中の  $a_1$ ， $a_2$ ， $a_3$ ）に対する破壊確率 ( $p_{f1}$ ， $p_{f2}$ ， $p_{f3}$ ) は，前述の各最大加速度に対する超過確率である。Fig.11 に算出した損傷度曲線を示す。

なお，対策後の損傷度曲線については，計算した加速度が損傷度曲線の下限側に偏っていることが分かり，この 3 点で対数正規確率の累積分布関数への当てはめは困難であると考え，対策前の累積分布関数の当てはめから得られた平均値と標準偏差を用いて変動係数（＝標準偏

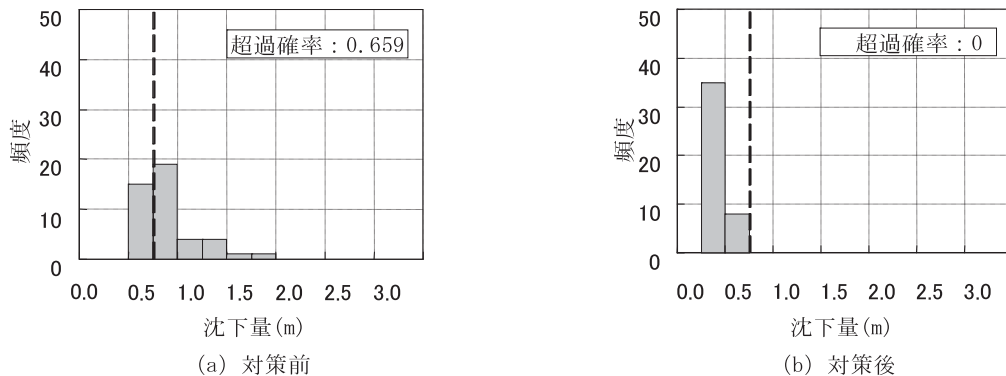


Fig.9 天端沈下量のヒストグラム（最大加速度 600gal の例）  
Example of MCS result for peak acceleration 600 (cm/s<sup>2</sup>)

差/平均値)を算出し、その変動係数が対策後も同じものであるとして、平均値のみをパラメータとした当てはめを行った。

3 ライフサイクルコストの評価

a LCCの評価方法

LCCの評価については、現在から任意の期間までのトータルコスト(TC)として評価する。このトータルコストとは、任意の期間までのコストの期待値を意味し、既設フィルダムの対策コスト $C_0$ 、フィルダムの破壊確率 $p_f$ と被害コスト(越流による周辺の浸水被害、再構築に関するものを含む) $C_f$ から、式(1)を用いて算出する。

$$TC = C_0 + p_f C_f \quad (1)$$

上式において、破壊確率 $p_f$ は、ハザード曲線と、損傷度(フラジリティ)曲線を用いて算出した「年間破壊確率」(1年間当りの破壊確率)である。この意味合いは、想定する地点で発生する可能性がある全ての地震(最大加速度)を考慮したときのフィルダムの破壊確率であり、地震はハザード曲線では、全ての最大加速度の発生確率が「1年間当り」で算定されているため、フィルダムの破壊確率も1年間当りとなる。この破壊確率を、無対策と対策後の2ケースについて算出する。

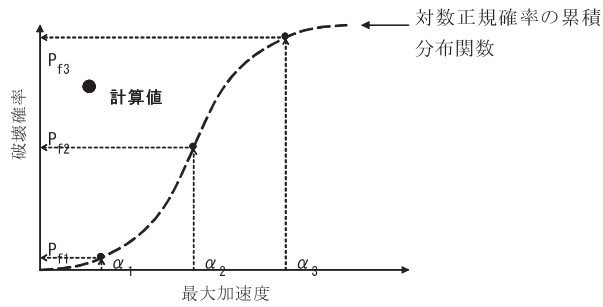


Fig.10 損傷曲線の算出  
General of fragility curve evaluation

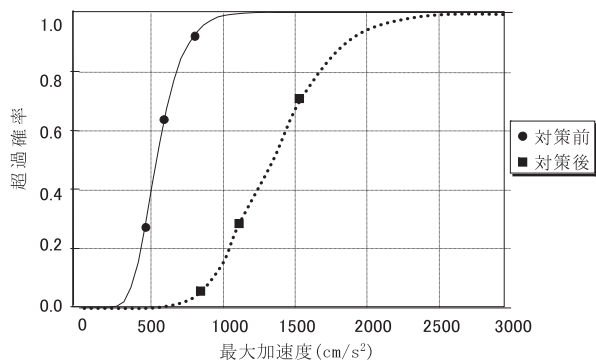


Fig.11 対策前後の損傷度曲線  
Comparison of fragility curve between no and with reinforcement

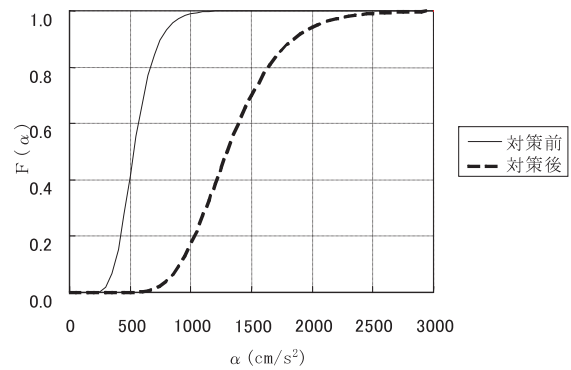
$$p = \int_0^{\infty} F(\alpha) \frac{dH(\alpha)}{d\alpha} \quad (2)$$

ここに、 $p$ :1年間当りの破壊確率、 $F(\alpha)$ :損傷度(フラジリティ)曲線、 $H(\alpha)$ :地震ハザード曲線、 $\alpha$ :最大加速度である。この結果を Fig.12 に示す。

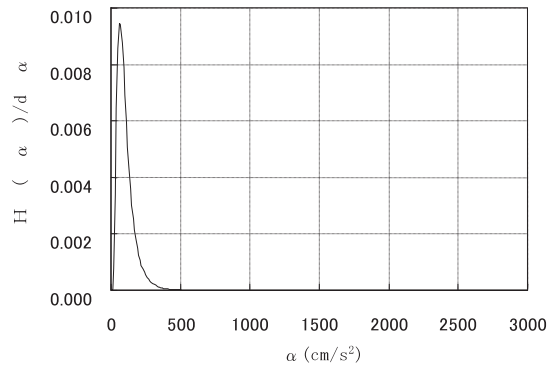
b 補強前と耐震補強後のLCCの評価

ハザード曲線と、耐震対策前後の損傷度曲線を用いて年間破壊確率を算出し、その結果を用いてLCCを評価した。年間破壊確率の算定結果を Table 3 に示す。耐震対策によって破壊確率は2オーダー小さい結果となった。

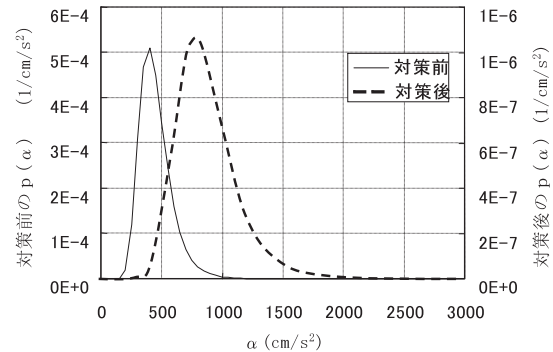
LCC評価で考慮したコストは Table 4 の通りである。耐震対策のための押え盛土の体積は、対象フィルダムの形状から算出した。その結果、本検討で用いたモデルで



(a)  $F(\alpha)$  損傷度曲線



(b)  $dH(\alpha)/d\alpha$  (最大加速度の確率密度関数)



(c)  $F(\alpha) \times dH(\alpha)/d\alpha$  (1年間当りの破壊の確率密度関数)

Fig.12 1年間当りの破壊確率の算定過程  
Process of annual failure probability evaluation

は、押え盛土による対策費は、22.9 億円であった。被害額が対策費よりも小さい 10 億円を想定した場合には、今後 500 年間では、対策を行った場合の方がトータルコストは大きくなる。しかし、被害額 50 億円、100 億円とした場合には、初期コスト(経過年数 0 年のときのトータルコスト)は対策を行った場合の方が大きいものの、年数の経過に伴ってトータルコストは小さくなり、無対策との差が大きくなる。このことは、大きな被害が想定される重要なフィルダムについては、対策を行った方が LCC は小さくなることを示している。LCC 評価結果(補強対策費 23 億円、被害額 50 億円の場合の LCC の評価結果)の例を Fig.13 に示す。

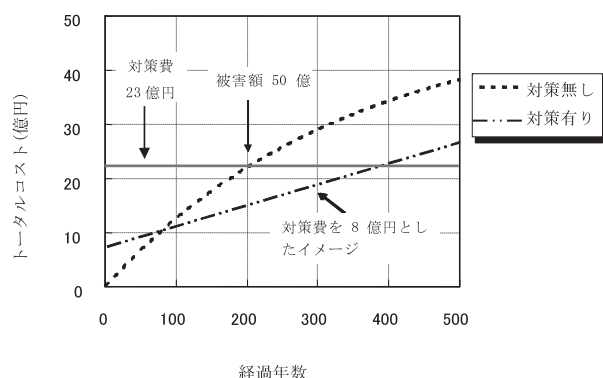
この結果において、対象期間(横軸)を限りなく長くすると、それぞれのトータルコストは限りなく想定被害額に漸近する。これは、対象期間を長くすればするほど、その期間に対象とするフィルダムが壊れる確率は 1 となり、その結果、想定した被害額が必ず必要となる、ということの意味している。また、耐震補強対策の規模を本検討よりも小さくすると、切片(対策コスト)は小さくなって勾配が大きくなるため(無対策に近づく)、無

**Table 3** 年間破壊確率の算定結果  
Calculation results of annual failure probability

対策前	$2.90 \times 10^{-3}$
対策後	$1.15 \times 10^{-5}$

**Table 4** LCC 評価で考慮したコスト  
Costs considered in LCC assessment

項目	数値	備考
対策コスト $C_0$	10,000 円 / $m^3$	押え盛土
被害コスト $C_f$	23 億円	1 ケースのみ計算



**Fig.13** LCC (トータルコストの期待値) の評価結果  
(補強対策費 23 億円、被害額 50 億円の場合の試算)

Results of LCC estimation in case of damage  
amount of 50 hundred millions

対策の関数と早い期間で交差し、より合理的な対策であると解釈することができる。このように、想定するフィルダムの特性(損傷度曲線)と対象地点の地震環境(地震ハザード曲線)を組合せた LCC 評価により、対策の必要性や、合理的な対策規模の検討を行うことが可能となると考えられる。

#### IV 結 言

本報告では仮想フィルダムを対象として、動的応答解析によりレベル 2 地震動におけるフィルダムの安全性の検討を行ったが、築堤材のばらつきによる堤体の変形量への影響を考慮し、さらに地震動や地震ハザードの設定、および 1 つの補強工法を仮定して耐震補強を行った場合の盛土の破壊確率を求めた。

これらにより、大規模地震動のリスクを考慮した老朽化フィルダムの LCC 評価を行った。本研究ではモデルフィルダムの損傷を受けた場合の被害額については類似地区の被害額を参考にしているが、今後は実際のフィルダム、地域を想定して、洪水被害額についても実際に算定し、LCC の検討を行っていく必要がある。また、補強対策の方法を変えて、対策コストに応じた LCC の評価を詳細に行っていく必要がある。本評価法の詳細については資料として巻末に添付した「老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した LCC 評価の手引き(試案)」に述べているので参照されたい。

#### 参考文献

- 1) 谷 茂 (1989) : 溜池の話あれこれ, 農業土木学会誌, Vol.57, No.12, p.2-4
- 2) 農林水産省農村振興局 (2005) : 農業用ダム台帳
- 3) 土構造物の地震時における許容変形と性能設計に関する研究委員会報告書 (2007) : 土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, p.113-114
- 4) 堀内孝英・川村国夫 (1977) : 信頼性設計のための土質の統計的性質, 土と基礎, Vol.25, No.11, p.11-18
- 5) 松尾 稔 (1984) : 地盤工学 信頼性設計の理念と実際, 技報堂出版, p.96
- 6) (独)原子力安全基盤機構 (2006) : 地震に係る確率論的安全評価手法の整備 - 距離減衰式を用いた地震ハザードの試解析 (その 2) - に関する報告書, JNES/SAE06-033
- 7) 谷 茂 (2009) : Soils and Foundations, Vol.49, No.6
- 8) (独)土木研究所 (2005) : 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料, 土木研究所資料, 第 3965 号



# Safety of Old Fill-Dams Considering the Risk of Strong Earthquake Motion

TANI shigeru and HORI Toshikazu

## Summary

Recently, it is required to assess the safety of old fill-dams considering the risk of strong earthquake motion and optimize the methods of earthquake-proof reinforcement based on the conception of LCC (Life cycle cost). In this study, the deformation analysis using Monte Carlo Simulation Method is conducted for the model fill-dams at the level-2-earthquake to consider the variety of fill materials. Moreover, both the seismic hazard evaluation and the failure probability of embankments after the aseismic reinforcement as well as in the present condition are performed. Furthermore, the amount of the damage by the collapse of them is assumed, and the measures for the earthquake-proof reinforcement are investigated from the view point of LCC. In addition, in this study the amount of damage is figured out on the assumption that model fill-dams are failed, but in the future it must be necessary to set the existing fill-dams of certain areas and to estimate the real cost of damage in order to consider LCC.

**Keywords :** old fill dam, earthquake, risk, earthquake-resistant, performed-based design

資料

# 老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した LCC 評価の手引き (試案)

谷 茂\*・堀 俊和\*

目 次

第1章 概説	153	4.2 限界状態の設定	160
第2章 地震外力の設定	153	4.3 解析モデル	160
2.1 一般	153	4.4 応答値のばらつきと損傷確率の算定	161
2.2 地震動の設定	154	第5章 年間破壊確率の算定	161
2.3 地震ハザード曲線の設定	154	5.1 一般	161
第3章 築堤材料等の地盤定数の設定	157	5.2 損傷度曲線の評価	162
3.1 一般	157	5.3 年間破壊確率の算出	162
3.2 平均値の設定	157	第6章 LCCの算定	164
3.3 変動係数の設定	157	6.1 一般	164
3.4 確率密度関数の設定	160	6.2 算定方法	164
第4章 モンテカルロ・シミュレーション	160	6.3 LCC評価における割引率	166
4.1 一般	160	第7章 あとがき	167

## 第1章 概説

近年、大規模地震に対する老朽化フィルダムの安全性の評価において、耐震補強対策の必要性、対策の合理性の説明が求められていること、仕様設計から性能設計へ移行していることなどから、耐震補強する場合でも、耐震補強対策の程度と地震リスクを考慮したライフサイクルコスト（以下、「LCC」とする）の概念に基づく耐震補強対策の最適化が求められている。このような背景を踏まえ、本手引きは、LCCの最適化による老朽化フィルダム等の高地震時におけるLCCの評価方法を取りまとめたものである。

**【解説】**

本手引きで示すLCC評価の流れをFig.1に示す。LCC評価は、地震リスクに基づいて算出するものとしている。そのため、耐力側フィルダムでは、地盤物性値のばらつきを不確定要因として考慮するものとしている。この地盤物性値のばらつきを考慮するために、本手引きでは、モンテカルロ・シミュレーションを行うことを基本としているが、それ以外の確率計算方法を否定するものでは

ない。また、外力としては、地震の不確実性を考慮するために、地震ハザードを考慮するものとしている。なお、LCCを算出するためには、対策費や被害額のコストの評価が必要となるが、その評価法については、本手引きの対象外としている。

## 第2章 地震外力の設定

### 2.1 一般

対象フィルダムの動的解析に用いるための地震動と、年間破壊確率の算定に用いるための地震ハザード曲線を設定する。地震動の設定は2.2に従う。また、地震ハザード曲線の設定は以下に示す方法とする。

**【解説】**

対象フィルダムの地震時の挙動を評価するために、動的解析を行う。この動的解析に用いる地震動の設定方法は、2.2に示すとおりである。また、フィルダムの年間破壊確率を求めるためには、地震ハザード曲線が必要となる。この地震ハザード曲線の設定方法は以下に示す方法である。

\* 農研機構農村工学研究所 施設資源部

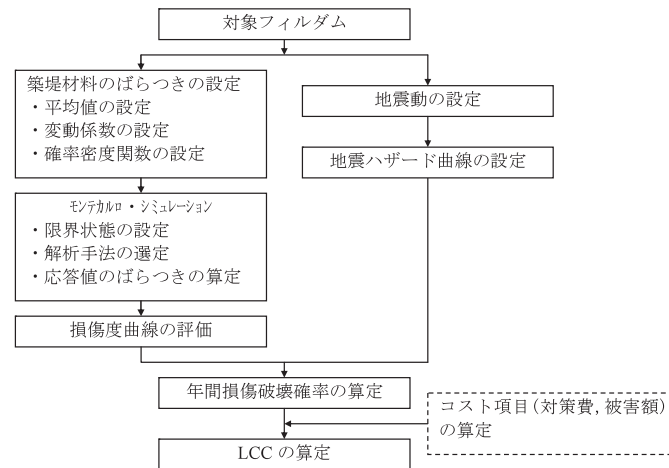


Fig.1 LCC算定の流れ

## 2.2 地震動の設定

対象フィルダムの動的解析に用いる地震動の設定にあたっては、以下の候補のうち、最も大きな影響を及ぼす可能性のある地震を選定する。

- ①照査用下限加速度応答スペクトルを有する地震動（位相は観測波）
- ②想定地震に基づく地震動

想定地震とは、対象地点周辺において過去に発生した地震や、周辺に分布する活断層やプレート境界等に基づくものである。候補とした地震動の加速度応答スペクトルの比較などから、検討に用いる地震動を設定する。

### 【解説】

動的解析に用いる地震動は、特にLCC算出用で特殊な地震動を用いる必要はなく、フィルダムを対象とした一般的な検討地震動を用いることでよい。参考に、京都府に存在するフィルダムを対象とした地震動の設定事例を以下に示す。

この事例では、以下に示すように、下限加速度応答スペクトル以外に、想定地震として地点近傍の断層を考慮したものと、プレート境界型の地震動を考慮して選定している。

- ①下限加速度応答スペクトルに基づく地震動（位相特性は川西ダム）（谷茂他，2007）
- ②京都西山断層帯の地震動
- ③東海+東南海+南海地震の地震動

上記①の下限値応答加速度スペクトルは、Table 1のように定められている（国土交通省河川局，2005）ので、この下限応答加速度スペクトルをもとに地震動を作成する方法がある。また、地点近傍の断層を考慮した地震動やプレート境界型の地震動については、地点で独自に評価することも考えられるが、一般公開されているデータに基づいて設定することも可能である。事例で示す上記

Table 1 下限応答スペクトル（減衰定数 = 5%）

固有周期 $T$ (sec) の範囲	加速度応答スペクトル $S_A$ (gal)
$0.02 \leq T < 0.1$	$S_A = 400/0.08 \times (T - 0.02) + 300$
$0.1 \leq T \leq 0.7$	$S_A = 700$
$0.7 < T \leq 4$	$S_A = 700 \times (T/0.7)^{-1.642}$

の②と③は、中央防災会議（東南海、南海地震等に関する専門調査会，2009）で評価、公開されているデータに基づいている。公開データでは、NS、EW成分の地震動が公開されている場合があるが、検討ではそれらの中の最大加速度の最も大きいものを適用するのがよい。

今回の事例で対象とした各地震動の加速度時刻歴の比較をFig.2に、加速度応答スペクトルの比較をFig.3に示す。事例では、殆どの周期帯で加速度応答スペクトルが上回っている京都西山断層帯地震動を設定している。

## 2.3 地震ハザード曲線の設定

年間破壊確率の算定で必要となる地震ハザード曲線は、対象地点の地震危険度解析に基づいて設定することを原則とする。地震危険度解析を行わない場合は、対象地点周辺の公開データ資料を用いてもよい。

### 【解説】

地震ハザード曲線とは、最大加速度と年発生確率の関係を示したものである。本来は、対象地点周辺での地震活動度等に基づいて、地震危険度解析を行って設定するものである。しかし、地震危険度解析を実施しなくても、公開データに基づいて、地震ハザードを設定することも出来る。

例えば、京都府を対象としたフィルダムの検討事例では、防災科学研究所<sup>1)</sup>で公開されている京都市の地震ハザード曲線が適用している。Fig.4, Fig.5は、防災科学

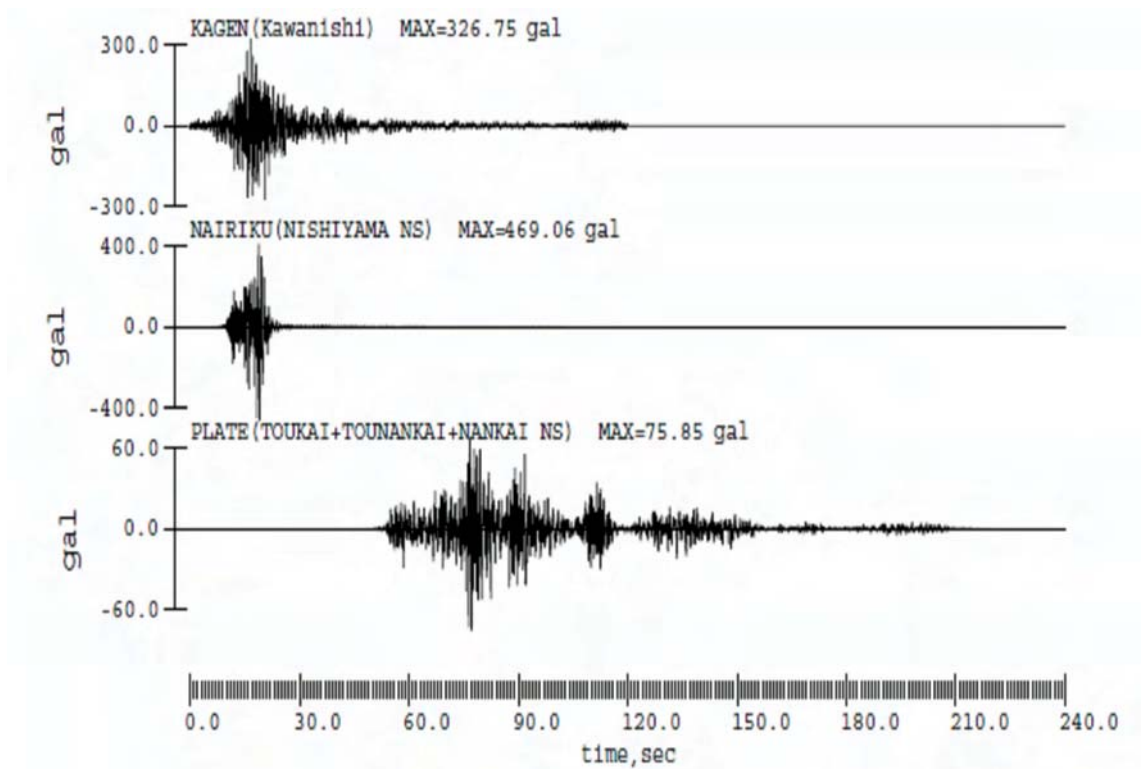


Fig.2 候補とした地震動の時刻歴の比較

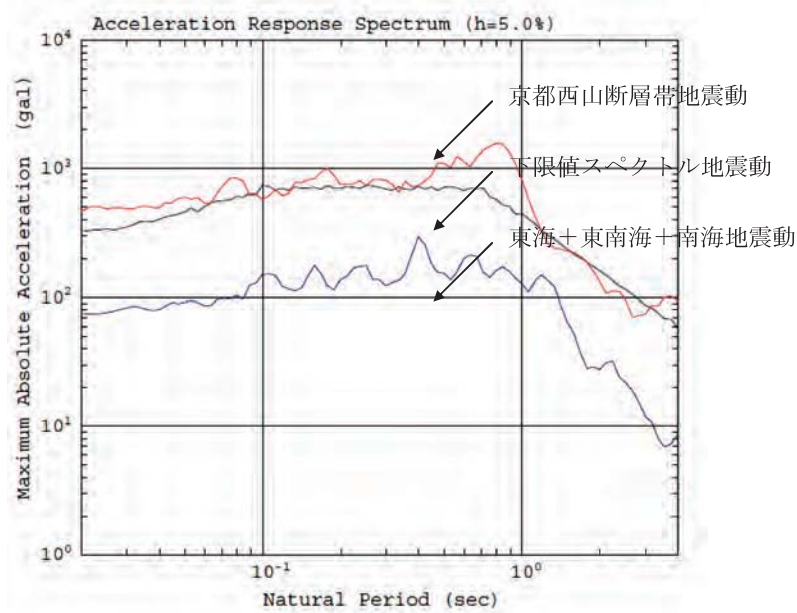


Fig.3 候補とした地震動の加速度応答スペクトルの比較

研究所で公開している京都市のハザード曲線である。ただし、これらの図で示すように、地震ハザード曲線は、最大速度を指標として評価されており、30年および50年の超過確率として示されている。そこで、実際の地震ハザードの評価に当たっては、以下に示すように、最大加速度を指標とした1年間当たりの超過確率に変換して用いている。

(1) 30年および50年の超過確率の1年間当たりの超過確率への変換方法

地震発生 の時間モデルとしてポアソン型モデルを考えると、着目地点において最大速度Vがある値vを超える時系列もポアソン型モデルとなる。その結果、着目地点でT年間に着目地点で最大速度がvを超える確率は、ポアソン型モデルでは、その発生率  $\nu(v)$  を用いて、次式で表される。



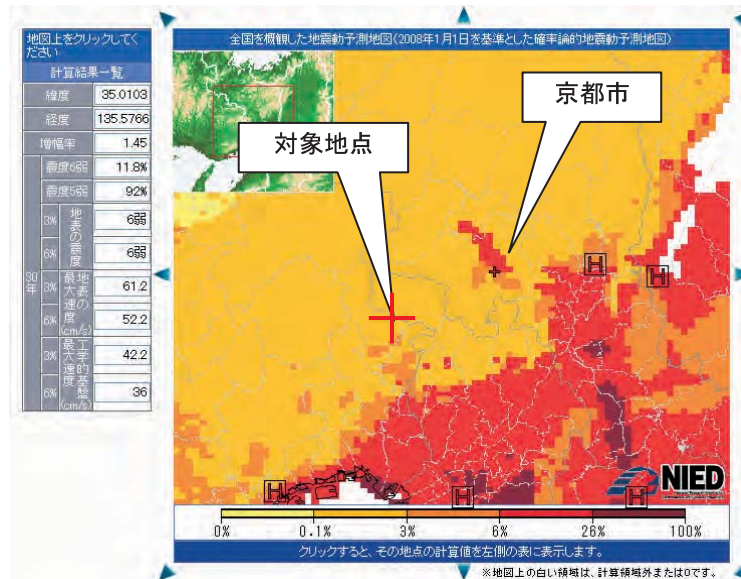


Fig.4 地震ハザード曲線表示地点 (独防災科学技術研究所, 2009)

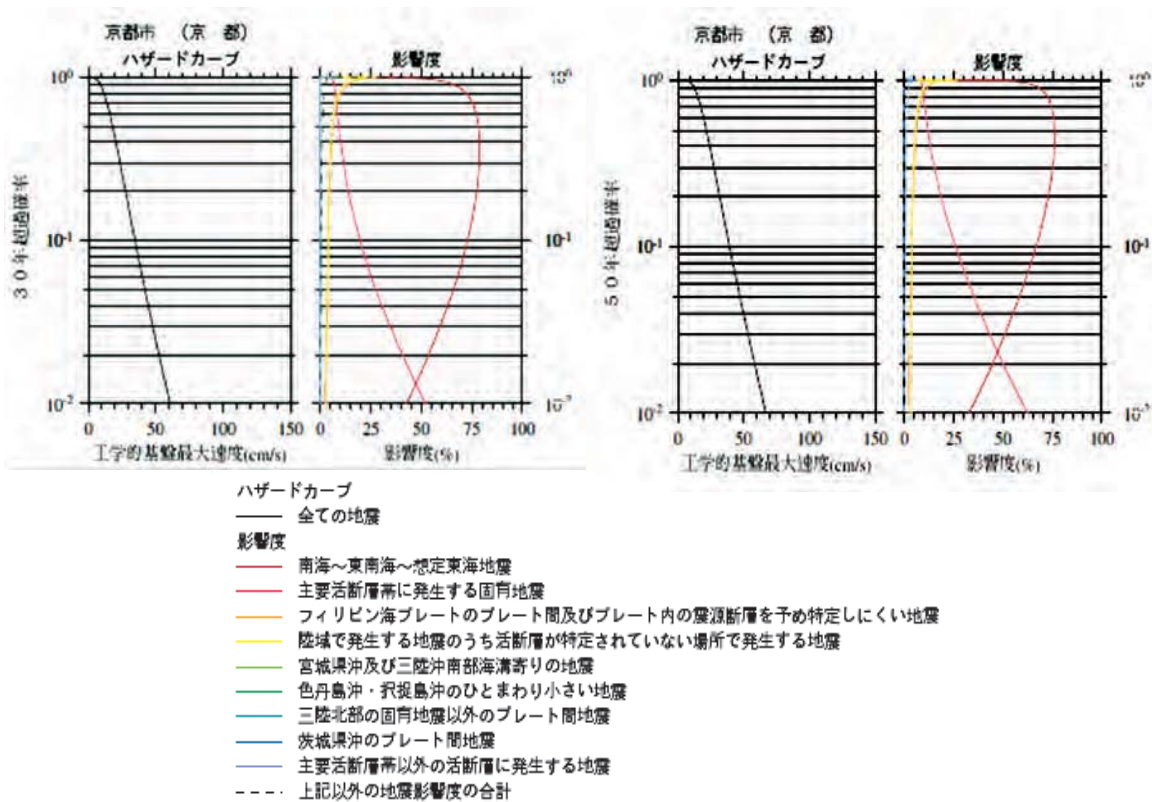


Fig.5 京都市のハザードカーブ (NIED による, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)

$$p(v) = 1 - \exp[-v(v)T] \quad (1)$$

この関係を利用して、50年あるいは30年超過確率で評価されたハザードカーブから、年間超過確率を算出することを考える。具体的には、ある最大速度に対する  $T = 50$  年の超過確率  $p(v)$  を 50 年超過確率のハザードカーブから読み取り、上式から  $v(v)$  を逆算する。次に、その逆の手順で、 $T = 1$  年としたときの  $p(v)$  を、逆算した  $v$  を用いて算出することで年間超過確率とする。上

述の方法で算出した 1 年超過確率を Fig.6 に示す。Fig.6 では参考のため、50 年超過確率から 30 年超過確率を算出したもの、30 年超過確率から 50 年ものものを併記しているが、両者とも変換したハザード曲線と元のハザード曲線との差は小さい。

なお、最大速度の最大加速度への変換は、検討で用いる地震動が特定されていれば、加速度時刻歴を時間に関して積分して速度時刻歴を評価し、両者の最大値の関係を見ることで可能である。

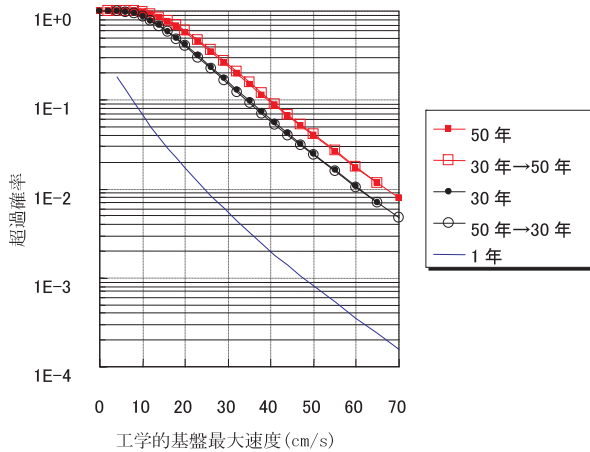


Fig.6 京都市の年間超過確率の算定

### 第3章 築堤材料等の地盤定数の設定

#### 3.1 一般

モンテカルロ・シミュレーションで必要となる築堤材料や補強材料の平均値、変動係数、確率密度関数を設定する。平均値の設定は3.2、変動係数（もしくは標準偏差）の設定は3.3に従う。また、確率密度関数の設定は、3.4に従うものとする。ここで設定した平均値、変動係数（標準偏差）、確率密度関数に基づいて、モンテカルロ・シミュレーションの試行回数に応じた個数の地盤定数を、乱数を用いて作成する。

#### 【解説】

フィルダムのLCC評価に当たっては、地盤物性値の不確実性を考慮するために、地盤物性値のばらつきを考慮するものとしている。対象とする地盤物性値は、強度や変形特性、密度等がある。地盤物性値のばらつきの評価に当たっては、平均値と標準偏差（変動係数）のパラメータからなる確率密度関数を考慮する。評価できる詳細な試験データが揃っている場合には、空間的ばらつきを考慮することも考えられる。

地盤物性値のばらつきを考慮したフィルダムの動的な確率計算方法については、本手引きでは、フィルダムの非線形解析を前提としていることから、モンテカルロ・シミュレーションによる方法を原則としているが、他の確率計算方法（確率有限要素法\*、レスポンス・サーフィス法\*\*等）を否定するものではない。

\* 確率有限要素法；摂動法と呼ばれることもあり、例えば、ばらつきを有する材料定数が含まれている剛性マトリックスを、平均値まわりにテーラー展開を行い、テーラー展開の1次の項に相当する平均値の計算と、二次の項に対する微小な揺らぎ（標準偏

差に相当）の計算を一度に計算し、モンテカルロ・シミュレーションを行うことなく、平均値と、平均値+標準偏差が得られる方法である。この結果から、限界値を下回る確率を算出し、これを各最大加速度について適用する。

\*\* レスポンス・サーフィス法：まず、平均値を用いた有限要素法などで、最大加速度と天端沈下量の関係を求め、次に、平均-標準偏差、あるいは、平均+標準偏差の計算を行って、天端沈下量の平均値-標準偏差、あるいは平均値+標準偏差に相当する値を求め、それを天端沈下量のばらつきとする。最大加速度によらずばらつきを一定とする（標準偏差一定）、あるいは、最大加速度が大きくなると天端沈下量のばらつきは大きくなる（変動係数一定）などの仮定を設け、それぞれの最大加速度について限界値を下回る確率を算出する。

#### 3.2 平均値の設定

堤体、フィルタ、コア等の築堤材料や補強材料、あるいは基礎岩盤の平均値を設定する。試験結果等のデータが得られていない場合は、既往の文献資料等に基づいて設定する。

#### 【検討事例】

地盤物性値のばらつきの評価に用いる地盤物性値の平均値は、得られている試験データの平均値を算出することで得られる。しかし、試験結果等のデータが得られていない場合は、既往の文献資料等に基づいて平均値を設定する。参考として、ため池堤体土の土質分類によるせん断強度定数を Fig.7 に示しておく。

#### 3.3 変動係数の設定

堤体、フィルタ、コア等の築堤材料や補強材料の変動係数（もしくは標準偏差）を設定する。変動係数（標準偏差）は、対象ダムでデータが得られていない場合は、既往の文献資料等に基づいて設定する。

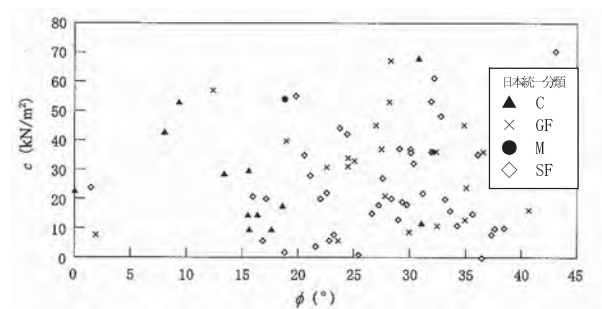
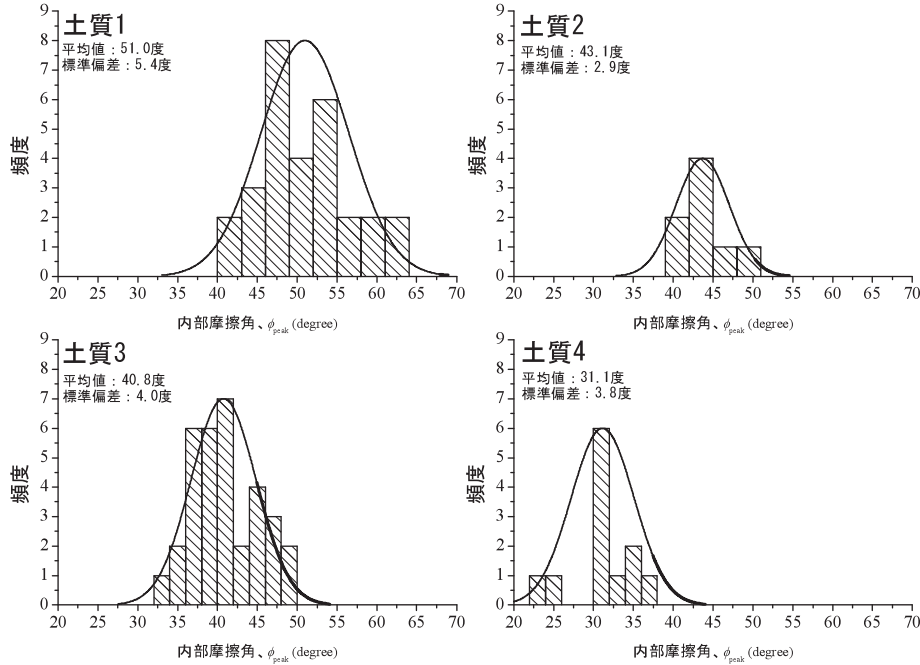


Fig.7 ため池現況堤体土の土質分類別せん断強度定数 (全応力) (ため池整備, 2006)

【解説】

対象としたフィルダムにおいて、材料の試験結果が得られていない場合や残されていない場合は、既存の地盤物性値のばらつきの評価結果に基づいて、変動係数を設定することが考えられる。

参考として、既存の地盤物性値のばらつきの評価結果を **Table 2**, **Table 3**, **Fig.8**, **Fig.9**, **Fig.10** に示す。堤体の内部摩擦角等の変動係数は、鉄道（の盛土）で評価されているピーク強度の値（7～12%）（地盤工学会，2007）を参考に10%程度とすることが考えられる。また、粘



※全実験データのうち、締固め度D=90%、拘束圧49kPa、飽和度Sr=100%で実施されたデータのみを抽出

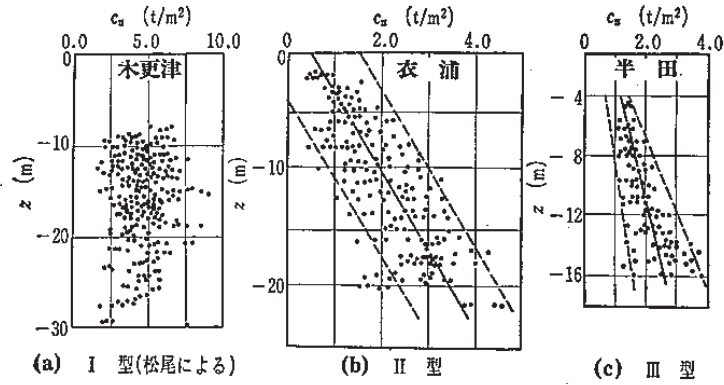
Fig.8 各土質分類の  $\phi_{peak}$  の頻度分布（堀内孝英他，1977）

Table 2 各強度定数の平均値，標準偏差，変動係数（堀内孝英他，1977）

	土の構成成分			湿潤単位体積重量, $\gamma_t$			ピーク強度, $\phi_{peak}$			残留強度, $\phi_{res}$		
	礫分含有率	砂分含有率	細流分含有率	平均値 (g/cm <sup>3</sup> )	標準偏差 (g/cm <sup>3</sup> )	変動係数	平均値 (degree)	標準偏差 (degree)	変動係数	平均値 (degree)	標準偏差 (degree)	変動係数
土質 I	66.0%	28.5%	5.5%	2.086	0.141	6.8%	51.0	5.43	10.7%	43.8	4.06	9.3%
土質 II	33.8%	56.8%	9.3%	1.890	0.063	3.3%	43.1	2.87	6.7%	36.7	2.58	7.0%
土質 III	28.7%	48.0%	23.4%	1.901	0.079	4.2%	40.8	4.02	9.9%	36.7	4.25	11.6%
土質 IV	2.3%	16.7%	81.0%	1.415	0.192	13.5%	31.1	3.78	12.2%	32.2	6.43	20.0%

Table 3 土質定数の統計的性質（堀内孝英他，1977）

パラメータ	分布型	平均	変動係数	備考	出典
$\tan \phi_d$	正規分布	0.692	0.138	Silty Sand	(2)
$\tan \phi_d$	正規分布	0.597	0.148	Clayey silt	(2)
$\phi^f$ (°)	—	37.6	0.09	Sand	(3)
$\phi^f$ (°)	—	15.3	0.21	Clayey, silt	(3)
$\phi^f$ (°)	—	33.3	0.09	Clayey, silt	(3)
$\tan \phi$	—	0.744	0.09	Sand	(3)
$c$ (kPa)	正規分布	13.7	0.193	Silty Sand	(4)
$\tan \phi$	正規分布	0.615	0.0575	Silty Sand	(4)
$c$ (kPa)	正規分布	37.2	0.334	Sandy loam	(4)
$\tan \phi$	正規分布	0.714	0.127	Sandy loam	(4)



Cu の分布

地域	サンプル数 (n)	平均値 $\mu$ (t/m <sup>2</sup> )	標準偏差 $\sigma$ (t/m <sup>2</sup> )	変動係数 $v$
堀川橋	119	5.50	1.250	0.227
木更津	231	1.25	0.380	0.304
寝屋川	86	4.10	1.000	0.244
安 浦	238	3.00	0.870	0.289
京 浜	271	3.50	1.230	0.350
千 葉	192	1.45	0.310	0.214

海外の Cu の分布特性

地域	変動係数	分布モデル	試験法
London clay <sup>1)</sup>	0.184	Ⅲ型	現場ベーン
Hong kong A <sup>1)</sup>	0.316	Ⅰ型	現場ベーン
Hong kong B <sup>1)</sup>	0.259	Ⅰ型	現場ベーン
Greece <sup>7)</sup>	0.410	Ⅰ型	一軸圧縮
Detroit clay <sup>8)</sup>	0.30 ~ 0.41	—	一軸圧縮
Barbicon <sup>6)</sup>	0.15 ~ 0.33	Ⅱ型	三軸 UU
Walton <sup>6)</sup>	0.18 ~ 0.42	Ⅲ型	三軸 UU

Ⅱ型 Cu の分布

地域	n	a	b	$\sigma$	$\overline{Cu}$	V	道路, 港湾
厚木 *	60	1.250	0.245	0.567	2.06	0.28	道路
船子 *	52	1.240	0.153	0.486	1.59	0.30	
愛甲 *	56	1.560	0.075	0.435	1.80	0.24	
高崎 *	60	1.100	0.194	0.584	1.61	0.35	
袋井 *	29	0.910	0.140	0.345	1.46	0.24	
豊田 *	40	2.780	0.579	0.216	3.93	0.28	
東京港	159	0.527	0.126	0.482	1.95	0.25	港湾
名古屋港	101	0.336	0.130	0.583	2.55	0.23	
衣浦	78	1.350	0.140	0.350	2.60	0.14	
錦海湾	154	0.300	0.156	0.330	2.20	0.16	

(\* 栗原による)

Fig.9 飽和粘性土の非排水せん断強度 Cu の統計的性質 (堀内孝英他, 1977)

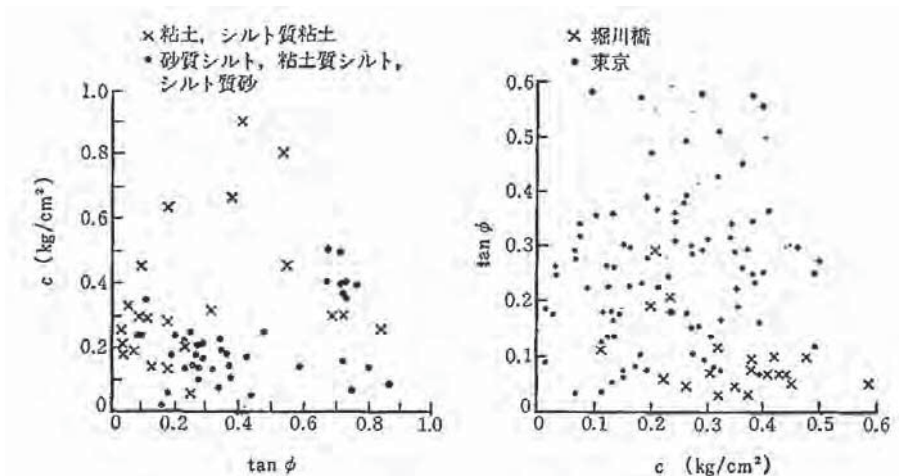


Fig.10 C と tan  $\phi$  との関係



着力の変動係数は、堀内ら<sup>2)</sup>がとりまとめたデータを参考にして30%とすることが考えられる。なお、Fig.9によれば、内部摩擦角と粘着力の統計的な関係は、互いに独立と仮定してよいものと考えられる。

### 3.4 確率密度関数の設定

堤体、フィルタ、コア等の築堤材料や補強材料の確率密度関数を設定する。確率密度関数は、正規分布あるいは対数正規分布を仮定するのがよい。

#### 【解説】

確率密度関数は、地盤物性値等のばらつきを数学的に表現するために用いるものである。後述するモンテカルロ・シミュレーションでは、設定した確率密度関数に従うように、乱数を用いて内部摩擦角と粘着力等の地盤物性値を複数発生させている。

試行回数を50回、つまり50個のサンプルで発生させた地盤物性値のばらつきの例をFig.11に示す。このFig.11では、確率密度関数として、対数正規分布を考慮している。確率密度関数として正規分布を仮定すると、平均値が小さい、あるいは変動係数が大きい場合、発生させる乱数によっては、実際にはあり得ない負値となる場合が生じる。そこで、この例では、確率密度関数として対数正規分布を仮定している。なお、変動係数が30%程度までは、正規分布とした場合と確率密度関数に大差はないと言われている。

## 第4章 モンテカルロ・シミュレーション

### 4.1 一般

動的解析のモンテカルロ・シミュレーションを行い、対象フィルダムの応答値のばらつきを評価する。このモンテカルロ・シミュレーションの解析結果に基づいて、フィルダムの機能が維持できなくなる、限界状態に至る確率を算定する。限界状態の設定は4.2に従う。また、動的解析は4.3、応答値のばらつきと超過確率の算定は4.4に従う。

#### 【解説】

地盤物性値のばらつきによるフィルダムの応答値のばらつきを求めるために、モンテカルロ・シミュレーションを行う。モンテカルロ・シミュレーションでは、動的解析を用いて、フィルダムの地震応答を求めることを原則とする。

### 4.2 限界状態の設定

フィルダムとしての機能、安全性を考慮して、貯水機能を保持できる沈下量を限界状態とする。地震後の天端標高が貯水位より下回る、すなわち沈下量が堤体の余裕高を超える状態を限界状態とする。

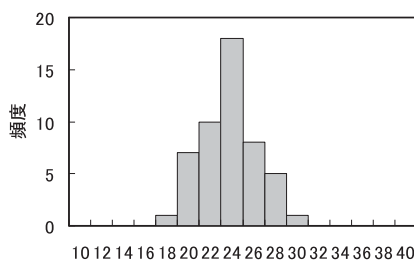
#### 【解説】

フィルダムの要求性能として、事業者(利用者)によって要求される構造的、社会的要求性能である。一般的には使用性、修復性、安全性それぞれについての要求性能となるが、構造物の重要度、考慮すべき外力項によって異なる。安全性の要求事例として、概念的には地震時に損傷が生じたとしても機能を失わないことというような表現になり、明示的、具体的には天端での最大沈下量が1.0m以内などの表現となる。

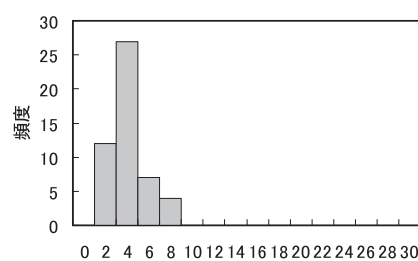
フィルダムではダムの機能面、安全性から考えると、レベル2地震動に対しても貯水機能を保持出来る範囲の沈下量に納めなければならないことになる。地震後の天端標高が貯水位よりも下回らないこと、すなわち盛土の余裕高以内に沈下量が収まるように設計することが、最低限必要になってくる。フィルダムでは“余裕高さ(付加高さ)”が設計基準で少なくとも1.0m以上は確保されていることから、堤高にかかわらず概ね1mぐらいを性能目標とするが、解析に用いる土質定数のばらつき、解析の誤差等を考慮して、工学的判断により100%~50%というような数値も想定される(S.TANI etc., 2009)。

### 4.3 解析モデル

地震による天端沈下量を適切に算定することが出来る動的解析手法と解析モデルを用いて、動的解析によるモンテカルロ・シミュレーションを行う。



(a) 内部摩擦角 (°)



(b) 堤体の粘着力 (kN/m²)

Fig.11 モンテカルロ・シミュレーションに用いた内部摩擦角と粘着力のヒストグラム

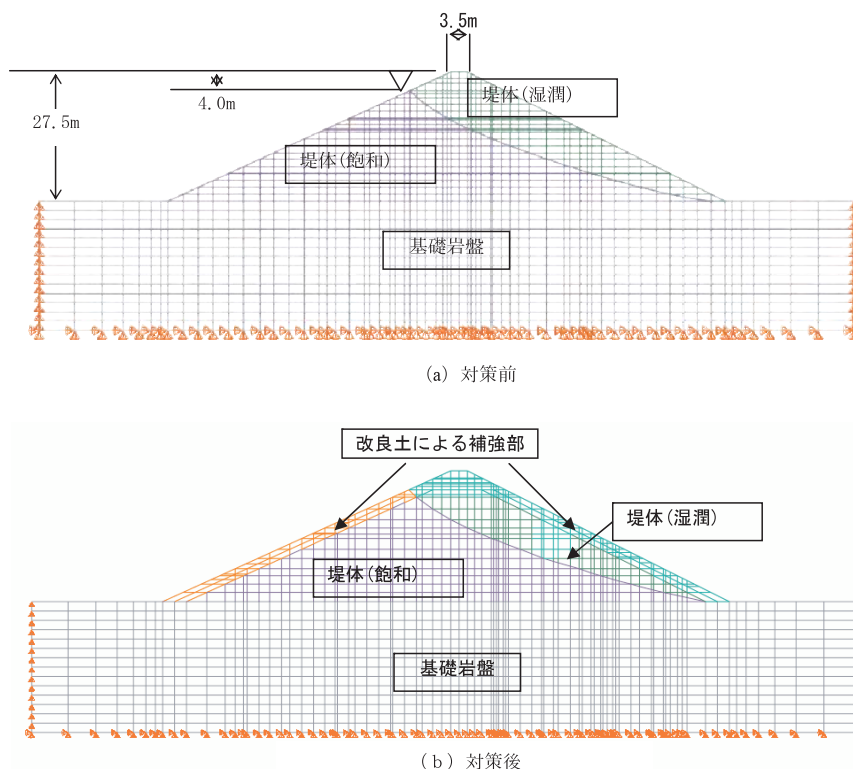


Fig.12 動的FEM解析のモデル

【解説】

LCCの評価に当たっては、フィルダムの天端の沈下量を限界値の指標としているため、沈下量を評価できる解析コードや解析モデルを適切に選定する必要がある。

既往のLCCの評価事例では、土の構成則にMohr-Coulombモデルを用いた二次元FEM動的解析を行っている。解析モデルの例をFig.12に示す。このときの堤体の浸潤線は、A.Casagrandeの解法等から評価している。

4.4 応答値のばらつきと損傷確率の算定

数レベルの最大加速度に対して、築堤材料や補強材料の地盤定数のばらつきを考慮した動的FEM解析のモンテカルロ・シミュレーションを実施し、天端沈下量のばらつきを算定する。また、その結果に基づいて、各最大加速度における損傷確率として、天端沈下量の限界値を超過する確率を算定する。

【解説】

入力地震動の最大加速度をパラメータとし、入力地震動レベルごとに実施した動的解析によるモンテカルロ・シミュレーション結果により各地震動レベルのフィルダムの損傷確率を求め、それらの結果を連続的に評価することで最大加速度と損傷確率の関係を求めることができる。

既往のLCC評価事例では、入力加速度レベルとして

150gal, 300gal, 600galを考慮して、それぞれの加速度レベルにおいて動的解析を用いたモンテカルロ・シミュレーション解析を行っている。モンテカルロ・シミュレーション結果に基づいて、Fig.13に示すように、各加速度レベルでの天端沈下量のヒストグラムを求めている。このFig.13中に示す赤線は、天端沈下量の平均値と標準偏差から求めた対数正規分布の確率密度関数である。各加速度レベルにおける損傷確率は、Fig.13の赤線で示している確率密度関数に基づいて、天端沈下量50cmを超える確率として評価される。動的解析のモンテカルロ・シミュレーションを行う加速度レベルの設定に当たっては、損傷確率が0から1の範囲で偏りがないように、最低でも3レベルの加速度レベルを考慮する必要がある。

第5章 年間破壊確率の算定

5.1 一般

モンテカルロ・シミュレーションから得られる最大加速度と超過確率を連続関数で現した損傷度曲線を評価する。また、地震ハザード曲線とのたたみ込み(コンボリューション)から、1年間当たりの限界値の超過確率(以下、「年間破壊確率」)を算出する。損傷度曲線の評価方法は5.2に従う。また、年間破壊確率の算出は5.3に従う。

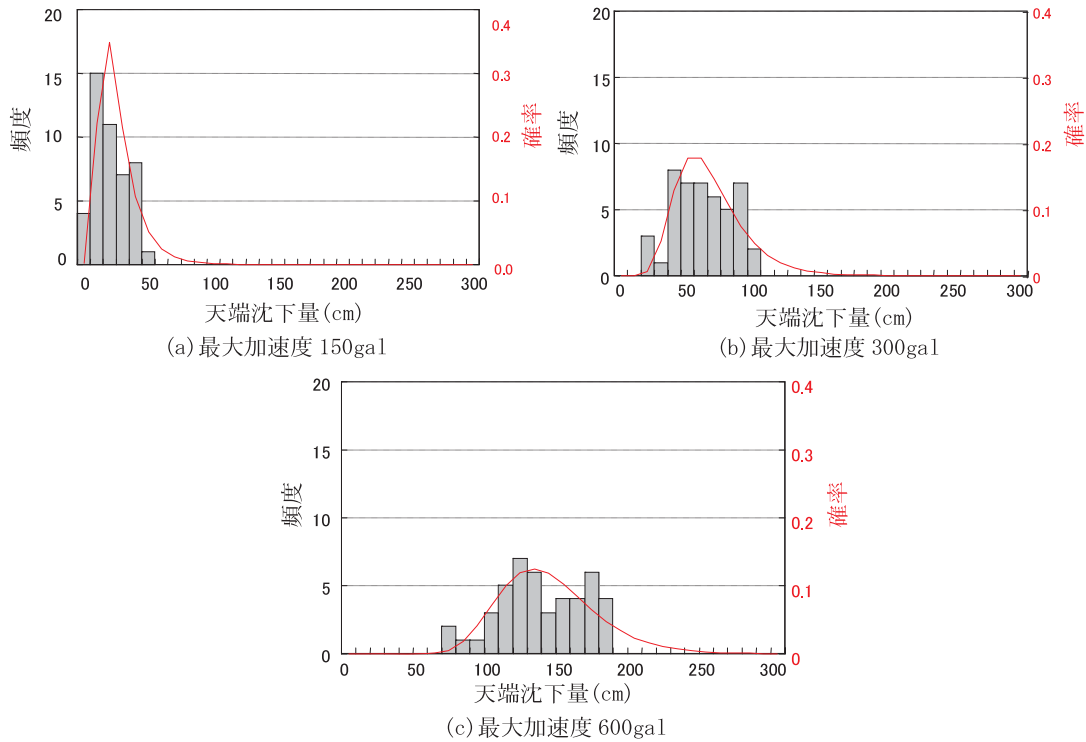


Fig.13 天端沈下量のヒストグラム

【解説】

損傷度曲線とは、限界状態が発生する確率を地震の大きさに応じて評価したものである。一方、地震ハザードは、地震の再現期間、つまり1年間当たりの加速度の発生確率を評価したものであることから、両者を考慮することで、1年間当たりの地震による損傷確率（年間破壊確率）が求まる。

5.2 損傷度曲線の評価

損傷度曲線は、モンテカルロ・シミュレーションから得られる最大加速度と超過確率の関係を対数正規分布の累積分布関数で回帰することで評価する。

【解説】

入力地震動の最大加速度をパラメータとした各加速度レベルの損傷確率は4.4に示す方法で求めることが出来る。損傷度曲線は、4.4で求めた各加速度レベルの損傷確率を連続関数として求めることになる。連続関数への変換に当たっては、各加速度レベルの損傷確率が対数正規分布の累積分布関数であるとして求めることが出来る。この回帰については、確率紙を用いることで求めることが出来る。

既往のLCC評価の事例として、損傷度曲線を求めた事例を Fig.14 に示す。対策前のフィルダムに対しては最大加速度 150, 300, 600gal, 対策後に対しては最大加速度 300, 600, 900gal でモンテカルロ・シミュレーションを実施している。これらの計算点は、Fig.14 中にプ

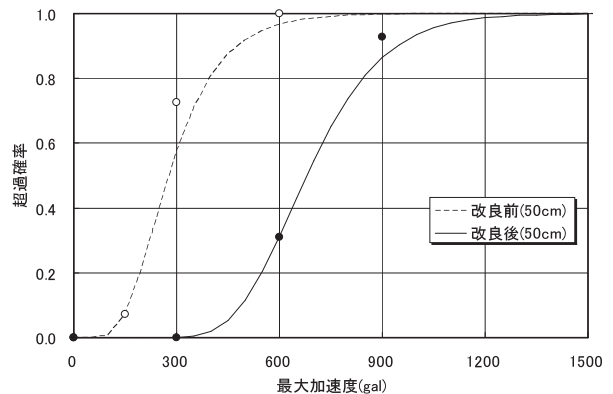


Fig.14 対策前後の損傷度曲線

ロットしてある。損傷度曲線は、対数正規分布の累積分布関数であるとして回帰した曲線が実線で示してある。

5.3 年間破壊確率の算出

年間破壊確率は、損傷度曲線と地震ハザード曲線を用いて次式で算出することができる。

$$p = \int_0^{\infty} F(a) \frac{dH(a)}{da} da \tag{2}$$

ここに、  
 p：年間破壊確率  
 F(a)：損傷度曲線  
 H(a)：地震ハザード曲線  
 a：最大加速度

Table 4 年間破壊確率の算定過程

$\alpha$	$d\alpha$	$H(\alpha)$	$dH(\alpha)$	$dH(\alpha)/d\alpha$	$F(\alpha)$ (対策前)	$F(\alpha)$ (対策後)	$F(\alpha) dH(\alpha)/d\alpha \times d\alpha$ 対策前	$F(\alpha) dH(\alpha)/d\alpha \times d\alpha$ 対策後
0.0	0.0	1.000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.6	4.6	0.381	0.619	1.36E-01	7.58E-23	1.31E-85	4.69E-23	8.11E-86
18.2	13.7	0.244	0.137	1.00E-02	4.75E-11	8.97E-46	6.52E-12	1.23E-46
36.4	18.2	0.181	0.063	3.47E-03	6.93E-07	1.28E-30	4.37E-08	8.07E-32
54.6	18.2	0.128	0.053	2.90E-03	5.60E-05	3.19E-23	2.96E-06	1.68E-24
72.8	18.2	0.092	0.036	1.98E-03	7.38E-04	1.25E-18	2.66E-05	4.49E-20
91.0	18.2	0.067	0.025	1.35E-03	4.04E-03	1.92E-15	9.94E-05	4.72E-17
109.2	18.2	0.050	0.017	9.50E-04	1.34E-02	4.43E-13	2.31E-04	7.66E-15
127.4	18.2	0.038	0.012	6.79E-04	3.22E-02	2.98E-11	3.98E-04	3.69E-13
145.6	18.2	0.029	0.009	4.93E-04	6.28E-02	8.59E-10	5.64E-04	7.71E-12
163.8	18.2	0.022	0.007	3.63E-04	1.05E-01	1.33E-08	6.95E-04	8.81E-11
182.0	18.2	0.017	0.005	2.70E-04	1.58E-01	1.30E-07	7.79E-04	6.41E-10
209.3	27.3	0.012	0.005	1.91E-04	2.52E-01	2.08E-06	1.31E-03	1.08E-08
236.6	27.3	0.008	0.003	1.28E-04	3.53E-01	1.86E-05	1.23E-03	6.49E-08
263.9	27.3	0.006	0.002	8.72E-05	4.53E-01	1.09E-04	1.08E-03	2.60E-07
291.2	27.3	0.004	0.002	6.05E-05	5.46E-01	4.63E-04	9.01E-04	7.64E-07
318.5	27.3	0.003	0.001	4.24E-05	6.29E-01	1.53E-03	7.28E-04	1.77E-06
345.8	27.3	0.002	0.001	3.03E-05	7.00E-01	4.14E-03	5.79E-04	3.43E-06
373.1	27.3	0.001	0.001	2.19E-05	7.60E-01	9.56E-03	4.55E-04	5.72E-06
400.4	27.3	0.001	0.000	1.61E-05	8.09E-01	1.94E-02	3.54E-04	8.49E-06
427.7	27.3	0.001	0.000	1.19E-05	8.48E-01	3.52E-02	2.75E-04	1.14E-05
455.0	27.3	0.001	0.000	8.74E-06	8.80E-01	5.85E-02	2.10E-04	1.40E-05
500.5	45.5	0.001	0.000	6.07E-06	9.20E-01	1.16E-01	2.54E-04	3.21E-05
546.0	45.5	0.000	0.000	3.92E-06	9.46E-01	1.96E-01	1.69E-04	3.50E-05
591.5	45.5	0.000	0.000	2.58E-06	9.64E-01	2.94E-01	1.13E-04	3.45E-05
637.0	45.5	0.000	0.000	1.70E-06	9.76E-01	4.01E-01	7.55E-05	3.10E-05
682.6	45.5	0.000	0.000	1.18E-06	9.84E-01	5.07E-01	5.26E-05	2.71E-05
728.1	45.5	0.000	0.000	7.71E-07	9.89E-01	6.07E-01	3.47E-05	2.13E-05
773.6	45.5	0.000	0.000	5.13E-07	9.93E-01	6.94E-01	2.32E-05	1.62E-05
819.1	45.5	0.000	0.000	3.42E-07	9.95E-01	7.68E-01	1.55E-05	1.19E-05
910.1	91.0	0.000	1.73E-05	1.90E-07	9.98E-01	8.73E-01	1.72E-05	1.51E-05
年間破壊確率							$\Sigma$ 1.07E-02	2.70E-04

【解説】

(2) 式の各項目である  $F(\alpha)$  は損傷度曲線そのものであり、地震ハザード曲線  $H(\alpha)$  の微分形の  $dH(\alpha)/d\alpha$  は、対象とする地点で発生する可能性のある最大加速度の確率密度関数に相当するものである。損傷度曲線、地震ハザード曲線のそれぞれが連続関数によって現されている場合は、数値積分によって解を得ることができるが、一般的には煩雑となる。

実用的な計算としては、市販の表計算のソフトを活用して、離散的な計算から求めることができる。既往のLCC評価における計算過程を Table 4 に示す。対策前については同 Table の 5 列目と 6 列目、対策後については 5 列目と 6 列目の積和が年間破壊確率に相当する。それぞれの関数を Fig.15 に示す。離散的な計算により求め

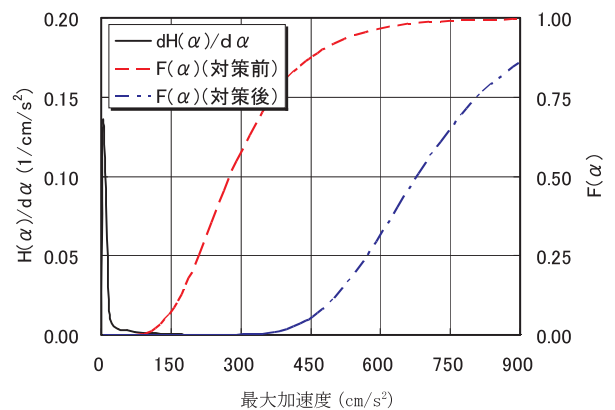


Fig.15 年間破壊確率の算定過程 (天端沈下量の限界値 50cm) の例



**Table 5** 年間破壊確率 (天端沈下量限界値 50cm)

	年間破壊確率
対策前	$1.07 \times 10^{-2}$
対策後	$2.70 \times 10^{-4}$

**Table 6** 年間破壊確率 (天端沈下量限界値 75cm)

	年間破壊確率
対策前	$4.92 \times 10^{-3}$
対策後	$5.77 \times 10^{-5}$

たフィルダムの対策前後の年間破壊確率の算定結果を、それぞれ **Table 5** と **Table 6** に示す。

## 第6章 LCCの算定

### 6.1 一般

年間破壊確率と、対策費、被害額を用いてLCCを算定する。算定方法は6.2に従う。なお、被害額については、別途実施する洪水解析等に基づいて適切に設定する。

#### 【解説】

算定したLCCに基づいて、対象としているフィルダムの耐震対策の必要性や、耐震対策の試用について、検討することが可能となる。なお、算定したLCCは、評価した時点以降の相対的なリスクの変化を考慮している。したがって、既に建設されたフィルダムについては、これまでのリスクを無視すれば、評価時点からのLCC評価を行うことになるものであり、これまでのリスクを考慮して評価する場合には、建設時に遡ってLCCを評価することが必要であると考えられる。

### 6.2 算定方法

LCCは、次式のトータルコストで算定する。

$$TC(n) = C_0 + \sum_{i=1}^n p_i C_f \quad (3)$$

ここに、TC (n) : トータルコスト  
 C<sub>0</sub> : 対策費  
 C<sub>f</sub> : 被害額  
 n : 経過年数

#### 【解説】

年間破壊確率  $p$  から、下式を用いて、フィルダムの経過年数  $n$  とトータルコスト  $TC(n)$  の関係の評価し、対策コストや被害コスト等を考慮した供用期間中のLCC

の算出を行う。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p \\ p_2 &= p(1-p) \\ p_3 &= p(1-p)^2 \\ &\vdots \\ p_i &= p(1-p)^{i-1} \\ &\vdots \\ p_n &= p(1-p)^{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$TC(n) = C_0 + \sum_{i=1}^n p_i C_f \quad (5)$$

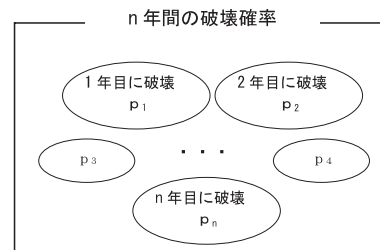
ここに、 $p_i$  は  $i$  年目での破壊確率を示す。

上式の考え方は、経過年数  $n$  年の間に「いずれかの最大加速度に対して1回破壊する (1回破壊すれば、対策や再構築されるため、元のものとは異なる)」という事象は、「1年目に破壊する」事象、「2年目に破壊する」事象、・・・「 $n$ 年目に破壊する」事象の和事象で表せる。これを示したのが **Fig.16** である。このうち、「 $n$ 年目に破壊する」という事象は、「 $(n-1)$ 年目までに破壊しない」という条件の下での「 $n$ 年目に発生する」事象である。 $(n-1)$ 年目までに破壊しない確率 (1年目に破壊せず、2年目に破壊せず、・・・ $(n-1)$ 年目も破壊しないという条件付き確率) は次式で算定され、 $n$ 年目に発生する確率  $p$  との積で  $n$ 年目に破壊する確率  $p_n$  が得られる。

$$(1-p)^{n-1} \quad (6)$$

そこで、1年目に破壊する確率  $p_1$ 、2年目に破壊する確率  $p_2$ 、・・・と計算し、それらが独立であるとして足し合わせることで、次式で示される  $n$ 年目までの破壊確率が得られる。この破壊確率に被害コスト  $C_f$  を乗じることで、 $n$ 年目までの期待被害コストが得られ、さらに対策コスト  $C_0$  を加えるとこと、 $n$ 年目までの期待トータルコストとなる。

$$\sum_{i=1}^n p_i \quad (7)$$



$$p_i = p(1-p)^{i-1} \quad (8)$$

$$p(n) = \sum_{i=1}^n p_i \quad (9)$$

**Fig.16** n年間の破壊確率算定概念

Table 7 LCC の計算過程（天端沈下量の限界値を 50cm に設定，50 年までを抜粋して示す）

超過年数 n	$p(1-p)^{n-1}$	$\Sigma p(p-1)^{n-1}$	$Co + Cf * \Sigma p(p-1)$		
			Cf = 10	Cf = 20	Cf = 30
0	0.000E+00	0.000E+00	10.000	20.000	40.000
1	2.700E-04	2.700E-04	10.014	20.014	40.014
2	2.699E-04	5.399E-04	10.027	20.027	40.027
3	2.699E-04	8.098E-04	10.040	20.040	40.040
4	2.698E-04	1.080E-03	10.054	20.054	40.054
5	2.697E-04	1.349E-03	10.067	20.067	40.067
6	2.696E-04	1.619E-03	10.081	20.081	40.081
7	2.696E-04	1.888E-03	10.094	20.094	40.094
8	2.695E-04	2.158E-03	10.108	20.108	40.108
9	2.694E-04	2.427E-03	10.121	20.121	40.121
10	2.693E-04	2.697E-03	10.135	20.135	40.135
11	2.693E-04	2.966E-03	10.148	20.148	40.148
12	2.692E-04	3.235E-03	10.162	20.162	40.162
13	2.691E-04	3.504E-03	10.175	20.175	40.175
14	2.691E-04	3.773E-03	10.189	20.189	40.189
15	2.690E-04	4.042E-03	10.202	20.202	40.202
16	2.689E-04	4.311E-03	10.216	20.216	40.216
17	2.688E-04	4.580E-03	10.229	20.229	40.229
18	2.688E-04	4.849E-03	10.242	20.242	40.242
19	2.687E-04	5.118E-03	10.256	20.256	40.256
20	2.686E-04	5.386E-03	10.269	20.269	40.269
21	2.685E-04	5.655E-03	10.283	20.283	40.283
22	2.685E-04	5.923E-03	10.296	20.296	40.296
23	2.684E-04	6.192E-03	10.310	20.310	40.310
24	2.683E-04	6.460E-03	10.323	20.323	40.323
25	2.683E-04	6.728E-03	10.336	20.336	40.336
26	2.682E-04	6.996E-03	10.350	20.350	40.350
27	2.681E-04	7.264E-03	10.363	20.363	40.363
28	2.680E-04	7.533E-03	10.377	20.377	40.377
29	2.680E-04	7.800E-03	10.390	20.390	40.390
30	2.679E-04	8.068E-03	10.403	20.403	40.403
31	2.678E-04	8.336E-03	10.417	20.417	40.417
32	2.677E-04	8.604E-03	10.430	20.430	40.430
33	2.677E-04	8.872E-03	10.444	20.444	40.444
34	2.676E-04	9.139E-03	10.457	20.457	40.457
35	2.675E-04	9.407E-03	10.470	20.470	40.470
36	2.675E-04	9.674E-03	10.484	20.484	40.484
37	2.674E-04	9.942E-03	10.497	20.497	40.497
38	2.673E-04	1.021E-02	10.510	20.510	40.510
39	2.672E-04	1.048E-02	10.524	20.524	40.524
40	2.672E-04	1.074E-02	10.537	20.537	40.537
41	2.671E-04	1.101E-02	10.551	20.551	40.551
42	2.670E-04	1.128E-02	10.564	20.564	40.564
43	2.670E-04	1.154E-02	10.577	20.577	40.577
44	2.669E-04	1.181E-02	10.591	20.591	40.591
45	2.668E-04	1.208E-02	10.604	20.604	4.0604
46	2.667E-04	1.234E-02	10.617	20.617	40.617
47	2.667E-04	1.261E-02	10.631	20.631	40.631
48	2.666E-04	1.288E-02	10.644	20.644	40.644
49	2.665E-04	1.314E-02	10.657	20.657	40.657
50	2.665E-04	1.341E-02	10.671	20.671	40.671

※年間破壊確率  $p = 2.70 \times 10^{-4}$

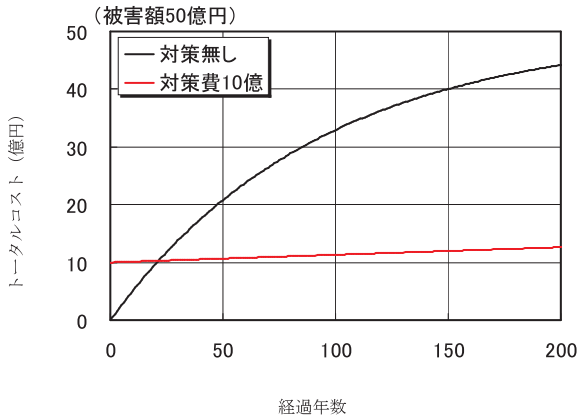


Fig.17 LCCの評価結果 (天端沈下量の限界値50cm, 対策費10億円の場合)

上記のLCCの算定においても、実用的な計算としては、市販の表計算のソフトを活用して、離散的な計算からLCCを求めることが出来る。既往のLCC評価における計算過程をTable 7に示す。この事例では、被害額50億円を仮定してLCCを評価している。このとき、対策費はパラメータとし、10, 20, 40億円としている。また、越流が生じる天端沈下量の限界値を50cm, 対策費を10億円としたときの算定結果がFig.17である。なお、これらの横軸の経過年数は、対策を実施した時点 zeroes として、それからの経過年数を示している。

6.3 LCC評価における割引率

LCC評価における費用の算出においては、必要に応じて費用の社会的割引率を考慮しても良い。

【解説】

社会的割引率は、事業の投資効率性を評価するときに用いられており、例えば国土交通省の費用便益分析で用いられている。

これは、得られる便益BとコストCの比較で事業の投資効果を判断するもので、防災事業では、便益は「期待被害額」の軽減分を防災事業の便益としているようである。

今回のようなLCC評価を行う場合、Fig.18に示すように面積を便益とした場合は、次式で求まるtが社会的割引率を考慮した費用分析結果となる。

$$\sum \frac{B_t}{(1+i)^t} - C_0 = 0 \quad (10)$$

社会的割引率の考慮の有無は、ケースバイケースであり、民間企業のように比較的短期間の投資効果を見るときには不確定な金利を考えないで、社会的割引率を考慮しないほうが分かりやすいものと考えられる。一方、国関係の大掛かりな事業では、社会的割引率を考慮する場合もあるようである。参考事例として、同一のフィル

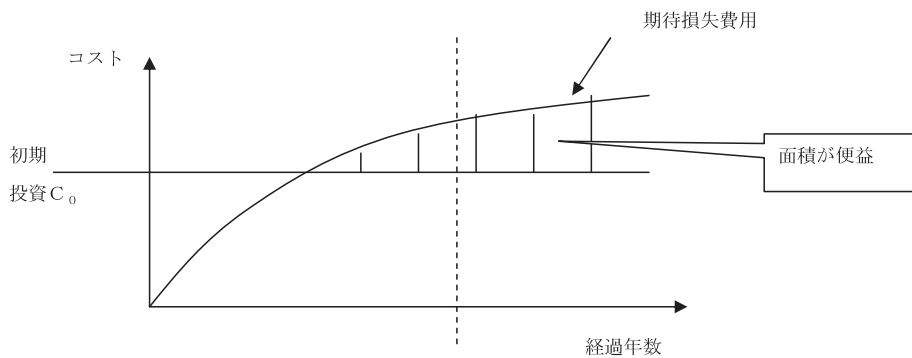


Fig.18 今回のLCC評価における便益の評価

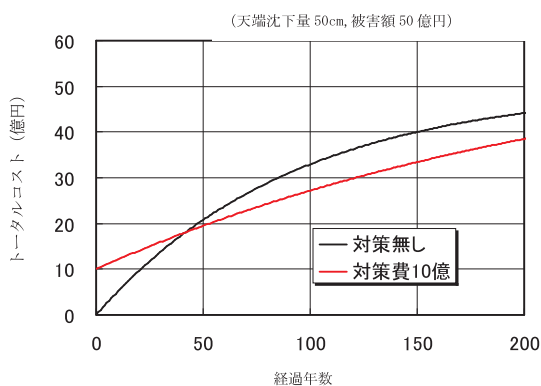


Fig.19 社会的割引率を考慮しない場合のLCC評価例

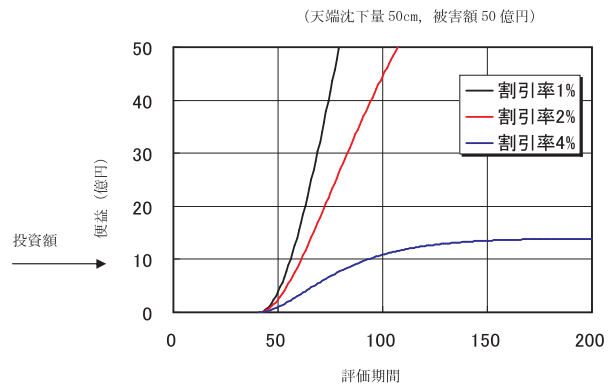


Fig.20 社会的割引率を考慮した場合のLCC評価例

ダムを対象として、社会的割引率の考慮の有無による LCC 評価の違いを Fig.19 と Fig.20 に示す。

## 第7章 あとがき

近年、大規模地震に対する老朽化フィルダムの安全性の評価において、耐震補強対策の必要性、対策の合理性の説明が求められていることなどから、耐震補強する場合でも、築堤材のばらつきを評価し、耐震補強対策の程度と地震リスクを考慮したライフサイクルコスト(以下、「LCC」とする)の概念に基づく耐震補強対策の最適化が必要となっている。

このようなことから本手引きは老朽化フィルダムの高地震時における LCC の評価方法とその手順をとりまとめたものである。なお、LCC を算出するためには、各フィルダムの現状に対応した具体的で詳細な対策費や、被害額のコストの評価が必要となるが、その評価法については、本手引きの対象外とした。

## 参考文献

- 1) 谷 茂・津國正一・塩見忠彦 (2007) : ISO23469 に準拠したフィルダムの耐震事例, 第 42 回地震工学研究発表会 pp.1085-1086
- 2) 国土交通省河川局 (2005) : 大規模地震に対するダム耐震性能照査指針 (案)・同解説, pp.10
- 3) 中央防災会議東南海, 南海地震等に関する専門調査会ホームページ (2009) : [http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index\\_chukin.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_chukin.html).
- 4) (独)防災科学技術研究所, 地震ハザードステーションホームページ (2009) : <http://wwwold.j-shis.bosai.go.jp/>
- 5) 地盤工学会・土構造物の地震時における許容変形と性能設計に関する研究委員会 (2007) : 土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム 発表論文集, pp.113-114, (社)地盤工学会
- 6) 農林水産省 (2006) ; ため池整備
- 7) 堀内孝英・川村国夫 (1977) : 信頼性設計のための土質の統計的性質, 土と基礎, Vol.25, No.11, pp.11-18
- 8) S. Tani, S. Tskuni, T. Shiomi (2009): PERFORMANCE OF FILL DAM BASED ON THE PERFORMANCE BASED DESIGN CONCEPT AND STUDY OF A SEISMIC RETROFITTING METHOD, *Soils and Foundations*, **49**(6), pp.841-851



# 南ドイツにおける小水力発電の調査報告と わが国の農村地域の小水力発電の今後の展望

後藤真宏\*・上坂博亨\*\*・小林 久\*\*\*

## 目 次

I 緒言	169	a 買い取り価格	173
II 調査地区の概要	169	b 関連企業	173
III ドイツにおけるエネルギー及び小水力の現状	170	c 除塵装置	174
IV 南ドイツとわが国の小水力の相違点	172	d 支援体制	174
1 小水力発電の多様な事業主体	172	V わが国の農村地域の小水力発電の今後の展望	174
a 自然愛好協会	172	VI 結 言	177
b 共同出資	172	参考文献	177
c 個人所有	172	Summary	178
2 小水力発電への種々の取り組み	173		

## I 緒 言

2009年10月に鳩山首相は国連総会において、温室効果ガス排出量削減目標値として、2020年までに1990年比で25%削減を掲げたが、現時点で具体的な削減方法は提示されていない。具体的な数値が示されていた前政権時の麻生首相が提示した2005年比15%削減案をもとに、小水力でどの程度賄わねばならないか試算してみた。15%のうち1%を太陽光などで賄うと報じられていたので、この1%のうち仮に小水力で0.2～0.3%とすると10年間で合計100万kW、平均すると1年間で10万kWの発電所の建設が必要となる。水力発電所一カ所あたりの出力を500kWとすると、毎年200カ所の水力発電所を建設する計算になる。

現在このような動きも含めて、温暖化対策として自然エネルギーの中でも小水力発電に関心が高まってきた。特にわが国の農村地域には農業用水を利用した小水力発電の開発可能な地点が存在しており、他の自然エネルギーに比べて出力が安定している小水力発電は注目されている。著者らは、平成20年9月に、ドイツ国内でも小水力発電の盛んな南ドイツのバーテン＝ヴェルテンベルク州とバイエルン州における状況を調査する機会を得

た。ドイツの河川はわが国よりも勾配が緩く、年降水量も少なく、水力発電には恵まれていないにもかかわらず、古くから、また近年にあっては盛んに小水力発電所が建設されている。

そこで本報告では、南ドイツにおける小水力発電の現状についての調査結果とわが国における小水力発電の現状との比較、さらにはわが国の小水力発電の今後の展望について報告する。

本報は、科学研究費補助金（基盤研究（B）（一般）：課題番号（20380131））、科学技術振興機構社会技術研究開発センターによる社会技術研究開発事業研究開発プログラム「地域に根ざした脱温暖化・環境共生社会、プロジェクト名：小水力を核とした脱温暖化の地域社会形成」、官民連携新技術研究開発事業の一環として実施したものである。なお、今回の調査では、ドイツ在住の環境ジャーナリストの松田雅央氏に多大なご協力を頂いた。記して、感謝申し上げる。

## II 調査地区の概要

### 1 調査地区の概要

南ドイツに位置するバーテン＝ヴェルテンベルク州のカールスルーエとフライブルグ、バイエルン州のヴェルツブルグ、ニュルンベルグとミュンヘンの計5都市周辺を調査した（Fig.1）。今回調査した地域は、稚内よりも北側の北緯48～50°に位置している。標高は110m（カールスルーエ）～970m（ミュンヘン）で、わが国の中山間地域よりも緩勾配であるが、北ドイツに比べて

\* 施設資源部

\*\* 富山国際大学

\*\*\* 茨城大学

平成21年12月14日受理

キーワード：小水力発電、ドイツ、固定買い取り制度



Fig.1 調査地区の概要  
Location map of study area

地形勾配が急である。年間降水量は最大でミュンヘンの970mm、いずれの都市でも1,000mm以下である。このようにわが国と比較すると地形勾配や水量で小水力発電に恵まれているとはいえない条件である。

カールスルーエとフライブルグは、スイスのトマーゼ湖に端を發し北海へと注ぐライン川に面しており、ヴュルツブルグはライン川の支流であるマイン川の流域である。ニュルンベルグは、マイン川とドナウ川の結ぶマイン-ドナウ運河に沿っている。ミュンヘンは、ドイツ南部バーデン=ヴュルテンベルク州の森林地帯「シュヴァルトツヴァルト (黒い森)」に端を發し、概ね東から南東方向に流れ、東欧各国を含む10ヶ国を通して黒海に注ぐドナウ川の支流イザール川に面している。

## 2 調査行程

調査行程と概略を Table 1 に示す。12の地点において、13台の水車、水車製造会社、自然エネルギー関連施設等を見学し、関係者との意見交換を行った。

## III ドイツにおけるエネルギー及び小水力の現状

### 1 ドイツにおけるエネルギーの概要

ドイツ全土における一次エネルギー消費総量に占める

再生可能エネルギーの割合は、2000年の2.6%、2005年の4.7%、2006年の5.3%と増加している。

2006年において再生可能エネルギーの部門別の割合は、水力は約11%、風力が約16%、バイオマスが約69%である (Table 2)。また電力総消費量に占める再生可能エネルギーの部門別の割合は、水力発電が約3.6%、風力が約5%、バイオマスが約2.2%、太陽光発電が約0.3%である。

ドイツ連邦環境省が2008年3月に発表した再生可能エネルギーの2007年暫定版データでは、再生可能エネルギーをエネルギー源にした電力、熱、燃料の年間生産量は222TWh (2006年は189.6TWh) で、エネルギー総消費量に占める再生可能エネルギーの割合は8.5% (2006年は5.3%) に、電力消費量に占める再生可能エネルギーの割合は14.2%に達したと報告されている。

### 2 ドイツにおける小水力の現状

2005年から2006年にかけてドイツにおける小水力発電所の設置数と出力を見ると、5,000kW以下の発電所は7,201から7,524箇所と、1年間に約300箇所もの発電所が建設されている (Table 3)。一方、5,000kW以上の発電所数は増加していない。5,000kW以下の発電出力は、2005年から2006年にかけて815MWから869MWへ増

**Table 1** 調査行程  
Schedule of investigation

月日	都市名	日程
23Sep. (火)	カールスルーエ  ゲルンスバッハ	①ドゥーラッハの水車見学 訪問先：ドゥーラッハ自然愛好協会、協会役員と面談 直径 8m・落差 3.5m・出力 15kW の胸掛け水車 ②水車を中核とする川の自然復元事業見学 訪問先：ドゥーラッハ自然愛好協会、協会役員と面談 ③スタインプレナー社の小水力見学 訪問先：製粉工場跡の小水力 流量 9.0m <sup>3</sup> /s・落差 1.4m・出力 78kW のカプラン水車 水車上流に石積みのわん曲斜め堰があり、水車へ導水
24Sep. (水)	フライブルグ	④再生可能エネルギーに関する講演 訪問先：フライブルグ自然エネルギーツアー ⑤フライブルグ地区の小水力見学 担当者等：エコメディア研究所委員と面談 流量 6.6m <sup>3</sup> /s・落差 4.3m・出力 250kW のカプラン水車 流量 4.0m <sup>3</sup> /s・落差 3.0m・出力 90kW のらせん水車 流量 2.3m <sup>3</sup> /s・落差 4.0m・出力 69kW のカプラン水車
25Sep. (木)	タウバー川流域	⑥ブロンバッハ修道院の小水力見学 訪問先：個人出資の小水力 流量 8.0～9.0m <sup>3</sup> /s・落差 3.2m・出力 90kW と 130kW の 2 台 ⑦ケーニヒスホーフェン地区の小水力見学 訪問先：個人所有の小水力 流量 1.5m <sup>3</sup> /s・落差 1.4m・出力 18kW のらせん水車 ⑧シェフタースハイムの小水力見学 訪問先：共同出資による小水力 流量 4.65m <sup>3</sup> /s・落差 2.6m・出力 73kW のカプラン水車
26Sep. (金)	ヴァイセンブルク	⑨ブロンバッハ湖の小水力見学 訪問先：ダム放流施設の小水力 流量 1.22m <sup>3</sup> /s・落差 33.0m・出力 327kW のクロスフロー水車が同型 2 台
27Sep. (土)	ニュルンベルク	⑩マイン・ドナウ運河の小水力見学 訪問先：運河からの放流水による小水力 流量 4.8m <sup>3</sup> /s・落差 18.0m・出力 720kW のカプラン水車
28Sep. (日)	ヴァイセンブルク	⑪オズバーガー社見学 訪問先：水車メーカーを見学、役員と面談 クロスフロー水車では高効率水車の製作技術を有する
29Sep. (月)	ミュンヘン	⑫英国庭園の TIVOLI 水力発電所見学 訪問先：バイエルン水力発電所協会所長ライブル博士と面談 流量 12.5m <sup>3</sup> /s・落差 4.5m・出力 450kW：2 台

**Table 2** 2006 年の再生可能エネルギーの割合  
Proportion of renewable energy in 2006

	電力 (TWh)	熱 (TWh)	燃料 (TWh)	合計 (TWh)	比率 (%)
水 力	21.6			21.6	11.4
風 力	30.5			30.5	16.1
バイオマス	18.6	83.9	27.5	130.0	68.6
太 陽 光	2.0			2.0	1.1
太 陽 熱		3.4		3.4	1.8
地 熱	0.1	2.1		2.1	1.1
合 計	72.7	89.4	27.5	189.6	100.0

**Table 3** ドイツにおける小水力発電所数と出力  
Number of small hydroelectric power plants and output in Germany

		2005 年	2006 年
水車の設置数	5,000kW 以下	7,201	7,524
	5,000kW 以上	155	155
	合計	7,356	7,679
出力の合計	5,000kW 以下	815	869
	5,000kW 以上	3,466	3,466
	合計	4,680	4,700

加している。この間に建設された323箇所の一地点当たりの平均出力は、約160kWとなる。

統計値は違うものの2002年のドイツの再生可能エネルギーに関する報告では、1,000kW以上の水力発電所は403箇所、1,000kW未満は5,500箇所と、小水力発電所の建設数の多いことがわかる。一方、わが国では、地形条件等も考えられるが、1,000kW以上の水力発電所は1,407箇所に対して、1,000kW未満は437箇所と、圧倒的に1,000kW未満の開発が遅れていることが明らかである(水力協, 2008)。

#### IV 南ドイツとわが国の小水力の相違点

ここでは、今回の南ドイツにおける小水力発電関連の調査を踏まえて、その特徴とわが国との相違点について報告する。

##### 1 小水力発電の多様な事業主体

わが国では、水力発電の主な事業主体は電力会社・企業局であり、自治体・市民・個人等が参加できる経済市場になっていない。東京電力などの一般電気事業者、J-POWERなどの卸電気事業者などの事業主体が全体の60%以上を占めている。その他、県企業局、土地改良区の事業主体と自家発などである。

今回の調査では、個人から共同出資、市民団体、公共団体等種々の小水力発電事業者が所有する発電所を調査できた。ここでは特徴的だった事業主体を紹介する。

##### a 自然愛好協会

カールスルーエ市内のドゥーラッハ地区には、文化・芸術・自然保護等を行っている会員約480名の自然愛好協会が運営する小水力発電所がある(Fig.2)。水車は直径8m、幅2.5mの胸掛け式水車で、最大出力は50kW、年間発電量は約15万kWhである。発電所は協会が1987年にカールスルーエ市から水利権とともに買



Fig.2 自然愛好協会の胸掛け水車  
Breast wheel of Naurfreunde in Karlsruhe

い取った。発電電力は、敷地内の建物内で約15%使用して、残りをカールスルーエのエネルギー水道公社に1kWh当たり10ユーロセントで売電している。2010年1月時点で、1ユーロ=132円程度であるので、日本円で約13円となる。水車や発電所の運営は協会会員のボランティアで賄われている。

##### b 共同出資

ニュルンベルグ近郊のマイン・ドナウ運河からの放流水を利用した出力720kW(流量4.8m<sup>3</sup>/s・落差18m)の発電所(Fig.3)は、3人の共同出資で建設された。自己資金30%、バイエルン州経済局からの返却不要の補助20%、銀行から50%の資金である。発電所建設の許可には4年を要している。運河の取水口から直径1.8mのポリエチレン管(GFK)で250m導水している。南ドイツの降水量が少ない6月から9月に運河を通じて大量の水がマイン川に注ぎ込まれる時期が主要な発電時期となっている。

またニュルンベルグ近郊のタウバー川に、再生可能エネルギーに興味を持った仲間を募って、10人の大口出資者と50人の小口出資者で建設された、出力70kW(流量4.6m<sup>3</sup>/s・落差2.5m)の発電所がある。近くの町への用水のための堰として利用していたが、60年前に使用されなくなり堰のみが残っていた地点で発電を行っている。建設費40万ユーロ(土木15万、水車発電機25万)のうち、出資者で34万5千ユーロ、5万5千ユーロを補助金で賄っている。発電所自体がコンテナになっており、建設期間が短縮できるような構造となっている(Fig.4)。

##### c 個人所有

タウバー川沿いのケーニッツスホーフエンには、個人所有の小水力発電所がある。リッツアトロ社製のらせん水車で、出力18kW(流量1.5m<sup>3</sup>/s・落差1.4m)である(Fig.5)。このらせん水車の効率は90%程度と非常に高効率である。土木工事2万ユーロを含めて13万ユー



Fig.3 カプラン水車  
Kaplan turbine at Main-Donau canal





**Fig.4** 建設中の発電所の概要  
Outline of hydropower plant under construction



**Fig.5** 個人所有のらせん水車  
Spiral water mill of individual ownership

ロで製作した。

## 2 小水力発電への種々の取り組み

### a 買い取り価格

ドイツでは、固定買い取り制度（FIT：フィードインタリフ制度）を導入している。また、今回調査した発電所はいずれも電力会社へ売電していた。今回の調査で売電に関して以下の点が明らかになった。

- 1) 水力発電では出力規模によって買い取り価格が区分され、小規模出力ほど高く設定されている。
- 2) 水力発電の買い取り価格は、2000年にkWh当たり7.67ユーロセント、2004年には魚道を設置するなどの環境に配慮した場合（Fig.6）には2ユーロセント加算されて9.67ユーロセント、2009年からは11.67ユーロセントである。

一方、わが国の電力会社の電力買い取り価格は、土地改良区や県企業局など個々の発電事業者が東京電力などの電力会社と個別に協議して決定されているが、基本的には電力会社の提示価格に従っている状況である。また、東京電力や関西電力など9電力会社によってkWh当た



**Fig.6** 水車設置に伴って環境に配慮した河川改修  
River improvement that considers environment along with water mill installation



**Fig.7** オズバーガー社の工場内の状況（クロスフロー水車）  
Situation in factory of Ossberger

り3～10円程度と買い取り価格に大きな差が生じている。

2010年1月時点で、1ユーロ=132円程度であるので、11.67ユーロセント=15.40円となり、国内の買い取り価格の1.5～3倍程度である。

### b 関連企業

今回は、1～1,500kWの中小規模の水車を製造するオズバーガー社を見学した。当該会社は、クロスフロー水車の製造技術に長けており、約120名のスタッフによって水車の開発・製造がなされ、水車効率は中大規模機で86%と高効率で、製造コストを抑える方法として水車形状を規格化している（Fig.7）。ドイツではオズバーガー社を含めて大規模水力から中小水力発電機の製造メーカーがあり、小水力発電のメーカーが企業体として成り立っている。

一方、わが国の小水力発電の市場規模は、現状では10億円程度と言われており、年間数カ所の小水力発電所が建設されているにすぎない。国内には水車専門メーカーが数社しかなく、先に記述したように、年間200箇所もの発電所が建設される状況でなければ、小水力発電が産業として成立するのは困難と考えられる。このような状況下で、水力発電に関連する技術者が減少している、技術が継承されていないなどの問題が発電事業者などに指摘されている。

### c 除塵装置

小水力発電の維持管理において、水車に流入する塵芥の処理は大きな問題である。わが国もスクリーン、電動除塵機などを設置して、ゴミの除去、処理を行っている。ここでは調査地に設置されていた特徴的な除塵装置を紹介する。

#### (1) 流入防止装置

発電所の上流に、流れ方向に対して斜めに板が設置されている (Fig.8)。浮遊性塵芥が流れてくると、この板に沿って放流口に流れることにより、発電所に直接流入する浮遊性の塵芥量を減少させることができる。さらに本装置によって、水車前面に設置してあるスクリーンに付着する塵芥を減少でき、除塵回数の低減が図られる。このような装置はわが国でも研究開発されている (たとえば、平成18年度農村工学研究所研究成果情報, 2007)。

#### (2) 放流装置

発電所には一般にスクリーン及び除塵機が設置されている。わが国では除塵機はスクリーンに付着した塵芥を掻き上げ、掻き上げたゴミは分別した後に処理される。今回調査した発電所の中で掻き上げた塵芥を再び河川や水路に放流する装置を設置している事例がいくつか見られた。放流方法として、掻き上げた塵芥を桶状の水路に落として、そこにポンプによる噴流を与えて塵芥をフラッシュさせるタイプ (Fig.9) と、掻き上げた塵芥を水槽に落として水槽の側壁ゲートを開放することによって放流させるタイプ (Fig.10) の2タイプが見られた。

わが国同様に、除塵機で掻き上げたゴミは掻き上げた当事者が処理しなければならないが、掻き上げないものは下流に流すようにしている施設が多いことが明らかになった。

### d 支援体制

わが国同様に、水利権など発電所建設に伴う手続きは必要であり、申請から取得までに4年も要する事例など多くの労力を要する実態が明らかになった。また水利権に関して、州の権限が連邦に引き渡されるなどの問題も指摘されていた。一方で、以下のような小水力を支援す

る体制が明らかになった。

- ・州で小水力発電の開発可能な地点を把握しており、一般からの問い合わせに答える体制がある。
- ・たとえばバイエルン水力発電協会など小水力を推進させる組織があり売電交渉や小水力の推進のためのロビー活動を行っている。
- ・再生可能エネルギー法、固定買い取り制度のように小水力の推進を支援している。

## V わが国の農村地域の小水力発電の今後の展望

ドイツの河川は、わが国の河川よりも緩勾配で、年降



Fig.9 フラッシュタイプの除塵機  
Flash-type trash removal screen



Fig.10 ゲートタイプの除塵機  
Gate-type trash removal screen



Fig.8 浮遊性ゴミ流入防止板  
Board that prevents floating waste from flowing into a sluiceway



水量も6割程度と少ないにもかかわらず、現在もなお小水力発電所が数多く建設されている。前述したように、ドイツでは2005年から2006年にかけて、約300カ所の5,000kW以下の水力発電所が建設されている。ドイツにおいて小水力発電の建設を進めているものとして、①固定買い取り制度、②環境配慮へのインセンティブ、③多様な事業主体の参加、④小水力に関する情報公開、⑤小水力利用への種々のバックアップ体制などが上げられる。

一方、わが国には農業用ダムや用水路内の落差工、急流工地点など開発可能な地点は多く賦存しているが、Ⅲ章で述べたように小水力発電所の建設はドイツと比較すると十分に進んでいるとは言えない。ここでは今回の調査等を踏まえて、わが国の農村地域の今後の小水力発電について展望する。

### 1 小水力発電の拡大を図るための制度面の方策

著者らは、地域が主体的に小水力開発に関する問題を解決するメカニズム創出を目指して、わが国において小水力開発が盛んな富山県を対象に調査研究に取り組んでいる。許認可権を有する省庁、自治体、電力会社、土地改良区などのステークホルダー（利害関係者）が自由に討議できる場を設定して、小水力推進のための問題点の発掘と共通認識などを行っている。その中で明らかになってきたことは、①安すぎる売電単価、②水利権等小水力の手続きの簡素化、③ダム主任技術者の選任等制度の簡素化、④農業用水路の活用の拡大など、小水力発電の拡大のためには解決しなければならない問題が数多く存在することである。

今回の調査から、小水力発電の拡大を図るためには、①小河川の積極的な利用、②多様な事業主体の参画を促進、③個別交渉でなく、固定買い取り制度など売電単価の透明性の確保、④小水力利用の議論の場の創出、⑤小水力関連の支援体制の整備などが今後の取り組みとして考えられる。

### 2 小水力発電の開発可能性

現在わが国の開発可能な小水力発電地点は、出力範囲が100～1,000kWで数千地点、10～100kWで数万地点との試算がある<sup>3)</sup>。これらを合計すると発電出力は約500万kWとなり、原発数箇所に相当する大きな賦存量といえる。

わが国の歴史を振り返ると、明治11年の「共武政表」という統計では9,000台以上の水車が稼働していた<sup>4)</sup>。昭和17年の調査では精米、タービン等農事用水車が約78,000台稼働していた<sup>5)</sup>。また、大正9年ごろに富山県で考案された螺旋水車は、全盛期の昭和10年には約13,000台が普及していた<sup>6)</sup>。戦後、無電地区に電力を供給する目的で昭和27年に農山漁村電気導入促進法が制定され、農協、土地改良区、森林組合等が事業主体となっ

てこれまで200地点以上の発電所が建設されている<sup>7)</sup>。

昭和17年の約78,000台のうち、73,000台は鉄製の在来型水車で、出力は数kW程度と考えられる。また、螺旋水車の出力は、0.5kW程度である。農業用水路や小河川における数kW以下の小水力利用の地点は、前述の水車台数から10万カ所程度はあったと推定される。現在のように農業用水路がコンクリートで整備されていない時期の数値である。これらの地点がすべて現時点で利用可能ではないが、昭和63年時点で受益面積100ha以上の農地に送水している基幹的な農業用水路は約28,000kmに達し<sup>8)</sup>、現時点において基幹的な用水路に支線、末端用水路を加えると、数kWクラスの小水力利用地点はさらに数多く存在するものと考えられる。仮に、これらすべてで数kWの小水力発電が可能と考えると、水車性能、発電機効率の向上などから数十万kWの発電可能性が見込まれ、貴重なエネルギー資源といえる。

### 3 電気利用を巡る状況

2008年から2009年にかけて、ガソリン車、ハイブリッド車、燃料電池車、EV車へと自動車を巡る状況が大きく変化している。国内の大手企業だけでなく、地方の中小企業、インドなどの海外も含めて電気自動車の開発、販売が急速に進んでおり、100万円を下回る電気自動車も販売されている。また、電気バイク、小型の電動耕耘機などの農作業機械も販売されている。

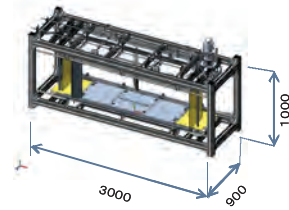
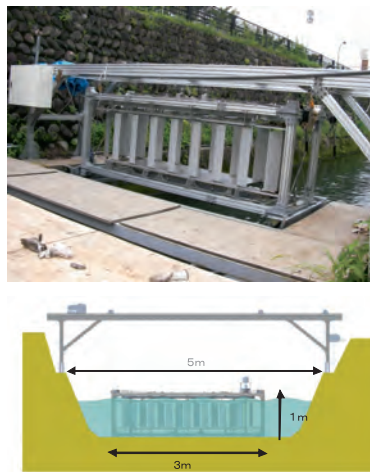
電気自動車を例にすると、1kWhの充電で約10kmの走行が可能である。このことから、一日数kWhの発電電力で十分であり、出力数kWの発電で十分といえる。また、1戸あたりの契約電力は数kWである。このことから農村地域の農業用水を利用した小水力発電では経済性に見合う規模として数百kWを開発対象としてきたが、農村地域に数多く存在する数kWの発電地点が大きな意味を持つてくると考えられる。

### 4 緩勾配の農業用水路を利用した小水力発電

農村工学研究所では、民間、大学等の参画する官民連携新技術研究開発事業において、農業用水路等緩勾配流水力発電技術の開発を行っている。本事業においては、農業用水路の流水エネルギーを効率的に電力に変換するカスケード水車を開発している（Fig.11）。勾配1/1,500の用水路に水車を設置して、水車出力、水位変化、長期間の耐久試験等を実施して、水車流入流量1.8m<sup>3</sup>/sec、水車上下流水位差0.15mで、出力1.4kWの結果を得ている。農業用水路に水車設置による上下流水位への影響を考慮すれば、数kmの間に複数台設置することも可能である。

### 5 わが国の小水力発電の目指すべき方向

電気自動車やバッテリー技術の変化は、単に自動車という輸送手段における変化にとどまるのではなく、農



ブレード枚数: 19  
 ブレード諸元: 翼幅 600  
                   翼弦長 150  
 回転軸: 4本  
 機能: 上流側ブレードピッチ角と  
       下流側ブレードピッチ角の  
       差動可能  
 目標水車効率: 60%程度

Fig.11 カスケード水車の概要  
Outline of cascade turbine

山村地域の生活や環境などに大きな変化をもたらすものと考えられる。すなわち、化石燃料中心の社会システムでは化石エネルギーの最遠地であった農山村地域が、小水力に代表される再生可能エネルギーの視点で見ると源泉地に生まれ変わることを意味する。ここでは、今後の小水力発電の目指すべき方向と農村工学研究所が果たすべき課題について記述する。

#### a 現状の水利システムにおけるエネルギー状況の技術的、制度的課題

農業用ダムや用水路内の落差工、急流工地点がこれまでの小水力発電の主要な地点であった。昭和58年からかんがい排水事業ではこれまで26地点の建設に留まっている。これは、建設の可否においては経済性が最も重要視され、最低でも数百kW程度の発電規模が必要となることから、発電箇所が限られている。現在、固定買い取り価格制の検討が行われており、さらに小規模の発電所でも経済性の向上が期待される。今後も数百kWクラスの小水力開発は重要であるが、基本的に電力会社への売電、すなわち電力システムへの連携が基本と考えられる。

ここで解決すべき課題として、①現状の水利システムにおける消費エネルギーの実態把握、②燃料価格等経済性を考慮した水利システムの維持可能性の検討、③現状の水利システムにおけるエネルギー削減方法の検討、④小水力エネルギー利用を考慮したダムの貯水運用方法の開発、⑤土地改良法、国有財産法、冬期水利権の利用等、水利システム活用に関する制度上の問題点の抽出と解決方策の提案、などがある。

#### b 現状の水利システムにおける新たなエネルギー利活用技術の開発

数百kW程度の発電可能地点は、幹線用水路に多くても数地点程度である。このため開発目標を数百kWクラスにすると数十～数kWの資源が未開発になり、点の開発に留まってしまう。前述したように、農業用水路には数十～数kWのクラスの開発地点が数多く存在する。さ

らに、ため池や休耕田など水利システムには未開発の小水力エネルギーが賦存している。開発の目標を数十～数kWのクラスまで拡大することが重要である。

ここで解決すべき課題として、①農業用水路における数十～数kWのクラスの小型水車の開発、②農業用水路の数十～数kWの小水力エネルギー賦存状況の解明、③小型水車の農業用水路への導入技術の開発、④ため池を活用した発電システムの開発、⑤休耕田を活用した小型発電システムの開発、などがある。

#### c 農村地域におけるエネルギー安定供給技術の開発

個々の家における生活、自動車やバイクなどの移動手段、トラクターや耕耘機などの大型農作業機械から草刈機などの小型機械など、農村地域の維持には化石燃料の使用は不可欠である。農村地域は、都市部のようなエネルギー消費地点が集中した形態ではなく、分散かつ一地点の消費量が小さい特徴を有している。数十～数kWのクラスの発電は街灯や電気自動車への供給など小規模小出力需要に単独で利用することも可能であるが、小規模な発電を多数開発して、これらを面状につなぎ合わせることで（マイクログリッド）によって、システムに連携することなく、一定の地域の電力を賄うことも可能となる。そこで小規模分散電力網を形成して、農村の振興、農村生活、農業生産に十分に貢献するためには以下の課題が挙げられる。

①農村地域における生活から農業まで全てに関わるエネルギーの使用状況の解明、②農村地域におけるエネルギー消費の分布状況の解明、③小規模水力の複合利用・安定化技術の開発、④太陽光、風力、バイオマス発電等を活用した安定化技術の開発、⑤エネルギーの需給バランスの安定化技術の開発、などがある。

#### d 小水力エネルギー利活用を考慮した新たな水利システムの構築

これまでの小水力利用はあくまで既存の農業水利シス



テムを改変しないで利用する考え方であるが、今後のエネルギーや食料状況を鑑みたときに、さらなる水力開発、エネルギー利用、食料生産、安定した農村生活を支えるために、農業水利システムをエネルギー利活用システムへ再構築することが必要であると考えられる。

ここで取り組むべき課題は、①農業用水の利用状況の経年変化の把握、②土地利用状況の経年変化の把握、③小水力エネルギー利活用を考慮した用水路の路線計画手法の開発、④小水力エネルギー利活用を考慮した用水管理手法の開発、⑤農業水利システムの再構築の開発、などである。

このためには、社会システム、法整備など越えなければならぬ課題も山積しているが、そこではトップダウンで物事を進めるのではなく、地域にある資源、社会システムを活かし、地域の実情にあった開発を地域が主体的に解決していくことが重要であると考えられる。

## VI 結 言

今回の調査で、わが国の今後の小水力開発において指標となるドイツの小水力発電の現状を垣間見ることができた。

すなわち、①多様な事業主体の参画によって、地域エネルギーである小水力の有効利用が図られている、②小水力発電に関する補助金や売電単価など行政の支援が充実している、③小水力事業が産業として成り立っている、

④わずかな落差に対しても小水力発電を活用しようとする意欲が高いなどである。

小水力発電は、わが国において今後重要度を増していくものと考えられる。水車の開発、農業水利システムの高度な活用、規制緩和など多々の課題があるものの、様々な分野の英知を結集して取り組んでいかねばならないと考える。

## 参考文献

- 1) 平成 18 年度農村工学研究所研究成果情報 (2007) : 水位に追従して自動開閉する機構を備えた取水口の浮遊性ゴミ流入防止装置, 農村工学研究所, p.75-76
- 2) 水力協 (全国小水力利用推進協議会) (2008) : ながれる水の物語, p.17
- 3) 小林 久 (2010) : 小水力発電の可能性, 世界 (岩波書店), 2010-1, p.104-114
- 4) 末尾至行 (1980) : 水力開発 = 利用の歴史地理, 大明堂, p.7
- 5) 前田清志 (1992) : 日本の水車と文化, 玉川出版部, p.43
- 6) 田中勇人 (1990) : 螺旋水車, p.151
- 7) 農村開発企画委員会 (1983) : 農村工学研究, 33, p.85
- 8) 農林水産省 (1988) : 農業水利施設整備状況調査結果, p.16

# Investigation Report of Small Scale Hydropower in South Germany and View in the Future of Small Scale Hydropower of Rural Area in Japan

GOTO Masahiro, UESAKA Hiroyuki and KOBAYASHI Hisashi

## Summary

We surveyed south Germany where a lot of small hydraulic power plants existed. As a result of the investigation, interesting findings were obtained as follows.

- 1) The power plant of 5,000kW or less was constructed from 2005 to 2006 by about as much as 300 plants in Germany. The average output of the constructed power plant in one place was about 160kW.
- 2) The existence of a small hydro-power entrepreneurs of individual ownership, a joint investment, the civic group, and the public organization, etc. was able to be confirmed.
- 3) Feed-in electricity tariffs have been introduced in Germany to encourage the use of new energy technologies such as wind power, biomass, hydropower, geothermal power and solar photovoltaics. FIT was €0.0767 per kWh in 2000, €0.0967 per kWh in 2004 with responsible concern for the environment, €0.1167 per kWh in 2009.
- 4) A lot of small hydro-power companies have been approved as an enterprise.

**Keywords :** small scale hydropower, Germany, feed-in tariff

# 高密度ラビリンス堰放流特性への下流水位の影響について

常住直人\*・高木強治\*・後藤眞宏\*\*・浪平 篤\*

## 目 次

I 緒 言	179	V 下流セキ上げを考慮した洪水吐水理設計	185
II 実験方法	181	1 セキ上げを見込んだ水理設計図表, 設計式	185
III ラビリンス堰の実験形状・水理諸元	182	2 セキ上げを見込んだ水理設計	186
IV 下流セキ上げによる放流特性, 流況の変化	182	VI 直下落水による放流特性, 流況の変化	186
1 セキ上げによる流量係数, 流況変化の状況	182	VII 結 言	187
2 セキ上げによる流量係数に関する考察	184	参考文献	187
3 セキ上げ時の下流流況	184	Summary	188
4 遷移状態卓越流況での放流安定性	185		

## I 緒 言

ラビリンス堰 (Fig.1) については, これまで, 水平水路内にラビリンス堰を設置し, かつ水平水路下流端でセキ上げが無い条件 (水平床かつ下流セキ上げ無し) で, 放流特性の解明が成されてきた (Hay, et al., 1970; Taylor, 1968; Lux, 1985; Lux, 1989; 常住ら, 2002)。しかし, 下流セキ上げ時の放流特性把握は, フィルダム, ため池の洪水吐や水路系など, 下流水位の影響が顕著にならざるを得ない適用条件下では重要である。

例えば, 現状, ラビリンス堰はため池洪水吐への適用事例が多く, しかも, 老朽ため池改修時の設計洪水量適正化に伴い採用される場合が多い。この場合, 設計洪水量増大となるので, 越流部の敷地確保と下流水路への接続のため, 側水路式のように下流セキ上げが高まりやすい洪水吐形式になる場合が多く見られる (Fig.2)。殊に側水路上流部では下流水位が高くなりやすい。一方, 改修時の設計洪水量増大が顕著でなく, 従前の正面越流式洪水吐のまま, ラビリンス堰を適用出来たとしても, ため池では洪水吐下流水路が概して小規模, 狭幅なので, 下流水路への接続, 経済施工, (堤体上下流が緩勾配なフィルダムゆえ) 緩勾配放水路の長さ, 放流減勢の点から, 洪水吐水路幅を緩勾配放水路上で縮小せざるを得ない。この場合も, 堰直下で水路幅漸縮となり, ある程度のセキ上げは回避できない (Fig.2)。

現在の設計指針 (農水省, 2006) では, 以上のような場合, セキ上げが顕著にならないように堰下流の水路敷高を下げるか, 側水路幅を広げるが, 改修時の設計洪水流量増大が大きい場合もしくは洪水吐側の地山が迫っている場合や圃場・宅地が近接している場合はそれらが困難になることもありうるし, ある程度, セキ上げを許容した設計のほうが改修費等の点で有利になる場合もある。しかし, ラビリンス堰の場合, 従来型直線堰のよう

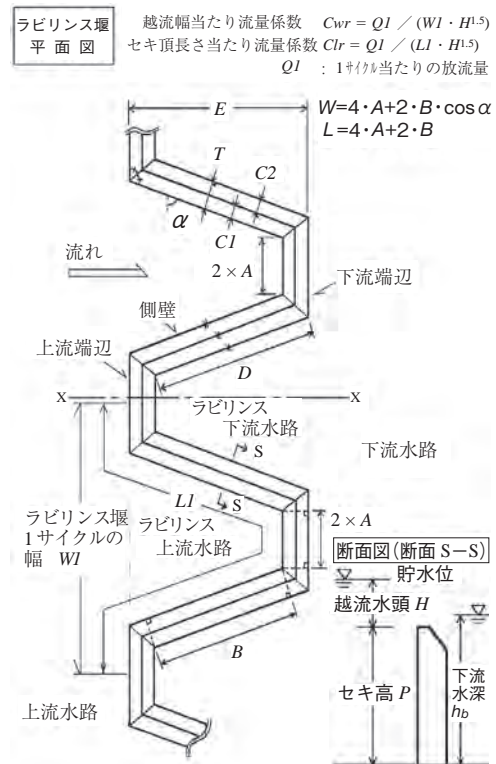


Fig.1 ラビリンス堰の模式図と記号  
Symbols of a labyrinth weir

\* 施設資源部部水源施設水理研究室

\*\* 施設資源部部上席研究員

平成21年11月4日受理

キーワード: 堰, ラビリンス堰, 流量係数, セキ上げ背水, 低下背水, 水理実験

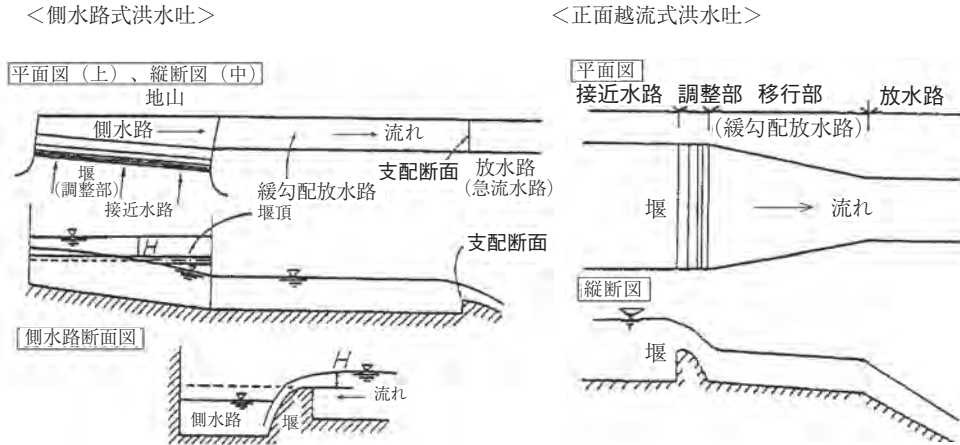


Fig.2 ため池の洪水吐形式  
Spillway types of small fill dams

に堰頂標高以上の下流セキ上げを見込んだ設計図表がないため、高めのセキ上げ水位を許容した場合との比較検討が出来ない。

下流水位によるラビリンズ堰放流特性への影響については、Taylor (1968) により、下流セキ上げ水位が堰頂を越えない限り放流特性への影響はほぼ無い、と言及されており、現行の設計指針もその範囲での記述となっている。すなわち、下流セキ上げがあっても、それによる下流水位がラビリンズ堰堰頂標高以下であれば、その際の流量係数は水平床かつ下流セキ上げ無しの条件での流量係数と変わらないとされている。

しかし、Taylor (1968) の検討は縦横比  $W/P \geq 2$  (以下、記号については Fig.1 参照) の低密度形状 (平面的にラビリンズ堰のジグザグの密度が低い形状、Fig.3 参照) を中心としたものである。ため池洪水吐等、狭小スペースに設置して放流能力を上げるには  $W/P < 2$  の高密度形状も有効となり得るうえ (常住, 2003)、水路系 (調整池、水位調整施設など) で既設水路幅に中断なく効率的にラビリンズ堰を配置する場合も、1 サイクル幅を縮小出来る高密度形状 (低  $W/P$  形状) が望ましい。このような形状はユニット型のラビリンズ堰として現地適用されているが (常住, 2001)、その下流セキ上げの影響を調べた事例はほとんどない (常住, 2004)。

$W/P < 2$  など、低  $W/P$  形状は、ため池洪水吐では、常時満水位、地形・地質条件から決まる堰高  $P$  に対し、ラビリンズ堰 1 サイクルの幅  $W$  が狭い形状であり、平面的にラビリンズ堰のジグザグの密度が高い高密度形状である。また、所定の越流水頭比  $H/P$  に対し  $H/W$  が大きい形状でもある。すなわち、水理的にも高密度ゆえ、セキ上げ等、下流水位による影響は低密度形状 ( $W/P \geq 2$ ) よりも顕著となりうる。なぜなら、ラビリンズ堰では、両側壁 (Fig.1 参照) からの放流水脈の衝突により、ラビリンズ下流水路 (Fig.1 参照) 内で水位上昇しやすいうえ、放流特性にはナップ背面エア域の放流阻害等に依ると思われる変化も見られるからである。このため、

ラビリンズ下流水路が狭小で、同一越流水頭での単位幅当たり放流量が大きくなる高密度形状 (常住, 2002) では、セキ上げによる下流水位 (下流水路水位、Fig.1 参照) が堰頂標高より低くても、下流水位が放流特性に影響を及ぼす可能性がある。これは、逆に言えばラビリンズ堰直下で流れを自由落下させた場合 (コンクリートダム洪水吐クレストに設置した場合に相当) も放流特性が変化する可能性がある、ということでもある。

セキ上げ等、下流水位による放流特性への影響解明は、ダム洪水吐と異なり、費用面の制約から机上設計がそのまま最終設計となるため池洪水吐や水路系では、その必要性が高い。ただ、ラビリンズ堰での流れは三次元的で複雑で、かつ攪乱しており、その放流特性は解析的には解明困難で (柏井ら, 1988; Indlekofer et al., 1975)、実験的に検討されてきた経緯がある。

本報文では以上のことから、水理実験により、高密度

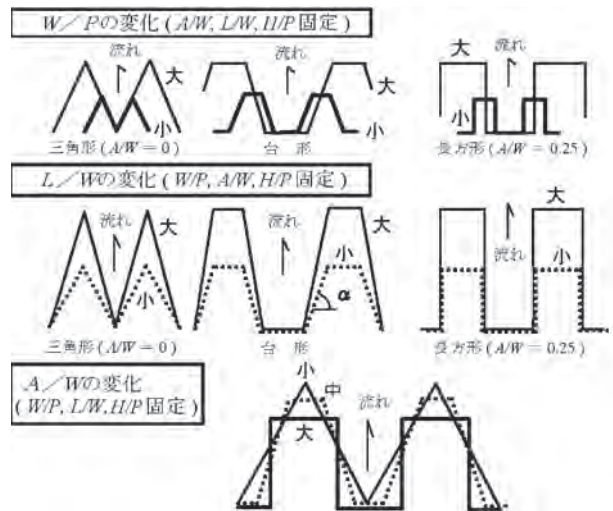


Fig.3 形状諸元の変化によるラビリンズ堰の平面形の越流水頭  $H$  に対する相対的な変化  
Relation between a relative plan shape of a labyrinth weir to overflow head and  $W/P, L/W, A/W$



ラビリス堰の放流特性に対する下流水位（セキ上げもしくは直下落水）の影響解明を試みたものである。以下、本報文における記号は Fig.1 で、また、流量係数は特に断りが無い限り、(1) 式の単位幅当たり流量係数  $C_{wr}$  で定義している。

$$C_{wr} = Q_i / (W_i \cdot H^{1.5}) = Q / (Wt \cdot H^{1.5}) \quad \dots (1)$$

$Q_i, Q$  : 各々、ラビリス堰1サイクル当たりの放流量、ラビリス堰の全放流量

$W_i, Wt$  : 各々、ラビリス堰1サイクル当たりの越流幅、ラビリス堰の総越流幅

$H$  : 越流水頭

なお、本研究に際しては農村工学研究所業務管理課（現、農村技術支援チーム）の方々から実験水路の補修、改造において多大なるご協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

## II 実験方法

実験は Fig.4 に示す実験水路で行った。実験水路は内幅 0.5m、深さ 0.6m、全長 12.3m、水路床は水平で、水路下流端にはセキ上げ用のフラップゲートを設置した。下流セキ上げの実験では、ラビリス堰上流の水路長を 9.4m とし、その上流端 0.9m は整流区間とした。堰上流水路長は、従前の実験結果（常住ら、2002）を参考に堰への接近流の影響が無くなる長さ以上、下流はセキ上げ

により生じる跳水長以上としている。但し、堰直下で自由落下の実験ではラビリス堰位置を実験水路下流端とした。各実験での堰設置位置は Fig.4 右下図に示すとおりである。

越流水位測点は、接近流の影響、実験水路への流入縮流の影響の低減を考慮して、ラビリス堰上流端から 3m 上流の水路幅中央とした。越流水位変動はサーボ式波高計で計測し、越流水位は同位置からマンメータで取り出したうえ、1/10mm 読みポイントゲージで計測した。実験では粘性の影響が卓越しないように、越流水頭が概ね 2cm 以上となるようにし（村ら、1956; 柏井ら、1988）、各越流流況における放流特性曲線を滑らかに描けるような間隔で、実験越流水頭を設定した。

一方、流量は上流計量水槽の四角セキ（セキ幅 0.6m、計量水槽内幅 2.01m、計量水槽底～四角セキ天端の高さ 2.51m）で計測した。流量係数はこの流量と越流水位から越流水頭を求め、Fig.1 中の式により算出した。

越流流況は目視による観察とビデオ画像により記録した。ビデオ画像は模型セキ各部の越流水脈背面の空洞域の有無、空洞域の発生・消失とその動きが明確に分かるように記録した。

また、下流水位測点は、各実験流量における堰直下の攪乱、実験水路下流端の低下背水の影響抑制の点から設定した。具体的にはラビリス堰下流端から下流 68.8cm（堰高の約 4.5 倍）地点とし、横断方向に左右岸から 1cm、水路中央、水路左右岸と水路中央測点の間点の 5 点で計測した。計測機器は、サーボ式波高計（下

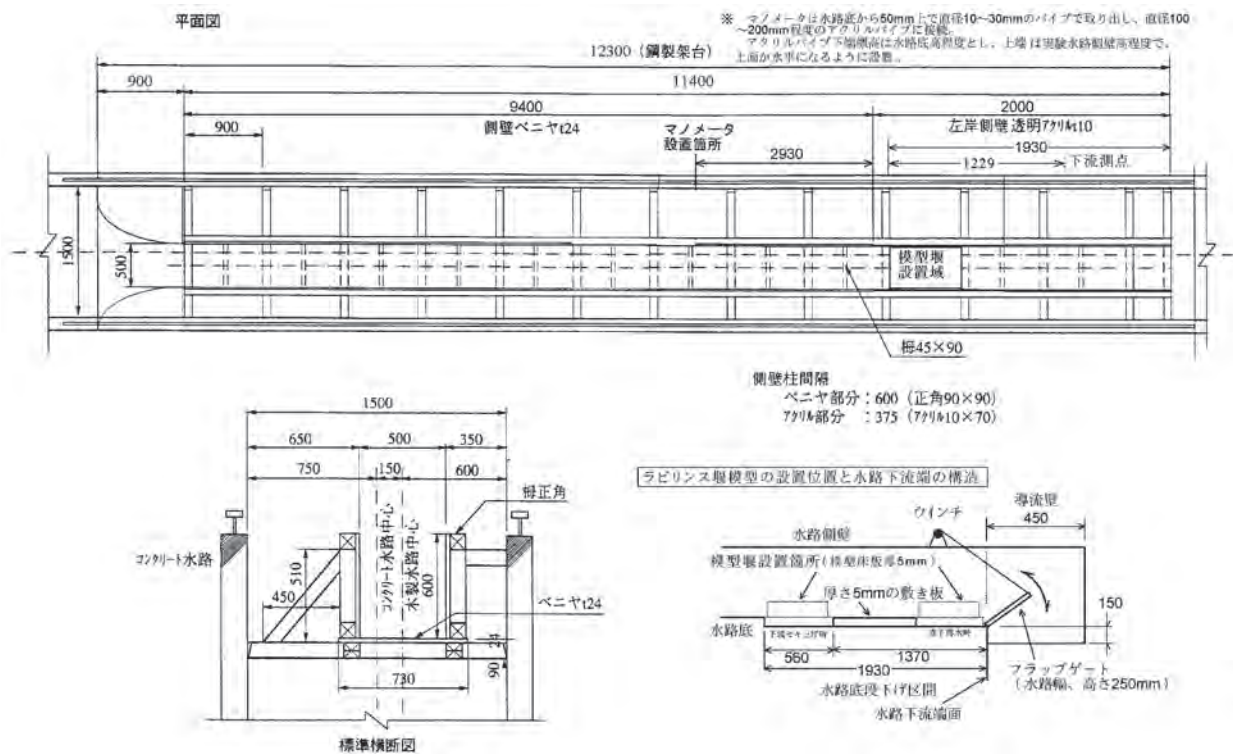


Fig.4 ラビリス堰の実験水路と堰設置位置  
The experiment flume and model weir arrangements of this investigation.

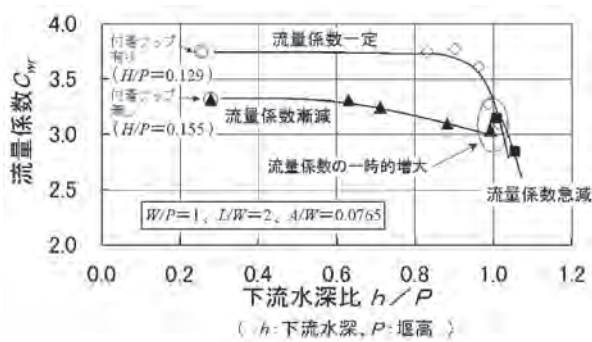


Fig.5 付着ナップによるラビリンス堰の流量係数変化  
Change of discharge coefficient on labyrinth weir by clinging nappe

流水深3.5cm以上で使用)及び1/10mm読みポイントゲージであり、サーボ式波高計では計測時間を3分とし、ポイントゲージでは同じ時間中の最高、最低水位から針先潜没、露出時間が概ね同一となる水位を計測した。いずれでも、水路横断方向各測点の計測時間中平均水位の平均値を下流水位とした。さらに、下流整流区間長を、模型セキ直下から水路横断水位が概ね一定化する横断面までの区間長(目視による)として1mm読みスケールにより計測した。

上記の計測は下流セキ上げ有・無、堰直下自由落水のいずれのケースでも行い、いずれの計測も流量、流況が十分、安定してから行った。また、放流特性にヒステリシスは見られなかったものの、洪水増水時を鑑み、実験は流量ゼロから流量を上げる方向で行った。実験流量への調整初期に付着ナップ(現地規模では極く低越流水頭でしか発生せず)が生じた場合は、付着ナップを人為的に切ってから流量設定を行った。これは、下流セキ上げの影響を検討した従前実験(常住, 2004)において、現地規模の堰、越流水頭では殆ど生じない付着ナップにより、下流セキ上げ時の流量係数変化が影響されることが確認されたためである(Fig.5)。一方、下流セキ上げ高は、下流セキ上げにより変化する越流流況各々で、下流セキ上げによる放流特性曲線を滑らかに描けるような設定間隔とし、現地で問題となる増水時を想定して、セキ上げ無しの状態からセキ上げ高を上げていく方向で実験を進めた。この際、越流流況変化時の下流セキ上げ水位も計測した。

なお、各部の測定に先立って、ポイントゲージを設置する水路側壁天端の不陸に対する標高補正をラビリンス堰を潜没させた静水面を基準に行った。また、流量係数等の算定の基礎となるセキ頂標高には、ラビリンス堰各端辺中央の頂部標高の平均値を用い、ラビリンス堰セキ頂標高の微妙なズレを補正した。

### III ラビリンス堰の実験形状・水理諸元

下流水位を考慮した場合、ラビリンス堰の放流特性は、水理条件たる越流水頭 $H$ 、下流水深 $h_b$ と形状諸元たる

堰高 $P$ 、堰厚 $T$ 、堰断面形状、1サイクルの堰頂長さ・越流幅・端辺長( $L, W, A$ ) (Fig.1)や堰上下流の水路底の標高差により規定される。堰断面形状が刃形堰で、水平床水路の場合、 $H, h_b, P, T, L, W, A$ の7諸元により放流特性が規定され、これらは $H/P, h_b/P, T/P, L/W, W/P, A/W$ の6無次元パラメータに集約出来る。

$W/P < 2$ の高密度なラビリンス堰に関しては、特段小さい $H/P$ を設計水頭にしなければ、すなわち、設計水頭に比し、堰高を相対的に大きく出来る場合以外は、従来型直線堰に対する放流能力(単位幅当たり流量係数 $C_{wr}$ )の大きさ、単位放流量当たりの堰体体積の小ささ、施工性等、費用対効果の点から、有効なラビリンス堰形状は、 $A/W \approx 0.0765, W/P = 1 \sim 2, L/W = 2 \sim 8$ の限られた範囲に存在することが分かっている(常住, 2003)。

また、直線堰に対する流量係数比は低下するものの、絶対的な放流量を高めるには、 $L/W$ をある程度大きくする必要がある。 $L/W$ を5~8と高めた場合には、 $W/P = 1.5 \sim 2, A/W = 0 \sim 0.0765$ の形状が、遷移状態の越流流況(Fig.6)がラビリンス堰に現れる流況II~IV (Fig.7)となる $H/P$ の範囲( $\Delta(H/P)_{IV}$ )が小さく、流況安定に優れることが分かっている(Fig.8, 常住, 2001)。すなわち、 $A/W$ が過大な形状や $W/P$ が過小な形状(平面的に長方形に近い、過度に高密度な形状、前出 Fig.3 参照)は遷移状態となる越流水頭比の範囲が広い、もしくは遷移状態での越流流況の攪乱が激しい等、流況安定の点で問題があり、このことも勘案すると $A/W \approx 0.0765, W/P = 1.5 \sim 2, L/W = 5 \sim 8$ が比較的有効な形状と考えられる。

さらに、 $W/P$ が小さい形状のほうが、所定の敷地に対し、余り幅なくラビリンス堰を効率的に敷設しうること、 $L/W$ が過大な形状では直線堰に比し、堰頂長さ、堰体容積、堰体コストが増大する割に放流能力が伸びなくなることを考慮し、ここでは実験形状を $A/W = 0.0765, W/P = 1.5, L/W = 5$ に設定した(模型堰高15.3cm、堰断面形状は刃形で水平床水路に設置)。

実験の上流水位条件は、ラビリンス堰の直線堰に対する放流能力が比較的大きくなる $H/P \leq 0.8$ とし、これらの条件下でセキ上げによりセキ上げ比 $h_b/P$ を変えて下流水位の影響を調べた。

### IV 下流セキ上げによる放流特性、流況の変化

#### 1 セキ上げによる流量係数、流況変化の状況

下流セキ上げ時の放流特性、越流流況の変化は Fig.9 のようになった。ラビリンス堰の越流流況は下流セキ上げにより流況V (Fig.7)から流況Iの方向に変化した。図中、「給気状態卓越」、「遷移状態卓越」、「非給気状態卓越」とあるのは、各々、流況IVもしくはV、流況III、流況IもしくはIIとなる領域である。

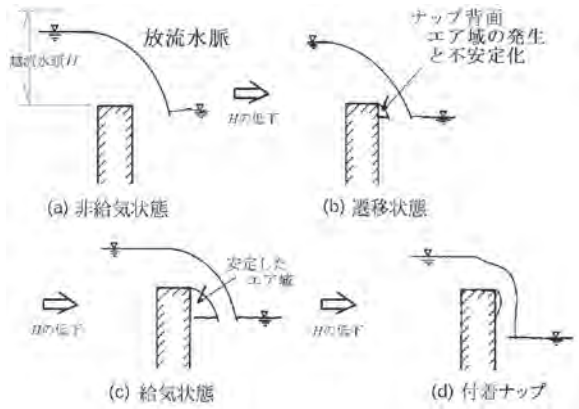


Fig.6  $H/P$  の低下によるラビリス堰各断面の越流流況変化  
Change of sectional overflow regimes on labyrinth weir by  $H/P$

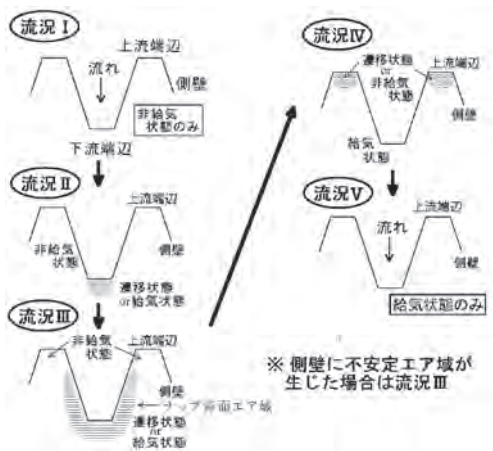
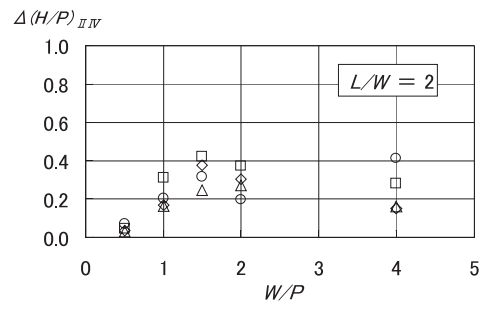
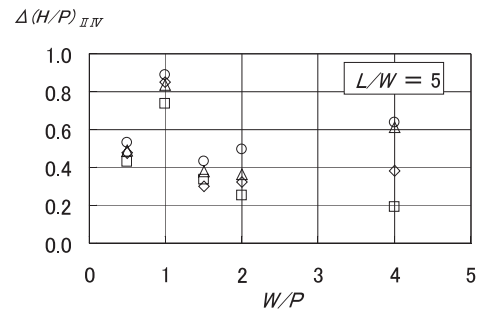
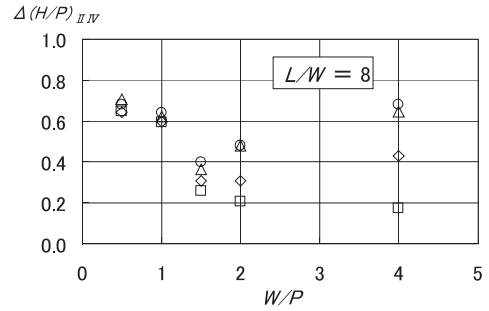


Fig.7  $H/P$  の低下によるラビリス堰の流況変化  
Change of plan overflow regimes on labyrinth weir by  $H/P$

流量係数  $C_{wr}$  (単位幅当たり流量係数) は、給気状態卓越流況時は概ね横直いで、遷移状態卓越流況ではセキ上げ比  $h_b/P$  に応じて漸増、非給気状態卓越流況時はセキ上げ比  $h_b/P$  に応じて低下していく傾向が見られた。

但し、どのケースでもセキ上げ水位がラビリス堰天端高を越えるまでは、流量係数の低下はほとんど生じず、セキ上げ水位がラビリス堰天端と同高での流量係数低下は、非セキ上げ時流量係数 ( $C_{wr}$ )<sub>0</sub> に対し 3% 減未満に留まった。それ以降、セキ上げ水位が堰天端高を越えてからは流量係数低下が著しくなり、セキ上げ水深が堰高の概ね 2 倍になるまでには、全てのケースで直線堰 (非セキ上げ時) と同程度まで流量係数は低下した。

セキ上げによる越流流況の変化は、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ( $(H)_o/P$ ) が小さいケースほど緩慢で、セキ上げ比  $h_b/P$  が增大しても中々、遷移状態卓越流況、非給気状態卓越流況へと移行しなかった。反面、遷移状態卓越流況での流量係数増加、非給気状態卓越流況での流量係数低下は、 $(H)_o/P$  が小さいケースほど急激であり、 $(H)_o/P$  が特に小さいケースでは、堰頂標高以上の



□  $A/W = 0$  ◇  $A/W = 0.0765$  △  $A/W = 0.15$  ○  $A/W = 0.25$

Fig.8 形状諸元による  $\Delta(H/P)_{IIIV}$  の変化  
Relation between  $W/P$ ,  $L/W$ ,  $A/W$  and  $\Delta(H/P)_{IIIV}$

セキ上げで急激に直線堰 (非セキ上げ時) の流量係数に近づいていった。

以上より、ラビリス堰の効果 (流量係数 ( $C_{wr}$ ) の大きさ) を高く維持するには、設計水頭 (想定最大水頭, 非セキ上げ時) での越流水頭比 ( $(H_d)_o/P$ ) が小さい場合、設計水頭時のセキ上げ比  $(h_b)_d/P$  を 1 以下に抑えるのが望ましい。反面、 $(H_d)_o/P < 0.19$  となる場合には、 $(h_b)_d/P = 0.94 \sim 0.99$  で  $C_{wr}$  が非セキ上げ時の 5% 以上増大する場合もあり (Fig.10)、非セキ上げ時の流量係数推計式 (常住, 2002; 常住, 2003) で設計している洪水吐では過放流 (最大約 10%) の問題を生じることが分かる。

一方、 $(H_d)_o/P$  が大きい場合には、セキ上げ比  $(h_b)_d/P$  が 1.5 まで大きくなって流量係数の低下は 15% 未満に留まる場合もある (Fig.10)。このようにセキ上げでの流量係数低下が顕著でない場合は、堰高増大で  $(H_d)_o/P$  を下げるよりも、 $(h_b)_d/P > 1$  の比較的大きいセキ上げでの設計が有利になりうる。



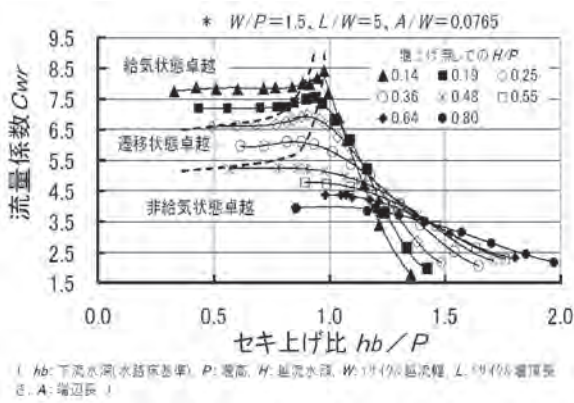


Fig.9 セキ上げによるラビリンズ堰の流量係数, 流況の変化  
Relation between discharge coefficient, plan overflow regimes and  $h_b/P$  on labyrinth weirs

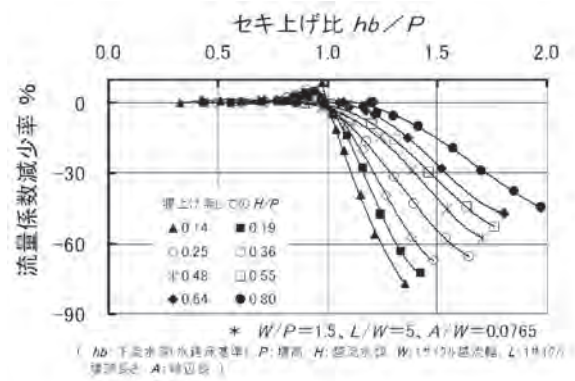


Fig.10 セキ上げによるラビリンズ堰の流量係数変化率  
Relation between discharge coefficient increase rate and  $h_b/P$  on labyrinth weirs

2 セキ上げによる流量係数変化に関する考察

セキ上げによる流況変化は、セキ上げに伴うナップ背面水位の上昇、ナップ背面エア域 (Fig.6, 7) の縮小により生じており、セキ上げ時の流量係数変化もこれに起因すると考えられる。すなわち、遷移状態卓越流況ではセキ上げによりナップ背面水位が上昇し、ナップ背面エア域が気泡化して消失していくが、この際、エア域の消失とともにそれによる放流阻害も減じていくため、これが流量係数増大方向に作用すると考えられる。さらにセキ上げ水位が上昇し、エアが概ね消失して非給気状態卓越流況化すると、エア域消失による放流阻害低減効果よりもセキ上げ水位自体による放流阻害効果が上回り、流量係数低下に転じると見られる。

この際、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ( $(H)_o/P$ ) が小さいケースでは、流量が小さくラビリンズ下流水路 (ジグザグ下流の凹部, Fig.1) の水位が低いこと、両側壁からの放流水脈の衝突が穏やかでナップ背面水位も低いこと、ナップ厚が薄いこと等に依り、 $(H)_o/P$  が大きいケースと比べ、セキ上げ比  $h_b/P$  増大時にナップ背面エア域が消失しにくく、中々、遷移状態卓越流況、非給気状態卓越流況へと移行しなかったのだと思われる。反面、セキ上げ増大で、下流水位が堰高近くになった時 ( $h_b/P \approx 1$ ) には、急激にナップ背面エア域が消失するため、遷移状態卓越流況下での流量係数増大は顕著になるであろう。また、低越流水頭、低流量ゆえ、ラビリンズ堰からの放流が下流セキ上げで潜没しやすく、非給気状態卓越流況下での流量係数低下は急激になるのだと思われる。

すなわち、下流セキ上げによる  $h_b/P$  値、 $(H)_o/P$  に応じた単位幅当たり流量  $q_{wr}$  によって決まるラビリンズ下流水路水位、ナップ背面水位と  $(H)_o/P$  に応じたナップ厚の3つによって変化する「ナップ背面エア域の大きさ」が下流セキ上げ時の流量係数、流況変化の原因と考えられる。

なお、付着ナップ有無の影響を検討した前出 Fig.5 で

は、セキ上げ時の流量係数低下が早期に現れているが、これは  $W/P = 1, L/W = 2$  の短堰頂・超高密度形状ゆえ、ラビリンズ下流水路が狭く、ラビリンズ下流水位よりもナップ背面水位が大きく上がる傾向があったためと思われる。ゆえに、セキ上げ時に、ナップ背面エア域による放流阻害の影響が大きく現れ、早期に流量係数が漸減した可能性がある。さらにセキ上げが増しエア域が消失する際には、一時的に流量係数反発となるが、以降は流量係数が急激に低下しており、この経過は  $W/P = 1.5$  の形状の Fig.9 と同様である。

一方、前出 Fig.5 の付着ナップ有りのケースでは、負圧の流量係数増大効果で下流セキ上げでも流量係数低下が起きない反面、ナップ背面エア域が無いのでエア域消失による流量係数増大もないのだと考えられる。この場合は、下流セキ上げが堰頂近くになり、負圧域を喪失してから、付着ナップ無しのケースに流量係数が急速に近づいていったと見られる。

3 セキ上げ時の下流流況

ラビリンズ堰下流水位測点での流れは、下流セキ上げの増大に応じて、射流、跳水、動揺跳水、常流 (更に潜り越流に続く常流、堰潜没に続く常流へ) と移行し、跳水位置はセキ上げにより上流へ移動した。この際、下流水位測点位置の水位は、跳水の通過時に大きく上がり、通過後に低下、以後、漸増という経過を辿った。跳水はラビリンズ堰下流で生じる交叉波 (ラビリンズ堰の各下流端辺を起点に、左右岸に向け斜めに走り、互いに交叉する波立ち) の下流端付近で生じるが、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ( $(H)_o/P$ ) が小さい場合は、セキ上げ無しでも交叉波が見られず常流下となり、 $(H)_o/P$  が大きい場合は、ラビリンズ下流水路内で両側壁からの放流水脈衝突による跳水状の流れを経て交叉波が生じた。

なお、今回実験の下流水位測点位置は、堰直下の流れの攪乱による測定誤差を回避すべく、堰からある程度離して設定している。しかし、ため池洪水吐の場合、下流



水路長は今回実験の下流水位測点位置より総じて短くなる。したがって、今回実験の下流水位測点位置に基づく設計図表で設計した場合、ラビリンス堰下流で射流、交叉波跳水と続く水面形になる「低セキ上げかつ高  $(H)_o/P$ 」のケースでは、実験での下流水位測点位置の水位と実際の洪水吐下流水路内の水位に齟齬を生じ（後者の水位は、交叉波跳水位置よりも上流に位置するので、より低位）、実際と異なる流量係数を与える場合もある。すなわち、両者の水位が一致する、より低セキ上げ時の流量係数（Fig.9 参照）で設計してしまう懸念がある。

しかし、これに依る流量係数の誤差は最大で5%未満であるうえ（Fig.9 より推計）、農業用フィルダム、ため池では、どのような洪水吐形式であれ、一般には緩勾配放水路内で整流化させるので、低セキ上げの設計条件になることは稀である。特に設計水頭時にそうなることは稀である。よって、今回の下流水位測点位置と実際の洪水吐下流水路長（緩勾配放水路長もしくは側水路幅）の差異による流量係数推計誤差の実用上の問題は大きくないと考えられる。

4 遷移状態卓越流況での放流安定性

遷移状態卓越流況では、実験で用いた近三角形ラビリンス堰形状の場合、堰頂の大半を占める側壁部でナップ背面のエア域が側壁沿いを不安定に上下流に動いたり、エア域が細かいエア溜まりに分裂し不安定に上下流に動く、もしくはエア域底面の水面が上下動する等の流況になる。このため、エア域上を流下する越流ナップも動揺し、流量係数が不安定化することも想定される。これを確認すべく、経時的な越流水位変動を観測したのが Fig.11 である。

しかし、本図を見る限り、越流水位の経時変動は水位上昇、流量上昇に応じており、遷移状態卓越流況時に特段大きくなるわけではなかった。流量増大による波立ち増大の中に埋没している状況であった。実験における経時変動計測時間（3分）は、現地ラビリンス堰高が1mとすれば現地では約8分相当なので、設計洪水ピーク流

量の持続時間がこの範囲に収まるならば、遷移状態卓越流況に設計水頭をとっても特段の問題は生じないと考えられる。

V 下流セキ上げを考慮した洪水吐水理設計

前出 Fig.9 のように、下流セキ上げ無しでの越流水頭比  $(H)_o/P$  が大きいケースでは、下流セキ上げによる流量係数低下は緩慢である。このような場合には下流セキ上げ水位が堰頂標高以上でも直線堰より費用対効果で有利となる場合も有りうる。また、高密度ラビリンス堰では下流水位が堰頂標高未満の場合も、放流特性への下流水位の影響が見られる（Fig.9）。よって、以下では、下流水位を見込んだ高密度ラビリンス堰の水理設計について、ため池、フィルダムの洪水吐を対象に論述する。

1 セキ上げを見込んだ水理設計図表、設計式

下流セキ上げによる越流水頭増大率は Fig.12 のようになる。越流水頭の増大率は下流セキ上げ無しでの越流水頭比  $(H)_o/P$  が大きいほど小さくなる。なお、本図では  $h_b/P < 1$  の範囲は除いてあるが、これは、この範囲では越流水頭が概ね横這いか、若干低下するので、堤体余裕高の設定上、問題にならないからである。

一方、下流セキ上げによる流量係数変化は、越流水頭・下流水位間の落差  $\eta$  で整理すると、 $(H)_o/P$  に依らず Fig.13 のような類似の曲線になる。これより流量係数比  $C_R (= C_{wr}/(C_{wr})_o)$  は下記 (2) の近似式で表され、その精度は概ね  $\pm 5\%$  未満に収まる ( $\eta/H = 0.32 \sim 2.0$ )。低密度形状に関する Tullis et al. (1995), Waldron (1994), 高密度形状に関する常住 (2003) 等のラビリンス堰流量係数式（下流セキ上げ無し）と同様、比較的高次の多項式で近似させたのはデータ数の多さとデータ分布への整合に依る。なお、ここでは WES 標準型越流頂と同様、流量係数定義式自体は下流セキ上げ有無に依らず同一（前出 (1) 式）とし、下流水位の影響は  $C_R$  式で見込むものとした。

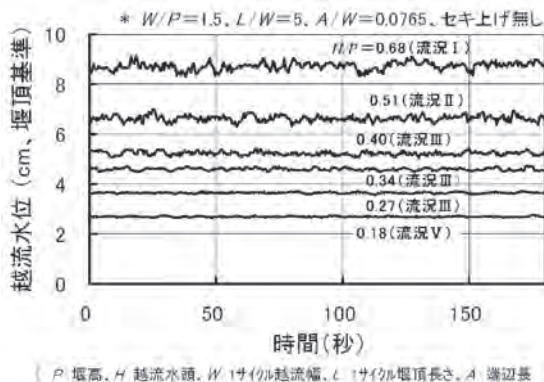


Fig.11 流況とラビリンス堰越流水位の経時変動  
Fluctuation of head on labyrinth weirs by plan overflow regimes

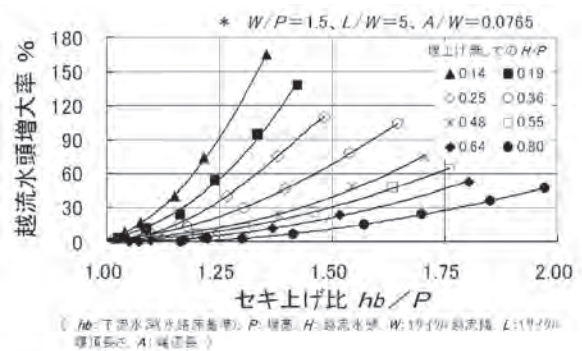


Fig.12 セキ上げによるラビリンス堰越流水頭変化率  
Relation between head increase rate and  $h_b/P$  on labyrinth weirs

$$C_R = C_{wr}/(C_{wr})_0 = 0.116 \cdot (\eta/H)^6 - 0.644 \cdot (\eta/H)^5 + 1.12 \cdot (\eta/H)^4 - 0.161 \cdot (\eta/H)^3 - 1.66 \cdot (\eta/H)^2 + 2 \cdot (\eta/H) + 0.22 \quad \dots (2)$$

2 セキ上げを見込んだ水理設計

前節の流量係数式(2)式より下流セキ上げを考慮したラビリンス堰の水理設計手順をFig.14のように示す。図中(3)式、(4)式は次のとおりである。

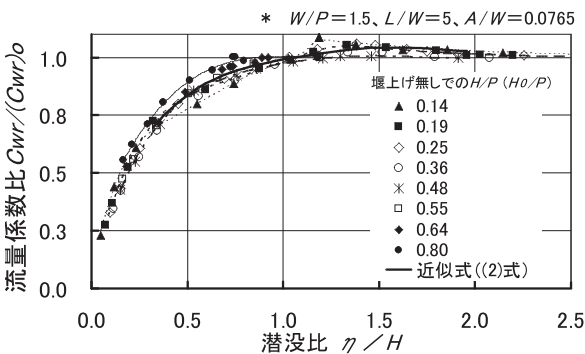
$$H_R = C_R^{-2/3} \quad \dots (3)$$

$$(C_{wr})_d = Q_d / (Wt \cdot H_d^{1.5}) \quad \dots (4)$$

$H_d, Q_d, (C_{wr})_d, (h_b)_d$ : 越流水頭, 流量, 流量係数, 下流水深 (いずれも設計洪水放流時, セキ上げ有り)

$Wt$ : 洪水吐の総越流幅

ラビリンス堰を洪水吐規模の縮小(総越流幅  $Wt$  の縮小), 堤高の低減もしくは貯水量の増大(越流水頭  $H$  の低減), 洪水吐安全度の向上(設計洪水量  $Q$  の増大)など, いずれの目的で用いるかにより, Fig.14中の試算対象, 最終出力種別( $Wt$ か $Q$ か $H$ か)は異なるが, いず



( $\eta$ : セキ上げ時の越流水頭・下流水位間の落差,  $H$ : セキ上げ時の越流水頭,  $P$ : 堤高,  $W$ : 1サイクル越流幅,  $L$ : 1サイクル堰頂長さ,  $A$ : 端辺長,  $C_{wr}$ : セキ上げ時の流量係数,  $(C_{wr})_0$ : セキ上げ無しでの流量係数)

Fig.13 潜没比と流量係数比の関係

Relation between  $C_{wr}/(C_{wr})_0$  and  $\eta/H$  on labyrinth weirs

れにせよ基本的な設計手順は同一である。(2)式を用いた場合,  $\eta/H = 0.32 \sim 2.0$  ((2)式の適用範囲)では下流セキ上げを考慮した水理設計,  $\eta/H > 2.0$ では下流セキ上げを考慮しない水理設計と区分され, 下流セキ上げを考慮しない水理設計では, Fig.14で $(h_b)_d$ を算出せず,  $C_R = H_R = 1$ とすれば良い。一方,  $\eta/H < 0.32$ では下流セキ上げに伴う流量係数低下が30%以上と著しいので, ラビリンス堰の適用性は低いと考えられる。以上のいずれの場合も(2)式の代わりにFig.13による水理設計が可能だが, Fig.13を用いる場合,  $H_d$ 導出のための試算と, Fig.13中の曲線間の内挿計算を要するので設計は煩雑化する。なお, 事前にセキ上げ考慮での貯水位・堤頂間の余裕高変化, 流量係数変化等, ラビリンス堰適用の効果を概略推計するにはFig.12, 前出Fig.10も用いる。

VI 直下落水による放流特性, 流況の変化

前出の高密度ラビリンス堰形状につき, 堰直下で流れを自由落下(ラビリンス堰模型床版の下流側張り出しにより堰下流端から堰高の0.42倍下流地点から落下)させた場合の流量係数 $C_{wr}$ (単位幅当たり流量係数), 流況の変化を示すとFig.15のようになる。このように堰直下で落水させた場合, 堰下流が水平床の場合(常住, 2002)と比べ,  $H/P$ が上がっても遷移状態卓越流況が維持されるものの, 流量係数はほとんど変わらなかった。また, 遷移状態卓越流況への移行 $H/P$ もほとんど変わらなかった。

これは, Fig.15で検討しているような近三角形形状(端辺比 $A/W \approx 0$ )のラビリンス堰では, その流量係数が, 主として側壁部の越流流況に左右されるためであり, かつ近三角形形状では側壁部の越流流況は下流水路長さあまり影響されないためと思われる。すなわち, 近三角形形状では, 下流水路長さ越流流況に影響されやすい下流端辺の, 全堰頂長さ占める比率が大きくないうえ, 下流端辺がほとんどないため, 近長方形形状のように下流端辺のナップ背面エア域が側壁側に貫入して越流流況に影響を及ぼす度合いも低い(常住, 2001)。さら

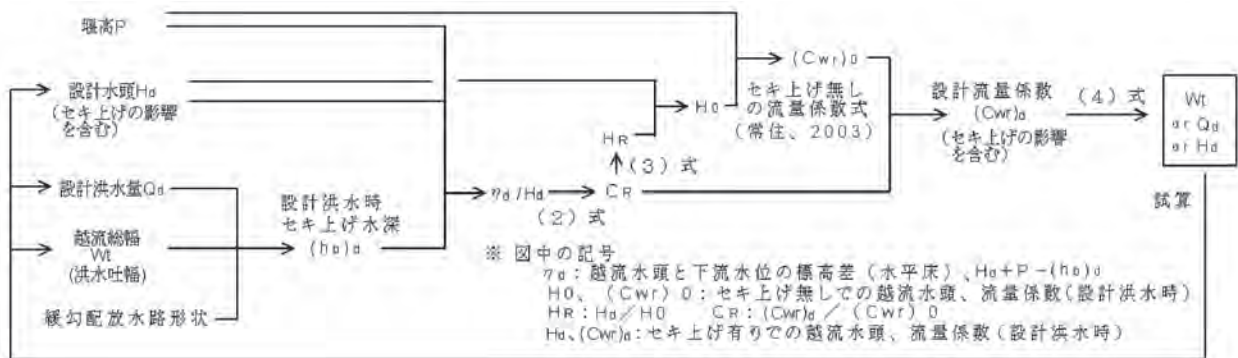
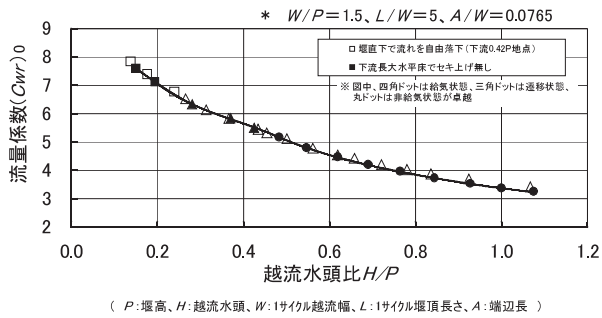


Fig.14 セキ上げを考慮したラビリンス堰の水理設計手順  
Hydraulic design routine of labyrinth weirs in backwater



**Fig.15** 直下落水における流量係数と流況  
Relation between discharge coefficient ( $C_{wr}$ )<sub>0</sub>, plan overflow regimes and  $H/P$  on labyrinth weirs in free overfall

に、側壁部の越流流況は、堰頂長さが相対的に長ければ ( $L/W$  が極端に小さくなければ), ラビリンス下流水路 (Fig.1) の流況のみに大方左右され, ラビリンス下流水路の流況には, ナップ厚さや両側壁からのナップ衝突跳水の影響が大きいので (常住, 2001), 下流水路末端で自由落下であれば, 下流水路長さの側壁部越流流況への影響は大きくないのだと考えられる。それゆえ, 堰直下落水でも下流水平床の場合と比べ, 流量係数, 遷移状態卓越流況移行時  $H/P$  に差異が生じなかったのであろう。

ただし, 直下落水ゆえ, 下流端辺からのエア貫入は, 頻度は低くなるものの高  $H/P$  時まで時折見られ, それが完全な非給気状態卓越流況には移行し難い原因であった。

以上より, 実用上有用 (Ⅲ章より) な「 $L/W$  がある程度大きい近三角形形状」のラビリンス堰では, 直下落水による流量係数への影響は考慮不要と考えられる。

## Ⅶ 結 言

ラビリンス堰は, 通常の直線標準型越流頂より高い放流能力を持ち, 要改修数が多いため池洪水吐に有用と見込まれるものの, その放流能力 (単位幅当たり流量係数) に対する下流水位の影響については, これまで十分検討されていなかった。特に放流能力増大に有効な高密度 (低  $W/P$ ) のラビリンス堰については, 下流水位の影響が大きくなると想定されるものの既往データがほぼ皆無であった。そこで, 本研究では, 放流能力, 流況安定性の点で有用な近三角形形状 (低  $A/W$ ) の高密度ラビリンス堰について, 下流水位による放流特性への影響を検討した。

その結果, 高密度ラビリンス堰 (近三角形形状) であっても越流水頭が小さい場合は, 下流セキ上げにより必ずしも放流能力低下とならないこと, すなわち流況変化により放流能力が上下すること, 比較的設水頭が高い場合は高密度形状でもセキ上げによる放流能力低下が抑えられること, 堰直下で落水させた場合も放流能力がほと

んど変わらないこと等が明らかとなった。

また, これらの知見から下流水位の影響を考慮した流量係数推計式, 水理設計手法を呈示した。

今後は以上の結果を, より低コストなため池改修工法の開発へ活用していきたい。

## 参考文献

- Indlekofer, H., Rouve, G. (1975): Discharge over the Polygonal Weirs, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E.*, **3**, 385-401
- Hay, N., Taylor, G. (1970): Performance and Design of Labyrinth Weirs, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E.*, **11**, 2337-2357
- 柏井条介・中西 徹 (1988): ラビリンス型越流部の放流特性, 土木技術資料, 30 (1), 14-19
- Lux, F., Hinchliff, D. (1985): Design and Construction of Labyrinth Spillways, *15th Commission Internationale des Grands Barrages*, 249-274
- Lux, F. (1989): Design and Application of Labyrinth Weirs, *International Symposium on Design of Hydraulic Structures(2nd)*, 205-215
- 農林水産省 (2006): 土地改良事業設計指針 「ため池整備」, 58-87
- 村 幸雄・荒木正夫 (1956): ダム越流部形状に関する実験的研究, 土木研究所報告, 93
- Taylor, G. (1968): The Performance of Labyrinth Weirs, *Thesis Presented to The University of Nottingham in Partial Fulfillment of The Requirements for The Degree of Doctor of Philosophy*
- 常住直人 (2001): ラビリンス堰のユニット化, H.12 農業工学関係研究成果情報, 49-50
- 常住直人 (2003): 刃形ラビリンス堰の形状と効果に関する一考察, 農業土木学会論文集, 224, 135-143
- 常住直人 (2004): 下流水位によるラビリンス堰の流況変化, 平成 16 年度農業土木学会大会講要, 812-813
- 常住直人・久保成隆 (2001): 刃形ラビリンス堰の越流流況について, 農業土木学会論文集, 214, 119-125
- 常住直人・久保成隆 (2002): 刃形ラビリンス堰の流量係数について, 農業土木学会論文集, 218, 283-289
- Tullis, P., Amanian, N., Waldron, D. (1995): Design of Labyrinth Spillways, *Journal of Hydraulics Engineering*, **121**(3), 247-255
- Waldron, D. (1994): Design of Labyrinth Weirs, *MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah*

# Influence of Backwater, Free Overfall on Discharge Coefficients, Overflow Regimes of High-density Labyrinth Weirs

TSUNESUMI Naoto, TAKAKI Kyoji, GOTO Masahiro and NAMIHIRA Atsushi

## Summary

Labyrinth weirs have higher discharge capability than straight standard weirs. Therefore, it is useful for repair works of small fill dam spillways required increase of discharge ability for safety of their downstream areas. Nevertheless discharge capability of labyrinth weirs wasn't clear in imperfect or submerged overflow which hydraulic designs of these conditions can be effective for reduction of downstream channel volume in fill dam spillway, especially on high-density labyrinth weirs which have high discharge ability and a good effect on efficient repair works by those compatible units in spite of long crest length.

In this study, we investigated discharge coefficient, overflow regimes of a high-density and semi-triangular labyrinth weir which had relatively high discharge capability and stable overflow state in our former study. The results in hydraulic experiments indicated below.

- 1) Discharge coefficients per unit width ( $C_{wr}$ ) of labyrinth weir are not necessarily decreased to increase of backwater in case of low head in spite of high-density plan form.
- 2)  $C_{wr}$  change by plan overflow regimes of labyrinth weirs. Namely,  $C_{wr}$  are relatively flat in free nappe regime, increase in transitional regime, and decrease in imperfect or submerged nappe regime to increase of backwater.
- 3) Decrease of  $C_{wr}$  in case of high head is low, which has capability of hydraulic design in imperfect overflow state.
- 4) Hydraulic design routine in imperfect overflow regime was proposed using a regressive formula of discharge coefficient from the above results.
- 5)  $C_{wr}$  in case of drop right downstream of the labyrinth weir are nearly same with those in case of flat bed in spite of difference of plan overflow regime at the same heads.

**Keywords** : weir, labyrinth weir, discharge coefficient, backwater, drop down, hydraulic experiment



調整池によるオープンタイプパイプラインの  
脈動防止効果の事例研究

田中良和\*・向井章恵\*・樽屋啓之\*

## 目 次

I 緒言	189	2 調整池の脈動防止効果	195
II 事例地区の概要	190	3 脈動防止に必要な水面積	199
III 脈動現象の実態	193	VI 結言	200
IV 周波数応答法	194	参考文献	200
V 結果と考察	195	Summary	201
1 連続した多段のスタンドにおける脈動特性	195		

## I 緒言

オープンタイプパイプラインでは、水路の構造と流量の条件によって、通常の水管理においても脈動現象が生じる場合がある。脈動現象は、調圧スタンド内水位や管路内水圧を不安定化して分水効率を低下させたり、スタンドから溢水による周辺環境への二次被害の問題を引き起こす。この脈動現象の原因は、松下（1984, 1990, 1991）によれば、主に上流側の流量変動と下流側の振幅増大現象の2つの要因の組み合わせが原因である。前者はスタンドの下流側水槽の呑口における空気連行に伴う流量変動や管理者の分水口ゲート操作に伴う流量変動が挙げられる。後者は、多段に調圧分水スタンド（以下、スタンドまたはSTとする。）を連結した水路構造の水利施設が有する流量変動の固有振動特性である。

オープンタイプパイプラインの設計における脈動現象の解析手法として、水理実験や非定常数値シミュレーションが行われてきた（吉野, 1984）。しかし、これらの手法は初期・境界条件を設定したモデルまたはモデルにおいて水理現象の時系列変化を忠実に再現するものであり、オープンタイプパイプラインシステムに求められるシステムとしての要求性能を分かりやすい指標によって明らかにする手法ではなかった。近年は、計算機の発達に伴って非定常水理解析が一般的に利用されているが、古くは、Edward et al. (1852) がオープンタイプパイプラインシステムの周波数応答からサージング特性を解明

する手法を提案していた。施設更新のための性能設計手法という観点から見つめ直した場合、この周波数応答法は、スタンドを要素、一对のスタンド間の流入と流出を入力と応答として、入力と応答の比を要素の伝達関数の大きさ（以下、ゲインと呼ぶ）を解析し、スタンド間の脈動現象が減衰するのか増幅するのかを示してシステム全体のサージング現象に関する要求性能の指標を明らかにすることができる手法であると言える。この手法のもう一つの利点は、非定常数値シミュレーションに必要とされる数値計算の労力と知識を必要とせず、水路構造の変更が伝達関数に直接反映されるためにスタンドの水深の増幅について瞬時に結果が得られることである。今後の水利施設の整備は、機能の保全や改善を行うために維持や更新を行うことが期待されているために、設計手法においても維持や更新を目的とした設計手法が必要とされている（中ら, 2003）。周波数応答法は、システム内の水路施設の諸元や配置・接続の変更によって生じる各水路施設の水位の変化をシステム全体の応答として瞬時に知ることができるため、オープンタイプパイプラインシステムの今後の設計手法として期待できる。

関谷（1988）は、周波数応答法をオープンタイプパイプラインシステムの脈動現象を防止するための施設改良の検討に適用した。関谷によれば、脈動現象を防止する方法の一つとして、スタンドの二次水槽の水面積を広くすることが、一次水槽の水面積を広くすることよりも、ゲインを小さくする効果が高いことが示された。ただし、水面積の広さには調整池規模のものが必要であるとされた。本来、中間調整池の主な役割は、水路システム内における農業用水の需給の変化に対して弾力的な送水を行うためである。設計基準「水路工」の技術書（農林水産省 農村振興局, 2001）においても、多目的調整池に脈

\* 施設資源部水路工水理研究室

平成21年11月4日受理

キーワード：オープンタイプパイプライン、脈動現象、調整池、周波数応答法、高速フーリエ変換、ラプラス変換

動防止効果があることは明記されていない。しかし、オープンタイプパイプラインの水路システムに限り、多目的な機能の一つとして脈動現象の防止効果が期待できる。

そこで、本稿では、ある事例地区を対象にして周波数応答法による解析を行い、脈動現象について現地調査との比較による本手法の結果の妥当性を検証した。さらに、脈動現象を防止するために必要な中間調整池の水面積を算出し、周波数応答法によるオープンタイプパイプラインシステム的设计における有効性を検討した。

また、周波数応答法によって算出された調整池の水面積が十分な広さを確保したとしても、ある条件では脈動防止の効果を発現しない現象が起こることが現地観測と解析結果から同じように認められたので、脈動現象対策の注意点として報告する。

## II 事例地区の概要

本地区は、S 県の K 平野南東部に位置し、T 市ほか 3 町にまたがる県下有数の大規模穀倉地帯にある。

対象水路は、S 地区の国営造成施設の左岸側水路に位置する幹線から分岐した水路である。

A 幹線の水路構造は、上流側は開水路、下流側はオープンタイプパイプラインとした複合幹線水路である。A 幹線のオープンタイプパイプライン区間には、用水の需要と供給の差を調整するために、二期事業において中間調整池が設置された。A 幹線の下流端の No.13ST にて、県営の B 支線と C 支線へ分岐している。B 支線と C 支線は共にオープンタイプパイプラインである。A 幹線、B 支線および C 支線のオープンタイプパイプライン区間の水路系統図を Fig.1 に図示する。

A 幹線、B 支線および C 支線の水理縦断面図を Fig.2 ~ Fig.4 に図示する。A 幹線の上流側にある複数のスタンドにおいて、呑口のシール高が確保されていない。例えば、普通期最大送水時においても、A 幹線の上流側である No.1 ~ No.3 の 3 箇所のスタンドのシール高が不足す

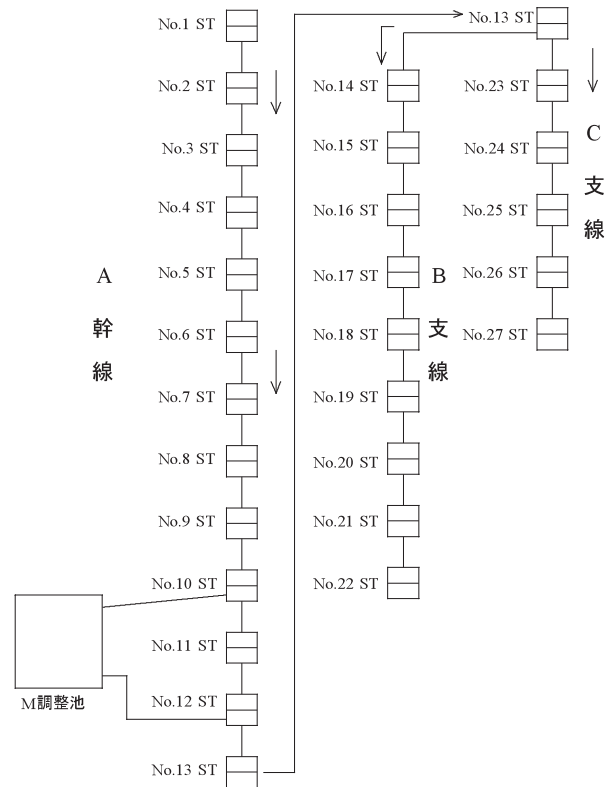


Fig.1 A 幹線、B 支線および C 支線の水路系統図  
Water channel system diagram of A trunk line,  
B branch line and C branch line

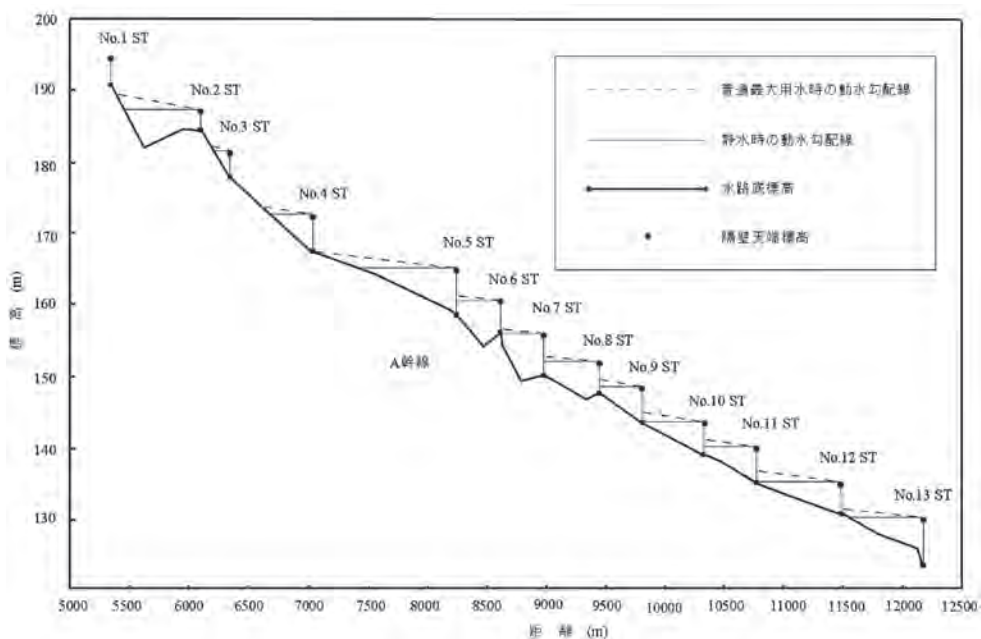


Fig.2 A 幹線の水理縦断面図  
Hydrology longitudinal figure of A trunk line

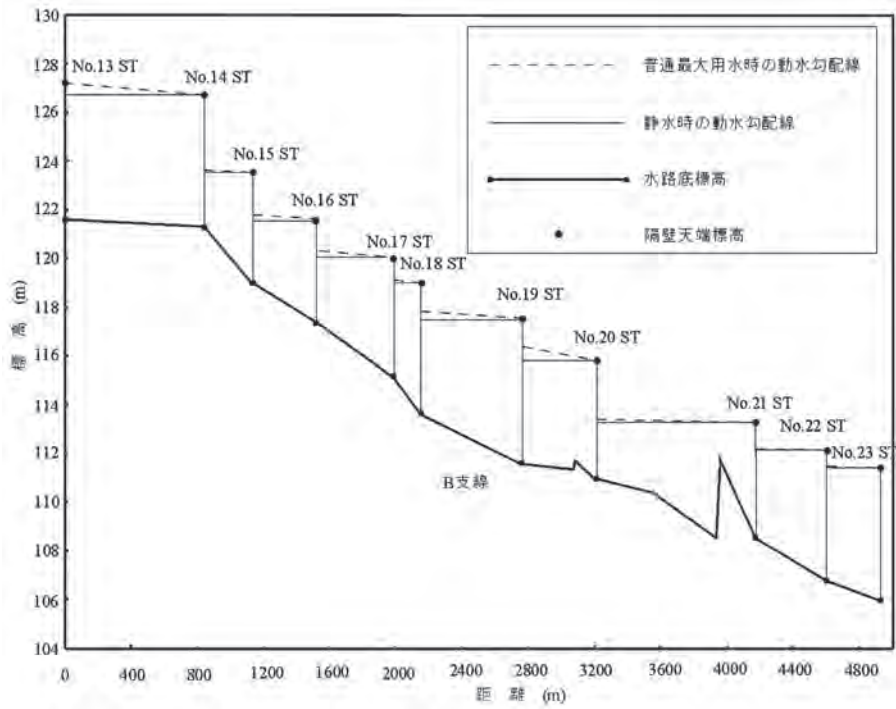


Fig.3 B支線の水利縦断面図  
Hydrology longitudinal figure of B branch line

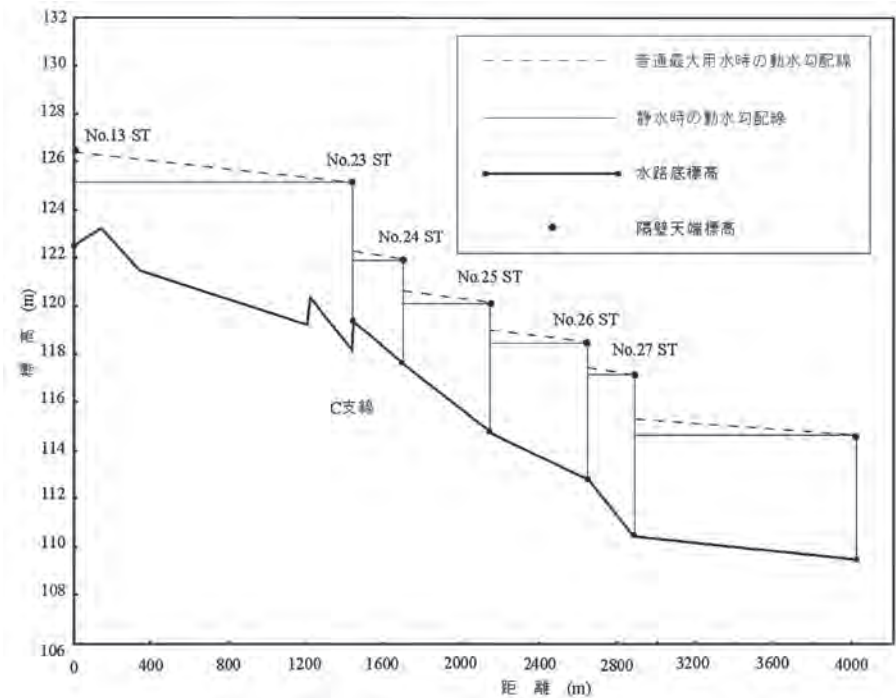


Fig.4 C支線の水利縦断面図  
Hydrology longitudinal figure of C branch line

る。他方、B支線とC支線はシール高が確保されている。

施設構造および通水量は Table 1 のとおりである。本稿において解析に用いた流量は、平常時の最大流量を選定し、平成8年の7月6半旬における通水量とした。

A幹線の下流側と支線の全域におけるスタンドでは、脈動防止の対策工法が施されている。Fig.5に示すよう

に、A幹線の下流側のスタンドでは、通気孔（エアスティッキ）、越流ナップを導流壁で抑えた隔壁、および多孔式整流板（穴あき整流板）の3点が施されていた。他方、支線の全てのスタンドは通気孔（エアスティッキ）、越流ナップを導流壁で抑えた隔壁の2点が施されていた。

**Table 1** 施設構造と流量の諸元  
The dimension of facilities structure and flow rate

## A 幹線

スタンド名		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13
一次水槽	長さ	3.3	3.275	3.275	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	幅	2	2	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.25
	高さ	5.9	4.16	5.46	6.5	7	7.4	7.3	5.95	7.3	5.95	7.55	7.25	8
	底敷高	190.6	183.6	176.8	166.35	158.273	154.067	149.194	146.7	141.743	138.139	132.993	128.627	122.35
	接続管頂高	191.2	185	178.25	167.903	159.55	156.695	150.04	147.969	144	139.443	135.493	130.57	124.05
	通水量	1.931	1.832	1.745	1.661	1.516	1.516	1.516	1.516	1.479	1.422	1.422	1.333	1.476
	分水量	0.068	0.087	0.084	0.112	0.000	0.000	0.000	0.037	0.057	0.000	0.050	0.024	0.177
隔壁	幅	2	3.275	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2.5	4
	高さ	4.85	2.9	4.5	5.55	5.95	5.784	6.046	4.699	6.086	4.724	6.344	4.302	7.3
二次水槽	長さ	3.3	3.275	3.275	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	幅	2	2	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.25
	高さ	5.9	4.16	5.46	6.8	7	7.4	7.3	5.95	7.3	5.95	7.55	7.25	8
	底敷高	190.6	183.6	177.7	166.35	158.273	154.067	149.194	146.7	141.743	138.139	132.993	128.627	122.35
	接続管頂高	191.2	185	176.8	167.903	159.55	155.367	150.579	147.862	142.943	0.664482	134.193	130.57	124.05
	通水量	1.863	1.745	1.661	1.549	1.516	1.516	1.516	1.479	1.422	1.422	1.372	1.550	1.299
	分水量	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

## B 支線

スタンド名		No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22
一次水槽	長さ	4.53	2.52	2.53	2.5	2.5	2	2	2	1.35
	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.75	2	1.5	1.5	5
	高さ	6.924	6.487	5.583	6.25	6.9	7.34	5.9	6.4	7.35
	底敷高	120.9	118.1	116.917	114.2	113.2	111.06	110.5	107.96	105.4
	接続管頂高	122.1	119.8	118.034	115.3	114.3	112.16	111.5	108.96	106.3
	通水量	0.794	0.635	0.626	0.618	0.592	0.554	0.488	0.403	0.251
	分水量	0.000	0.009	0.008	0.026	0.038	0.066	0.053	0.152	0.050
隔壁	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.5	2	1.5	2	5
	高さ	5.608	5.187	4.406	4.85	5.5	5.94	4.5	5	5.8
二次水槽	長さ	2.03	2.52	2.52	2.5	2.5	2.5	2	2.5	2.1
	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.75	2	1.5	1.5	5
	高さ	6.924	6.487	5.583	6.25	6.9	7.34	5.9	6.4	7.35
	底敷高	120.9	118.1	116.917	114.2	113.2	111.06	110.05	107.96	105.4
	接続管頂高	122.1	119.3	118.031	115.3	114.3	112.06	111.5	108.96	106.3
	通水量	0.794	0.626	0.618	0.592	0.554	0.488	0.435	0.251	0.201
	分水量	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

## C 支線

スタンド名		No.23	No.24	No.25	No.26	No.27
一次水槽	長さ	2.54	2.5	2.5	2.5	2
	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	8.303	5.572	6.689	6.76	8.36
	底敷高	117.504	117.37	114.505	112.357	110.058
	接続管頂高	118.884	118.434	115.47	113.457	111.158
	通水量	0.505	0.505	0.505	0.437	0.431
	分水量	0.000	0.000	0.068	0.006	0.000
隔壁	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	7.008	4.272	5.389	5.702	7.156
二次水槽	長さ	1.99	2	2	2.02	4
	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	8.303	5.572	6.689	6.76	8.36
	底敷高	117.504	117.37	114.505	112.357	110.058
	接続管頂高	120.329	118.434	115.47	113.457	111.158
	通水量	0.505	0.505	0.437	0.431	0.431
	分水量	0.000	0.000	0.000	0.000	0.297



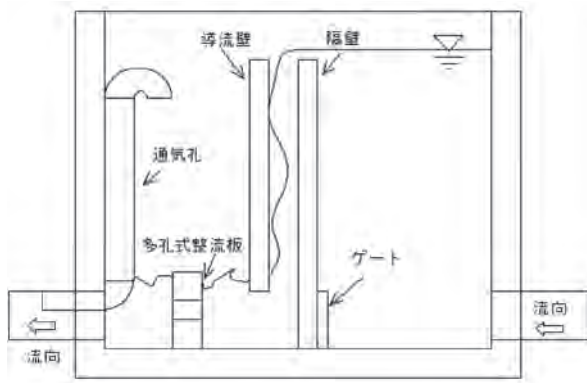


Fig.5 スタンドの構造  
The structure of the stand

### III 脈動現象の実態

平成 17 年に K 局 S 事業所によって、A 幹線と B・C 支線の脈動現象について現地観測が行われた。本章は、その結果を要約し、高速フーリエ変換を行い脈動現象の周期を調べたものである。著者らは平成 20 年 9 月 10 日に A 幹線の流量を調整して A 幹線と B・C 支線において同様の脈動現象が生じることを確認した。

現地観測の試験方法は、上流側の流量を操作して、No.3ST における流量を  $0.6\text{m}^3/\text{s}$  から  $1.0\text{m}^3/\text{s}$  に変更した際に、スタンドの水位を測定するものであった。水位の測定方法は、圧力式水位計（精度  $\pm 20\text{mm}$ ）を各スタンドに設置し、10 秒間隔で計測した。

その結果、No.10ST から M 調整池を経由して下流側へ送水する場合と M 調整池を経由しない場合では、脈動現象の発生に大きな違いが見られた。例えば、M 調

整池を経由した場合、No.3ST における流量が  $0.6\text{m}^3/\text{s}$  以下では、脈動現象は生じなかった。No.3ST における流量が  $1.0\text{m}^3/\text{s}$  の時は、M 調整池の上流側のみ脈動現象が生じたが、M 調整池よりも下流側では脈動現象が生じなかった。ただし、M 調整池を経由するが、No.12ST で少量の越流がある場合、越流量が少量であっても、下流側において脈動現象が生じた。

他方、M 調整池を経由しない場合、No.3ST における流量が  $0.6\text{m}^3/\text{s}$  以下では、脈動現象は生じなかったが、流量が  $1.0\text{m}^3/\text{s}$  に増加すると、M 調整池の下流側において、A 幹線と B・C 支線に脈動現象が発生した。下流側の支線において水位変化が大きく、二次水槽の水位が隔壁の天端高を越えて、スタンドから溢水しかねない状況となった。

M 調整池を経由しない場合について、A 幹線、B 支線および C 支線のスタンドの二次水槽の水位の時系列変化 (Fig.6) を、高速フーリエ変換することによって代表的な固有周期があるかどうかを調べた。

その結果、Table 2 に示すように、No.3ST の二次水槽では、低周波数から高周波数までを含んだ不規則な振動であった。No.9ST の二次水槽では、89 秒の周期の短い脈動現象が生じた。続く No.12ST の二次水槽では、脈動現象の周期が 120 秒に伸び、続く B 支線と C 支線の各スタンドの二次水槽では、脈動現象の周期がさらに長くなり、158 秒になった。下流側ほど周期が若干大きくなる原因は、各スタンド間の管路延長は、約 500m 間隔であったが、地形の高低差によって約 1km の間隔が生じた区間もあるためであると考えられる。

地区の概要と脈動の実態から判断して、脈動現象の発生する原因は、No.1ST から No.7ST の間のスタンドに

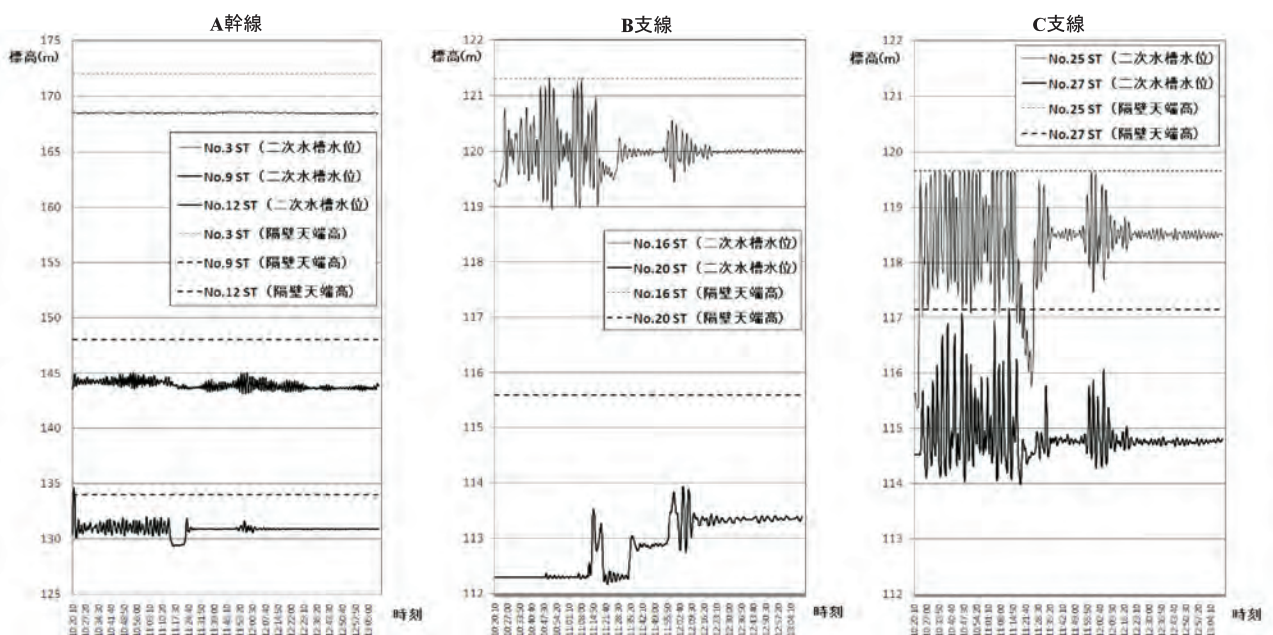


Fig.6 脈動現象における水位の時系列変化  
Time series change of the water-level in the surging phenomenon

**Table 2** 現地観測した脈動現象の周波数特性  
Frequency characteristics of observed surging phenomenon

観測日時	平成 17 年 8 月 26 日		代表的な 周期 (S)
	10 時 20 分 10 秒～13 時 10 分 40 秒		
ポイント数	1024 個		
観測時間間隔	10 秒間		
観測点	A 幹線	No. 3 ST	200
		No. 9 ST	89
		No. 12 ST	120
	B 支線	No. 16 ST	158
		No. 20 ST	205
	C 支線	No. 25 ST	158
No. 27 ST		158	

おける呑口のシール高が不足する水路構造であることから、脈動現象の始まりは、シール高不足に起因して管内に連行した空気がブローバック現象を起こして流量の微小変動を引き起こしたことによると推察した。また、代表的な固有周期があり、各スタンド間において概ね一致していることから、上流側スタンドにおいて開始した水面の震動が、M 調整池を経由しなかった場合では、幹線の下流側や支線のスタンドにおいて増幅したと推察した。

**IV 周波数応答法**

周波数応答法は、オープンタイプパイプラインの運動方程式をラプラス変換して、その伝達関数を求め、入力信号として流量変動を与えた場合に、伝達関数を通して流量変動がどのように変化するかを検討を行うことを目的とする。

Edward et al. (1852) による導出方法に従い、既設のスタンドと管路による水路構造と通水量を入力して伝達関数を求めた。オープンタイプパイプラインの水路システムは、Fig.7 に示すような上流側スタンドの二次水槽と下流側スタンドの一次水槽が U 字管の水路構造を形成した要素が連結して構成されている。この U 字管水路に流れる流体が剛体であると仮定すると、流れの状態方程式は次式になる。

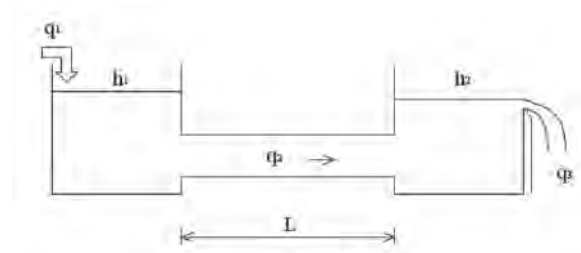
$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_1 - q_2}{P_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{g}{L} \left( h_1 - h_2 - f \frac{v_2^2}{2g} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{q_2 - q_3}{P_2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$q_2 = v_2 A \dots\dots\dots (4)$$



**Fig.7** U 字管の水路構造を形成した要素  
The element which formed the water channel structure of the U-tube

$$q_3 = C_w B (h_2 - W)^{1.5} \dots\dots\dots (5)$$

A: 管の断面積, L: 管の延長, P<sub>1</sub>: 上流側水槽の面積, P<sub>2</sub>: 下流側水槽の面積, B: 堰幅, C<sub>w</sub>: 堰の越流係数, g: 重力加速度, W: 堰の高さ, f: 摩擦損失係数 (マンニングの公式) である。ただし、管の摩擦損失係数 f は、管路の水理計算ではヘイゼン・ウィリアムズの公式の係数を用いることが一般的であるが、本稿では、関谷の方法に従ってマンニングの公式の係数とし、値は 0.012 とした。

次に、(2) 式の運動方程式を線形化する。脈動現象は平衡状態からの変動であると見なすと、水深 h, 流速 v, および流量 q の変動を大文字 H, V, および Q で表し、添え字 m で平衡値を表して、(2) 式の運動方程式の摩擦項 (右辺第 3 項) を線形化すると次式になる。

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{P_1} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{g}{L} (H_1 - H_2 - FV_2) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{Q_2 - Q_3}{P_2} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$Q_2 = V_2 A \dots\dots\dots (9)$$

$$Q_3 = KH_2 \dots\dots\dots (10)$$

$$K = 1.5 C_w B \sqrt{h_{2m} - W} \dots\dots\dots (11)$$

$$F = fv_{2m} / g \dots\dots\dots (12)$$

(6) 式～ (8) 式をラプラス変換すると、次式になる。

$$sH_{1s} = \frac{Q_{1s} - Q_{2s}}{P_1} \dots\dots\dots (13)$$

$$sV_{2s} = \frac{g}{L} (H_{1s} - H_{2s} - FV_{2s}) \dots\dots\dots (14)$$

$$sH_{2s} = \frac{Q_{2s} - Q_{3s}}{P_2} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$$Q_{2s} = V_{2s}A \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_{3s} = KH_{2s} \dots\dots\dots (17)$$

入力  $Q_1$  と出力  $Q_3$  の比は、伝達関数  $G(s)$  と呼ばれる。

$$G(s) = \frac{Q_{3s}}{Q_{1s}} \dots\dots\dots (18)$$

よって、この単純なオープンタイプパイプラインにおける1対のスタンドからなる要素の伝達関数は次式になる。

$$G(s) = \frac{Q_{3s}}{Q_{1s}} = \frac{1}{1 + as + bs^2 + cs^3} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$a = \frac{P_2}{K} + \frac{FP_1}{A} + \frac{P_1}{K} \dots\dots\dots (20)$$

$$b = \frac{P_1 P_2 F}{AK} + \frac{P_1 L}{gA} \dots\dots\dots (21)$$

$$c = \frac{P_1 P_2 L}{gAK} \dots\dots\dots (22)$$

$Q_1$  の定常応答の振動特性にのみに焦点を当てると、正弦波状に変化させて十分に時間が経過して定常状態になったときの伝達関数は、ラプラス演算子  $s$  を  $i\omega$  に置き換えて次式になる。ここで、 $i$  は虚数、 $\omega$  は角周波数とする。

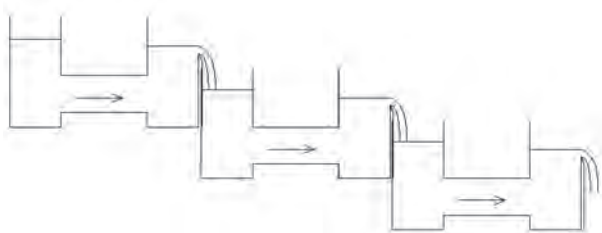
$$G_\omega = \frac{1}{1 + ai\omega + b(i\omega)^2 + c(i\omega)^3} \dots\dots\dots (23)$$

入力  $Q_1$  と出力  $Q_3$  の振幅の比は伝達関数の絶対値  $|G(s)|$  (ゲインと呼ぶ) で表される。

ゲインは通常は対数  $20 \times \log$  で表されるので、次式になる。

$$20 \log_{10} |G_\omega| = 20 \log_{10} \sqrt{\frac{(1 - b\omega^2)^2 + (-(a\omega + c\omega^3))^2}{(1 - b\omega^2)^2 + (a\omega + c\omega^3)^2}} \dots\dots\dots (24)$$

多段にスタンドが連続したオープンタイプパイプラインの水路システムは、上記の要素を連結して表すことが



**Fig.8** 多段にスタンドが連続したオープンタイプパイプライン  
The open type pipeline system in which the stand continued multistage

できる (Fig.8)。つまり、 $m$  番目下流のスタンドにおける伝達関数は、次式になる。

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{m-1} \cdot G_m \dots\dots\dots (25)$$

## V 結果と考察

解析する手順は、はじめに送水が調整池を経由しない場合について解析を行い、次に送水が調整池を経由した場合について同様の解析を行った。

### 1 連続した多段のスタンドにおける脈動特性

A 幹線と B・C 支線のオープンタイプパイプライン区間について、周波数応答法によって定常応答の固有振動特性を求めた。

流量は、最大流量が流れると考えられる時期を選定し、平成8年の7月6半月における通水量が流れている場合を設定した (Table 1)。A 幹線の上流側スタンド二次水槽の呑口において空気連行が生じて流量が変動した場合を想定し、その流量変動が正弦波として生じるものとした。

各スタンドでは上流からの流入量の変化によって下流側の流量は変化するので、多段に連続したスタンドは、上流側の応答が下流側のスタンドの入力となる。よって、上流側のスタンドの応答を下流側のスタンドの入力とした多段に連続したスタンド群の周波数特性を、A 幹線、B 支線、および C 支線の順にそれぞれ Fig.9 ~ Fig.11 に示す。

A 幹線では、下流側に行くにしたがってゲインが大きくなっていることから、振幅の増大する影響が上流側から下流側へ向かって重なり合いながら徐々に伝達していることが Fig.9 より判断できる。

同様に、B 支線と C 支線においても下流側の振幅が増大する。両支線では、A 幹線における振幅の増大の影響を受けるため、既に支線の始点となる No.13ST において、振幅の増大が大きく、その後、両支線の下流側に行くにつれて振幅がさらに増大していくことが明らかになった。この原因は、関谷が脈動増大現象の要因として指摘しているように、同程度のスタンドの寸法と管路延長が多段に連結しているため、各スタンドの水位変動の周期が重なり合ったためであると考えられる。

### 2 調整池の脈動防止効果

A 幹線、B 支線および C 支線において、M 調整池へ経由して送水した場合について前節と同じ方法で解析した。M 調整池の水面積は、実際の施設諸元より  $66,000\text{m}^2$  である。流量は、前節と同様に最大流量が流れる時期を選定した (Table 1)。

No.10ST においては、No.12ST までの小口の分水量のために本線に少量を送水し、残量を M 調整池へ送水す

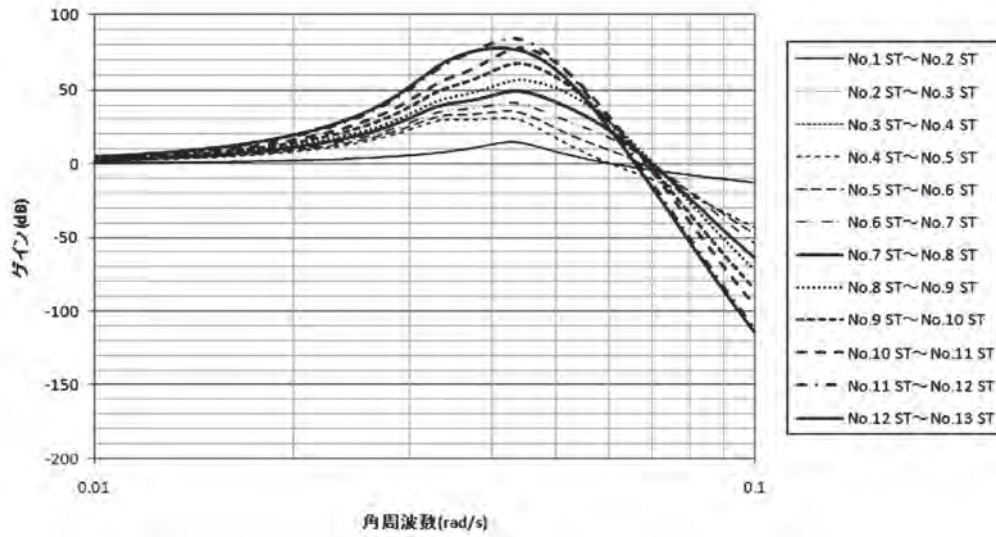


Fig.9 A 幹線の周波数特性  
Frequency characteristics of the A trunk line

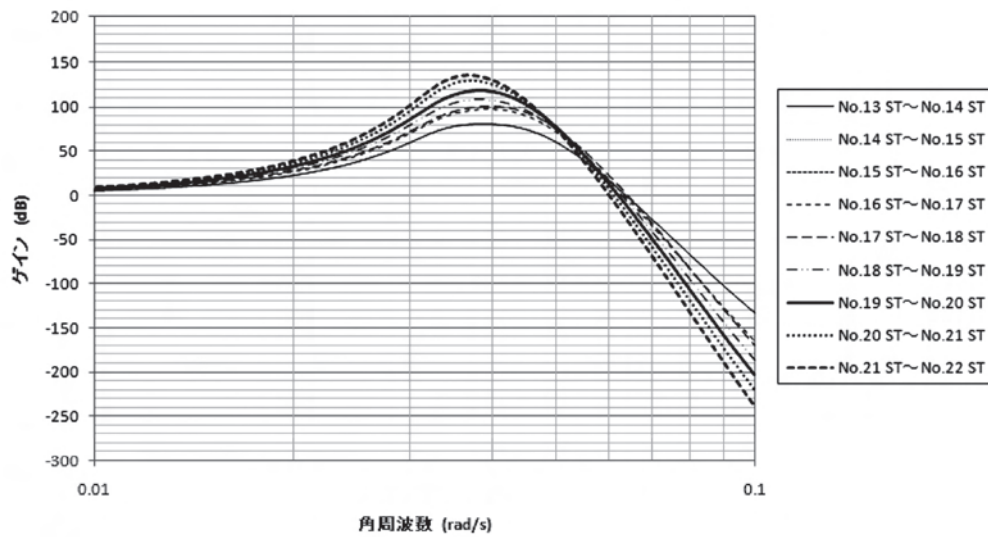


Fig.10 B 支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the B branch line

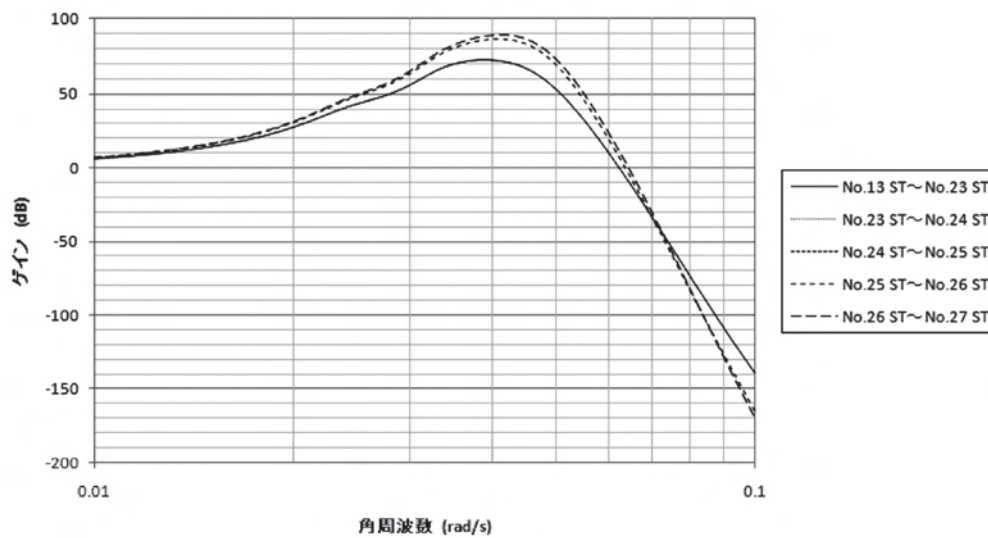
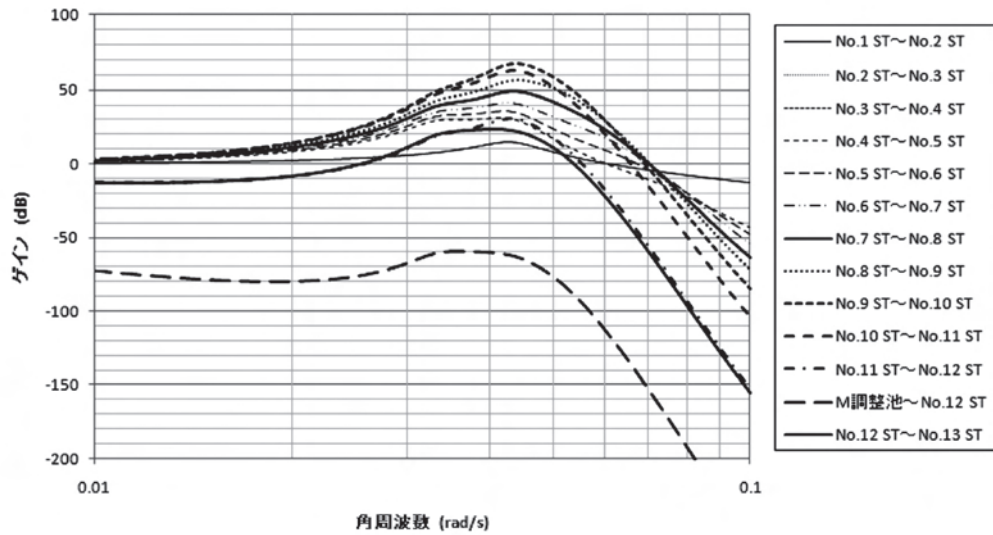
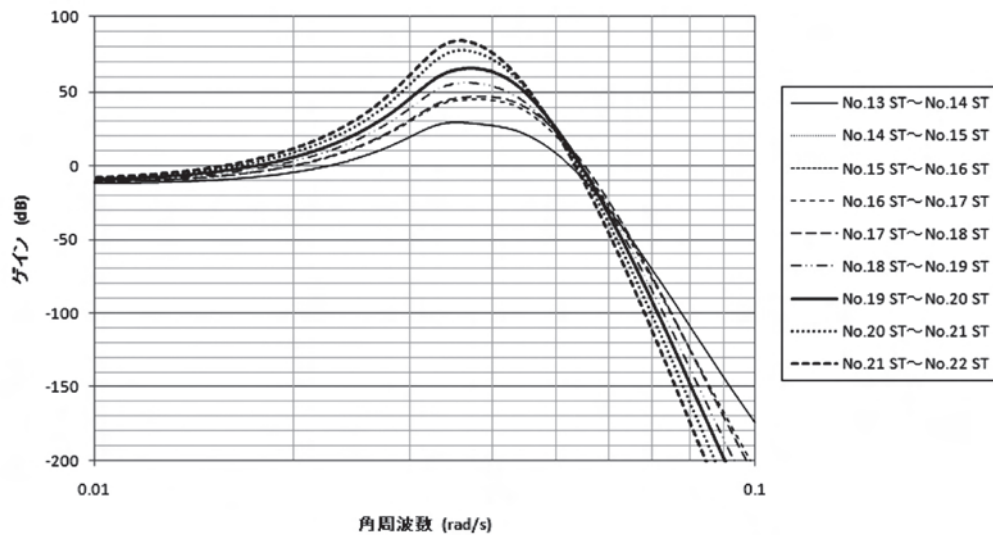


Fig.11 C 支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the C branch line

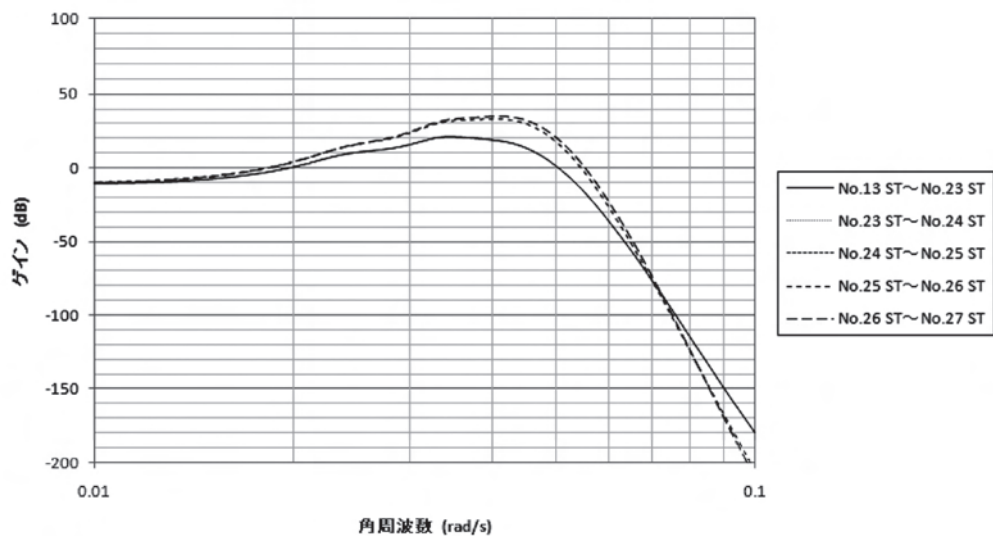




**Fig.12** A 幹線の周波数特性  
Frequency characteristics of the A trunk line



**Fig.13** B 支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the B branch line



**Fig.14** C 支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the C branch line

ることになっている。さらに、No.10STからM調整池への貯水は、余水吐からの越流となり、水理的には下流側の影響が上流には伝わらないため、No.10STとM調整池の間には脈動現象は生じない。よって、No.10STからNo.11STへはこの間の分水口の分水量のみを通水している。No.11STの分水口において、予定通り分水されれば、No.11STからNo.12STへの流量は生じないので、 $0.000001\text{m}^3/\text{s}$ として計算した。

M調整池を経由した場合のA幹線の周波数特性をFig.12に示す。同様に、B支線とC支線の周波数特性をそれぞれFig.13とFig.14に示す。

Fig.12より、A幹線では、No.12STよりも上流側はM調整池の影響は受けませんが、No.12STよりも下流側ではM調整池の影響を受け、M調整池は全周波数領域においてゲインが増大しないため、A幹線の末端であり、か

つ、支線の入り口でもあるNo.13STでは振幅が低減することが明らかになった。

B支線とC支線では、上流側STにおいて振幅が低減されている。しかし、B支線はC支線よりもスタンドの数が多いため、下流側へ向かって徐々に振幅が増大していく(Fig.13)。C支線はスタンドが少ないために振幅の増大が抑制された(Fig.14)。

次に、M調整池を経由した場合において、No.10STからNo.12STの小口の分水口から取水残量が生じて、No.12STにおける越流量が少量発生した場合を検討した。No.12STにおける越流量を $0.001\text{m}^3/\text{s}$ として、周波数応答法を行った結果を、A幹線、B支線、およびC支線の順にFig.15～Fig.17に示す。

No.12STにおける越流量が $0.001\text{m}^3/\text{s}$ と少量であっても、B支線とC支線においてゲインが大幅に増加した。

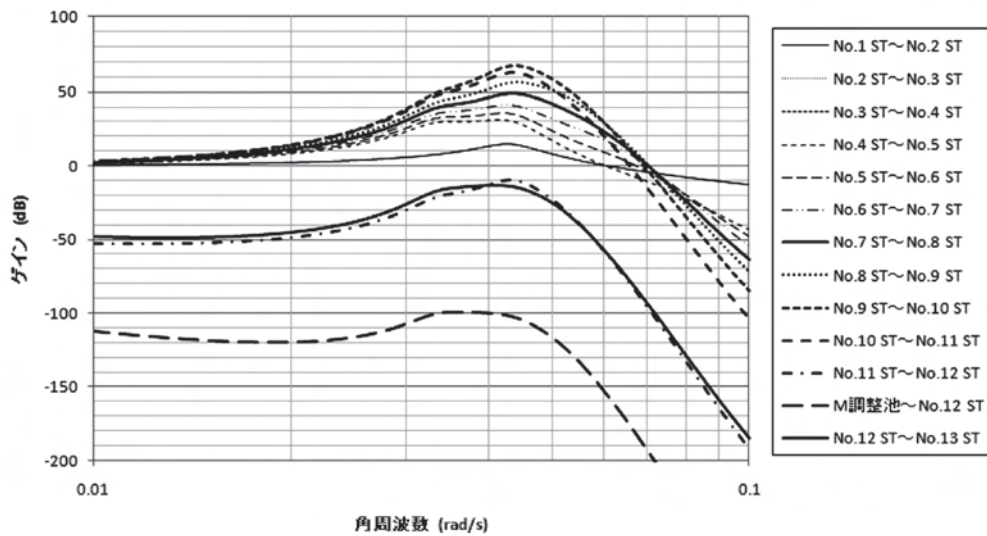


Fig.15 A 幹線の周波数特性  
Frequency characteristics of the A trunk line

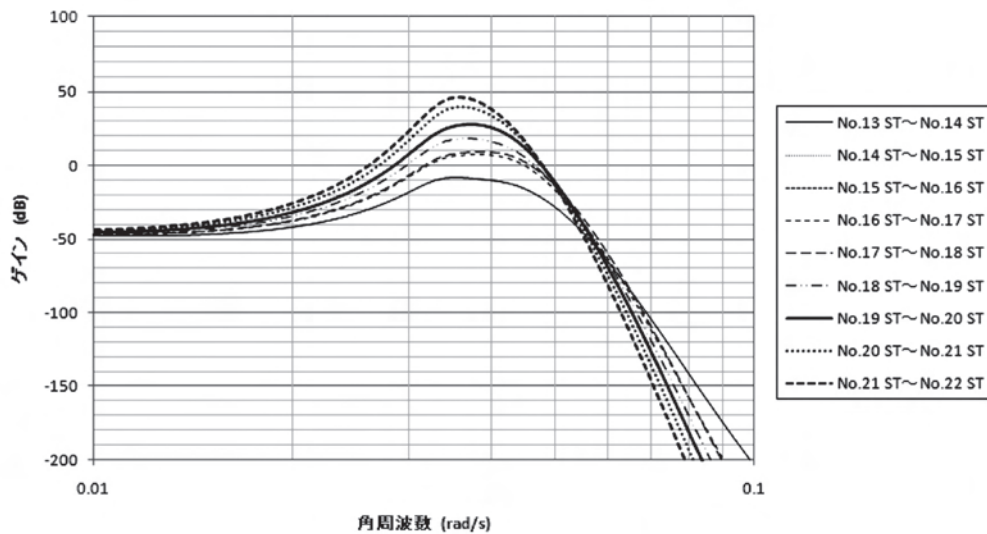


Fig.16 B 支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the B branch line

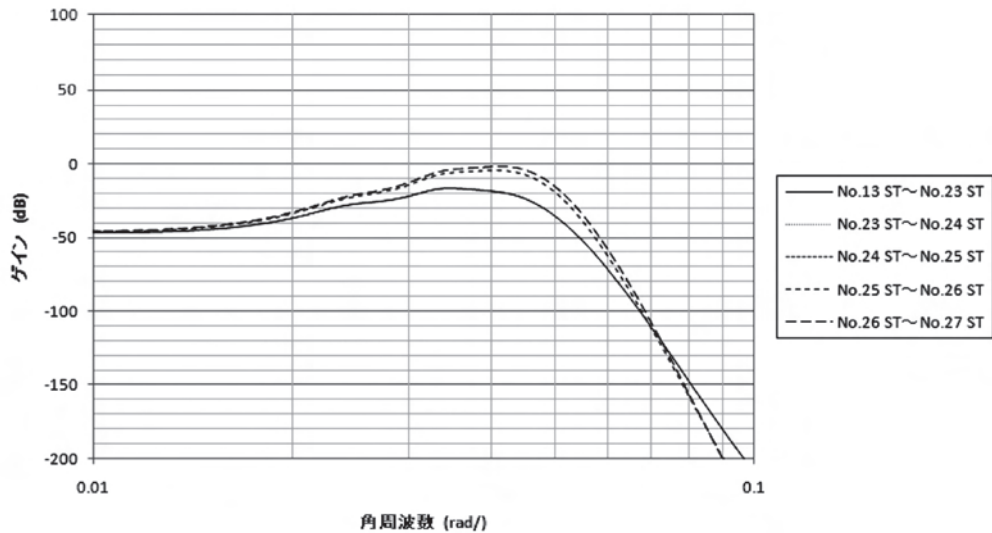


Fig.17 C支線の周波数特性  
Frequency characteristics of the C branch line

つまり、水位の振幅が増大して脈動現象が生じることが明らかになった。この傾向は、現地観測においても同様の傾向が確認されていた。よって、中間調整池による脈動現象の防止効果を発現させるためには、少量であっても調整池を経由せずに下流側に送水してはならないことが示唆された。

3 脈動防止に必要な水面積

脈動防止に必要な水面積を求める式は、関谷によって、以下のように導出された。

脈動現象による水位の変動を減勢させるためには、全周波数領域で入力と出力の比である伝達関数  $G(s)$  が 1 より小さくならなければならない。つまり、 $G_\omega$  に関する (23) 式の右辺の分母が 1 より大きければ良い。よって、分母の絶対値が 1 より大きいと次式になる。

$$\sqrt{(1-b\omega^2)^2 + (a\omega - c\omega^3)^2} > 1 \dots\dots\dots (26)$$

これを展開すると次式になる。

$$\omega^4 + \frac{(b^2 - 2ac)}{c^2}\omega^2 + \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} > 0 \dots\dots\dots (27)$$

ここで、第 2 項と第 3 項の係数を  $M$  と  $N$  とおくと、

$$M = \frac{(b^2 - 2ac)}{c^2} \dots\dots\dots (28)$$

$$N = \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} \dots\dots\dots (29)$$

次式のように整理される。

$$\omega^4 + M\omega^2 + N > 0 \dots\dots\dots (30)$$

この不等式が成り立つためには、 $M > 0$  の場合、 $N > 0$  となり、 $M < 0$  の場合、 $M^2 - 4N < 0$  となる必要がある。以下にそれぞれの場合において、上流側水槽の水面積  $P_1$  の算定方法を記す。

3.1  $M > 0$  の場合

この条件を満たすには、 $N > 0$  でなければならない。よって、

$$N = \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} > 0 \dots\dots\dots (31)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 、および  $c$  を代入すると次式に変形できる。

$$\left(\frac{P_2}{K} + \frac{FP_1}{A} + \frac{P_1}{K}\right)^2 - 2\left(\frac{P_1P_2F}{AK} + \frac{P_1L}{gA}\right) > 0 \dots\dots\dots (32)$$

これを  $P_1$  について整理すると以下の 2 次方程式になる。

$$\left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K}\right)P_1^2 + 2\left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA}\right)P_1 + \frac{P_2^2}{K^2} > 0 \dots\dots\dots (33)$$

2 次方程式の解の公式より、全周波数領域でゲインが負になるための調整池の水面積  $P_1$  は次式になる。

$$P_1 > \frac{-2\left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA}\right) \pm \sqrt{4\left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA}\right)^2 - 4\left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K}\right)^2 \frac{P_2^2}{K^2}}}{2\left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K}\right)} \dots\dots (34)$$

3.2  $M < 0$  の場合

この条件を満たすためには、 $M^2 - 4N < 0$  でなければならない。よって、

$$4N - M^2 = 4\left(\frac{a^2 - 2b}{c^2}\right) - \left(\frac{b^2 - 2ac}{c^2}\right)^2 > 0 \dots\dots\dots (35)$$

この式を展開して整理すると、次式になる。

$$8c^2 + b^3 - 4abc < 0 \dots\dots\dots (36)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 、および  $c$  に代入して式を展開し、 $P_1$  について整理する。その結果、全周波数領域でゲインが負になるための調整池の水面積  $P_1$  は次式になる。

$$P_1 > \frac{4gKAL^2P_2^2 - 4g^2ALFP_2^3}{4(g^2KLF^2P_2^2 + gK^2L^2FP_2 + g^2ALFP_2^2 + gKAL^2P_2)} - (g^3F^3P_2^3 + 3g^2KLF^2P_2^2 + 3gK^2L^2FP_2 + K^3L) \quad (37)$$

### 3.3 全周波数領域でゲインが負になるための M 調整池の水面積の算定

M 調整池と No.12ST の二次水槽との間について、上記の計算方法を適用して、全周波数領域でゲインが負になる M 調整池の水面積  $P_1$  を算定する。

ここで想定する流況は、事例地区の通水量が最大となる 7 月 6 半旬期を想定する。No.10ST から M 調整池への流入量は  $1.55\text{m}^3/\text{s}$  として、No.10ST から No.11ST への通水量はその間の分水工の分水量のみとして、No.11ST から No.12ST への通水量は無いものとした。この条件下において、導出した  $M$  を算出すると、0.16 となり正であるので、 $M > 0$  の場合の計算方法を適用して、M 調整池の水面積  $P_1$  を算定すると、No.12ST の二次水槽において脈動現象を生じさせないためには、M 調整池の水面積を  $6,890\text{m}^2$  以上確保することが必要である。M 調整池の水面積は  $66,000\text{m}^2$  であることから、脈動現象の防止に十分効果があったことが示唆された。

## VI 結 言

周波数応答法を用いて、オープンタイプパイプラインシステムにおける一対のスタンドの流入と流出をシステムの入力と応答の関係とみなし、そのゲインを解析することによって、スタンド間の脈動現象が増幅を検討した。脈動現象の影響は下流側へ伝播するが、中間調整池によって下流側の脈動現象を防止できることが、周波数応答法の結果から示唆され、同様の現象が現地試験によって確認された。よって、周波数応答解析はオープンタイプパイプラインシステムの設計において脈動現象を評価することができる有効な手法であると考えられる。事例地区では、A 幹線においては、M 調整池の水面積  $6,890\text{m}^2$

以上の確保が必要であることがわかったが、実際に M 調整池の水面積は十分確保されていたために脈動現象による水位の振幅が低減した。よって、中間調整池がオープンタイプパイプラインシステムにおける脈動現象の防止に効果を発現したと言える。ただし、十分な広さの水面積を持つ中間調整池があっても、No.12ST において越流した量が少量でもあれば、この小さな流量変動によって下流側の支線において脈動現象が増幅する傾向が現地観測と周波数応答法の両方から得られた。この水理現象は調整池の脈動防止効果を発現させるために注意すべき点である。また、周波数応答解析が、このような小さな流動変動によって生じる脈動現象も現地観測の水理現象と同じように再現することができたことは、オープンタイプパイプラインシステムの設計手法としての有効性を示すものであると考えられる。

## 参考文献

- Edward H. Taylor, A. M. Asce, Arthur F. Pillsbury, Thomas O. Ellis, and George A. Bekey (1852): Unsteady Flow in Open-type pipe Irrigation Systems, *American Society of Civil Engineers Transactions*, **2793**, 143-161
- 松下 玄 (1984): 越流スタンドの空気連行特性, 農土論集, No.110, 101-108
- 松下 玄 (1990): 越流型オープンタイプパイプラインの脈動現象について, 農土論集, No.149, 67-78
- 松下 玄 (1991): 越流型オープンタイプパイプラインの脈動対策について, 農土論集, No.149, 85-100
- 中 達雄・田中良和・向井章恵 (2003): 施設更新に対応する水路システムの性能設計, 農土誌, 71 (5), 417-422
- 農林水産省 農村振興局 (2001): 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」技術書, 584-586
- 関谷 剛 (1988): オープンタイプパイプラインのサージ特性とその低減法の解析, 農土誌, 56 (8), 765-770
- 吉野秀雄 (1984): パイプライン系のサージ現象解析のための汎用数理モデルの開発, 農土試技報, 24, 61-81



# A Case Study on Prevention Effect of Surging Phenomenon in Open Type Pipeline by Regulating Reservoir

TANAKA Yoshikazu, MUKAI Akie and TARUYA Hiroyuki

## Summary

In the open type pipeline, there is a case in which surging phenomenon is generated in proportion to the condition of structure and flow rate of water channel in usual water management. The surging phenomenon made unstable of water pressure in the stand and pipe line, and the diversion efficiency is made to lower. In addition, it is made to overflow from the stand, and the secondary damage to the circumference is caused. Using the frequency response method, whether surging phenomenon between stands in the open type pipeline attenuates or amplifies were examined. It was got that the surging phenomenon of the upstream could prevent the effect on the downstream by the Regulating Reservoir from the result of the frequency response method. However, if a little quantity water overflow to downstream without passing via the regulating reservoir, trunk line tends to amplify surging phenomenon in the branch line of the downstream.

**Keywords :** Open type pipeline, surging phenomenon, regulating reservoir, frequency response method, fast Fourier transform, Laplace transform

## 水路補修工法の性能評価に関する考察

森 充広\*・奥野倫太郎\*\*・森 丈久\*・渡嘉敷 勝\*・中矢哲郎\*

## 目 次

I 緒 言	203	1 補修工法に使用される材料の性能評価の ための試験方法の現状	210
II コンクリート製開水路の補修工法の現状	204	2 補修工法の性能評価に関する考察	220
1 補修工法の適用事例	204	IV 結 言	223
2 補修工法に見られる変状事例とその要因	204	参考文献	223
3 補修工法に要求される性能	208	Summary	225
4 補修工法適用に際するその他の留意点	209		
III コンクリート製開水路の補修工法の 性能評価に関する考察と今後の課題	209		

## I 緒 言

戦後の食糧増産時代に建設されてきた多くの農業水利施設は、機能低下が進行し、随時更新の時期が到来している。しかし、農地面積の減少や社会経済情勢の悪化、廃棄物処理問題、さらには国民への説明責任などの面から、農林水産省では、古くなった農業水利施設を取り壊して新たに再建設するのではなく、補修や補強を繰り返しながら農業水利施設を長寿命化し、ライフサイクルコストの低減を目指す“ストックマネジメント”を導入し、平成15年度から「予防保全対策事業」や「予防保全対策指導事業」などの取り組みを進めてきた。特にコンクリート製開水路については、土地改良区などの施設管理者や、各都道府県、各土地改良調査管理事務所等が中心となって機能診断を行い、構造的な劣化がない場合、旧躯体を活かした様々な補修技術が適用されている。しかし、これらの中には、施工後早期に変状が発生し、補修工法に期待していた耐久性が確保できない事態が確認されている。

一方、新設の構造物の設計に関しては、これまでの「仕様」に基づく設計ではなく、構造物に求められる「性能」を所有者あるいは管理者との協議の上で明確化し、構造物の保有性能が要求性能を満足していることを確認する設計体系である性能照査型設計への移行が進められている。性能照査型設計の利点として、ISOをはじめとする

国際標準への整合が図られる、性能達成の自由度が高まる、新材料、新技術の導入が図りやすく、低コストに貢献できる、などがあげられる。特に内在するリスクについても事前に所有者との協議を十分に行うため、説明責任が果たせることもメリットのひとつである。このような背景から、農業水利施設の補修に関しても、今後補修工法に求める性能を規定し、それを照査することによって工法を選定することになると考えられる。このためには、補修工法に要求される性能、特にその耐久性に関して照査できる技術開発が望まれている。

そこで本報では、まず、コンクリート製開水路に対して適用された補修工法に見られる変状事例を収集し、その変状発生メカニズムを推測した。これらの変状事例から、コンクリート製開水路の補修工法において要求される性能項目を明確にするとともに、コンクリート製開水路の補修を対象とした材料に要求される性能を照査するための性能評価のあり方について検討した。まず、日本工業規格（JIS）、ASTM、日本建築学会、日本下水道事業団、土木学会（JSCE）、高速道路（JHS）などの団体が規格として定められている補修材料の性能評価試験をレビューするとともに、その特徴をまとめた。そして、コンクリート製開水路の補修工法として使用実績が多い表面被覆工法および断面修復工法を取りあげ、これらの補修工法の耐久性能を照査できると考えられる性能評価試験を整理して、コンクリート製開水路の補修工法の性能を評価するための手法と今後検討すべき課題について考察した。

\* 施設資源部 水利施設機能研究室

\*\* 施設資源部 水利施設機能研究室 講習生

平成21年11月5日受理

キーワード：コンクリート製開水路、補修工法、変状、要求性能、性能評価

## II コンクリート製開水路の補修工法の現状

### 1 補修工法の適用事例

近年、コンクリート製開水路の機能回復を目的とした様々な補修技術が現地に適用されている。現場打ちコンクリート製開水路に見られる特徴的な変状は、大別すると、以下の三種類がある。一つめは、コンクリート躯体そのものに発生する変状、すなわち、ひび割れ、骨材露出、鉄筋露出、断面変形などである。二つめは、コンクリート躯体以外に発生する変状、例えば目地材の脱落、堆砂などである。三つめは、これらの要因に起因して農業用水路周辺環境に発生する変状、例えば目地材からの漏水による背面土砂の流亡などである（森ほか，2007）。このうち、コンクリート躯体そのものに発生する変状、例えばひび割れに関してはひび割れ注入材によってひび割れを充填し、劣化因子が侵入しないように補修がなされている。また、断面欠損や摩耗による表面の骨材露出等の変状に関しては、左官塗りが可能な断面修復材や、平滑性を有するパネル材料等によって表面を覆うことにより、通水性の回復を図るような対策がとられている。現地への実施も進められており、例えば、特殊軽量ポリマーセメントモルタルにビニロン短繊維を混入し、通常局所的に発生するひび割れを複数の微細ひび割れに分散させる機能を有する工法（濱田，2006；内田ほか，2009）、仮設道路の確保が難しい住宅密集地において高い施工性を発揮するFRPM板によるパネル工法（伊藤，2005；廣本，2008）、漏水防止機能と通水機能を有するポリウレタン樹脂による表面塗装工法（長嶋，2004）、水路トンネルの内面に超高強度繊維補強コンクリートパネルを施工した事例（西場，2008）、耐摩耗性とひび割れ追従性に優れた光硬化型FRPシートによる補修技術（浪花ほか，2008）などが報告されている。また、目地材の脱落などに関しても、既に様々な補修技術が研究開発（例えば、長東ほか，2007，加藤ほか，2008など）され、現地への適用が進められている。

### 2 補修工法に見られる変状事例とその要因

コンクリート製開水路の補修のため、各種の補修工法が開発され、現地適用が進められている。しかし、施工後早期に変状が発生している場合も見られる。ここでは、補修工法が適用された現地で確認された変状の事例を示し、その原因について考察する。

#### a ひび割れ

(1) 旧コンクリートのひび割れ挙動に起因するもの

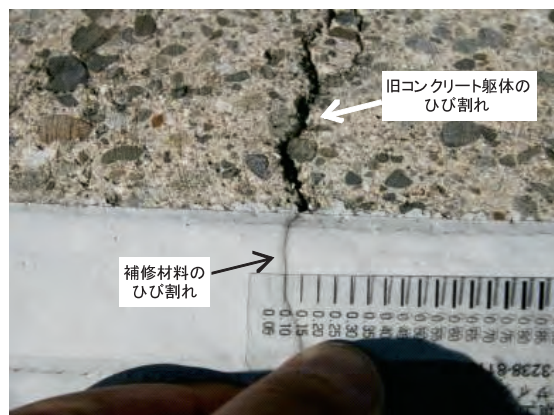
**Fig.1**に現場打ちコンクリート製開水路表面に施工された断面修復材の一種であるポリマーセメントモルタル（以降PCMと示す）に鉛直方向に発生したひび割れの状況を示す。この水路は目地間隔が10mあり、旧コンクリート躯体に既に温度の影響あるいは施工後初期の乾燥収縮によると思われる鉛直方向のひび割れが存在し

ていた。その躯体の上から、ひび割れ補修をしないまま表面にPCMを打設したため、旧コンクリート躯体のひび割れの挙動にPCMが追従できず、施工後数ヶ月でその直上でひび割れたものであると推測できる。旧コンクリート躯体の鉛直ひび割れの挙動をコンタクトゲージで測定した結果、目地と同じく、温度による伸縮、すなわち、躯体温度が上昇する日中はひび割れ幅が小さくなり、逆に躯体温度が下がる夜間にひび割れ幅が大きくなる挙動を示した。すなわち、目地間隔が10mと長い現場打ちコンクリート製開水路では、躯体を貫通している鉛直ひび割れは、目地と同様の挙動を示す可能性がある。したがって、旧躯体の鉛直方向のひび割れを補修する際には、このひび割れ部分を目地として別途処理することを検討する必要がある。**Fig.1**に示した現場も、最終的には旧躯体のひび割れ直上部で補修材料を縁切りし、市販のシーリング材で処理することで対応した。

一方、無機系のPCM以外の工法、例えば有機系補修工法やパネル工法、目地補修工法においても、ひび割れの発生が確認できる。**Fig.2**に旧コンクリート躯体のひび割れ直上部の有機系被覆材料に発生したひび割れを、**Fig.3**に目地部を跨いで施工したパネル系補修材料に発生したひび割れを、**Fig.4**にFRP製の目地補修材料に発生したひび割れを、



**Fig.1** PCMのひび割れ  
Cracks on the surface of PCM



**Fig.2** 有機系被覆材料のひび割れ  
Crack on the organic surface coating repair material



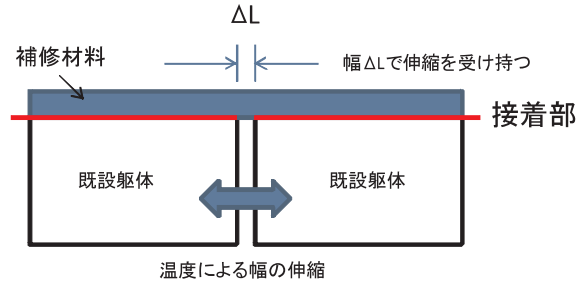


**Fig.3** パネル材料のひび割れ  
Crack on the surface of the organic panel lining material



**Fig.4** 目地補修材料のひび割れ  
Cracks on the surface of canal joint repair material

生じたひび割れの事例を示す。いずれも施工後1年未満に旧コンクリート躯体の目地部やひび割れの直上にひび割れが発生している。すなわち、旧コンクリート躯体のひび割れや目地の挙動に補修材料が追従できていないことが原因である。有機系の被覆材の場合、無機系の補修材料に比べると格段に伸び能力に優れている。それにもかかわらずひび割れが発生するのは、局部に引張応力が発生することが原因である。**Fig.5**にそのひび割れ発生メカニズムの概要図を示す。有機系補修工法において、旧コンクリート躯体との一体化性を確保するため、目地やひび割れ部を跨いで接着してしまうと、**Fig.5**に示



**Fig.5** 局部引張のメカニズム  
Mechanism of cracks of repair materials by partial tension



**Fig.6** 無付着区間の盛り上がり  
Peeling of the repair material at the section of unbonded area

す無付着領域幅 $\Delta L$ でその挙動を吸収する必要がある。しかし、この無付着領域の幅 $\Delta L$ を限りなく小さくすると、対応できる伸びの絶対量は必然的に小さくなる。例えば、 $\Delta L$ を0.2mmとすると、たとえ伸び率200%の材料であっても0.4mmの変位にしか追従できないことになる。このことから、有機系材料によって目地やひび割れ部を被覆する場合、目地やひび割れの変動量と、補修材料の伸び率に応じた無付着領域を設けることが必要となる。

しかし、無付着領域を設けることにもリスクがある。一般にコンクリート製開水路の補修は非かんがい期の施工、すなわち気温が低い状態での施工となる。したがって、非かんがい期における施工は、目地やひび割れが開いた状態で補修を行うことになる。このため、夏季に気温が上昇すると、目地あるいはひび割れは、幅が狭くなる方向に挙動し、補修材料に圧縮力が作用する。このため、補修材料が水路内面側に盛り上がり、剥がれが進行したりすることがある(**Fig.6**)。さらに、引き続き冬季に補修材料には引張力が作用し、このような挙動が年間で繰り返されることによる補修材料の疲労劣化が発



生する可能性がある。また、目地幅は一日の気温の変化に対しても変動することも確認されているため、今後はひび割れ部、目地部において施工される補修材料の疲労耐久性に関しても照査が必要となる。

以上のことから、補修工法には、その伸び能力に起因する変状が発生する可能性がある。したがって、躯体の伸縮挙動への追従性能が要求される。

## (2) 材料の特性に起因するもの

上述した鉛直ひび割れ以外にも、PCMにFig.7のような亀甲状を呈するひび割れなども見られる。これは、乾燥収縮によって施工後まもなく生じたひび割れと考えられる。PCMはもともと水セメント比W/Cを少なくした配合となっており、気温の上昇、施工時の気象条件(特に風など)、旧コンクリート躯体の乾燥などによって、水分が奪われやすい状態となると、乾燥収縮によるひび割れが発生しやすくなる。

有機系の目地材にも、上述した亀甲状のひび割れが発生しているものがある(Fig.8)。これは、紫外線による材料自体の劣化によるものと思われる。特に高分子材料である有機系補修材料は、紫外線による劣化を受けやす



Fig.7 PCMの亀甲状のひび割れ  
Map Cracking on the surface of PCM

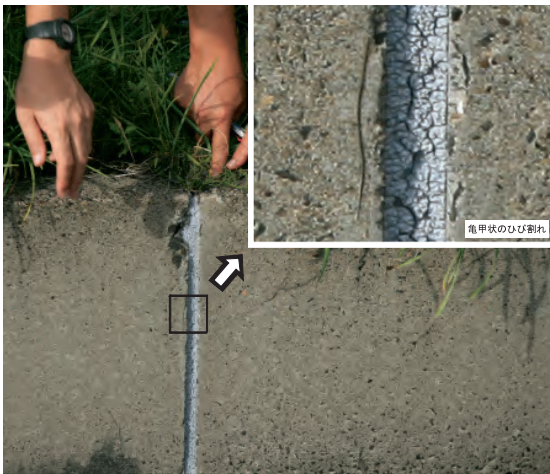


Fig.8 不定形目地材のひび割れ  
Cracks on the surface of canal joint sealants

く、紫外線によるひび割れやピンホールの発生により、その性能が低下することがあるため、注意が必要である。

## b 浮き、はく離、ふくれ、はがれ

各種補修工法に見られる変状として、旧コンクリート躯体と補修材料が一体化していない、浮き、はく離、ふくれ、はがれなどの変状も散見される。

Fig.9にコンクリート製開水路に施工した補修材料の底版の浮きの状況を、Fig.10に有機系被覆材の表面に発生したふくれの状況を示す。Fig.9のチョークでマーキングしている部分は、補修材料を施工して約1年後に行ったハンマーによる打音確認によって浮きがあると判断された箇所である。旧コンクリート躯体と補修材料との付着が十分にとれなかった場合、施工後早期に浮きが発生する。このような付着性の性能低下については、様々な要因が考えられているが、施工直後に発生しているものと施工後ある程度時間を経過した後に発生するものとで、原因は異なると考えられる。

旧コンクリート躯体との付着が十分得られない要因については、①旧コンクリートの問題、②施工上の問題点、③コンクリート製開水路の立地上の問題点、の三種類に起因するものが考えられる。

まず、①については、旧コンクリート躯体の表層の脆



Fig.9 補修材料に発生した浮き  
(斜線箇所が打音によって確認された浮きの範囲)  
Peeling of the surface of repair material  
(The oblique line shows the peeling area estimated by hammering test)



Fig.10 表面被覆材のふくれ  
Peeling of the organic surface coating repair material

弱化である。健全なコンクリートに対して十分な付着性を有する補修工法であったとしても、表層が脆弱化したコンクリートに対して接着させた場合、旧躯体の脆弱化したコンクリート層で容易にはく離し、補修材料が本来有する付着強度が得られないことがある。長期間供用された農業水利コンクリートの通水表面では、カルシウム成分が溶脱して消失している現象を確認しており（森ほか、2009）、溶脱した層の強度は著しく低下している。このような劣化部を十分除去しないまま補修材料を施工した場合などに、十分な付着強度が得られない可能性がある。これまで、コンクリート製開水路の補修においては、前処理としてコンクリート躯体表面の汚れやコケなどを落とす「洗浄」が一般的であったが、さらに高压の「ウォータージェット」によって、補修前にあらかじめ脆弱部を除去することにより、旧コンクリート躯体の健全さを露出させる必要がある。

次に②として、施工環境によるものが想定される。コンクリート製開水路の場合、地表面よりも低い位置に設置されていることが多いため、補修を行う非かんがい期には周辺の地下水がコンクリート製開水路内に湧水として流入する。補修時には、これらの湧水を処理し、乾燥させた環境で施工することが望ましい。しかし、一般に完全に遮水することが困難であり、補修材料あるいは接着材が硬化する前に湧水などにさらされ、硬化不良となり、付着力が弱まる。

コンクリート製開水路の粗度改善を目的として表面被覆材の施工を行ったある地区で、被覆材のはがれが確認された。はがれた箇所を調査した結果、施工中に目地やひび割れから湧水が発生し、その処理が困難であった施工区間にはがれなどの変状が集中していることが判明した（Fig.11）。このことから、十分な付着強度が発現する前に湧水が被覆材と躯体との間に封入され、施工当初から一体化が損なわれていた可能性があることが判明した。このことから、湧水状況は、補修工法選定に大きな影響を与える重要なチェックポイントとなる。

また、コンクリート製開水路では、摩耗による凹凸が著しい条件で施工することが多い。このような条件では、粗骨材と粗骨材との間にきっちり補修材料を充填することが難しく、その部分が気泡として残る。この部分が未付着部分として存在し、水圧が作用したり、あるいは熱（反応熱や太陽熱等）による体積膨張をおこしたりすることで、ふくれが広がる。Fig.12に左官仕上げ中に発生したPCMのふくれの状況を示す。左官職人に聞き取ったところ、左官仕上げにおいて、摩耗による凹凸が著しい場合、ふくれが発生しやすく、一度仮仕上げをした段階でしばらく放置し、最終的にこれらのふくれをつぶしながら本仕上げをすることであった。無機系の補修材料については、硬化前にこのような処理を施しやすいが、速乾性に優れる有機系の被覆材の場合、施工後の手当は困難である。したがって、このようなふくれを発生



Fig.11 表面被覆材がはく離した箇所に見られた湧水処理の痕跡

Trace of the springwater processing in the canal where the peeling of organic surface coating repair material was shown



Fig.12 PCM 施工時の左官仕上げ中に発生したふくれ  
Peeling of the PCM in the process of plaster finishing

させないためには、摩耗した旧コンクリート躯体表面を平滑にするための断面修復を併用する必要がある。

最後に、③としては、施工後、かんがい期に使用された水が地下水となって外部から流入したり、あるいは補修材料そのものから水が浸透あるいは欠陥部から流入したりすることにより、接着界面に水圧等の外力が作用し、付着性が失われる可能性がある。特に有機系の被覆材は、材料の伸び率が大きく、また容易にせん断されないため、ひとたびふくれ、はく離が発生すると、界面に引き剥がし力が作用し、全面におよぶ危険性がある。

### c その他の変状

有機系材料の中には、燃えやすい素材のものがある。水路脇で雑草などを野焼きした場合に、それが有機系の補修材料を燃やしてしまうことがある（Fig.13）。このため、補修した地区内には注意のための看板を設置している。このような事態を考慮し、補修工法に対して「耐火性」を要求性能として付与することも検討する必要があると考えられる。

コンクリート製開水路には、温度による挙動を吸収するための目地が設けられている。古くは、木片やアスファ





Fig.13 野焼きによる材料燃焼  
Burning of the repair material



Fig.14 不定形目地材の脱落  
Peeling of canal joint sealants

ルトなどにより、伸縮に耐えていたが、これらが劣化し、空洞化することによって、漏水が発生する。シーリング材などの不定形目地材では、肉やせしたり、あるいは旧躯体との一体化性がなくなったりした場合、流水や、目地背面からの水圧などによって不定形材料が脱落することもある (Fig.14)。

あるいは、まだ顕在化している事例はほとんど報告されていないが、無機系の補修工法の場合、流水等による摩耗を考慮する必要があると考えられる。

### 3 補修工法に要求される性能

これまでの現地調査で確認された変状の事例から、補修工法に要求される性能を考察する。

#### a 旧コンクリート躯体のひび割れ挙動への追従性

旧コンクリート躯体に鉛直方向に発生しているひび割れは、温度変化により開閉する。例えば、6.5m スパンのコンクリート製開水路の目地において、一日で約1mm、年間で約2mm 伸縮した事例が報告されている (渡嘉敷ほか, 2005)。この事例は、目地部の挙動であり、実際のひび割れではないものの、躯体コンクリートに鉛直方向に見られる貫通ひび割れは、同程度に挙動していると考えられる。したがって、ひび割れや目地の補修工法には、躯体コンクリートの温度変化によって生じる伸縮に対して追従できる性能が要求される。通常、無機系補修工法の場合、伸び能力は期待していないため、ひび割れの挙動に対する追従性は、例えば、繊維等を混入することによりひび割れを分散させる工法 (平石ほか, 2007) など、ごく一部の補修工法に要求される性能であるといえる。一方、有機系補修工法に用いられる材料は、無機系補修材料と比較すると伸び能力に優れているため、一般的にひび割れ追従性が期待される。これまで、有機系補修材料の性能値として、特に「伸び率」が重要視されてきたが、コンクリート製開水路の補修工法として性能を評価する場合、絶対値として何 mm の動きに追従できるかを照査する必要がある。また、変状を発生させないために、無付着領域を設けるなど、施工における

工夫で対応することなども想定されるため、ひび割れ追従性に加え、引張-圧縮の繰り返し状況を想定した疲労試験などによる耐久性評価技術を確立する必要がある。

#### b 旧コンクリート躯体への付着性

一般に、補修工法は、無機系および有機系補修工法を問わず、旧コンクリート躯体と一体化することによりその効果を発揮する。十分な付着が得られない場合には、浮き、はく離などの変状が発生し、これが進行するとひび割れや断面欠損に至る。したがって、コンクリート製開水路の補修工法には、旧コンクリート躯体との一体化性 (付着性) が要求される。特に、背面の地下水位が高い箇所で施工を計画している有機系の補修工法の場合は、注意が必要である。材料自体の伸び能力が大きいため、施工時にわずかに発生した未付着部分に背面からの水が供給されたとき、容易に水路内面側にふくれを生じ、かつ膨れが全体に広がる危険性がある。また、水路内面の一部にキズなどが発生した場合にも、水流による圧力等によりその部分から侵入した水が補修材料を旧躯体から引きはがす作用を生じる。したがって、無機系補修工法に比べて、有機系補修工法の付着性への依存は大きいと考えられる。ただし、背面からの水を適切に処理することにより、あえて一体化させず、旧コンクリート躯体のひび割れの挙動による変状を発生させない工法 (渡嘉敷ほか, 2005) なども考案されており、すべての有機系補修工法について要求される性能ではない。

また、目地部については、特に背面からの水圧などを受けやすい部位であるため、水圧に対して脱落しない付着性が要求される。

#### c 紫外線劣化への抵抗性 (耐候性)

有機系の補修材料は、一般に高分子系の材料であり、太陽光に含まれる紫外線により劣化する。したがって、予定供用期間中、紫外線による劣化を受けても、補修材料の性能が要求性能以上に保持されることが要求される。目地部に使用されることの多い、シーリング材料なども有機系材料であり、紫外線劣化に対する抵抗性が要求される。

#### d 温度変化への抵抗性

ひび割れ部、目地部を問わず、無機系の補修材料では、特に施工初期において、凍結融解などによるひび割れが発生しやすい。したがって、温度変化に対する抵抗性を有する必要がある。これらの変化に対する抵抗性が低い場合には、十分な性能が発揮できるまで養生期間を設ける等、施工上の工夫で対応することになる。

#### e 乾湿環境への抵抗性

無機系の補修材料では、施工直後の乾燥収縮によるひび割れが懸念される。また、有機系の補修材料では、耐湿試験（JIS K 5600 準拠）10日後の外観と曝露試験後の外観との間に相関が認められたとの報告（竈本ら、2009）があり、乾湿繰り返し環境への抵抗性が要求される。

#### f 耐摩耗性・平滑保持性

コンクリート製開水路では、旧コンクリート躯体の表面が摩耗により断面欠損し、凹凸を生じている。このため、水理性能が低下し、水利用に支障をきたしている。したがって、補修工法には、予定した供用期間中、表面が摩耗しにくい、または摩耗しても平滑性を保持する性能が要求される。設計計画基準「水路工」において、コンクリート製開水路の粗度係数は0.015で設計することになっている。しかし、補修等により表面の平滑性を改善させる場合、断面縮小を伴う補修工法などもあるため、水理特性を把握する必要がある。

#### g 劣化因子の遮断性

コンクリート製開水路の多くは、鉄筋コンクリートである。したがって、他の土木構造物と同様、中性化や塩害などの有害劣化因子が侵入することによって鉄筋が腐食し、構造的な安定性が保てなくなる。防潮水門、河口の用排水機場の基礎コンクリート、凍結防止剤が散布される道路脇のコンクリート製開水路を除けば、塩化物イオンの浸透などを考慮する必要はない。

一方、コンクリート製開水路の補修材料は、漏水防止を目的として実施されることが多い。したがって、主たる漏水の要因となるひび割れや目地からの漏水を防ぐとともに、補修材料自体も遮水性を有することが要求される。

### 4 補修工法適用に際するその他の留意点

施工後早期に見られる変状の原因として、施工に起因するもの、現場環境に起因するもの、補修材料自体の品質に起因するもの、に類型化できる。ここでは、これらの原因への対応を考察する。

#### a 施工に起因する変状への対策

施工に起因する変状の原因には、施工時の補修材料の乾燥収縮、接着面の濡れ、接着剤の養生不足、可視時間の超過、塗布量の不足、空気巻き込みなどが該当する。施工に起因する変状を防ぐためには、使用する補修材料の特性に応じた施工管理を正確に実施する必要がある。また、コンクリート製開水路の補修は、落水後の秋季か

ら冬季に施工されることが多いため、補修材料の低温下での施工性や硬化性を考慮することも必要である。

#### b 現場環境に起因した変状への対策

現場環境に起因した変状の原因には、進行性のあるひび割れ、水路背面からの浸水、旧躯体のひび割れや空隙からの水や空気の侵入などが該当する。現場環境に起因する変状については、旧躯体を診断する段階で旧躯体が置かれている現場環境や劣化状況を十分に把握出来ていなかったことが主たる原因である。したがって、今後は機能診断において、旧コンクリート躯体の置かれている現場環境について詳細な調査を行い、これらに対応できる補修工法を選定することが重要である。

#### c 補修材料自体の品質に起因する変状への対策

補修材料自体の品質に起因する変状の原因には、上述した各種性能の不足、例えば旧コンクリート躯体の挙動に対する追従性不足、温度変化による付着層のせん断、温度変化や乾湿の繰り返し、紫外線の影響、流水による磨耗による補修材料自体の劣化が該当する。補修材料自体の品質に起因する変状が発生する理由としては、補修材料が農業用水路に要求される性能を満たしていないことが考えられる。したがって、変状を防ぐためには、コンクリート製開水路が置かれる環境下で補修材料が有すべき性能を明確にし、農業用コンクリート開水路の置かれる環境条件を考慮した性能評価手法を確立する必要がある。

### III コンクリート製開水路の補修工法の性能評価に関する考察と今後の課題

コンクリート製開水路が置かれる環境は様々であり、補修工法には対象施設の立地環境や管理内容などによって様々な性能が要求される（森、2009）。また、補修工法は、対象とする施設の劣化の状況により求められる性能も異なる。したがって、対象とする施設ごとに要求性能を明確化することが適切と考えられる。コンクリートの劣化因子に対する補修対策については、既にコンクリート工学分野で示されている（日本コンクリート工学協会、2009）ものの、農業水利施設、特にコンクリート製開水路の補修工法に要求される性能は明確に示されていない。このため、コンクリート製開水路の補修に適した工法が選定されず、上述した変状が発生していると考えられる。

そこで、以下では、コンクリート製開水路の補修工法に要求される性能として、先に考慮したひび割れ追従性、付着性、耐候性、温度変化に対する抵抗性、乾湿に対する抵抗性、耐摩耗性、劣化因子の遮断性に着目し、それぞれ性能に関して、日本工業規格（JIS）、ASTM、土木学会（JSCE）、日本建築学会、日本下水道事業団、高速道路（JHS）などで規定されている補修工法の性能評価に関する現状や、性能を評価するための試験方法を調査



した。これらの結果に基づき、コンクリート製開水路に用いられる補修材料としての性能評価への適用可能性について考察した。

## 1 補修工法に使用される材料の性能評価のための試験方法の現状

### a ひび割れ追従性評価のための試験方法

#### (1) 試験の概要

ひび割れの挙動に対する補修材料の追従性を評価する試験方法として、土木学会規準 (JSCE-K532, ひび割れ追従性試験) がよく用いられる。ただし、この試験方法は、あくまで引張に対する追従性を評価するものであり、コンクリート製開水路のように引張-圧縮を繰り返す環境を想定しているものではない。

#### (2) 試験方法

あらかじめ大きさが規定されている、ひび割れを有するモルタル板を対象とする補修材料を塗布し、モルタル板に引張力を作用させたときの伸び、追従性を確認する方法である。

#### (3) 試験体

中央部にきり欠きを有する  $120 \times 40 \times t10\text{mm}$  のモルタル基板を対象とする補修材料を塗布したものを試験体とする。モルタル基板はあらかじめきり欠き部で切断しておき、これを密着させた状態で鋼板などに固定し、その上に補修材料を塗布する。補修材料を塗布後、固定していた鋼板を取り除き、モルタル基板に引張力を作用させ、補修材料の追従性、伸び状況を評価する。

#### (4) 評価方法

土木学会の表面保護工法設計施工指針 (案) では、有機系補修工法のひび割れ追従性試験の結果に基づき、補修材料を低追従 (0.15 ~ 0.40mm 未満)、中追従 (0.40 ~ 1.00mm 未満)、高追従 (1.00mm 以上) に区分して評価している (土木学会, 2005)。

### b 付着性評価のための試験方法

#### (1) 試験の概要

付着性は、補修材料と旧コンクリート躯体との一体化性能を確保する重要な性能である。付着力には、一体化させた補修材料を旧コンクリート躯体から垂直に引きはがす単軸引張試験 (建研式付着試験) と、旧コンクリート躯体に対して  $90^\circ$  あるいは  $180^\circ$  の角度を保ちながら引きはがすピール試験がある。試験の容易さから、一般に建研式が用いられ、コンクリート製開水路の補修にも建研式付着強度試験による付着強度が施工管理値として指示されることがある。

#### (2) 試験方法

表面被覆材の付着強度試験は、土木学会規準 (JSCE-K531) で規定されている。付着子と呼ばれる金属製の治具 (一般に  $40 \times 40\text{mm}$ ) を補修材料表面にエポキシ樹脂等で接着する。付着子の周囲にモルタル基板に達するようにカッターなどで切り込みを入れ、付着子を補修材



Fig.15 建研式付着試験装置による付着強度測定状況  
Measurement of bond strength by the uniaxial tensile apparatus

料に対して鉛直方向に引っ張り、荷重を計測する。

#### (3) 試験体

試験体は、 $70 \times 70 \times t20\text{mm}$  のモルタル基板に補修材料を施工したものが用いられる。また、現場での施工管理として付着強度が示されている場合には、現場の補修材料に直接付着子を接着し、Fig.15 に示す建研式付着試験装置により付着強度を測定する。

#### (4) 評価方法

付着強度は補修工法の重要な性能であることから、様々な指針、規準などで所定の付着強度を要求している。例えば、ひび割れ追従性の項目でも取りあげた土木学会の「表面保護工法設計施工指針 (案)」(土木学会, 2005) では、この試験に基づいて、一般環境における標準の付着強度を  $1.0\text{N/mm}^2$ 、柔軟環境においては  $0.7\text{N/mm}^2$  (凝集破壊) として区分することを提案している。また、常時水に没する下水道環境においては、補修材料の付着性を  $1.5\text{N/mm}^2$  以上としている (日本下水道事業団, 2007)。また、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法」(日本建築学会, 2007) においても、断面修復用 PCM の品質基準として、付着強度を標準時に  $1.0\text{N/mm}^2$ 、温冷繰り返し後も同じく  $1.0\text{N/mm}^2$  としている。

### c 耐候性評価のための試験方法

#### (1) 試験の概要

耐候性は、JIS K 5400 (塗料用語) において、「屋外で、日光、風雨、露霜、寒暖、乾燥などの自然の作用に抵抗して変化しにくい塗膜の性質」と定義されている (日本規格協会, 2001)。表面被覆材など直接自然の作用や日光に曝されるコンクリート製開水路の補修材料にとって、耐候性は、補修工法の耐久性を示す性能のひとつである。

耐候性を評価する試験方法として、促進耐候性試験がある。これは、人工光源の照射を行いながら、温度、相対湿度及び照射エネルギーの変化を含む周期的実験条件

での曝露試験方法をいい、使用される光源によって、キセノンランプ式耐候性試験、サンシャインカーボンアークランプ式耐候性試験、紫外線蛍光ランプ式耐候性試験、メタルハライド式耐候性試験等がある。

様々な分野で行われている補修材料の耐候性を評価するための試験方法を **Table 1** に示す。調査した範囲において、耐候性試験の光源は、サンシャインカーボンアークとキセノンの2種類が規定されている。サンシャインカーボンアークランプ式は、オープンな大気中で直接カーボンアークを発光させ、連続した強い紫外線を放射させる試験機を使用する試験方法であり、1950年代の後半から実用化されている。日本では、工業用塗料や汎用塗料で膨大な量のデータが蓄積されている。一方、キセノンランプ法は、希ガスであるキセノンガス中でアーク放電させ、励起されたガスが基底状態に戻るときに発光する光が太陽光に近似していることを利用する試験方法であり、1970年代から実用化されている。照射する光が太陽光に近似しているという特徴と、他の試験方法

と比べ光源が安定しており再現性が確保しやすいという特徴から、現在では促進耐候性試験の主流になりつつある（飯田ほか、2006）。

### (2) 試験方法

各機関で規定されている耐候性試験方法は、サンシャインカーボンアークランプ式もキセノンランプ法も以下の点で統一されている。

- ・連続照射を行うこと。
- ・ブラックパネル温度を 63℃ とすること。
- ・120 分間の照射中に 18 分間の水噴射を行うこと。

ただし、補修材料を評価するための総試験時間については、サンシャインカーボンアークランプ式で 250 時間（JIS A 6021）から 700 時間（JHS 417）、キセノンランプ法で 300 時間（JIS A 6909）から 3,000 時間（阪神高速道路）と規定されており、各機関により独自に設定されている。

### (3) 試験体

試験に用いる試験体は、JSCE-K 511 及び JHS 417 で、70 × 70 × t20mm のモルタル版に補修材料を塗布した

**Table 1(a)** 耐候性評価のための試験方法  
weathering test

No.	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
1	JIS A 6021-2000 建築用塗膜防水材 6.7 劣化処理後の 引張性能 b) 促進暴露処理	建築用 塗膜防水材	なし	アルミニウム合金製の支持板に試験片の上下端をくくりつけた状態で、オープンフレームカーボンアークランプ（サンシャインカーボンアークランプ）による促進暴露処理を行う。ブラックパネル温度：63 ± 3℃，スプレーサイクル：120 分間中 18 分，試験時間：250 時間。  暴露試験後の試験片は、引張試験を実施。引張試験機につかみ間が 60mm になるように試験片を取り付け、ウレタンゴム系、クロロプレン系及びゴムアスファルト系は 500mm/min，アクリルゴム系及びシーリングゴム系は、200mm/min の引張速度で、試験片が破断するまで引く張る。	・引張強さ ・破断時の伸び率 ・杭張積
2	JIS A 6021-2000 建築用塗膜防水材 6.8 伸び時の劣化 性状 b) 促進暴露処理	建築用 塗膜防水材	なし	保持具を用い、試験片の標線間距離 40mm を 60mm になるように伸長して保持した状態で、オープンフレームカーボンアークランプ（サンシャインカーボンアークランプ）による促進暴露処理を行う。ブラックパネル温度：63 ± 3℃，スプレーサイクル：120 分間中 18 分，試験時間：250 時間。	・試験片に保持具を取り付けたままでの外観観察（観察項目：試験片の変形の有無，8 倍の拡大鏡でのひび割れの有無）
3	JIS A 6909-2003 建築用仕上塗材 7.18 耐候性試験 A 法	建築用 仕上塗材	フレキシブル板	キセノンランプ法。試料面放射照度は、60W/m <sup>2</sup> （300～400nm）の連続照射を基本とする。ぬれ時間：18 分，乾燥時間：102 分，ブラックパネル温度：63 ± 3℃，乾燥期間中の相対湿度：50 ± 5%，試験時間：300 時間。	・ひび割れ及びはがれがないこと。 ・変色の程度がグレースケール 3 号以上であること。
4	JIS A 6909-2003 建築用仕上塗材 7.19 耐候性試験 B 法	建築用 仕上塗材	フレキシブル板	キセノンランプ法。試料面放射照度は、60W/m <sup>2</sup> （300～400nm）の連続照射を基本とする。ぬれ時間：18 分，乾燥時間：102 分，ブラックパネル温度：63 ± 3℃，乾燥期間中の相対湿度：50 ± 5%。試験時間：2500 時間，1200 時間，600 時間の 3 種類。	・塗膜にひび割れ，はがれ及び膨れがないこと。 ・光沢保持率は 80% 以上。 ・変色の程度がグレースケール 3 号以上。 ・白亜化の等級が 1 以下であること。

Table 1(b) 耐候性評価のための試験方法  
weathering test

No.	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
5	JSCE - K 511 - 2007 表面被覆材の耐候性試験方法	表面被覆材	モルタル板	キセノンランプ法。操作:連続運転,ブラックパネル温度:63 ± 2℃を標準とする,ぬれ時間:18分,乾燥時間:102分,乾燥期間中の相対湿度:40 ~ 60%。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・暴露試験体と現状試験体を並べ,照射による表面被覆材表面の変化(膨れ,割れ,はがれ,白亜化,光沢,色差)について測定。</li> <li>・耐候性試験終了後の試験として,JSCE-K 531 表面被覆材の付着性試験 JSCE-K 532 ひび割れ追従性試験が規定されている。</li> </ul>
6	JHS 429-2004 塗料の促進耐候性試験方法 (サンシャインカーボンアーク灯式)	塗料	鋼板	サンシャインカーボンアーク式耐候性試験機により試験。水噴射:120分間の照射中に18分間。 ①試料ホルダーに試験片を取付け,試料の製品規格に規定する時間の4分の1の時間光を照射する。 ②試料ホルダーから試験片を取り外し,試験片の上下を移し変え,製品規格に規定する時間の4分の1の時間光を照射する。 ③試験片の試料ホルダー取付位置の上下に移し変えを繰り返し,試料の製品規格に規定する時間まで光を照射する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試料の製品規格に規定する項目の試験を行い,照射による塗面の変化の程度を調べる。</li> </ul>
7	JHS 406-2007 塗料の促進耐候性試験方法	塗料	鋼板	JHS 429 に規定するサンシャインカーボンアーク式耐候性試験機により 300 時間照射する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜の外観:色むら・われ・はがれないこと</li> <li>・白亜化度:白亜化がないこと</li> <li>・光沢残存率(%), 色差:判定基準に適合</li> </ul>
8	JHS 417-2008 コンクリート塗装材の品質規格試験方法	塗装材	モルタル板	JHS 429 に規定するサンシャインカーボンアーク式耐候性試験機により 700 時間照射する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・目視により塗膜の均一性,流れ,むら,ふくれ,われ,はがれ,白亜化を調べる。</li> <li>・促進耐候性試験後の試験体を使用して,「コンクリートとの付着性試験」や「ひび割れ追従性試験」が規定されている。</li> </ul>
9	(社)日本道路協会 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説 (1984年9月)	塗装材	モルタル板	サンシャインカーボンアーク式耐候性試験機により試験。水噴射:120分間の照射中に18分間。試験時間:300時間。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗面を指頭等で軽くこすって白亜化の程度を調べ,塗膜のわれ・はがれの程度について調べる。</li> </ul>
10	阪神高速道路 道路構造物の補修要領 第2部 コンクリート構造物 第2編 コンクリート構造物 表面保護要領(平成19年1月改定) 表面保護工共通試験	表面被覆材	スレート板	JIS K 5600 7-7 (キセノンランプ法)により促進耐候試験を行う。照射時間は以下とする。 ①表面保護工法D種(高耐久)の場合:3000時間 ②表面保護工法(D種以外)の場合:1500時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・白亜化はほとんどなく,塗膜にわれ,はがれないこと。</li> </ul>
11	東京湾埠頭公社における表面被覆材の品質規格値	表面被覆材	規定なし	サンシャインカーボンアーク灯式。試験時間:300時間。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜が均一で,流れ・むら・われ・はがれないこと</li> </ul>
12	JWTCS 4003:2007 構造物用塗膜の耐候性試験評価方法	塗膜	規定なし(試験板)	キセノンランプによる。試験時間:2000時間。 なお,キセノンランプ照射時間2000時間のデータは,(財)日本ウエザリングテストセンター銚子暴露試験場において2年間屋外暴露試験を行ったデータと相関がある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光沢度</li> <li>・色差</li> <li>・A等級:耐候性が特に優れている, B等級:耐候性が優れている, C等級:耐候性がある, D等級:耐候性が劣る。</li> </ul>



ものを規定している。また、JIS A 6909では、150×50×t4mmのフレキシブル板を、JHS 406及びJHS 429では150×70×t0.8mmの鋼板を、阪神高速道路では、50×50×t4mmのスレート板をそれぞれ基板として規定しており、その基板に対象とする塗材や塗料などを塗布して試験体を作製することを規定している。なお、材料単体を試験体としているのは、今回調査した試験方法の中ではJIS A 6021（建築用塗膜防水材料）のみであった。

#### (4) 試験の評価方法

評価方法は主として目視による観察であり、外観のわれ、はがれ、白亜化の有無などについて確認することとしている。測定器を用いた測定項目として、JIS A 6909、JSCE-K 511、JHS 406、JWTCS 4003において「光沢」と「色差」が規定されている。また、モルタル板を基板としているJSCE-K 511、JHS 417では、耐候性試験後に付着試験とひび割れ追従性試験を行うことを規定しており、促進耐候性試験後の補修材料の性能低下について確認することになっている。材料単体での試験を規定しているJIS A 6021においては、促進耐候性試験前後の引張試験による伸び率の相違を確認したり、試験片を伸ばした状態で耐候性試験を実施したりすることを規定している。ただし、必要とされる性能値については、各機関で独自に定められている。

#### d 温度変化に対する抵抗性評価のための試験方法

##### (1) 試験の概要

温度変化に対する抵抗性は、気温の変化や太陽光の影響を強く受けるコンクリート製開水路にとって重要な性能である。特に、日本は冬季の寒暖の差が激しく、凍結融解の繰返し数が多いという特徴がある。このため、コンクリート製開水路では、凍結融解の繰返しによる凍害の被害が多く確認されている。このような環境で長期耐久性を確保するためには、温度変化に対する補修材料の抵抗性を評価する必要がある。

温度変化に対する抵抗性に関する各機関の試験方法をTable 2に示す。

##### (2) 試験方法

各機関で規定されている温冷繰返し試験は、水中に18時間浸漬後、3時間冷却し、その後3時間加熱するという24時間を1サイクルとする操作を10回繰返した後、養生（静置）するという方法で共通している。また、冷却温度については-20℃、加熱温度については50℃と今回調査した試験方法の全てで共通である。しかし、浸漬する水の温度については、23℃（JIS A 6021、JIS A 6909）と20℃（JIS A 6916、JIS A 1171、JSCE-K 561）の2種類がある。また、温冷繰返し後の養生については、JIS A 6021、JIS A 6909、JIS A 6916、JIS A 1171では試験室に2時間養生するとしているのに対し、JSCE-K 561では標準状態1日間としている。また、日本建築学会（断面修復用軽量エポキシ樹脂モルタルの品質基準（案））では、試験室に3時間以上としている。

#### (3) 試験体

温冷繰返しに関する試験に使用する試験体の全てが、基板にモルタル板を使用し、そのモルタル板に試料を塗布して試験体を作製するものである。基板となるモルタル板の大きさは、JSCE-K 561は300×300×t60mm、その他の規格は70×70×t20mmのモルタル基板となっている。JISでは、試験体の4側面をエポキシ樹脂等で塗り包むことを規定している。

#### (4) 評価方法

JIS A 6909以外の規定では、温冷繰返し試験後の付着試験が規定されている。また、温冷繰返し試験後に割れ、はがれ、膨れの有無等の目視による表面観察を規定しているのは、JIS A 6909、JIS A 6916、JHS 416、JHS 417であり、逆に温冷繰返し試験後に表面観察を規定していないのは、JIS A 6021、JIS A 1171、JSCE-K 561、日本建築学会、日本下水道事業団などの試験方法であった。

#### e 乾湿環境に対する抵抗性評価のための試験方法

##### (1) 試験の概要

コンクリート製開水路は、かんがい期に湿潤状態、非かんがい期に乾燥状態となり、これらの繰返し作用を受ける。このことから、乾湿の変化に対する補修工法の抵抗性は、コンクリート製開水路にとって重要な性能である。

乾湿環境に対する抵抗性評価のための試験方法をTable 3に示す。乾湿繰返し条件を規定している試験にはJSCE-K 561がある。一方、乾湿の繰返しではないが、JIS A 6909やJHS 417で耐湿試験が規定されている。また、土木研究所資料4042号において、コンクリートに対する乾燥湿潤試験方法が規定されている。

##### (2) 試験方法

JIS A 6024、JIS A 6909の耐湿性試験B法、JSCE-K 561における試験条件は、24時間を1サイクルとし、JIS A 6024およびJIS A 6909の耐湿性試験B法においては3サイクル（72時間）、JSCE-K 561においては10サイクル（240時間）を試験時間としている。それぞれの試験方法では、1サイクルのうち、水中や高湿度状態を6時間、乾燥時間を18時間としている部分は共通している。しかし、乾湿繰返しとして試験方法を規定しているJIS A 6024とJSCE-K 561では、水中温度および乾燥温度を60℃としているのに対し、JIS A 6909の耐湿性試験B法では、高湿度状態および乾燥温度を50℃となっている点で、若干の相違がある。なお、同じくJHS 417では、時間を規定していないものの、高湿度状態（95%以上）の温度は50℃である。

また、試験サイクル数については、JIS A 6024およびJIS A 6909の耐湿性試験B法においては3サイクル（72時間）、JSCE-K 561においては10サイクル（240時間）である。それぞれの試験方法では、1サイクルのうち、水中や高湿度状態を6時間、乾燥時間を18時間としている部分は共通である。乾湿繰返しとして試験方法を



**Table 2(a)** 温度変化に対する抵抗性評価のための試験方法  
Tests for checking of the influence of temperature

No.	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
1	JIS A 6021-2000 建築用塗膜防水材 6.9 付着性能 6.9.2 温冷繰返し処理	建築用塗膜防水材	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	試験体を $23 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸せきした後、直ちに $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温器中で3時間冷却し、次いで $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の別の恒温器中で3時間加温し、この24時間を1サイクルとする操作を10回繰り返した後、試験室に2時間静置する。	・付着強度 (評価基準: アクリルゴム系, ウレタンゴム系, クロロプレンゴム系 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。シリコンゴム系 $0.3\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。)
2	JIS A 6909-2003 建築用仕上塗材 7.10 温冷繰返し試験	建築用仕上塗材	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	試験体を $23 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸せきした後、直ちに $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温器中で3時間冷却し、次いで $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の別の恒温器中で3時間加温し、この24時間を1サイクルとする操作を10回繰り返した後、試験室に2時間静置する。	・塗膜のひび割れ, はがれ及び膨れの有無を目視によって調べる。 ・変色及び光沢低下の程度を基準の試験体と比較する。 (評価基準: 試験体の表面に, ひび割れ, はがれ及び膨れがなく, かつ, 著しい変色及び光沢低下がないこと。)
3	JIS A 6916-2000 建築用下地調整塗材 7.17 仕上げ材が複層仕上塗材の場合の耐久性試験	建築用下地調整塗材 (仕上げ材が複層仕上塗材の場合)	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	試験体を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸せきした後取り出し、直ちに $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器内で3時間冷却した後、 $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器内で3時間加熱し、この操作を10回繰り返した後、一般養生室で2時間静置する。	・表面の割れ, 膨れ及びはがれがないこと。 ・付着強さ (評価基準: セメント系下地調整塗材 (C-1, CM-1) $0.7\text{N}/\text{mm}^2$ 以上, セメント系下地調整厚塗材 (C-2, CM-2) $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上, 合成樹脂エマルジョン系下地調整塗材 (E) $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。)
4	JIS A 1171-2000 ポリマーセメントモルタルの試験方法 7.9 接着耐久性試験	ポリマーセメントモルタル	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	試験体を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸漬した後、直ちに温度 $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器中で3時間冷却し、次いで、温度 $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器中で3時間加温する1サイクルを24時間とする温冷繰返し操作を10回繰り返す。その後、試験室に2時間静置する。	・接着強さ
5	JSCE-K 561-2003 コンクリート構造物断面修復材の試験方法 5.8 付着強度 (温冷繰返し条件)	断面修復材	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	(供試体を $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸せきした後、直ちに $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器中で3時間冷却し、次いで $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の別の恒温器中で3時間加温した状態=1サイクル)を10サイクル、その後、標準状態 (温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相対湿度50%以上) で1日間養生。	・付着強度
6	JHS 416-2004 断面修復材品質規格試験方法	断面修復材	モルタル板	JIS A 6909 (建築用仕上塗材) に従って10サイクル温冷繰返しを行う。	・目視により断面修復材の均一性, われ, はがれ, ふくれを調べる。 ・付着強さ
7	JHS 417-2008 コンクリート塗装材の品質規格試験方法	コンクリート塗装材	モルタル板	JIS A 6909 (建築用仕上塗材) に従って10サイクル温冷繰返しを行う。	・目視により断面修復材の均一性, われ, はがれ, ふくれを調べる。 ・付着強さ
8	日本建築学会 断面修復用ポリマーセメントモルタルの品質基準 (案) 1997年1月 3.8 温冷繰返し後の付着強さ試験	断面修復用ポリマーセメントモルタル	モルタル板 (4側面をエポキシ樹脂などで塗り包む。)	JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) による。	・付着強さ (評価基準: $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上)

**Table 2(b)** 温度変化に対する抵抗性評価のための試験方法  
Tests for checking of the influence of temperature

No.	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
9	日本建築学会 断面修復用軽量エポキシ樹脂モルタルの品質基準（案） 1997年1月 3.7 付着強さ試験（温冷繰返し試験体）	断面修復用軽量エポキシ樹脂モルタル	モルタル板	温冷水中繰返し（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に18時間浸漬した後取り出し、ただちに $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温槽内で3時間冷却した後、 $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温槽内で加温して1サイクルとする）を10サイクル行った後、試験室に3時間以上保存する。	・付着強さ （評価基準： $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上）
10	日本下水道事業団（素地調整材の品質試験方法） 2007年7月 8) 耐久性試験	塗布型ライニング工法に用いる素地調整材	モルタル板	JIS A 6916（建築用下地調整塗材）による。	JIS A 6916（建築用下地調整塗材）による。
11	日本下水道事業団（塗布型ライニング工法の防食被覆材（素地調整不要）の品質試験方法）2007年7月 8) 耐久性試験	塗布型ライニング工法の防食被覆材（素地調整不要）	モルタル板	JIS A 6916（建築用下地調整塗材）による。	JIS A 6916（建築用下地調整塗材）による。

**Table 3** 乾湿環境に対する抵抗性評価のための試験方法  
Tests for checking of the influence of dry or wet

No	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
1	JIS A 6024-2008 建築補修用エポキシ樹脂 6.4 接着強さ	建築補修用エポキシ樹脂	モルタル板	温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ で1日養生後、温度 $60^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ の循環式空気乾燥機中に18時間放置し、直ちに温度 $60 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温水槽中に6時間浸せきする操作を3サイクル、その後温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ で1日養生する。	・接着強さ （評価基準：硬質形エポキシ樹脂 $3.0\text{MPa}$ 以上、軟質形エポキシ樹脂 $1.5\text{MPa}$ 以上）
2	JIS A 6909-2006 建築用仕上塗材 7.24 耐湿性試験 A 法	建築用仕上塗材	フレキシブル版	清水に満たしたピーカーの中に試験体を垂直にして半分を60分間浸した後、これを引き上げて浸水させた部分の塗面を軽く指先でこすって塗面の移動状況を調べ、その後、垂直に保持した状態で、 $60 \pm 5^\circ\text{C}$ の恒温器中で24時間乾燥させる。	・浸水させた部分とそうでない部分を $1.5\text{m}$ 離れた距離から比較し、表面のひび割れ、はがれ、膨れ、しわ、変色及びつやの変化の有無を目視によって調べる。
3	JIS A 6909-2006 建築用仕上塗材 7.25 耐湿性試験 B 法	建築用仕上塗材	なし	$50 \pm 3^\circ\text{C}$ に調整した防露性試験装置の所定の位置に、軽量仕上塗材を塗り付けた面（成形時表面）を下側にして載せ、装置内温度を $50 \pm 3^\circ\text{C}$ に保って6時間経過した後、引き続き $50 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器に入れ18時間乾燥する操作を1サイクルとし、3サイクル行った後、試験室に2時間静置する。	・表面のひび割れ、膨れ及びはがれの有無を目視によって調べる。
4	JSCE-K 561-2003 コンクリート構造物断面修復材の試験方法 5.7 付着強度 （乾湿繰返し条件）	断面修復材	モルタル板	供試体の養生時：乾湿繰返し（供試体を $60 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温器中で18時間放置し、直ちに $60 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温水槽に6時間浸せきした状態＝1サイクル）を10サイクル、その後、標準状態（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50\%$ 以上）で1日間養生。	・付着強度
5	JHS 417-2008 コンクリート塗装材の品質規格試験方法	コンクリート塗装材	モルタル板	JIS A 5600に規定する回転式の湿潤箱に水平に金網を設置し、温度 $50 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $95\%$ 以上の雰囲気中で試験片の塗り面を上向きにして水平に置き、所定の期間を試験に供する。	・目視により塗膜の均一性、流れ、むら、ふくれ、われ、はがれ、白亜化を調べる。 ・付着強さ
6	コンクリートの乾燥湿潤試験方法（案） （土木研究所資料第4042号）	コンクリート	なし	乾燥は $80^\circ\text{C}$ の炉乾燥によって行い、湿潤は $20^\circ\text{C}$ の水中に浸漬することにより行う。乾燥湿潤1サイクルに要する時間は、96時間（4日）を標準とする。この場合、乾燥行程は47時間とし、1時間自然放置した後湿潤行程48時間を行うことを標準とする。 測定は、水中養生終了後の試験開始前、乾燥湿潤10サイクルまでは1～3サイクルごとに、それ以降は5サイクルを超えない間隔で行う。 試験終了は、原則として30サイクルとする。	・長さ変化 ・たわみ振動の一次共鳴振動数 ・質量

規定している JIS A 6024 と JSCE-K 561 では、水中温度および乾燥温度を 60℃としているのに対し、JIS A 6909 の耐湿性試験 B 法では、高湿度状態および乾燥温度を 50℃としている。なお、同じく耐湿試験として規定している JHS 417 では、時間を規定していないものの、高湿度状態 (95%以上) の温度として 50℃を規定している。

### (3) 試験体

JSCE-K 561 で規定されている試験体は 300 × 300 × t60mm のモルタル板である。一方、耐湿試験である JIS A 6909 の耐湿性試験 A 法においては、フレキシブル板へ対象とする塗材を塗布したものを規定しているのに対し、耐湿試験 B 法では、塗材単体での試験となっている。JHS417 では、モルタル基板への塗布を規定しており、その大きさは 70 × 70 × t20mm である。

### (4) 評価方法

評価方法は、JIS A 6909 および JHS 417 において目視による観察を規定しており、ひび割れ、膨れ、はがれなどの有無を確認することが規定されていた。また、JIS A 6024 では接着強さ試験を、JSCE-K 561 および JHS 417 では付着性試験をそれぞれ乾湿繰返しや耐湿試験後に規定していた。

## f 耐摩耗性評価のための試験方法

### (1) 試験の概要

農業水利施設を構成するコンクリートは、砂礫を含む流水にさらされるため、モルタル分が流亡し、表面の平滑性が失われる摩耗現象が劣化のひとつとして挙げられる。摩耗によるコンクリート表面の凹凸は、通水性能の低下、かぶりコンクリートの不足などの現象につながるおそれがあるため、現在、摩耗したコンクリート製開水路の表面を補修することによる通水性能の回復などが行われている。したがって、補修工法においても、このような砂礫を含む流水下で極力摩耗しないこと、また摩耗しても表面に凹凸を発生させないことが要求される。材料の耐摩耗性を評価する試験方法を **Table 4** に示す。主に建築材料を対象とした JIS A 1451 ~ 1453、塗料を対象とした JIS K 5600-5-8, 5-9、プラスチックを対象とした JIS K 7204, 7205、道路やアスファルト等を対象とした ASTM 規格のほか、必要に応じて種々改良された試験方法 (スパイクラベリング試験、掃流式摩耗試験、水流摩耗試験 (渡嘉敷ほか, 2006) など) が提案されている。

### (2) 試験方法

いずれも、試験体に何らかの外力を加えて摩耗させるものであるが、JIS, ASTM などの規格化された試験方法は、主にその外力として、研磨剤、砂、摩耗輪などの固体を用いる。それに対し、規格化されていない数多くの試験については、その対象とする材料に実際作用する外力に極力近い条件で外力を与えていることが特徴である。例えば、水流摩耗試験では、コンクリート製開水路の摩耗形状を再現することを目的として、高压水流を外力としている。

### (3) 試験体

JIS K 5600-5-8 と同 5-9 については、100mm × 100mm, ASTM C 779 と同 C 944 については、φ 150mm, 厚さ 50mm の円形供試体が同一であるが、それ以外の試験方法について、試験体の寸法は統一されていない。

### (4) 評価方法

摩耗による容積もしくは重量を評価値としている。ASTM C 1138 では、摩耗深さ、水流摩耗試験では摩耗深さに加え、骨材の凹凸の形状を示す表面粗さ変化を指標として加えている。

## g 劣化因子の遮断性評価のための試験方法

コンクリートの代表的な劣化である中性化や塩害、アルカリシリカ反応などは、二酸化炭素や塩化物イオン、水などの劣化因子が侵入することによって発生する。これら劣化因子の遮断は、表面被覆工法に求められる重要な性能である。コンクリート製開水路の置かれる環境を想定した場合、反応性骨材の使用等の特定の条件がなければ、ASR, 塩害などの劣化は想定されないことから、主として漏水を防止する性能が要求される。そこで、水の浸透を防ぐ遮水性に関する性能として、透水性に関する試験方法を整理した。

### (1) 試験の概要

透水性とは、補修材料の水の透過性能であり、必要な農業用水を目的地まで過不足なく運搬するという機能を有するコンクリート製開水路にとって重要な性能である。また、水を遮断することにより、コンクリートのアルカリシリカ反応や、補修材の浮きを抑制することができ、結果的に施設の長寿命化といった補修工法の目的を果たすことが出来る。

透水性を評価するための試験方法を **Table 5** に示す。透水性に関する試験は、JIS や JSCE, 下水道において、規定されており、高速道路関係の機関での規定はない。

### (2) 試験方法

試験方法には、直接試験体に一定の水圧をかける方法や、試験体に接着した漏斗などに水を入れ一定時間経過後の水頭差を読み取るものなどが規格化されている。直接一定の水圧をかける方法では、作用させる水圧について 9.8kPa (JIS A 1404 の外壁用モルタル), 100kPa (JIS A 1171), 294kPa および 0.29MPa (JIS A 1404 コンクリート用, 日本下水道事業団) の 3 種類が規定されている。水圧を作用させる時間は全て 1 時間となっている。一方、水頭差を読み取る試験方法においては、水頭の高さは 200mm (JIS A 6909 透水試験 A 法) もしくは 250mm (JIS A 6909 透水試験 B 法, JIS A 6916) と規定されている。いずれも、直接一定の水圧をかける方法に比べると試験体に作用させる水圧は小さい。また試験時間については、JIS A 6909 の透水試験 A 法および JIS A 6916 で 1 時間、JIS A 6909 の透水試験 B 法で 24 時間と規定されている。



Table 4(a) 耐摩耗性に関する試験方法  
Tests for the residence of abrasion

No	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
1	JIS A 1451-1994 建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（回転円盤の摩擦及び打撃による床材料の摩耗試験方法）	建築材料及び建築構成部分（床材料）	石綿セメント板の平板もしくはセメントモルタル板	上底 93・下底 300・高さ 250・厚さ 10～30mm（下地材含む）の台形型試験体 8 体を、回転円盤上に試験面を同一平面上に水平に取り付け、散布砂を落下させつつ、摩擦鋼板、摩擦ブラシおよび打撃びょうの順序で、回転円盤上の試験体の摩耗を行う。摩擦鋼板荷重：71.5N、摩擦ブラシ荷重：14.7N。	・摩耗量（厚さ）変化量（mm） ・外観観察
1	JIS A 1451-1994 建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（回転円盤の摩擦及び打撃による床材料の摩耗試験方法）	建築材料及び建築構成部分（床材料）	石綿セメント板の平板もしくはセメントモルタル板	上底 93・下底 300・高さ 250・厚さ 10～30mm（下地材含む）の台形型試験体 8 体を、回転円盤上に試験面を同一平面上に水平に取り付け、散布砂を落下させつつ、摩擦鋼板、摩擦ブラシおよび打撃びょうの順序で、回転円盤上の試験体の摩耗を行う。摩擦鋼板荷重：71.5N、摩擦ブラシ荷重：14.7N。	・摩耗量（厚さ）変化量（mm） ・外観観察
2	JIS A 1452-1972 建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（落砂法）	建築材料及び建築構成部分	なし	50×50mm の試験片を、角度 45° に調整した試験片支持台に取り付け、試験片の上に研削材を高さ 650mm の位置から落下させ、試験片表面の摩耗を行う。研削材：炭化けい素研削材。研削材毎分落下量：200～400g、研削材落下総量：2000g～下地が露出するまで。	・光沢度 ・透明度 ・摩耗抵抗度（下地が露出するまでの落下回数）
3	JIS A 1453-1973 建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（研摩紙法）	建築材料及び建築構成部分	なし	φ 120mm の円形試験片を、回転する水平円盤上に取り付け、これに研摩紙を取り付けた摩耗輪を試験荷重とともに加えて、円盤上の試験片の摩耗を行う。研摩紙：溶融アルミナ研削材をクラフト紙にかわにより接着させたもの。試験荷重：280～530g。試験総回転数：500 回転。研摩紙を用いたテーバー型摩耗試験。	・外観変化 ・重量変化 ・摩耗深さ
4	JIS K 5600-5-8-1999 塗料一般試験方法－第 5 部：塗膜の機械的性質－第 8 節：耐摩耗性（研摩紙法）	塗料	なし	100×100mm の試験片を、回転盤に取り付け、これに研摩紙を取り付けた摩耗輪を試験荷重とともに加えて、試験片の摩耗を行う。研摩紙：FEPA 標準 43-GB-1984。試験荷重：最大 1kg。回転数：任意、または下地に達するのに必要な回転数。研摩紙を用いたテーバー型摩耗試験。	・摩耗減量（mg） ・下地に達するまでの回転数
5	JIS K 5600-5-9-1999 塗料一般試験方法－第 5 部：塗膜の機械的性質－第 9 節：耐摩耗性（摩耗輪法）	塗料	なし	100×100mm の試験片を、回転盤に取り付け、これに摩耗輪を試験荷重とともに加えて、試験片の摩耗を行う。摩耗輪：任意、研磨機能を一定水準に維持。試験荷重：最大 1kg。回転数：任意、または下地に達するのに必要な回転数。摩耗輪を用いたテーバー型摩耗試験。	・摩耗減量（mg） ・下地に達するまでの回転数
6	JIS K 7204-1999 プラスチック－摩耗輪による摩耗試験方法 テーバー型摩耗試験	プラスチック	なし	φ 100mm の円板か側長 100mm の正方形のコーナーを切り取った八角形板試験片を、回転盤に取り付け、これに摩耗輪を試験荷重とともに加えて、試験片の摩耗を行う。摩耗輪：小さな研削といし、試験片材質により選択。試験荷重：2.5～9.8N。回転数：任意。摩耗輪を用いたテーバー型摩耗試験。	・質量減少 ・体積減少 ・光学的な変化
7	JIS K 7205-1995 研磨材によるプラスチックの摩耗試験方法	プラスチック	なし	縦 50・横 76・厚さ 2mm 以上の試験片を、上下に間欠運動をする回転盤に取り付け、これと平行に回転する円板上に研磨材を落下させ、試験片を円板に平均に圧着させ、試験片と円板の間に研磨材を介在させながら試験片の摩耗を行う。研磨材：白色アルミナ質研削材。試験荷重：44.1N。試験片と円板の回転速度は異なる。	・摩耗質量（mg） ・摩耗量（mm <sup>3</sup> ）
8	ASTM C 418	規定なし	コンクリート等	任意寸法の試験体に、吹付け装置によりシリカ砂を試験体表面に直接吹き付け、試験体の摩耗を行う。	・容積の減少量（摩耗によって生じた空隙に粘土を充填し、その量を測定する）
9	ASTM C 779 ドーリー型摩耗試験	規定なし	なし	φ 150・厚さ 50mm（例）の円形試験体に、ドリルプレス型構造の試験装置を用い、ドレッシングホイール（B 法）やボールベアリング（C 法）により荷重を加えながら連続的に回転させることで、すべり作用、ころがり作用を加え、試験体の摩耗を行う。四角形型試験体を用いることもある。	・容積の減少量 ・質量の減少量 ・摩耗深さ（すりへり深さ）



**Table 4(b) 耐摩耗性に関する試験方法**  
Tests for the residence of abrasion

No	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
10	ASTM C 944 Rotating-Cutter 試験	規定なし	なし	φ 150・厚さ 50mm (例) の円形試験体に、ドリルプレス型構造の試験装置を用い、小型ドレッシングホイールにより荷重を加えながら連続的に回転させることで、ころがり作用を加え、試験体の摩耗を行う。	・容積の減少量 ・質量の減少量
11	ASTM C 1138	規定なし	なし	φ 305・厚さ 102mm の円形試験体を、試験容器 (高さ 457mm) の底面に設置し、容器内に注水した後、直径が異なる 3 種類の鉄球と攪拌羽根を配置し、この羽根を回転させ容器内の水に流れを起こし、鉄球を動かすことで、試験体の摩耗を行う。回転数: 1200rpm。	・容積の減少量 ・摩耗深さ
12	スパイクラベリング試験 日本道路公団 北海道開発局 金沢大学, 岩手大学 等	規定なし	なし	φ 100mm (例) の円形試験体に、ドリルプレス型構造の試験装置を用い、鋼製スパイクにより荷重を加えながら連続的に回転させることで、転がり摩擦作用を加え、試験体の摩耗を行う。試験荷重: 294N (例)。回転数: 2000 回転 (例)。	・摩耗量 (cm <sup>3</sup> ) ・摩耗重量 (g)
13	掃流式摩耗試験 三重大学 電力中央研究所	規定なし	なし	内径 130・外径 250・高さ 100mm (例) の半円環状の試験体内面に、砂を含んだ水を入れ、回転翼によって攪拌し、掃流作用を加え、試験体の摩耗を行う。回転数: 1740rpm (例)。試験時間: 8 時間 (例)。全円環状の試験体を用いることもある。	・単位摩耗量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ) ・摩耗体積 ・摩耗重量
14	衝撃摩耗試験 落下衝撃試験 電力中央研究所 岐阜大学, 香川大学, 九州産業大学, 関西大学 等	規定なし	なし	150 × 150 × 200mm (例) の試験体を、角度 20° (例) に調整して設置し、試験体の上に 536g (例) の鋼球を高さ 1000mm (例) の位置から落下させ、試験体表面の摩耗を行う。鋼球径: 51mm (例)。鋼球落下総回数: 800 回 (例)。複数の鋼球を位置を変えて 2500 回以上落下させる例もある。	・摩耗体積 ・摩耗重量 ・衝撃損失量 (cm <sup>3</sup> )
15	ロッド式すりへり試験 衝撃すりへり試験 奥田式すりへり試験 電力中央研究所	規定なし	なし	150 × 300 × 60mm の試験体 6 体を、ドラム回転保持枠に取り付け、内部にロッド (シルベップ) を投入後、注水しながらドラムを回転させ、試験体表面に衝撃作用を加え、試験体の摩耗を行う。ロッド (シルベップ) 重量: φ 20 × 40mm × 21 個 = 約 2kg。試験時間: 5 時間。回転数: 90rpm。	・摩耗量 (g) ・摩耗深さ (cm)
16	ドラム式摩耗試験 九州電力総合研究所	規定なし	なし	内径 500・外形 740・高さ 200・内曲面長さ 390mm の試験体 4 体を、傾胴式ドラム内面に沿って取り付け、摩耗材 (シルベップ) と水を入れてドラムを回転させ、試験体内曲面にすりへり作用およびころがり作用を加え、試験体の摩耗を行う。摩耗材 (シルベップ): φ 20 × 40mm, 水: 5kg。回転数: 60rpm, 30000 回転。	・単位摩耗量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
17	表面疲労摩耗試験 北海道大学	規定なし	なし	φ 150・厚さ 50mm の円形試験体を、試験容器の底面に設置し、φ 9/16 インチの鋼球 8 個を入れ、振動周波数 8Hz にて振動を与えて表面疲労作用を加え、試験体の摩耗を行う。試験時間: 60 分間。	・摩耗損失量 (g)
18	水流摩耗試験 農村工学研究所	規定なし	なし	長さ 296・幅 142・高さ 60mm の試験体 6 体を、回転ドラム内面に設置し、ドラム中央回転軸に設置した高圧水噴射ノズルから試験体に、4.9MPa, 24.1l/min の高圧水流を噴射することにより、試験体の摩耗を行う。試験時間: 28 日間。回転数: 30rpm。	・表面変化 (外観観察) ・摩耗重量変化 (g) ・摩耗深さ変化 (mm) ・表面粗さ変化 (Ln/50)
19	選択的摩耗試験 島根大学	規定なし	なし	長さ 195・幅 145・厚さ 40mm の試験体 6 体を、回転ドラムに取り付け、上部に設置された噴射口からの圧力水 (砂混入水, 2.0MPa, 88.9l/min) により、試験体の摩耗を行う。混入砂の粒径: 0.61 ~ 1.18mm。試験時間: 20 時間。回転数: 30rpm。	・摩耗体積 (mm <sup>3</sup> )

**Table 5** 透水性評価のための試験方法  
Tests for the permeability

No.	試験方法名	材料	基板	試験方法	評価項目・方法
1	JIS A 1404-1994 建築用セメント防水剤 11 透水試験	建築用セメント防水剤	なし	試験は、防水剤を混合したものと混合しないもので実施する。 ①試験体を約 80℃で一定質量となるまで乾燥する。 ②試験体の上下両面の中央に、径 5cm の透水円孔をもつ厚さ約 1cm 以上のゴムガスケットを当て、均一に締め付けた後、成形の場合の上面から外壁モルタル用では 9.8kPa、コンクリート用では 294kPa の水圧を 1 時間かける。	・透水量 (g) = 水圧をかけた直後の質量 (g) - 試験体を乾燥後 1 時間保存後の質量 (g) ・透水比 = 防水剤を混合したものの透水量 (g) / 防水剤を混合しないものの透水量 (g)
2	JIS A 6909-2003 建築用仕上塗材 7.11 透水試験 A 法	建築用仕上塗材	フレキシブル板	試験体を空洞ブロック (390 × 190 × 100mm) に載せ、試験体に透水試験装置を取り付けた後、シリンダー内に 23 ± 2℃の清水を 200mm の目盛りまでいれその時の水頭高さとして 60 分経過した後の水頭高さとの差を求める。	・透水性 (mm) = 初期の水頭高さ (mm) - 60 分経過後の水頭高さ (mm) ・評価基準：シリカ系系の外装薄塗材で 20mm 以下、その他の外装薄塗材で 10mm 以下
3	JIS A 6909-2003 建築用仕上塗材 7.12 透水試験 B 法	建築用仕上塗材	フレキシブル板	①試験体を水平に保持し、透水試験器具 (φ 75 の漏斗とメスピペットをゴム管等で連結した器具) をシリコーンシーリング材などによって止め付ける。 ② 48 時間以上放置した後、23 ± 2℃の水を試験体の表面から高さ約 250mm まで入れる。 ④そのときの水頭高さと 24 時間後の水頭の高さの差を求める。	・透水量 (ml) = 初期の水頭高さ (ml) - 24 時間後の水頭高さ (ml) ・評価基準：0.5 m l 以下
4	JIS A 6916-2000 建築用下地調整塗材 7.15 透水試験	建築用下地調整塗材	なし	①試験体を水平に保持し、研磨面の中央に透水試験器具 (水頭 250mm を保持できるもので、口径約 75mm の漏斗と 1 目盛 0.05ml のメスピペットをゴム管又は塩化ビニル管で連結した器具) をシリコーンシーリング材などによって止め付け、48 時間以上放置した後、試験体が水面下になるように水盤に沈める。 ②水盤に沈めてから 24 時間経過後、引き上げて試験体の下面が水盤の水面と一致するようにして固定して、透水試験器具の中に 20 ± 2℃の水を水面から高さ 250mm まで入れ、メスピペットの水頭を目盛を読み取る。 ③ 1 時間放置後のメスピペットの水頭を目盛を読み取る。	・透水量 (mm) = 初期の水頭高さ (mm) - 1 時間放置後の水頭高さ (mm)
5	JIS A 1171-2000 ポリマーセメントモルタル	ポリマーセメントモルタル	なし	① 80 ± 2℃で 48 時間乾燥し、デシケーター内で冷却してから質量を量る。 ②その両面の中央部径 5cm 以上を軽くブラシをかけて表皮部を除き、質量を量る。 ③試験体の上下両面の中央に、径 5cm の透水円孔をもつ厚さ約 1cm 以上のゴムガスケットを当て、均一に締め付けた後、成形の場合の上面から供試験体に 100kPa の水圧を 1 時間加えた後、質量を量る。 (JIS A 1404 に準拠)	・透水量 (g) = 透水後の質量 (g) - 乾燥後の質量 (g)
6	JSCE-K 523-2005 表面被覆材の透水量試験方法	表面被覆材	モルタル板	試験体の上下両面の中央に、径 5 cm の透水円孔をもつ厚さ約 1cm 以上のゴムガスケットを当て、均一に締め付けた後、成形の場合の上面から 294kPa の水圧を 1 時間かける。 (JIS A 1404 に準拠)	・透水量 (g) = 透水後の質量 (g) - 乾燥後の質量 (g)
7	JSCE-K 571-2005 表面含浸材の試験方法	表面含浸材	モルタル板	① JIS A 6909 の 7.13 (透水試験 B 法) に準じて、試験体の含浸面および現状試験体の試験面に透水器具を止め付けて、透水量試験を行う。なお、試験水が蒸発しないようにパラフィン等をたらして試験する。 ②試験開始時から 7 日後の水頭の高さを読み取る。	・透水量 (ml) = 試験開始時から 7 日後のメスピペットの読み (ml) - 試験開始時のメスピペットの読み (ml) ・透水比 (%) = 試験体の透水量 / 現状試験体の透水量 × 100
8	日本下水道事業団 塗布型ライニング工法の防食被服層の品質試験方法 (2007 年 7 月)	塗布型ライニング工法の防食被服層	フレキシブル板	試験体の上下両面の中央に、径 5cm の透水円孔をもつ厚さ約 1cm 以上のゴムガスケットを当て、均一に締め付けた後、成形の場合の上面からコンクリート用では 294kPa の水圧を 1 時間かける。(JIS A 1404 に準拠) ※試験前、並びに、294kPa の水圧を 1 時間かけた後、清潔な布で試験片の付着水等を拭き取った後の質量をそれぞれ測定する。	・透水量 (g) = 試験直後の質量 (g) - 試験前の質量 (g) (評価基準：A 種 0.3g 以下、B 種 0.25g 以下、C 種 0.2g 以下、D 種 0.15g 以下)

### (3) 試験体

それぞれの試験における試験体は、JIS A 1404, JIS A 6916, JIS A 1171 で材料単体での試験を、JSCE-K 523, JSCE-K 571 ではモルタル板に材料を塗布又は含浸した試験体での試験を、JIS A 6909, 日本下水道事業団ではフレキシブル板に材料を塗布した試験体での試験をそれぞれ規定している。

### (4) 評価方法

評価方法は、直接試験体に一定の水圧をかける試験方法では、水圧をかけた後の質量と水圧をかける前の質量との差を透水量 (g) として求める方法を規定している。また、水頭差を読み取る試験方法では、水頭高さを ml で読む場合には透水量 (ml), mm で読む場合には透水性 (mm) として試験前後の水頭差を求める方法を規定している。

## 2 補修工法の性能評価に関する考察

### a 他分野における補修工法の性能評価の事例

他分野においてもその施設が置かれている環境を考慮した補修工法の性能評価に関する考察が進められている。例えば、下水道分野では、硫化水素に起因する下水道コンクリート構造物の腐食・劣化に対する塗布型ライニング補修工法の品質規格に「耐酸性」および「硫黄侵入深さ」を規定している（日本下水道事業団, 2007）。これらの試験における試験体は、モルタル板 (150 × 70 × t20mm) に対象となる材料を塗布したものであり、「耐酸性」の品質試験は、所定の濃度の硫酸水溶液に所定日数浸漬後、目視観察により膨れやその他の損傷を確認することによって行う。また、「硫黄侵入深さ」の品質試験は、耐酸性の試験終了後の試験体を 10% 硫酸水溶液に 120 日間浸漬した後、試験体の中央部をモルタル用カッターによりサンプルを切り出し、切断面を EPMA (Electron Probe Micro Analyzer: 電子線マイクロアナライザー) により分析する。

また、海水による塩害を受ける港湾施設においては、補修材料に「遮断性」が求められている。例えば、東京湾埠頭公社では、表面塗装材の品質規格値として「耐海水性」や「塗膜の塩化物イオン透過量」を規定している（東京湾埠頭公社, 1994）。なお、耐海水性試験とは、塩化ナトリウムの 3% 溶液に 30 日間浸漬しても塗膜に変状がないことを確認する試験である。

鉄道や道路の分野では、補修に用いる表面被覆材料や断面修復材に要求する性能を評価するための JIS 試験方法、あるいは土木学会の試験方法を指定し、満足すべき値を規定している（土木学会, 2003）。その一例を **Table 6** に示す。ただし、これらの性能値の設定根拠について検証できていない。しかし、このような性能評価試験方法と性能値を設定することにより、発注者としては要求性能を満足する補修工法を選定しやすくなる。一方、補修工法の開発メーカーにとっても、達成すべき性

能値が明確に示されていることで、開発目標が定まる。このように、補修材料を評価するための試験方法を統一化することによる発注者・受注者間の相互メリットは大きいと考えられる。

### b コンクリート製開水路に適用可能な性能評価試験に関する検討

コンクリート製開水路の変状事例を参考に、補修材料に求められる性能として、数種類の性能を取りあげ、それを確認するために各機関が規定している試験方法を調査した。ここでは、これらの性能評価試験に関するコンクリート製開水路への適用上の留意点を述べる。

#### (1) 旧コンクリート躯体のひび割れ挙動への追従性

本試験は、あらかじめふたつの基板をまたぐように補修材料を施工し、基板自体を引っ張ることにより、ひび割れが開いた場合にも裂けることなく追従できるかを確認している。しかし、コンクリート製開水路の補修は一般に非かんがい期となる秋～冬の時期に実施されることから、ひび割れや目地間は開口した状態で施工されると考えられる。このため、夏には、間隔が施工時よりも縮まり、圧縮力を受ける。通常、無機系の補修工法の施工厚は、10mm 程度であり、圧縮力が作用すると強度が高くても破壊する危険性がある。また、ひび割れや目地の挙動は温度によって繰り返し伸び縮みし、疲労的な作用を受けることになる。今後、このような伸縮繰り返しによる疲労試験耐久性評価を取り入れる必要があると考えられる。

#### (2) 旧コンクリート躯体への付着性

各機関の試験は、原則鉛直方向の引張試験であるが、コンクリート製開水路では、流水による引き剥がし力が作用する。特に有機系被覆材の場合、キズなどにより流水が接着界面に作用すると、被覆材全体を引き剥がすことにつながるため、引き剥がし力による評価も必要となると考えられる。

#### (3) 紫外線劣化への抵抗性 (耐候性)

特に有機系の被覆材、目地材に要求される性能である。コンクリート製開水路の被覆材は、上述したように温度による挙動を受けるため、例えば JIS A 6021-2000 「建築用塗膜防水材 6.8 伸び時の劣化性状」にあるような引張力を作用させた状態で紫外線に曝露する、などの手法が活用できると思われる。有機系の被覆材表面には、耐候性を増すためのトップコートなどが施されている場合がある。しかし、コンクリート製開水路では、砂礫を含む流水によってトップコートが傷つくことも想定される。したがって、トップコートによる耐候性の性能向上をあらかじめ見込むのか、あるいはトップコートを考慮しない耐候性で評価するのかを明確にする必要がある。

#### (4) 温度変化への抵抗性

コンクリート製開水路の補修材料にも凍結融解に対する抗性が要求される。コンクリート製開水路の表面は、その色にもよるが夏場直射日光により 50℃ 以上となる。



Table 6 補修材料の性能評価の一例（土木学会，2003より抜粋，加工）  
Example of the performance evaluation of repair materials

	鉄道総合研究所	日本道路公団
塗膜の外観	JIS K 5400 7.1 塗膜が良好で、つぶ・しわ・ふくれ・われ・むら・あな・はがれがないこと	JHS 417 塗膜は均一でながれ・むら・ふくれ・はがれのないこと
耐候性	JIS K 5400 9.8.1, JSCE-K 511 サンシャインウエザオメータ 促進耐候性試験を 300 時間行ったのち、白亜化等塗膜に異常のないこと	JHS 417 促進耐候性試験を 700 時間行った後、白亜化はなく、塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと
温冷繰り返し試験	-	JHS 417 10 サイクルの試験で塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと
耐アルカリ性	JIS K 5400 7.4 30 日間飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬して塗膜に異常のないこと	-
耐水性	JIS A 6909 6.10 30 日間水中に浸漬して塗膜に異常がないこと	JHS 417 10 日間水中に半没し、塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと
遮塩性	-	JHS 417 $5 \times 10^3 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下
酸素透過阻止性	$10^{-5} \text{g/cm}^2 \cdot \text{日}$ 未満	JHS 417 $5 \times 10^2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下
水蒸気透過阻止性	JIS K 5400 8.17, JIS Z 0208 $20 \text{g/m}^2 \cdot \text{日}$ 未満	JHS 417 $5 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下
透水性	JIS A 6909 6.13 0.4ml/日以下	-
中性化阻止性	60 日間で 3mm 以下	JHS 417 1 ヶ月で 1mm 以下
コンクリートとの付着性	JIS A 6909 6.10 JSCE-K 531 標準養生後界面破壊がないこと	JHS 417 標準養生後、促進養生後、温冷繰り返し後、耐アルカリ性試験後、 $1.0 \text{N/mm}^2$ 以上
ひび割れ追従性	RC はり曲げ試験 部材に生じるひび割れ幅が 0.2mm まで塗膜に欠陥が生じないこと	JHS 417 標準養生後 20℃で 0.4mm 以上、-20℃で 0.2mm 以上、促進耐候性試験後 20℃で 0.2mm 以上

また冬季には、気温と同程度以下に下がることから、今回調査した試験の  $-20 \pm 3^\circ\text{C} \sim +50 \pm 3^\circ\text{C}$  の条件（JIS A 6916 や JIS A 1171 など）は、コンクリート製開水路の性能評価試験として活用できると考えられる。ただし、現在行われている性能評価試験における評価サイクル数は 10 サイクルと少なく、40 年の供用年数が期待されるコンクリート製開水路の耐久性を評価するためのサイクル数を考慮する必要がある。

#### (5) 乾湿環境への抵抗性

コンクリート製開水路の補修では、非かんがい期の施工ということもあり、十分な養生期間を確保できない可能性もある。特に無機系の補修材料では、施工初期の乾燥収縮が初期欠陥として発生する可能性がある。したがって、養生期間を短くした場合の乾燥収縮試験などを考える必要がある。

#### (6) 耐摩耗性・平滑保持性

摩耗は、コンクリート製開水路特有の劣化であり、補修材料にも耐摩耗性が要求される。コンクリート製開水路の摩耗のメカニズムは、詳細には解明されていないが、流水もしくは流水中に含まれる砂分によるアブレーション

ン摩耗が主と考えられる。今回の調査で得られた摩耗試験は、摩耗される供試体よりも固い材料をこすり付けたり、あるいは衝撃力として作用させたりすることによって、供試体を摩耗させる方法が大半である。しかし、コンクリートや補修材料についてこれらの試験を活用した場合、骨材の影響を大きく受ける。すなわち、骨材が強いほど耐摩耗性が良くなることになる。コンクリート製開水路では、粗骨材のみが残り、モルタル部分が欠損するような摩耗形状となることから、摩耗後の再現性の観点からは、水流摩耗試験、選択的摩耗試験などがメカニズムとリンクすると考えられる。しかし、頭首工エプロンのように巨礫が流下するような施設を対象とする場合には、衝撃による耐摩耗性を把握する必要がある。すなわち、対象とする補修材料の用途に応じて試験方法を決定する必要があると考えられる。

#### (7) 劣化因子の遮断性

一般の土木構造物の補修材料と同様、劣化因子の遮断性が要求される。コンクリート製開水路の被覆材料に関しては、水路内面からの漏水だけでなく、地下水の浸透による水路内面への膨れも想定されるため、付着性など



と合わせて評価する必要があると考えられる。

### c コンクリート製開水路の性能評価試験の確立に向けて

コンクリート製開水路には、水利用性能、水理性能、構造性能、社会的安全性能が求められる。このうち、コンクリート製開水路の補修工法に要求される性能は、安全に水を流下させ、水を漏水することなく配水する水理性能や、性能を経年にわたって持続させる構造性能などが挙げられる。さらに細分化すると、水理性能については、必要な粗度係数が経年にわたって持続されること、補修によって通水断面が阻害されないこと、計画取水位を維持できること、などが考えられる。また、構造性能に関しては、想定される劣化因子の侵入を予定供用期間にわたって防止すること、上述した性能を予定供用期間にわたって維持する耐久性などが挙げられる。

コンクリート製開水路の補修工法の性能評価においては、これら個々の性能について、まず、発注者が要求する性能と必要な性能値を明示する必要がある。したがって、補修対象とするコンクリート製開水路の状況を機能診断によって十分把握し、土地改良区等にも聞き取りをしながら、補修材料に要求する性能を明確にする必要がある。その上で、補修工法に要求する性能を決定しなければならない。一方、受注者は、発注者が明示している性能が確保できているかどうかを照査する必要がある。こうした発注者と受注者とのバランスを考慮すると、現時点では、Table 6 に示した補修材料の性能評価試験の一例のように、求める性能とその試験方法を選定し、明示することが第一段階として必要である。そのためには、農業水利施設の補修においても、補修材料に要求される性能を明らかにするために、具体的な試験方法とその試験において達成すべき目標を示すことが必要である。今回整理した各機関の試験のほとんどは、農業水利施設の補修材料の性能評価方法として流用できる。しかし、その達成基準については、未だ明確でない。したがって、現時点では、ある程度先行して性能値が決定されている事例を見ながらそれを暫定値として流用し、各地で進められている補修工法の追跡調査を行うことにより、その性能値を決定することが第二段階である。この場合、コンクリート製開水路では、常に流水に晒される環境にあること、第三者に対する影響度が小さいこと、などを考慮して、要求性能を高める、低減する、あるいは別の要求性能を掲げるなどの工夫が必要となる。

### d 補修技術の性能評価における今後の課題

一方で上記の性能評価試験を行う場合、①補修材料そのものを対象として行うか、②補修材料を基板に付着させた複合体として試験を実施するか、③数種類の試験方法のうち、どの条件の試験を採用するか、④予定供用年数と総試験時間との対応をどのように仮定するか、などを検討する必要がある。農業水利施設においては、常に流水に晒されるなど、一般の土木構造物とは異なる環境

条件において、長期間性能を発揮しなければならない。しかし、現在、このような環境条件を考慮した補修材料の耐久性試験方法は確立されていない。構造物の延命効果の評価が困難である理由として、渡嘉敷らは、現行の性能照査（性能評価試験）の対象の大部分が Fig.16 に示す A および F であるためと述べている。つまり、現時点では、①補修・補強材料自体の強度や耐候性を照査することのみで、その工法の耐久性を照査したこととする状況にある、②補修・補強の対象となる構造物は、竣工後、既に 30～40 年経過しているため、工法適用後は、新旧複合材料で構成された構造物となり、その挙動については未知の部分が多い、③現在も種々の対策工法により農業水利施設の長寿命化が図られているが、補修材料の浮きやひび割れなどの再損傷が早期に発生しているケースも見受けられる、という状況にある。したがって、今後はこれらの現象の解明も含めて、Fig.16 の G 領域、つまり、補修・補強材料、既設構造物、環境の相互作用の条件下にある工法の耐久性などを適切に評価できる試験の開発が必要であるとしている（渡嘉敷ほか、2007）。このためには、補修工事を行った直後からの経過をモニタリングすることが重要である。何らかの不具合がある場合には、施工中もしくは施工後早期に変状が発生することが多い。したがって、この時期には高い頻度で点検することが重要である。そのような場合には、原因を究明するとともに、その情報を広く農業土木技術者に情報提供することが重要である。こうした取り組みにより、同様の失敗を繰り返すことがなくなるとともに、選定した補修工法の適用範囲がより明確になると考えられる。

現在、中国四国農政局四国調査管理事務所、岩手県盛岡地方振興局（岩手県盛岡地方振興局、2009）、関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所（利根川水系土地改良調査管理事務所、2009）などが主体となり、実規模の農業用水路を使った多数の補修工法の実証試験や PR 施工が行われている。さらに、ストックマネジメント技術高度化事業により、実証試験を通じた新工法の性能評価を行う取り組みが進められているとともに、実証試験中の追跡調査結果も報告されている。このような現地実証試験による補修工法の性能評価が今後期待される。

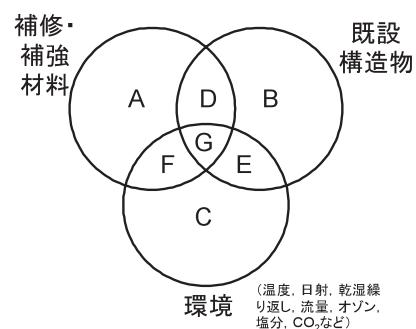


Fig.16 補修材料の性能評価の領域  
Region to evaluate the performance of repair materials

## IV 結 言

本報では、現在コンクリート製開水路の補修工法に焦点をあて、発生している変状とその要因について考察するとともに、無機系、有機系補修工法、目地補修工法に要求される性能を示した。さらに、現在、各分野で規定化されている補修材料の性能評価試験を収集し、コンクリート製開水路の補修工法としての性能規定化、性能評価試験等への適用性について考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①補修工法に見られた変状は、ひび割れ、浮き、はく離、ふくれ、はがれ、紫外線劣化、目地材の脱落等であった。
- ②補修工法の変状を防ぐためには、主として以下の性能が要求されることが示された。

無機系補修工法：旧コンクリートとの付着性、温度変化・乾燥収縮への抵抗性、耐摩耗性・平滑保持性など

有機系補修工法：旧コンクリート躯体のひび割れへの追従性、旧コンクリートとの付着性、紫外線劣化への抵抗性など

目地補修工法：目地挙動への追従性、紫外線劣化への抵抗性、旧コンクリートとの付着性など

- ③補修工法に見られた変状から、コンクリート製開水路の補修工法に対する性能として、旧コンクリート躯体のひび割れ挙動への追従性、付着性、耐候性、温度変化に対する抵抗性、乾湿環境に対する抵抗性、耐摩耗性・平滑保持性、透水性があげられた。
- ④日本工業規格 (JIS)、ASTM、土木学会 (JSCE)、日本建築学会、日本下水道事業団、高速道路 (JHS) 等で規定されている性能試験の現状を調査し、ひび割れ追従性試験、付着試験、耐候性試験、温度変化に対する抵抗性試験、乾湿環境に対する抵抗性試験、耐摩耗性試験、透水性試験、吸水試験などが規定されていることが明らかとなった。また、耐候性試験における運転条件に代表されるように、試験体、温度条件などがほぼ統一されている試験もあることが確認された。
- ⑤コンクリート製開水路の補修工法の性能評価として、補修工法に求める性能とその試験方法を選定、統一することが必要である。また、これらの性能試験結果と、実際補修工法が発揮している性能との対応を図るため、現地における試験施工による検証を行うとともに、モニタリングデータを活用して、コンクリート製開水路の性能値を決定していく作業が必要である。

なお、性能評価試験による結果と、実際の現地におけ

る追跡調査結果とを比較検証するため、現在、平成19年度に整備した複合劣化促進試験装置を用いて、各種補修材料の促進試験を実施しており、補修工法に見られる変状を再現できるような新たな試験方法の開発や、耐候性試験など促進効果が期待される性能評価試験に関して、その試験の「促進係数」を明らかにするための研究に着手し、有機系補修材料の耐候性については、評価が行える見通しが得られている (奥野ほか, 2009)。

## 謝 辞

本研究は、「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発研究」により行った研究成果の一部である。また、耐摩耗性に関する試験方法の調査については、前水利施設機能研究室講習生石神暁郎氏の協力を得た。記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土木学会 (2003)：コンクリート標準示方書 [維持管理編] に準拠した維持管理マニュアル (その1) および関連資料, p.203
- 2) 土木学会 (2005)：表面保護工法 設計施工指針 (案) [工種別マニュアル編], p.39
- 3) 濱田秀徳 (2006)：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルを使用した水路ライニング工法について, 水と土, No.146, p.55-61
- 4) 飯田眞司・高柳弘道・矢部正実 (2006)：促進耐候性試験法, 関西ペイント(株) 塗料の研究, No.145, p.22-23
- 5) 伊藤美紀雄 (2005)：FRPM 板を用いた住宅密集地域における水路再生の施工事例, 水と土, No.144, p.31-36
- 6) 岩手県盛岡地方振興局農政部農村整備室ホームページ：<http://www.pref.iwate.jp/~hp1013/sec02/tech1.html>, 2009.10
- 7) 竈本武弘・野島昭二・藤田庫雄 (2009)：コンクリート表面被覆材の耐久性向上に関する検討, コンクリート工学, Vol.47, No.2, p.30-36
- 8) 加藤智丈・岸本達也・森 充広・森 丈久・長東 勇 (2008)：ジオメンブレンを活用した目地補修工法の開発, ジオシンセティックス論文集, 23, p.253-258
- 9) 平石剛紀・坂田 昇・渡嘉敷勝・増川 晋・長東 勇 (2007)：高靱性セメント複合材料のひび割れ追従性に関する基礎実験, 農業農村工学会大会講演要旨集, p.772-773
- 10) 廣本淳史 (2008)：新工法 (FRPM 板ライニング工法) による水路改修事例について, 水と土, No.153, p.64-70

- 11) 森 充広・石神暁郎・渡嘉敷勝・増川 晋 (2007) : 農業水利コンクリート構造物に見られる変状とその要因, ARIC 情報, No.82, p.53-59
- 12) 森 充広・渡嘉敷勝・山崎大輔・加藤智文 (2009) : 長期供用された農業用水路コンクリート通水表面の変質, コンクリート工学協会年次論文集, 31 (1), p.919-924
- 13) 森 丈久 (2009) : 水利施設補修材料の品質確認試験について (第1回), JAGREE, No.77, p.33-39
- 14) 長嶋滋則, 崎山佳孝 (2004) : 特殊塗装ライニング工法によるコンクリート開水路の改修について, 水と土, No.139, p.43-49
- 15) 浪花直人・三浦信隆・長束 勇・上野和広 (2008) : 光硬化型 FRP シートを用いた三面水路更正工法の開発, 農業農村工学会大会講演要旨集, p.466-467
- 16) 長束 勇・渡嘉敷勝・森 充広・石神暁郎 (2007) : ゴム弾性を活用した水路目地補修工法の開発, 農業農村工学会論文集, 249, p.31-37
- 17) 西場 猛 (2008) : 超高強度繊維補強コンクリートパネルによる水路トンネルの補修について, 水と土, No.152, p.38-42
- 18) 日本コンクリート工学協会 (2009) : コンクリート診断技術 '09, p.228-243
- 19) 日本下水道事業団 (2007) : 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, p.38
- 20) 日本建築学会 (2007) : 鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法, p.285
- 21) 日本規格協会 (2001) : JIS A 6021 建築用塗膜防水材料
- 22) 東京湾埠頭公社 (1994) : 大井埠頭棧橋劣化調査・補修マニュアル (案) -, p.40
- 23) 奥野倫太郎・森 充広・森 丈久・渡嘉敷勝・中矢哲郎 (2009) : 促進耐候性試験による有機系表面被覆工法の耐久性照査に関する検討, 第64回農業農村工学会中国四国支部発表講演会要旨集, p.70-72
- 24) 渡嘉敷勝・石神暁郎・高橋 晃・森 充広・増川 晋・長束勇 (2005) : ジオメンブレンを用いた農業用水路の漏水補修工法の性能評価, ジオシンセティックス論文集, 20, p.171-176
- 25) 渡嘉敷勝・森 充広・増川 晋・石神暁郎・高橋晃・中川拓之 (2005) : ゴム弾性を活用した水路補修目地の追従性, 農業土木学会大会講演要旨集, p.604-605
- 26) 渡嘉敷勝・石神暁郎・森 充広・増川 晋 (2006) : 水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験, コンクリート工学年次論文集, 28 (1), p.695-700
- 27) 渡嘉敷勝・森 充広・増川 晋・中矢哲郎・石神暁郎 (2007) : 農業水利施設のマネジメント, ARIC 情報, 85, p.73-80
- 28) 利根川水系土地改良調査管理事務所ホームページ : <http://tonecho.st.wakwak.ne.jp/tonecho/osirase/consaisei.html>, 2009.10
- 29) 内田雄士・平石剛紀・坂田 昇・渡嘉敷勝・森 丈久 (2009) : 高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の農業用水路への適用, 農業農村工学会大会講演要旨集, p.472-473

# Study of Performance Evaluation Method for Repair Materials of Concrete Open Canals

MORI Mitsuhiro, OKUNO Rintaro, MORI Takehisa,  
TOKASHIKI Masaru and NAKAYA Tetsuo

## Summary

Most of concrete canals were constructed many years ago, and they have now deteriorated and no longer function well. In the case that the concrete canal does not have structural problems, some of concrete repair methods that can improve the function are adapted without the destruction of the old concrete canal. But some defective events are seen in the repair materials which were caused by the lack of the performance as the repair materials of concrete open canals.

In this study, the authors collected many defective events in the repair methods of concrete open canals, and considered the reason why the defective events were occurred. And through these samples of the defective events, both the required performances for repair methods of concrete open canals and the evaluation methods for repair materials were considered. About the evaluation methods of repair materials, we reviewed and summarized some domestic standards, such as Japanese Industrial Standard (JIS), Japan Society of civil Engineers (JSCE), Nippon Expressway Company, Japan Sewage Works Agency, and so on. After that, we proposed the test methodology to evaluate the performance of repair methods as the repair materials for concrete open canals.

**Keywords :** concrete open canal, repair method, defective events, required performance, performance evaluation



## ポラスコンクリートを通過する流れの流速と動水勾配の関係

浅野 勇\*・林田洋一\*・増川 晋\*・田頭秀和\*

## 目 次

I 緒 言	227	III 動水勾配と流速の関係式	232
II ポーラスコンクリートを通過する流れの水頭損失特性	227	1 骨材種別ごとの水頭損失推定式	232
1 実験方法	227	2 水頭損失推定式の予測精度の検証	235
2 実験結果	229	IV 結 言	239
3 考察	231	参考文献	240
		Summary	241

## I 緒 言

材料内部を水や空気が通過することがポラスコンクリート(POC)の大きな特徴である。POCを水質浄化, 沈砂池, ダムの法面対策などに活用していくためには, POC内部を通過する流れの特性を把握する必要がある。特にPOCを通過する水の流れを対象とする場合は, 流れの動水勾配と流速の関係を明らかにすることが重要である。

(社)日本コンクリート工学協会(2003)による「ポラスコンクリートの透水試験方法(案)」によれば, POCの透水特性は定水位透水試験に基づく透水係数により評価される。しかし, この試験における動水勾配の条件は0.3以下と定められているのみであり, 明確な設定値は示されていない。すなわち, 試験から求められた透水係数がどのような動水勾配で行われた試験値であるか不明である。また, 動水勾配が0.3以上の流れについては一般に検討されていない。つまり, POCの透水試験方法は広範囲な動水勾配に対応したものではなく, 動水勾配が0.3以上の領域におけるPOCを通過する流れに関する情報は極めて少ないのが現状である。

一方, POCに似通った空隙構造を有する礫あるいは砕石においては広範囲な動水勾配における透水試験が実施されており, 内部を通過する流れの動水勾配と流速の関係は非線形になることが報告されている(松尾ら, 1970; 森井ら, 2000)。空隙構造が良く似た材料を通過する流れが相似の関係になるとすれば, POCを通過する流れについても動水勾配と流速の関係は非線形になる

と考えられる。実際, 動水勾配が0.08～0.75の範囲におけるPOCの透水試験からPOCを通過する流れの動水勾配と流速の関係は非線形になることが報告されている(社)日本コンクリート工学協会, 1995)。

本研究では, 骨材種別及び空隙率が異なるPOC及び骨材単体の供試体を作成し, 供試体ごとに動水勾配を変化させた定水位透水試験を行い, 供試体を通過する流れの動水勾配と流速の関係を明らかにする。さらに, 化学工学の分野で粒状体を通過する流れの圧力低下推定式として用いられるErgunの圧力降下式(三輪, 1981)をPOCの動水勾配-流速関係に導入し, POCの内部を通過する流れの動水勾配-流速関係をPOCの空隙率及び骨材種別から推定するモデル式の作成を試みる。なお, 本研究におけるPOC供試体を通過する流れは, POCの内部が完全に水に飽和されている状態(飽和状態)を対象とする。

## II ポーラスコンクリートを通過する流れの水頭損失特性

POC供試体及び骨材単体を対象に定水位室内透水試験を行い, 供試体の動水勾配と流速の関係を求めた。

## 1 実験方法

## a 実験の概要

Table 1に実験ケースを示す。使用骨材は5号, 6号, 7号, 再生コンクリート骨材(以下RC骨材と呼ぶ)及び3号珪砂の5種類である。骨材の平均粒径 $D$ ((最小寸法+最大寸法)/2, 以下単に骨材粒径と呼ぶ)の範囲は0.19～1.65cmである。空隙率を10～30%の間で3～4段階変化させたPOC供試体を作成し, 供試体1本あたり動水勾配を7～8段階変化させて定水位室内透水試験を行い, 内部を通過する流れの動水勾配と流速の

\* 施設資源部構造研究室

平成21年11月5日受理

キーワード: ポーラスコンクリート, 非線形流れ, 水頭損失, 透水試験, 動水勾配, 流速, Ergunの式

**Table 1** 実験ケース  
Experimental conditions.

実験ケース	骨材種別	供試体	粒径 [mm]	目標空隙率 [%]	目標水位差 [mm]	目標動水勾配
C5-0	5号	骨材単体	13-20	-	30 ~ 250	0.15 ~ 1.25
C5-1		POC		10		
C5-2				20		
C5-3				30		
C6-0	6号	骨材単体	5-13	-		
C6-1		POC		10		
C6-2				20		
C6-3				30		
C7-0	7号	骨材単体	2.5-5	-		
C7-1		POC		10		
C7-2				20		
C7-3				30		
RC-0	RC	骨材単体	5-15	-		
RC-1		POC		10		
RC-2				20		
RC-3				25		
RC-4				30		
S3-0	3号珪砂	骨材単体	2.38	-		
S3-1		POC		10		
S3-2				20		
S3-3				30		

関係を求める。なお、骨材単体も同様の試験を実施する。

#### b 使用材料

骨材の物理的性質を **Table 2** に示す。5号、6号、7号砕石は茨城県新治村産の硬質砂岩を母材とする。RC骨材はコンクリート製の電柱を母材とする。3号珪砂は福島県相馬産である。セメントは高炉B種（密度  $3.04 \text{ g/cm}^3$ ）を、混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を用いた。

#### c 配合条件

骨材の実積率から骨材中の空隙量を求め、空隙量に見合ったペースト容積を計算し、POCの配合を行った。骨材の実積率を修正する補正係数は1.0とした（日本コンクリート工学協会，2003）。配合表を **Table 3** に示す。

#### d 供試体の作成及び空隙率の測定

容量55リットルのパン型強制練混ぜミキサを使用し、1バッチ当たり40リットルで練混ぜを行った。練混ぜは、（粗骨材 + 1/4の水）→（30秒練混ぜ）→（セメント投入）→（30秒練混ぜ）→（残りの3/4の水投入）→（120秒練混ぜ）→（排出），の順に行った。塩ビパイプ（内径108mm）内に試料を詰め、締め、高さ約20cmの円柱供試体を作成した。締め方法は、5号、6号及びRC供試体では3層に詰め、各層を突き棒で25回突き固めた（**Fig.1** の1）。ただし、目標空隙率30%の6号及びRC供試体では、円形圧縮板付きのこて型パイプ

**Table 2** 骨材物性  
Physical properties of the aggregates.

骨材種別	粒径 [mm]	表乾密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]	絶乾密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]	吸収率 [%]	単位容積質量 [ $\text{kg/m}^3$ ]	実績率 [%]
5号	13-20	2.67	2.65	0.71	1,632	61.0
6号	5-13	2.66	2.64	0.73	1,697	63.7
7号	2.5-5	2.66	2.64	0.75	1,657	62.2
RC	5-15	2.47	2.33	5.88	1,578	64.1
珪砂3号	2.38	2.62	2.60	1.30	1,621	63.1

注：単位容積質量、実績率は表乾での測定値。単位容積質量は珪砂のみ突き棒での締め。その他はこて型パイプを使用。

**Table 3** 配合表  
Mixture proportions of POC.

実験ケース	骨材	目標空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )			混和剤 ( $\text{kg/m}^3$ )
				W	C	G	
C5-1	5号	10	28	133	477	1,632	1.4
C5-2		20		87	312	1,632	0.9
C5-3		30		41	148	1,632	1.5
C6-1	6号	10		120	427	1,697	1.3
C6-2		20		74	263	1,697	0.8
C6-3		30		28	99	1,697	0.5
C7-1	7号	10		126	452	1,657	1.4
C7-2		20		80	288	1,657	0.9
C7-3		30		35	123	1,657	1.2
RC-1	RC	10		120	427	1,578	1.3
RC-2		20	74	263	1,578	0.8	
RC-3		25	51	181	1,578	0.5	
RC-4		30	28	99	1,578	1.0	
S3-1	珪砂3号	10	124	442	1,621	1.3	
S3-2		20	78	278	1,621	0.8	
S3-3		30	32	113	1,621	1.1	

レータ（振動数150～180Hz）により2層（1層締め時間8秒）で締め付けた（**Fig.1** の2）。7号珪砂供試体では、圧縮板を自由落下させ締め付けた（**Fig.1** の3）。供試体の養生は、材齢1日までは  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の恒温室にて湿潤養生、材齢2日以降は  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中養生とした。材齢5、6日でポーラスコンクリートの物性試験（案）（日本コンクリート工学協会，2003）に従い供試体の空隙率を測定した。その後再び水中養生し、材齢26～28日で室内透水試験を行った。供試体の外観を **Fig.2** に示す。なお、空隙率の計算に用いた供試体の気中質量は、供試体を湿潤状態で放置し、供試体の質量変化が落ち着いた放置7日後の値を用いた。供試体質量の時間変化を **Fig.3** に示す。

#### e 室内透水試験

室内透水試験はポーラスコンクリートの透水試験方法（案）（日本コンクリート工学協会，2003）に準拠して行った。試験装置の外観を **Fig.4** に概要を **Fig.5** に示す。試験ではあらかじめPOCを打設した塩ビパイプを試験装置の透水円筒に接続し、供試体の上下端に30～250mm

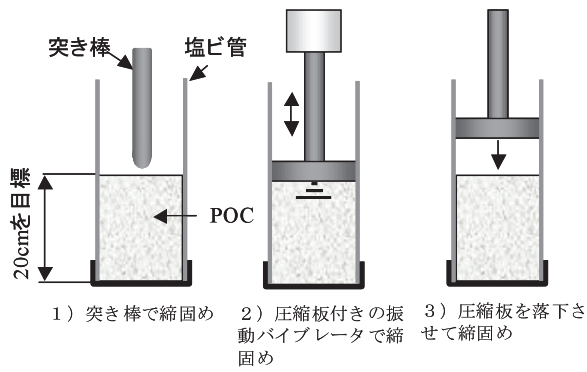


Fig.1 供試体の締め方  
Method of compaction of the specimen.

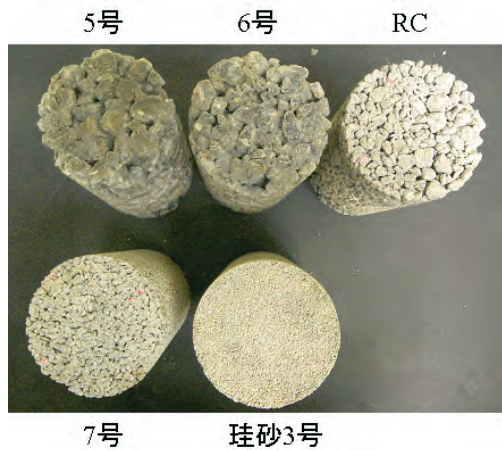


Fig.2 供試体の外観  
Outward appearance of the specimens.

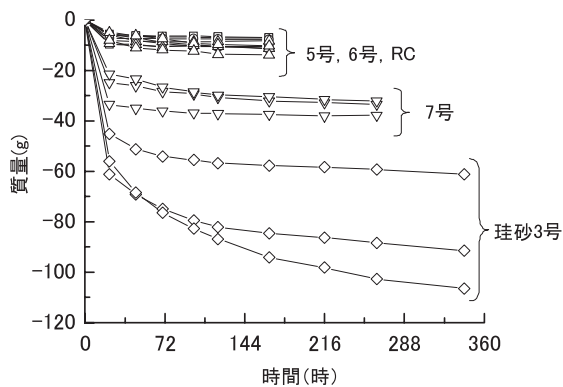


Fig.3 供試体の質量変化  
Cumulative mass of the specimens under moist curing.

(動水勾配に換算すると 0.15 ~ 1.25) の水位差を発生させた。この水位の範囲内で動水勾配を 0.1 ~ 0.2 刻みで 7 ~ 8 段階変化させ通水流量を測定した。通水流量は、容器で集水し、その質量から計算した。通水流量を集水時間と供試体の断面積で割り供試体を通過する流れのみかけの平均流速  $v$  を求めた。水位差は、ピエゾメータにより上部透水円筒と越流水槽の水位を mm 単位で読み取った。水位差及び流量は 3 回測定し、その平均値から



Fig.4 透水試験装置の外観  
Outward appearance of a permeability test apparatus.

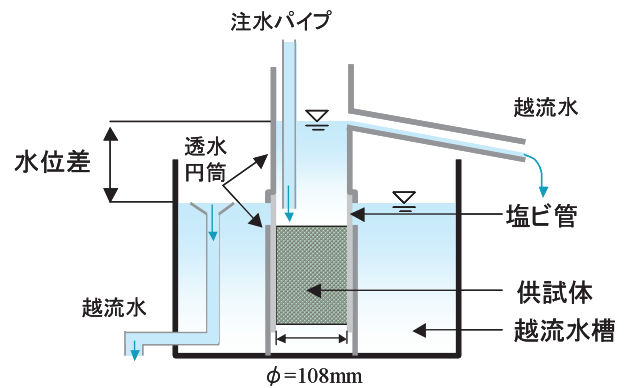


Fig.5 透水試験装置の概要  
Outline of the permeability test apparatus.

動水勾配及び流速を計算した。供試体の飽和度を高めるため、試験前に水中で供試体を通水し内部の空気を抜いた。骨材粒径が小さな 7 号及び珪砂 3 号供試体では時に念入りにこの作業を行った。試験時の水温範囲は 22 ~ 25℃であった。

骨材単体も同様の試験を行った。供試体は、底に金網を付けた塩ビ管の中に骨材を 1 層約 5cm の厚さで、4 層詰めし、高さ約 20cm の円柱供試体を作成した。各層は突き棒で 15 回突き固めた。POC 供試体と同様に供試体を水中に通水し、木づちを用いて塩ビ管の外側をたたき、内部の空気を抜き飽和度を高める準備を行った。

## 2 実験結果

### a 供試体の実測空隙率

Table 4 に供試体の空隙率の測定結果を示す。3 号珪砂 POC を除けば空隙率は目標値より 10% 程度大きくなった。骨材粒径が大きく目標空隙率が小さい供試体ほど目標値との差が大きくなる傾向が見られた。これは、骨材粒径が大きく密に詰まった供試体では突き棒による締め固めエネルギーでは締め固めが十分に行えなかったためと考えられる。なお、以下の説明では、供試体条件を区別するために骨材種別と実測空隙率を組み合わせ

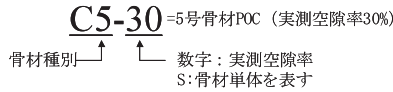


Fig.6 供試体記号  
Symbol of the specimens

Table 4 供試体の空隙率  
Measurement of void content in the specimens.

供試体記号	骨材種別	供試体	目標空隙率 [%]	実測空隙率 [%]	実験ケース
C5-S	5号	骨材単体	-	43.3	C5-0
C5-22		POC	10	21.9	C5-1
C5-32			20	31.5	C5-2
C5-39			30	39.1	C5-3
C6-S	6号	骨材単体	-	42.2	C6-0
C6-21		POC	10	21.4	C6-1
C6-30			20	29.9	C6-2
C6-31			30	30.6	C6-3
C7-S	7号	骨材単体	-	42.5	C7-0
C7-19		POC	10	19.1	C7-1
C7-26			20	25.7	C7-2
C7-32			30	31.5	C7-3
RC-S	RC	骨材単体	-	39.9	RC-0
RC-20		POC	10	19.8	RC-1
RC-27			20	26.7	RC-2
RC-30			25	29.9	RC-3
RC-33			30	32.7	RC-4
S3-S	3号珪砂	骨材単体	-	35.2	S3-0
S3-10		POC	10	9.5	S3-1
S3-13			20	13.1	S3-2
S3-26			30	26.2	S3-3

Fig.6 に示す供試体記号を用いる。

b 透水試験結果

礫を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は  $i$  を  $v$  の2次関数で表す場合と  $v$  の累乗式で表す場合がある(森井ら, 2000)。本研究では, 森井ら(2000)の研究に基づき POC を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係が式(1)の2次関数で近似できると仮定する。

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

ここで,  $i$  は供試体上下端間の動水勾配,  $v$  は流速 [cm/s],  $a, b$  は実験より求まる係数である。式(1)の物理的な意味は,  $v$  に比例する項が層流に起因する水頭損失,  $v^2$  に比例する項が乱流に起因する水頭損失を意味する。室内透水試験から求めた動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係を骨材

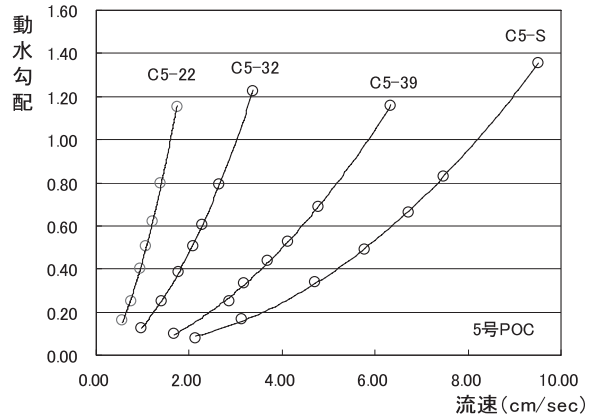


Fig.7(a)  $i - v$  の関係 (5号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.5 crushed stone).

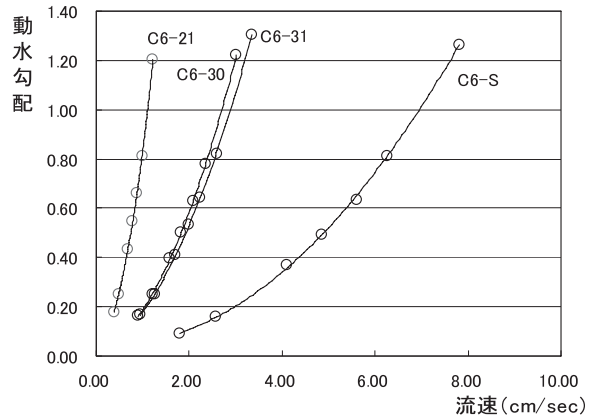


Fig.7(b)  $i - v$  の関係 (6号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.6 crushed stone).

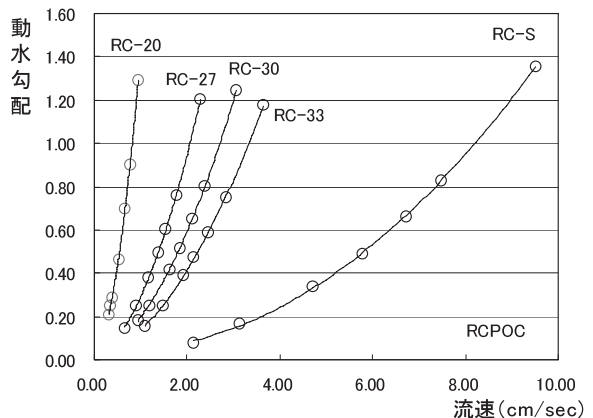
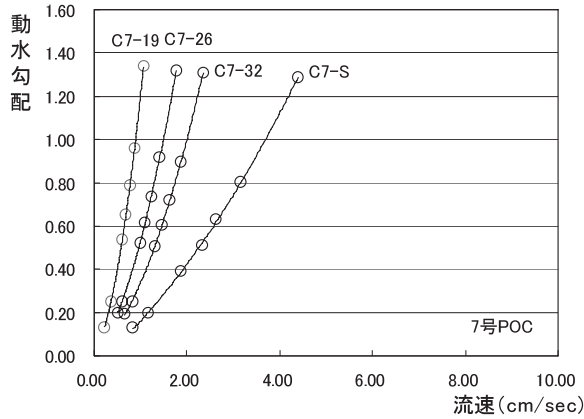


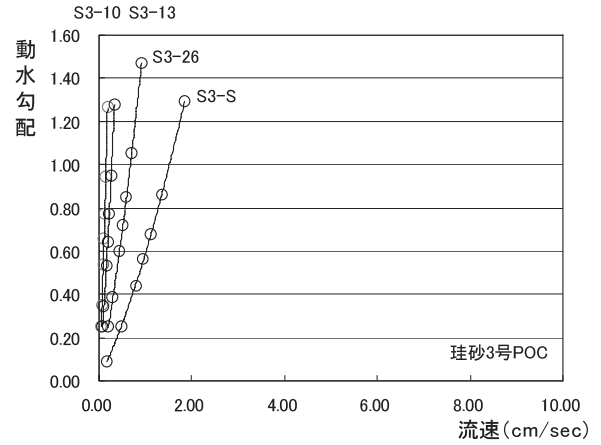
Fig.7(c)  $i - v$  の関係 (RC骨材)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (Used recycled aggregate).

種別ごとに Fig.7(a) ~ (e) に示す。図の○記号が実測値, 実線は実測値を式(1)によって回帰した2次曲線である。図から実測値と回帰曲線は良く一致することがわかる(決定係数  $R^2$  は全ての曲線で0.99以上)。よって, POC 供試体を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は式





**Fig.7(d)**  $i - v$  の関係 (7号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.7 crushed stone).



**Fig.7(e)**  $i - v$  の関係 (珪砂3号)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.3 silica sand).

**Table 5** 透水試験結果  
Results of the permeability test.

骨材種別	粒径 [mm]	平均粒径 [cm]	供試体	実測空隙率 [%]	動水勾配		流速 [cm/s]		限界レイノルズ数 $Re$	係数 $a$	係数 $b$
					最小	最大	最小	最大			
5号	13-20	1.65	骨材単体	43.3	0.08	1.36	2.13	9.52	1750	0.002	0.015
			POC	21.9	0.16	1.15	0.56	1.74	320	0.142	0.534
				31.5	0.12	1.23	0.96	3.38	621	0.050	0.093
				39.1	0.10	1.16	1.68	6.35	1167	0.021	0.026
6号	5-13	0.90	骨材単体	42.2	0.09	1.27	1.79	7.81	783	0.008	0.020
			POC	21.4	0.18	1.20	0.38	1.22	122	0.202	0.638
				29.9	0.16	1.22	0.91	3.02	303	0.075	0.109
				30.6	0.17	1.30	0.96	3.35	336	0.085	0.091
7号	2.5-5	0.38	骨材単体	42.3	0.13	1.29	0.84	4.40	186	0.140	0.036
			POC	19.1	0.13	1.34	0.23	1.06	45	0.395	0.812
				25.7	0.20	1.32	0.50	1.76	75	0.251	0.282
				31.5	0.19	1.31	0.66	2.35	99	0.175	0.163
RC	5-15	1.00	骨材単体	39.9	0.10	1.32	1.61	7.09	790	0.022	0.023
			POC	19.8	0.21	1.29	0.31	0.94	105	0.335	1.091
				26.7	0.15	1.21	0.65	2.29	255	0.111	0.181
				29.9	0.18	1.25	0.94	3.06	341	0.093	0.102
32.7	0.16	1.18		1.10	3.64	405	0.067	0.070			
3号珪砂	1.4-2.3	0.19	骨材単体	35.2	0.09	1.29	0.17	1.84	39	0.460	0.132
			POC	9.5	0.15	1.27	0.0284	0.185	4	4.960	10.027
				13.1	0.17	1.28	0.056	0.329	7	2.818	3.216
				26.2	0.25	1.47	0.198	0.916	19	1.133	0.516

(1) の2次関数で近似できると考えられる。骨材の異なる供試体の試験結果を回帰し求めた係数  $a$ ,  $b$  を **Table 5** に示す。なお、表中の限界レイノルズ数  $R_e$  は以下の式(2)から計算した。

$$R_e = \frac{\rho_w D v}{\mu} \tag{2}$$

ここで、 $\rho_w$  : 水の密度 [ $g/cm^3$ ],  $D$  : 骨材の平均粒径

[cm],  $v$  : 供試体内平均流速 [ $cm/s$ ],  $\mu$  : 水の粘性係数 [ $g/cm \cdot s$ ], 水の物性は  $25^\circ C$  における  $\rho_w = 0.997$  [ $g/cm^3$ ],  $\mu = 0.00895$  [ $g/cm \cdot s$ ] を用いた。

### 3 考察

#### a 流れの状態に関する考察

POC 及び骨材単体を通過する流れの限界レイノルズ数  $R_e$  の範囲を骨材種別ごとに **Table 6** に示す。実験にお

**Table 6** レイノルズ数の範囲  
Reynolds number range with the permeability tests.

骨材種別	限界レイノルズ数 Re	
	最小	最大
5号	320	1750
6号	122	783
7号	45	186
RC骨材	105	790
3号珪砂	4	39

ける限界レイノルズ数  $R_e$  は 4 ~ 1750 の範囲にあり 1 より大きな値を取る。よって、供試体を通過する流れは概ね乱流状態であったと考えられる。

### b 係数 $a$ , $b$ と空隙構造の関係

室内透水試験の結果から POC 供試体を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は式 (1) で表されることがわかった。ここでは式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  と供試体の空隙構造の関係について考察する。Table 5 から、使用骨材が同一な供試体では、空隙率が小さくなるほど係数  $a$ ,  $b$  の値が大きくなるのが分かる。この傾向は、Fig.7(a) ~ (e) で供試体の空隙率が小さくなるほど 2 次関数のグラフの開きが小さくなることから明らかである。また、Fig.7(c) ~ (e) で空隙率がほぼ等しい 3 本の供試体 (RC-27, C7-26, S3-26) に対する動水勾配のグラフを見ると、供試体の骨材粒径が小さくなるほどグラフの開きは小さくなる。すなわち、空隙率がほぼ等しい供試体では、骨材粒径が小さいほど係数  $a$ ,  $b$  の値は増加する。つまり、骨材粒径が小さく、空隙率が小さな POC ほど係数  $a$ ,  $b$  の値は大きくなると推定できる。この理由としては、供試体内部の空隙が細かく複雑になるほど、内部を通過する流れは狭窄した細孔中を長距離移動する必要があり、そのため流れの圧力損失は増大し、結果的に圧力損失を表す係数  $a$ ,  $b$  の値も大きくなるためと推定できる。

## III 動水勾配と流速の関係式

POC を通過する流れの動水勾配と流速の関係を表す式 (1) を再掲すれば以下のとおりである。

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  を骨材粒径や供試体の空隙率のみで表すことができれば、透水試験を実施せずに POC の動水勾配と流速の関係を求めることができる。これは、POC を用いた施設、構造物を設計するには大きな利点となる。そこで、化学工学の分野で圧力損失の推定式として用いられている Ergun の式に基づき、供試体の骨材粒径及び空隙率から POC の動水勾配と流速の関係を求める推定式の作成を試みる。

## 1 骨材種別ごとの水頭損失推定式

### a Ergun 式の適用性の検討

化学工学の分野では粒状体を充填した充填層に流体 (気体, 液体) を通過させ物質の分解や触媒反応を促進させる方法が各種の反応装置に用いられている。充填層に流入する流れは粒状体から抵抗を受け圧力低下を起こす。この圧力低下を予測する式に Ergun の式がある。Ergun の式は化学工学分野以外でも圧力低下の予測式として広く用いられている。たとえば、穀物を通風乾燥させる穀物充填層の通風抵抗の推定に適用され良好な結果を得ている (小出ら, 1996; 井上ら, 2003)。ここでは、粒状体の空隙構造と類似する POC に Ergun の式を適用し、POC の水頭損失の推定を試みる。

Ergun の式は材料の空隙率  $\varepsilon$  を用いて式 (3) のように表される (三輪, 1981)。

$$i = \alpha\mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v + \beta\rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} v^2 \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon$ : 材料の空隙率,  $\mu$ : 流体の粘性係数 [ $\text{g/cm}\cdot\text{s}$ ],  $\rho$ : 流体の密度 [ $\text{g/cm}^3$ ],  $v$ : 流速 [ $\text{cm/s}$ ] (単位時間に供試体を通過する流量を流に直角な粒状体層の面積で割ったいわゆる平均速度),  $\alpha, \beta$ : 空隙構造 (比表面積, 形状, 複雑さ) に依存する係数, である。式 (1) と式 (3) の係数を比較すると、式 (1) の係数  $a$  は式 (4) に示す空隙率関数  $f(\varepsilon)$  に、係数  $b$  は式 (5) に示す空隙率関数  $g(\varepsilon)$  に影響を受けると考えられる。そこで係数  $a$ ,  $b$  をそれぞれ  $f(\varepsilon)$ ,  $g(\varepsilon)$  の関数と仮定し、 $a, b$  と  $f(\varepsilon)$ ,  $g(\varepsilon)$  の関係を求めることにする。モデル化では、水温  $25^\circ\text{C}$  と仮定し、 $\rho = 0.997$ ,  $\mu = 0.00895$  を用いた。

$$a = F(f(\varepsilon)), \quad f(\varepsilon) = \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (4)$$

$$b = G(g(\varepsilon)), \quad g(\varepsilon) = \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (5)$$

### (1) $a \sim f(\varepsilon)$ の関係

Table 5 に示した 16 組の POC 供試体の動水勾配と流速の関係から求めた係数  $a$  と空隙率関数  $f(\varepsilon)$  の関係を Fig.8 及び Fig.9 に示す。図の直線は係数  $a$  の空隙率関数  $f(\varepsilon)$  に対する回帰直線である。Fig.8 は 16 組の全データをプロットしたグラフ、Fig.9 は Fig.8 の原点付近にかたまっているデータを拡大したグラフである。Fig.8 及び Fig.9 から骨材の種類が同一であれば、係数  $a$  と空隙率関数  $f(\varepsilon)$  の間には直線関係が成り立つことが分かる (全ての回帰直線で決定係数  $R^2$  は 0.97 以上)。そこで、同種の骨材を用いた供試体を通過する流れの  $a$  と  $f(\varepsilon)$  の間には直線関係が成り立つと仮定し、その関係を式 (6) で表すことにした。回帰分析を行い求めた式 (6) の係数  $k_1, k_2$  を Table 7 に示す。

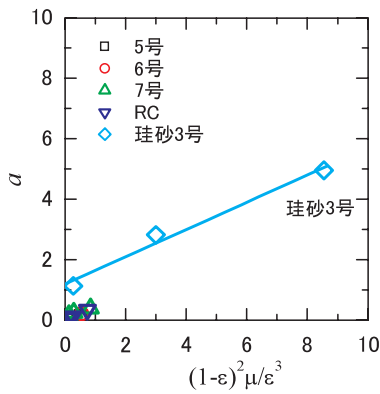


Fig.8 a ~ f(ε) の関係 (全データ)  
Relationship between a and f(ε) (full data).

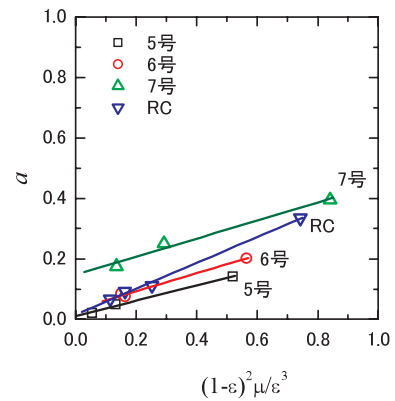


Fig.9 a ~ f(ε) の関係 (3号珪砂を除く)  
Relationship between a and f(ε) (removing No.3 silica sand data).

Table 7 骨材別の k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> の値  
Estimated values for k<sub>1</sub> and k<sub>2</sub> from laboratory test.

骨材種別	粒径 [mm]	平均粒径 [cm]	空隙率範囲 [%]	流速範囲 [cm/s]	係数 k <sub>1</sub>	係数 k <sub>2</sub>
5号	13-20	1.65	22 ~ 39	0.56 ~ 6.35	0.011	0.253
6号	5-13	0.90	21 ~ 30	0.38 ~ 3.35	0.034	0.297
7号	2.5-5	0.38	19 ~ 32	0.23 ~ 2.35	0.147	0.299
RC	5-15	1.00	20 ~ 33	0.31 ~ 3.64	0.016	0.428
3号珪砂	1.4-2.3	0.19	10 ~ 26	0.028 ~ 0.916	1.191	0.451

注：式 (6) に用いる骨材種別ごとの係数を示す。空隙率及び流速範囲は骨材種別ごとの係数に対する適用範囲を示す。

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

係数 k<sub>1</sub> は a ~ f(ε) 直線の切片値を表す。切片においては ε=1 が成り立つ。つまり、切片では供試体の空隙率は 100% となり、k<sub>1</sub> は供試体が存在しない状態での透水円筒を通過する流れの層流に起因する水頭損失を意味する。供試体が存在しないので k<sub>1</sub> の値は理論的には 0 になるべきだが、透水円筒内壁の摩擦などが存在するため k<sub>1</sub> の値は 0 にならない。Fig.8 及び Fig.9 の回帰直線のグラフを外挿し、切片値 (= k<sub>1</sub>) を推測すると、5号、6号及び RC の切片値は 0 に近い値を取ると推定できる。また、切片値は (5号, 6号及び RC) < 7号 < 珪砂 3号 の順に大きく傾向がある。つまり、k<sub>1</sub> は供試体の骨材粒径が小さくなるほど大きくなる。この原因は、Fig.8 及び Fig.9 から推定した k<sub>1</sub> の値が外挿値であり、元データの影響を強く受けているためと考えられる。すなわち、空隙率が等しい (f(ε) が等しい) 供試体を比較した場合、骨材粒径が小さいほど流れの損失水頭は大きくなり、係数 a の値も大きくなる。このため、骨材粒径が小さくなるほど f(ε) = 0 の近傍でも係数 a の値は大きくなり、外挿値である k<sub>1</sub> も骨材粒径が小さくなるほどその値が大きくなると推定できる。

係数 k<sub>2</sub> は式 (6) の直線の傾きを表す。空隙率が等しい供試体では、骨材粒径が小さいほど空隙構造は複雑と

なり、流れの損失水頭は大きくなると仮定すれば、空隙率が等しい供試体、すなわち空隙率関数 f(ε) が等しい場合、供試体の骨材粒径が小さくなるほど圧力損失が大きくなり係数 a の値も大きくなる、つまり k<sub>2</sub> の値も大きくなり直線の傾きも増加すると推測できる。たしかに、Table 7 の平均粒径と k<sub>2</sub> の値の関係からは平均粒径が小さくなるほど k<sub>2</sub> の値は増加する傾向が、RC 骨材を除いて観察される。このような考えに基づく係数 k<sub>2</sub> に骨材粒径の影響を取り入れたモデル化も有効と思われるが、今回は k<sub>2</sub> が骨材種別ごとに Table 7 に示す固有の値を持つと考え a を推定した。なお、本研究の室内透水試験は空隙率が 20% 未満の供試体の試験データが少なく、空隙率が 20% 未満の領域における a と f(ε) の関数関係について十分には明らかではない。よって、空隙率が 20% 未満の領域については a と f(ε) の関係が直線関係であるかも含めてさらなる検討が必要である。

(2) b ~ g(ε) の関係

Fig.10 に Table 5 に示した b と空隙率関数 g(ε) の関係及び b の g(ε) に対する回帰直線及び回帰式を示す。

Fig.10 から、b と g(ε) の間には直線関係が存在すると推測できる。しかし、珪砂 3号の 2 組のデータ (S3-10, S3-13) は他の 14 組のデータから大きく外れており、全

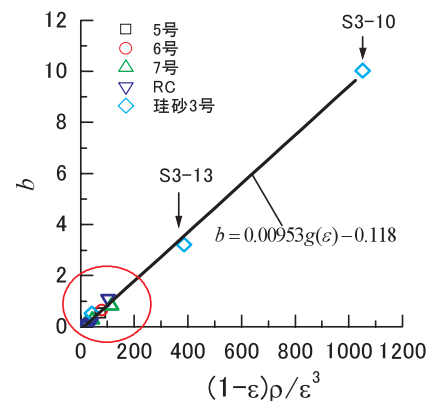


Fig.10 b ~ g(ε) の関係 (全データ)  
Relationship between b and g(ε) (full data).

データから求めた回帰直線が珪砂3号の2つのデータに強く影響を受けた関係式になる可能性がある。珪砂3号の供試体を通ずる流れは限界レイノルズ数4~39の範囲にあり、乱流の影響が弱い領域の流れである。係数  $b$  は乱流の影響を表す係数であるので珪砂3号のデータに影響を受けた関係式は、乱流の影響を十分反映していない可能性が高い。事実、Fig.10 から求めた係数  $b$  を用いて予測した動水勾配と流速の関係は、5, 6, 7号供試体では実測の動水勾配と流速の関係と良い一致が見られなかった。

そこで、本研究では、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係が供試体の空隙構造により変化すると仮定し、空隙構造で分類した  $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係式を求めることにする。すなわち、Fig.10 に示したデータを供試体の空隙構造に応じて2つのグループに分け、グループごとに  $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係を求めることにする。この考えの背景には、供試体の空隙構造と内部を通ずる流れの状態が互いに関係し、内部空隙の状態が変化する境界と内部を通ずる流れの状態も変化する境界が一致するという仮定が存在する。

供試体の空隙構造に基づく流れの状態のグループ分けを行うためには空隙構造が変化する境界を求める必要がある。大友ら(2006)は微小点X線を用いたPOC供試体の空隙構造の観察から最大骨材粒径 ( $G_{max}$ ) が10mmと15mmの供試体の間でPOCの空隙構造が大きく変化することを明らかにした。この結果は、POCの空隙構造が骨材粒径によって変化し、骨材粒径を指標として空隙構造の境界を決定できる可能性を示す。大友の試験における空隙構造の境界は、本研究では6号供試体と7号供試体の間に存在する。さらに、松川ら(1996)はPOCの横断面の観察から同じく6号供試体と7号供試体の間に空隙構造の境界があることを報告している。以上の研究結果に基づき、本研究では、POC供試体の空隙構造の境界が6号供試体と7号供試体の間に存在すると仮定する。また、骨材粒径の算術平均を空隙構造の境界を表す指標として用い、6号及び7号骨材の骨材粒径の算術平均  $(0.90+0.38)/2 \approx 0.6\text{cm}$  を空隙構造の境界値として仮定する。

以上の考察に基づき、Table 5 の16組の供試体データを大空隙グループ(以下LG)と小空隙グループ(以下SG)の2組に分類する。LGは5号, 6号, RC骨材を主体とする7本の供試体グループ(C5-32, C5-39, C6-30, C6-31, RC-27, RC-30, RC-33)である。骨材粒径  $D$  は0.9~1.65cmの範囲にある。SGは7号及び珪砂3号の6供試体に空隙率が20%程度の3供試体(C5-21, C6-21, RC-20)を加えた合計9本の供試体グループ(C5-21, C6-21, RC-20, C7-19, C7-26, C7-32, S3-10, S3-13, S3-26)である。骨材粒径  $D$  は0.19~0.38cmの範囲にある。3供試体を組み入れたのは空隙率が小さい供試体では乱流の影響が小さいと考えたためである。LG及びSGの空隙構造の特徴は以下のとおりで

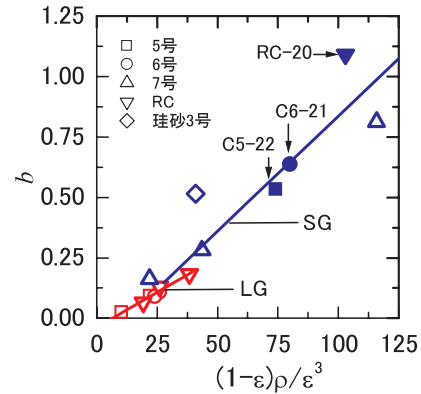


Fig.11  $b \sim g(\epsilon)$  の関係 (SG と LG でグループ分)  
Relationship between  $b$  and  $g(\epsilon)$  (classification by SG and LG).

Table 8 粒径別の  $l_1, l_2$  の値  
Estimated values for  $l_1$  and  $l_2$  with SG and LG.

グループ	適用平均 粒径範囲 [cm]	適用 骨材種	空隙率 範囲 [%]	係数 $l_1$	係数 $l_2$
SG	$D < 0.6$	5号 6号 RC	22 ~ 39 21 ~ 30 20 ~ 33	-0.117	0.00953
LG	$D \geq 0.6$	7号 珪砂3号	19 ~ 32 10 ~ 26	-0.0356	0.00568

注：式(7)に用いる  $l_1, l_2$  の値を示す。平均骨材粒径  $D$  によりSG, LGどちらかの値を判別する。骨材種は適用骨材の例、空隙率範囲は例示骨材に対する式の適用範囲を示す。

ある。LGは概ね最大限界レイノルズ数が300以上、 $g(\epsilon) < 30$ であり、供試体を通ずる流れは乱流の影響を強く受けており、供試体の空隙構造は粗く疎である。SGは概ね最大限界レイノルズ数が300未満、 $g(\epsilon) > 30$ であり、流れは乱流の影響が弱く層流に近い状況であり、供試体の空隙構造は細かく密である。

Fig.11 にSGとLGの2つにグループ分けした  $b$  及び  $g(\epsilon)$  のデータとその回帰直線を示す。図ではLGに属するデータ及び回帰直線を赤色、SGに属するそれらを青色で区別する。また、SGに組み込んだ3供試体(C5-21, C6-21, RC-20)は内部を青色で塗りつぶした記号を用い区別する。Fig.11 からSG及びLGどちらのグループに関しても、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の間には直線関係が成り立つことがわかる(回帰直線の決定係数は両直線とも0.96以上)。よって、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係を式(7)で表すことにする。回帰分析から求めたSG及びLGに対する  $l_1, l_2$  の値をTable 8に示す。

$$b = l_1 + l_2 \frac{(1-\epsilon)\rho}{\epsilon^3} \tag{7}$$

(3) 平均骨材粒径  $D$  を考慮した  $a \sim f(\epsilon)$  の関係式  
式(6)は、使用骨材種ごとに係数  $k_1, k_2$  を設定する必要があること、5種類の骨材しか適用できないことなど適用に限界がある。そこで、適用範囲を拡大するため



に、式 (6) に骨材種別の影響を考慮するパラメータとして骨材平均粒径  $D$  を導入し、 $a$  を  $D$  と  $f(\epsilon)$  の関数として表す推定式の作成を試みる。

推定式の作成では  $a$  と  $f(\epsilon)$  の間に以下の2つの仮定が成り立つとする。

- ①骨材種に関係なく  $a$  と  $f(\epsilon)$  の間には直線関係が成り立つ。
- ②直線の切片、すなわち式 (6) の  $k_1$  の値は  $D$  の関数であるとする。すなわち  $k_2 = m_1(D)$ 。

以上の仮定に基づけば、 $a$  と  $f(\epsilon)$  の関係は式 (8) で表すことができる。式 (8) による  $a$  のモデル式の概要を Fig.12 に示す。

$$a = m_1(D) + m \mu \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (8)$$

式 (8) は傾き  $m$  が一定で切片  $m_1$  が  $D$  の関数で表される直線である。直線の傾き  $m$  は  $a$  に対する  $f(\epsilon)$  の影響を代表する値である必要がある。そこで、 $m$  には Table 7 の5種類の骨材に対する回帰直線の傾き  $k_2$  の平均値 0.346 を用いることにした。つぎに、直線の切片  $m_1$  を  $D$  の関数として表すために Table 8 のデータを用いて  $m_1$  と  $D$  の関係を整理した。結果を Fig.13 に示す。 $m_1$  は

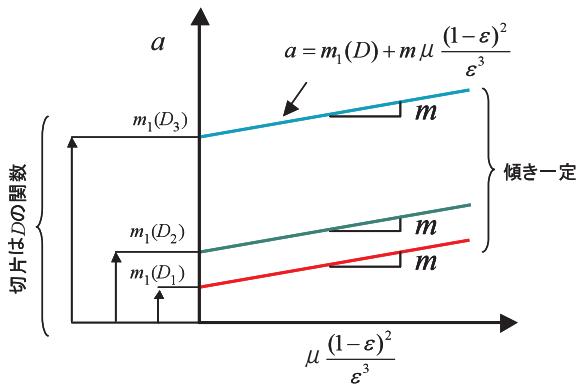


Fig.12 式 (8) による  $a$  のモデル式の概要  
Schematic diagram straight line of Eq. (8).

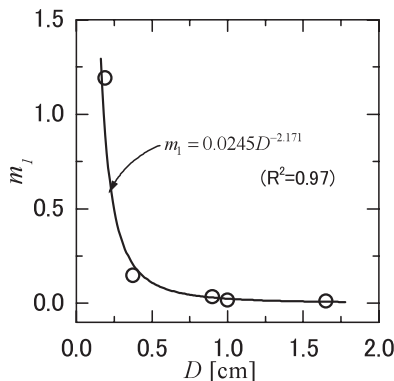


Fig.13  $D$  と  $m_1$  の関係  
Aggregate grain size ( $D$ ) versus intercept of formula (8)  $m_1$ .

$D$  の累乗式により式 (9) で近似可能と考えた。

$$m_1 = 0.0245D^{-2.171} \quad (9)$$

$m=0.346$  及び式 (9) を式 (8) に代入すると  $a$  を  $D$  と  $f(\epsilon)$  の関数として表した式 (10) が得られる。

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346\mu \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (10)$$

式 (10) の適用範囲は  $D$  が 0.19 ~ 1.65cm, 供試体の空隙率については Table 7 に示すように概ね 20 ~ 35% の範囲である。

## 2 水頭損失推定式の予測精度の検証

### (1) 関数値による予測精度の検証

前節 a 項では、Ergun の式に基づき供試体の骨材粒径及び空隙率から式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  を求める推定式を作成した。すなわち、係数  $a$  に対して式 (6), 式 (10) を、係数  $b$  に対して式 (7) を提案した。本節では、推定式から求めた  $a$ ,  $b$  を用いて計算した動水勾配グラフと実測値から求めた  $a$ ,  $b$  を用いて計算した動水勾配グラフを比較して、推定式の予測精度を検証する。予測精度の評価には、以下の式 (11) に示す相対誤差  $\epsilon_r$  を用いる。

$$\epsilon_r = \frac{\Delta i}{i_o} = \frac{i_o - i_p}{i_o} \quad (11)$$

ここで、 $\epsilon_r$ : 相対誤差、 $i_o$ : 透水試験から回帰して求めた係数  $a$ ,  $b$  を用いて式 (1) から求めた動水勾配値、 $i_p$ : 推定式から求めた係数  $a$ ,  $b$  を用いて式 (1) から求めた動水勾配値である。 $\epsilon_r$  の絶対値が大きいくほど実測値と推定値のずれは大きくなる。

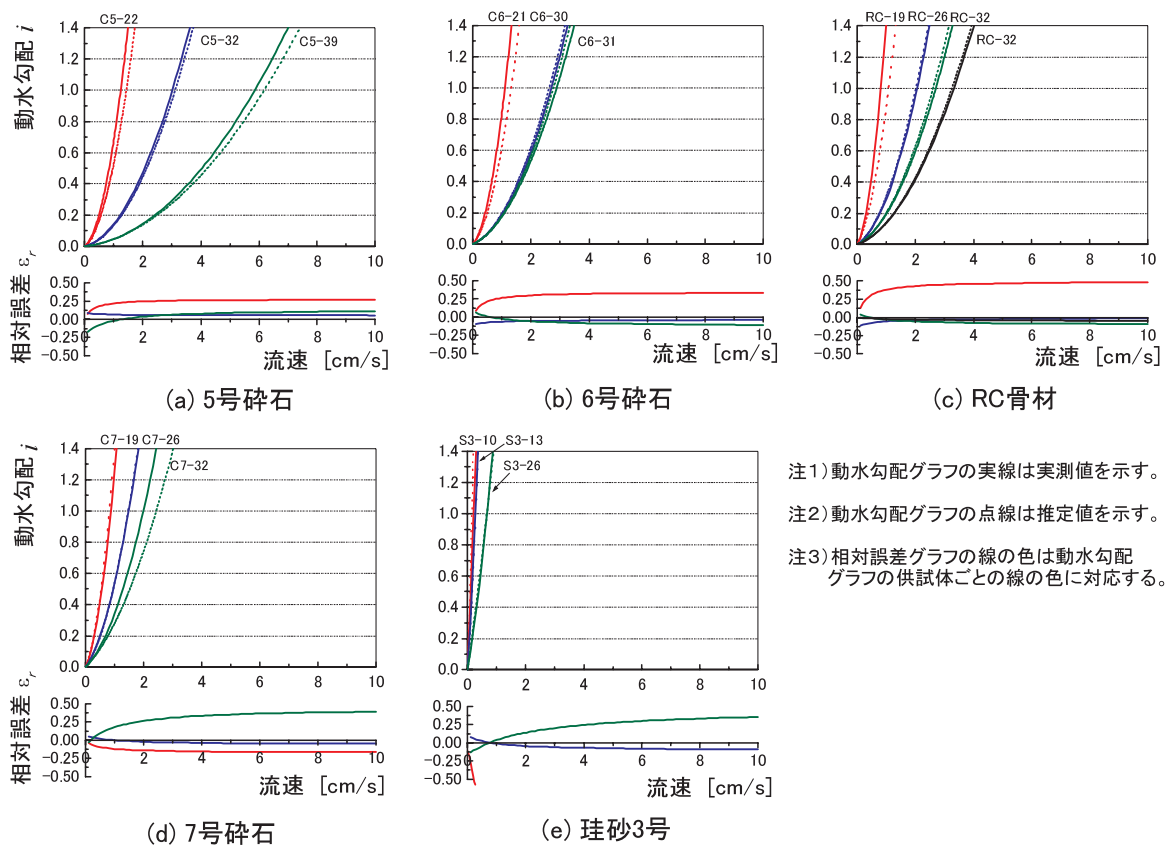
係数  $a$  は式 (6) と式 (10) から、係数  $b$  は式 (7) から計算した。Table 9 に係数  $a$ ,  $b$  の各式から求めた推定値を示す。

実測値から求めた係数  $a$ ,  $b$  と式 (6) 及び式 (10) から推定した係数  $a$ ,  $b$  を用いて動水勾配-流速のグラフを描き両者を比較した。式 (6) を用いた推定値と実測値の比較結果を Fig.14 に、式 (10) を用いた推定値との実測値の比較結果を Fig.15 に示す。Fig.14 及び Fig.15 では骨材種別ごとの比較結果を上下一組の5つのグラフで整理した。Fig.14 の (a) 5号碎石のグラフを例に説明すれば、上のグラフは空隙率が異なる供試体に対する動水勾配と流速の関係の比較を目的とし、実線が実測、点線が推定値から求めたグラフである。供試体の空隙率が大きくなる順に線の色を赤→青→緑に変化させている。下のグラフは上のグラフに示した推定値の実測値に対する相対誤差を示す。Fig.14 及び Fig.15 から推定式の予測精度について以下の傾向が認められる。

- ①動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲において、式 (6) あるいは式 (10) から係数  $a$  を、式 (7) から係数  $b$  を求め計算した動水勾配推定値の相対誤差は実測値の

**Table 9** 透水試験及び推定式から求めた係数  $a$ ,  $b$   
 Values of  $a$  and  $b$  from permeability test and estimated values of  $a$  and  $b$  from Eq.(6), Eq.(7), Eq.(10).

供試体記号	骨材種別	粒径 [mm]	平均粒径 [cm]	動水勾配	実測空隙率 [%]	最大限界レイノルズ数 Re	$(1-\varepsilon)^2$ $\mu/\varepsilon^3$	$(1-\varepsilon)$ $\rho/\varepsilon^3$	透水試験からの回帰値		推定値		
									係数 $a$	係数 $b$	係数 $a$		係数 $b$
											骨材種別	粒径考慮	
C5-22	5号	13-20	1.65	0.17 ~ 1.26	21.9	320	0.520	74.1	0.142	0.534	0.143	0.188	0.385
C5-32					31.5	621	0.134	21.9	0.050	0.093	0.045	0.055	0.089
C5-39					39.1	1167	0.056	10.2	0.021	0.026	0.025	0.027	0.022
C6-21	6号	5-13	0.90		21.4	122	0.564	80.0	0.202	0.638	0.201	0.226	0.419
C6-30					29.9	303	0.165	26.1	0.075	0.109	0.083	0.088	0.113
C6-31					30.6	336	0.150	24.1	0.085	0.091	0.078	0.083	0.102
C7-19	7号	2.2-5	0.38		19.1	45	0.841	115.8	0.395	0.812	0.399	0.491	0.986
C7-26					25.7	75	0.291	43.6	0.251	0.282	0.234	0.301	0.299
C7-32					31.5	99	0.134	21.9	0.175	0.163	0.188	0.246	0.091
RC-20	RC	5-15	1.00		19.8	105	0.742	103.0	0.335	1.091	0.335	0.281	0.549
RC-27					26.7	255	0.253	38.4	0.111	0.181	0.126	0.112	0.182
RC-30					29.9	341	0.165	26.1	0.093	0.102	0.088	0.081	0.113
RC-33					32.7	405	0.116	19.2	0.067	0.070	0.067	0.065	0.073
S3-10	3号珪砂	1.4-2.3	0.19		9.5	4	8.550	1052.4	4.960	10.027	5.049	3.858	9.912
S3-13					13.1	7	3.006	385.4	2.818	3.216	2.548	1.940	3.556
S3-26				26.2	19	0.271	40.9	1.133	0.516	1.313	0.994	0.273	



**Fig.14** 式 (6), 式 (7) を用いた推定値と実測値の比較

Comparison of estimated hydraulic gradient values from Eq.(6), Eq.(7) and test values with relative error.

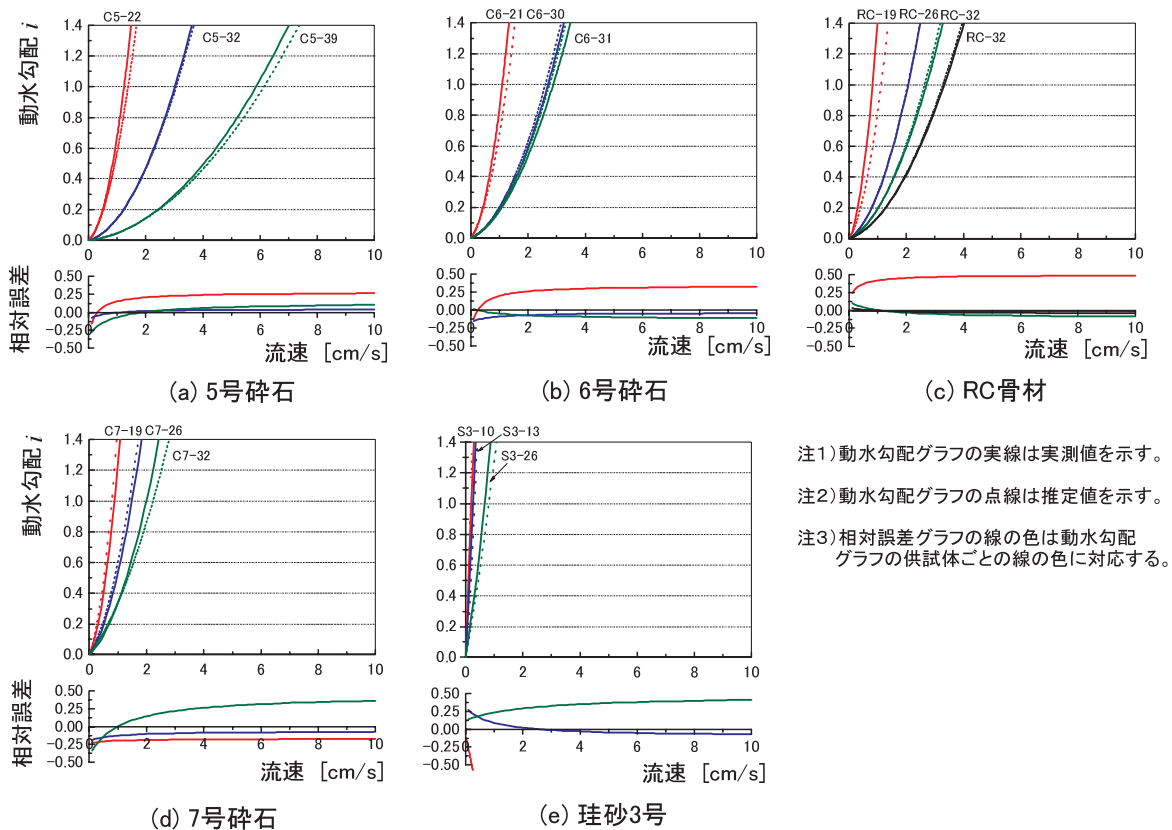


Fig.15 式 (10), 式 (7) を用いた推定値と実測値の比較と相対誤差  
 Comparison of estimated hydraulic gradient values from Eq.(10), Eq.(7) and test values with relative error.

± 50%以内に収まる。

- ② 5号, 6号, RC 及び珪砂3号供試体では供試体の空隙率が小さいほど, 7号供試体では空隙率が大きくなるほど, 推定値の実測値に対する相対誤差は増加する。つまり, 5号, 6号, RC 及び珪砂3号供試体では空隙率の下限に近づくほど, 7号供試体では空隙率の上限に近づくほど相対誤差は増加する。
- ③式 (6) と式 (10) の予測精度の差はほとんど無い。つまり, 骨材粒径と供試体空隙率のみから式 (10) を用いて係数  $a$  を推定することができる。

(2) 透水試験流速値に対するモデル式の精度検証

モデル式の予測精度を検証するために, 透水試験で得られた 112 点の実測流速と推定流速値の関係を整理する。透水試験の実測流速を  $y$ , Table 9 の式 (6) を用いて推定した流速を  $x_A$ , 式 (10) を用いて推定した流速を  $x_D$  とする。推定流速の計算では透水試験で設定した動水勾配  $i$  を入力値に用いる。  $y$  に対する  $x_A$ ,  $x_D$  の回帰直線を求めると, 式 (12), (13) が得られる。決定係数は共に 0.98 以上であった。

$$y = 0.968x_A + 0.0182 \tag{12}$$

$$y = 0.9846x_D + 0.0086 \tag{13}$$

$y$  と  $x_A$ ,  $y$  と  $x_D$  の散布図を Fig.16, Fig.17 に示す。 Fig.16 及び Fig.17 には式 (12) 及び式 (13) の回帰直線

を実線で表す。 Fig.16 及び Fig.17 から実測流速と推定流速は良く一致することがわかる。式 (12), 式 (13) から,  $x_A$  を 0.968 倍,  $x_D$  を 0.984 倍すれば流速推定値から実測流速のより良い予測値が得られることがわかる。このことは, 流速推定値  $x_A$  及び  $x_D$  が 1 ~ 3% 程度実測流速を過小推定する傾向があることを意味する。

流速推定値  $x_A$ ,  $x_D$  の予測精度を式 (12), (13) の残差から検討する。残差とは (実測値  $y_i$  - 推定値  $y_i'$ ) で表される量で推定値と実測値のずれを意味する。残差は推測流量から回帰直線で予測される  $y$  の値の回りに分布するが, この残差が  $y$  の値の回りに一定で分布すると仮定すれば (等分散性を仮定), 残差の標準偏差は式 (14) で表される条件付標準偏差  $S_{y/x}$  から求めることができる (Alfred H-S, Ang ほか, 2007)。

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \tag{14}$$

ここで,  $n$  はデータ数である。式 (12), (13) に対する条件付標準偏差を求めると, 式 (12) では  $S_{y/x_A} = 0.141$  [cm/s], 式 (13) では  $S_{y/x_D} = 0.124$  [cm/s] となり, 式 (12) の条件付標準偏差がわずかに大きくなる。すなわち, 式 (12) を用いた方が予測精度はわずかに低下する。回帰直線に沿って残差の分散が一定とすれば, 推定流速が大きくなるほど推定流速に対する実測値と推定値のずれの比率は小さくなる。推定流速に対する実測値と推定値のずれの

比率は、流速の推定値  $x_A$ ,  $x_D$  に対する条件付標準偏差の変動係数により求めることができ、それぞれ、 $0.141/x_A$ ,  $0.124/x_D$  となる。条件付標準偏差の変動係数の変化を Fig.18 に示す。Fig.18 から流速が 0.7cm/s 以上の場合

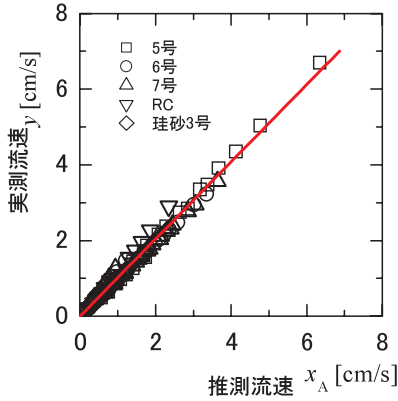


Fig.16  $y$  と  $x_A$  のプロットと回帰直線  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in the permeability test with one ( $x_A$ ) estimated by Eq.(6) and Eq.(7).

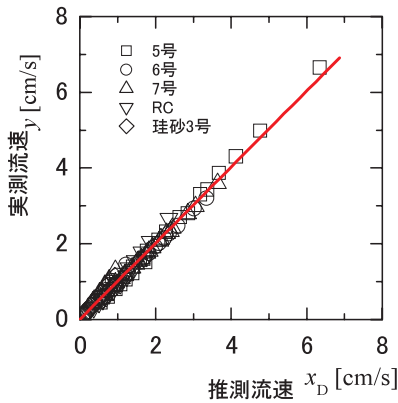


Fig.17  $y$  と  $x_D$  のプロットと回帰直線  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in the permeability test with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).

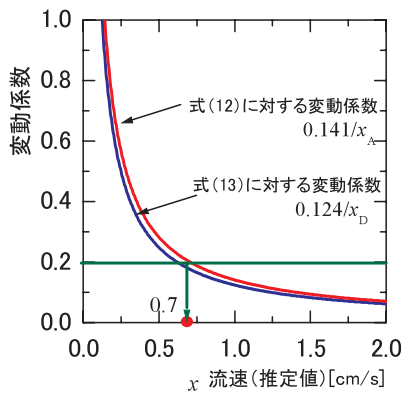


Fig.18 推定値 (流速) に対する残差の変動係数  
Variation coefficient of residual error for estimated discharge velocity.

ずれば推定流速に対して 20%以内に収まり、モデル式の予測精度は高いと考えられる。一方、流速が 0.7cm/s 未満の領域では変動係数の値は急激に増加し、流速が 0.25m/s 以下では 0.5 を越え、予測精度が急激に低下する傾向を示す。

(3) 他論文の透水試験値を用いた予測精度の検証

本研究以外に実施された POC の透水試験値から求めた流速に対するモデル式の予測精度を検証するために、エココンクリート委員会 (1995) が実施した POC の共通透水試験結果を対象に予測精度の検討を行う。対象とする 10 本の供試体の試験データを Table 10 に示す。ただし、式 (1) を用いて試験データを回帰分析した結果、式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  が負の値となったデータについては検討から除外した。また、委員会の試験では使用骨材条件として最大骨材寸法のみが記述されていたため、最大骨材寸法 20mm の骨材を 5号、13mm を 6号、5mm を 7号と同一し整理した。流速については試験データに与えられていないため、動水勾配と透水係数から逆算した。

前節 (2) の検討と同様に実測流速データを  $y$ , 式 (6)

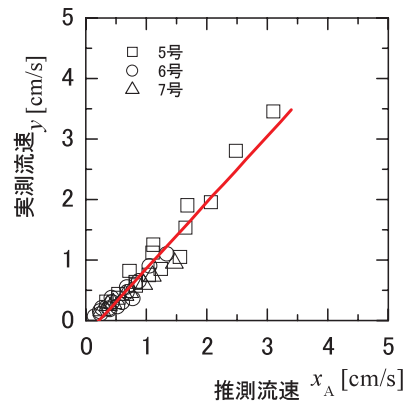


Fig.19  $y$  と  $x_A$  のプロットと回帰直線 (他論文データ)  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in another permeability test (JCI,1995) with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).

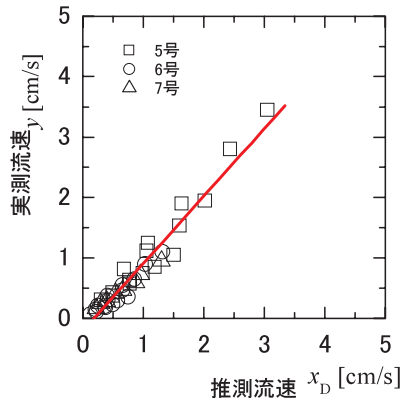
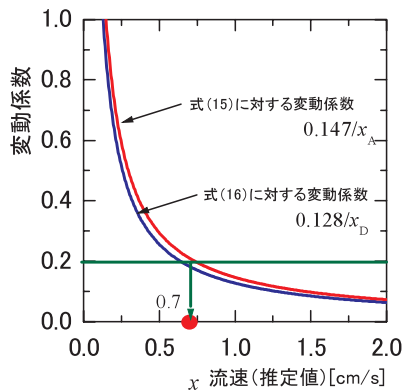


Fig.20  $y$  と  $x_D$  のプロットと回帰直線 (他論文データ)  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in another permeability test (JCI,1995) with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).



**Table 10** 他機関の透水試験結果と試験データから回帰した係数  $a$ ,  $b$   
Results of the permeability test (JCI, 1995) and the values of  $a$  and  $b$  calculated by regression analysis with JCI data.

動水勾配	流速 [cm/s]		動水勾配	流速 [cm/s]								
	A1	A2		C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2	E3	
0.125	1.00	0.59	0.083	0.38	0.21	0.07	0.25	0.17	0.82	0.31	0.15	
0.250	1.02	0.73	0.167	0.55	0.30	0.11	0.42	0.28	1.12	0.43	0.20	
0.500	1.13	0.83	0.333	0.90	0.47	0.18	0.73	0.47	1.53	0.63	0.30	
0.750	1.20	1.00	0.500	1.10	0.65	0.23	0.95	0.60	1.95	0.75	0.36	
最大骨材寸法 [mm]	20	20	最大骨材寸法 [mm]	13	13	13	5	5	20	20	13	
骨材種別	5号	5号	骨材種別	6号	6号	6号	7号	7号	5号	5号	6号	
空隙率 [%]	33.4	24.7	空隙率 [%]	26.3	21.4	16.6	31	25.6	31.1	22.7	20.1	
係数 $a$	0.038	0.196	係数 $a$	0.113	0.201	0.438	0.190	0.236	0.047	0.127	0.243	
係数 $b$	0.064	0.238	係数 $b$	0.187	0.403	0.957	0.152	0.337	0.091	0.326	0.501	



**Fig.21** 推定値（流速）に対する残差の変動係数  
Variation coefficient of residual error for estimated discharge velocity.

を用いて推定した流速を  $x_A$ , 式 (10) を用いて推定した流速を  $x_D$  とする。  $y$  の  $x_A$ ,  $x_D$  に対する直線回帰式を求めると以下の式 (15) 及び式 (16) が得られ, それぞれの直線回帰式に対する条件付標準偏差  $S_y/x_A=0.147$ [cm/s],  $S_y/x_D=0.128$ [cm/s]となる。

$$y = 1.094x_A - 0.236 \tag{15}$$

$$y = 1.114x_D - 0.206 \tag{16}$$

**Fig.19** に  $y$  と  $x_A$  の散布図と回帰直線を, **Fig.20** に  $y$  と  $x_D$  の散布図と回帰直線を示す。決定係数は式 (15), (16) 共に約 0.94 であり, 自ら実施した室内透水試験に対する結果に較べるとやや相関は低下した。式 (15), (16) の傾きはそれぞれ, 1.094, 1.114 となり, 推定値は約 10%程度実測値を過大に評価する傾向が見られた。

流速の推定値  $x_A$ ,  $x_D$  に対する条件付標準偏差の変動係数の変化を **Fig.21** に示す。変動係数の変化の傾向は **Fig.18** とほぼ等しく, エココンクリート委員会のデータについても提案した推定式は本節 (2) で述べた室内透水試験と同程度の予測精度を有すると考えられる。

## VI 結 言

本研究では, 骨材及び空隙率を変化させた POC 供試

体に対して動水勾配を変化させた定水位透水試験を行い, 動水勾配と供試体を通過する流れの流速の関係を明らかにした。さらに, Ergun の圧力降下式に基づき POC の空隙率及び骨材粒径から動水勾配を求める推定式を作成した。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 5 種類の骨材を用いて空隙率 10 ~ 39% の範囲の POC 供試体を作成し, 動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲で定水位室内透水試験を行い, 供試体の動水勾配と流速の関係を求めた。その結果 POC の動水勾配  $i$  と流速  $v$ [cm/s] の関係は式 (1) に示される 2 次関数で表せることがわかった。

$$i = av + bv^2 \tag{1}$$

- 2) Ergun の式に基づき式 (1) の係数  $a$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  で表す推定式 (6) を作成した。係数  $k_1$ ,  $k_2$  は骨材種別ごとに決定される値である。骨材種別ごとの値を **Table 7** に示す。

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \tag{6}$$

- 3) 式 (6) を改良し係数  $a$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  及び平均骨材粒径  $D$ [cm] で表す推定式 (10) を作成した。式 (10) の適用範囲は  $D$  が 0.19 ~ 1.65cm, 供試体の空隙率が概ね 20 ~ 35% の範囲である。

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \tag{10}$$

- 4) Ergun の式に基づき式 (1) の係数  $b$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  で表す推定式 (7) を作成した。係数  $l_1$ ,  $l_2$  は平均骨材粒径により決定される値である。値については **Table 8** に示す。

$$b = l_1 + l_2 \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \tag{7}$$

- 5) 動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲においては, 動水勾配の推定に式 (6) あるいは式 (10) を用いても推定値の相対誤差は実測値の  $\pm 50\%$  以内に収まる。相対誤

差は、Table 7 の空隙率の範囲に対して、5号、6号、RC 及び3号珪砂供試体では空隙率の下限に近づくほど、7号供試体では空隙率の上限に近づくほど増加する。

- 6) 式(6)、(7)及び(10)を用いた推定値の実測流速に対する推定精度は、推定流速が0.7cm/s以上の領域では、実測流速と推定流速のずれが推定流速の20%以内に収まるが、流速が0.25m/s以下の領域では実測流速と推定流速のずれは推定流速の50%を越える。流速が0.25m/s以下の領域における適用に関しては注意が必要である。

なお、本研究は、農林水産省委託プロジェクト農林水産バイオリサイクル研究(平成14～18年度)で得られたデータに新たな検討を加え取りまとめた結果であることを付記する。

### 参考文献

- 1) Alfredo H-S. Ang, Wilson H, Tang, 監訳(伊東 學, 亀田浩行)(2007): 土木建築のための確率・統計の基礎, pp.380-391.
- 2) 井上慶一・大塚寛治・村上則幸・杉本光穂・黎 文(2003): 大豆の高品質乾燥調整に関する研究, 中央農研研報, pp.1-49.
- 3) 大友鉄平・大塚浩司・武田三弘(2006): ポーラスコンクリートの三次元的空隙性状に関する研究, 東北学院大学工学部研究報告第40巻第1号, pp.65-71.
- 4) 小出章二・田村 敏・内野敏剛・菅原祐二・田中史彦・K.S.P. アマラトゥンガ(1996): 小麦充填層の通風抵抗に関する研究, 農業機械学会誌58(6), pp.111-117.
- 5) 松川 徹・玉井元治・杉野 守・芦田 馨(1996): 緑化コンクリートの空隙性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.999-1004.
- 6) 松尾真一郎・木暮敬二(1970): 碎石の透水性に関する実験, 土と基礎18-2(144), pp.5-10.
- 7) 三輪茂雄(1981): 粉体工学通論, pp.88-91.
- 8) 森井俊広・立石卓彦・佐田豊和・小林考至(2000): ロックフィルを通る流れの非線形水頭損失特性, 農業土木学会論文集 No.206, pp.199-207.
- 9) 社日本コンクリート工学協会(1995): エココンクリート研究委員会報告書, pp.59-63.
- 10) 社日本コンクリート工学協会(2003): ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究会報告書, pp.182-185.

# Relationship between Hydraulic Gradient and Discharge Velocity in Flow through Porous Concrete

ASANO Isamu, HAYASHIDA Yoichi, MASUKAWA Susumu and TAGASHIRA Hidekazu

## Summary

The relationship between hydraulic gradient and discharge velocity in flow through a porous concrete (POC) has been investigated on the laboratory permeability test. The conditions for the laboratory permeability test were as follows; POC specimen: 5 kinds of aggregates used, hydraulic gradient: 0.17~1.26, void contents of POC specimen: 10~39%. A model equation is proposed for estimating the relationship between hydraulic gradient and discharge velocity from the results of laboratory permeability test. The main results obtained are shown below. The proposed equation expressed a good agreement to the experimental results.

- (1) It was found that the relationship between hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  [cm/s] in flow through a porous concrete (POC) is considered to be a quadratic function following Eq.(1) from the results of laboratory permeability test.

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

- (2) Applying the Ergun equation to above Eq.(1), we found the following estimate equations Eq.(6) and Eq.(7) for the coefficient  $a$  of Eq.(1).

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (10)$$

where,  $\varepsilon$ : void contents of POC,  $D$ : average aggregate diameter [cm],  $k_1, k_2$ : these factors are given **Table 7** for 5 kinds of the aggregates.

- (3) Applying the Ergun equation to above Eq.(1), we found the following estimate equations Eq.(7) for the coefficient  $b$  of Eq.(1).

$$b = l_1 + l_2 \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

where,  $\varepsilon$ : void contents of POC,  $l_1, l_2$ : these factors are given **Table 9** for average aggregate diameter.

- (4) The hydraulic gradient values estimated by the equation Eq.(6) or Eq.(10) with Eq.(7) were within almost less than 50% relative errors.

**Keywords** : Porous concrete, Nonlinear flow, Head loss, Permeability test, Hydraulic Gradient, Discharge velocity, Ergun equation

## ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証

林田洋一\*・遠目塚良一\*\*・浅野 勇\*・増川 晋\*・田頭秀和\*

目 次	
I 緒 言	243
II ワイヤレス間隙水圧計の概要	243
III 実ダムにおける試験計測結果	244
1 A ダム	244
a 試験の概要	244
b 試験結果	245
2 B ダム	247
a 試験の概要	247
b 試験結果	247
IV 電池容量試験	249
1 試験装置および試験条件	249
2 試験結果	250
3 実ダムにおける試験計測結果との比較	251
4 耐用年数を満たす方策と課題の検証	252
VI 結 言	253
参考文献	253
Summary	254

## I 緒 言

フィルダムなどの盛土構造物には、施工時、運用時の構造物の安全性を確認するため、間隙水圧計や土圧計などの埋設計器が設置されている。これらの多くは対象とする物理量を電気信号に変換する電気式計器であり、電源の供給及び計測データの伝送のための導電ケーブルが必要であった。このため、(1) ケーブル敷設用トレンチの掘削、ケーブル敷設、埋め戻し工程に伴う盛立て作業効率の低下、(2) ケーブルの断線、絶縁低下や誘導雷による埋設計器の故障による計測の不安定化、等の問題点が指摘されてきた。そこで筆者らは、フィルダムにおける施工性の向上、埋設計器による計測の安定性の向上を目的に、低周波電磁波を用いた地中通信技術を活用した導電ケーブルを必要としないワイヤレス埋設計器の開発を行い、当時農水省が建設中の2基のロックフィルダムに試験的に従来のケーブル式センサと併設し、開発されたワイヤレス間隙水圧計テストモデルの適用性を検証してきた(林田ら, 2008)。開発時には計測頻度:1回/日、通信頻度:1回/週、の使用条件で10年以上の計測を可能と想定したが、実際に設置されたテストモデルは設置後5年半程度経過時にデータ回収不可能な状況に至った。本報告では、これまでにテストモデルにより計測されたデータと従来のケーブル式センサによるデータとを比較検討し、ワイヤレス間隙水圧計による計測結果の妥

当性について検証する。また、テストモデルは想定動作期間10年よりも大幅に短い期間で通信途絶状態に至った原因を、電池容量試験および実ダムでの電池電圧データから解明し、ワイヤレス間隙水圧計の動作期間を長期化するための方策を検証する。

## II ワイヤレス間隙水圧計の概要

低周波電磁波は透過する媒質の導電率や誘電率による影響をあまり受けず、比較的近距离であれば土中や水中においてもその減衰は少ない。このような低周波電磁波の特性と、0および1のデジタル信号を位相変調し識別するデジタル通信技術を活用し微弱な信号の読みとり精度を上げることによって信号対ノイズ比(S/N比)が2以上であれば、地中においても最大約100mの双方向無線データ通信が可能である。ワイヤレス間隙水圧計は、この技術を活用し、堤高100m程度のフィルダムにおいて10年以上安定した計測ができることを目標に、耐水圧性能3MPa以上、地中通信距離100m以上、電池寿命10年以上、堤体に対しての異物とならないよう計器寸法をフィルダム遮水材の最大粒径以下に抑えることを設計仕様とし、独立行政法人 農村工学研究所、坂田電機株式会社、東京電力株式会社が農林水産省農村振興局官民連携新技術研究開発事業により平成13～15年度に共同開発したものである。試験的に実ダムへの埋設を行ったワイヤレス間隙水圧計テストモデルの外形と内部構造をFig.1に示す。計器は、①回路基板、②通信アンテナ、③電池、④間隙水圧計、⑤筐体により構成される。基板部の小型化、省電力化、送受信アンテナの統合、部品数の削減、高エネルギー密度のリチウム電池の使用によ

\* 施設資源部構造研究室

\*\* 坂田電機株式会社

平成21年12月14日受理

キーワード: ワイヤレス間隙水圧計, フィルダム, 長期計測性能



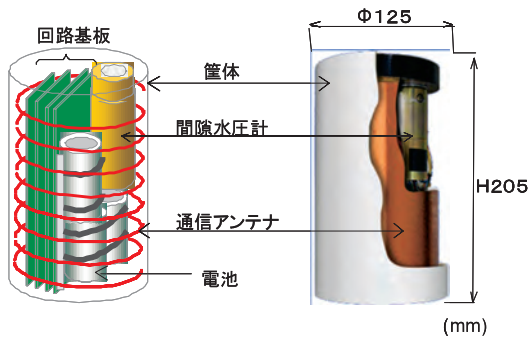


Fig.1 ワイヤレス間隙水圧計の概要  
Schematics of the wireless pore water pressure transducer

り、設計仕様を満たす小型化に成功した。形状は、直径125mm、高さ205mmの円筒形である。電源には装置内部に直列で搭載された3個のリチウム電池を利用しており、テストモデルによる使用電池容量を短期間で確認するための室内電池負荷試験結果から、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件で10年以上の計測が可能と推定した。なお、間隙水圧計は従来のケーブルセンサと同等のものを使用している。

テストモデル開発後の基板の改良等により開発終了時には同一寸法で2倍のリチウム電池を搭載することが可能となり、併せてスリープ時、測定時における電池の消費電流は大幅に削減された。現在では農水省所管の5フィルダムに75台のワイヤレス埋設計器が設置されているが、そのうち2台は通信途絶状態にある(浅野ら, 2009)。ワイヤレス埋設計器は設置工程を短期化できるなどのメリットがあるものの、①計器に付帯する電池寿命までしか測定できない、②電池寿命は現在約10年程度である、③低周波磁界を用いた通信機であり、環境ノイズで送信距離に影響する可能性がある、④データ受信機が必要になるが、送信側と受信側の設置位置には注意を要する、といったことが現状での課題点として指摘されている(財団法人ダム協会, 2009)。

### III 実ダムにおける試験計測結果

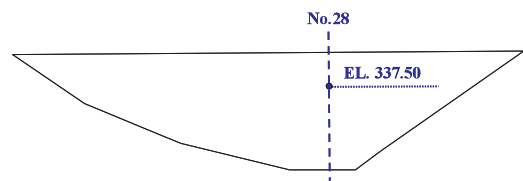
2基の実ダムにおいて、ワイヤレス間隙水圧計の設置手法を検討し、その簡便性を確認するための埋設試験を実施した。併せて、ワイヤレス間隙水圧計が従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能なこと、ワイヤレス間隙水圧計が想定動作期間を満足することを確認するために、長期計測試験を実施した。

#### 1 Aダム a 試験の概要

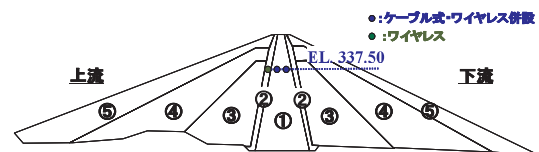
Fig.2に示すAダムは、堤高69.9m、堤頂長312.5m、堤体積1,575千m<sup>3</sup>の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムである。No.28断面EL.337.50mに設置されているケー

ブル式間隙水圧計(P18およびP19)の近傍にワイヤレス間隙水圧計(WP-2およびWP-3)を試験的に設置し両者の比較を行っている。また、上流側フィルタ内にワイヤレス間隙水圧計(WP-1)を試験的に設置している。これらの間隙水圧計の設置位置の概要をFig.3に示す。コアに埋設するワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置されるNo.28断面から1.5m離れたケーブルトレンチ先端の一段高い箇所にてコア抜き法(向後ら, 2006)で設置した。コア抜き法による作業手順を概説すると、①設置を容易にするためワイヤレス間隙水圧計の埋設位置周辺を約1m<sup>2</sup>掘削し整形する、②埋設のための穿孔及び整形を行い、設置標高を確認する、③ワイヤレス間隙水圧計を静置する、④粒度調整した盛土材で計器周辺を人力により締め固め覆土する、⑤計器周辺を覆土後、掘削箇所を重機により盛土材で埋め戻す、⑥振動ローラー等により締め固める、となる。なお、この一連の作業に要する時間は、1時間弱である。ケーブルトレンチ、ケーブル式間隙水圧計の設置、ワイヤレス間隙水圧計の設置、ケーブルトレンチの埋め戻し状況をFig.4~7に示す。Fig.5およびFig.6に示すようにケーブル式間隙水圧計、ワイヤレス間隙水圧計ともに計器周辺部は木植等を用いた人力で締め固めを行っている。埋設に当たってはケーブル式間隙水圧計の周辺にコンタクトコア材、ワイヤレス間隙水圧計の周辺にコア材の2mmふる

【縦断面】



【横断面 No.28断面】



①:コア②:フィルタ③:ZoneⅡ(透水性)④:ZoneⅢ(透水性)⑤:ZoneⅣ(透水性)

Fig.2 Aダムの概観と間隙水圧計設置位置  
Schematics of the arrangement of transducers at A dan

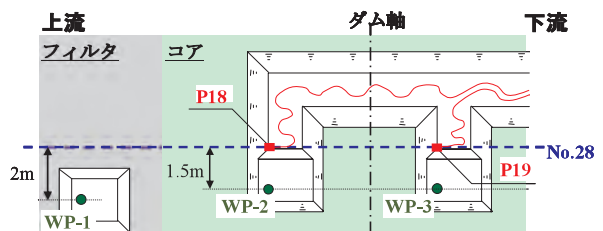


Fig.3 間隙水圧計設置平面の概要  
A schematic of the location for the transducers

い通過分を用いている。ケーブルトレンチの埋め戻しにはコンタクトコア材を用い、ローラーまたはランマにより転圧している。上流フィルタ内のワイヤレス間隙水圧計(WP-1)は、Fig.3に示すようにNo.28断面から2m左岸側に離れた位置にコア抜き法により設置している。

#### b 試験結果

No.28断面のEL.337.50mにおける間隙水圧計の経時計測結果をFig.8～10に示す。Fig.8はWP-1、Fig.9はP18およびWP-2、Fig.10はP19およびWP-3の結果を示している。なお、それぞれに築堤時の盛り立て標高の経時変化と試験湛水開始後の設置標高における貯水圧の経時変化を併記している。貯水圧は貯水位と設置標高の差に水の密度を乗じて算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には0としている。

ワイヤレス間隙水圧計については、2009年3月5日にデータ回収を実施した際には全ての計器から送信データを受信することができたが、2009年7月9日にデータ回収を実施した際にはWP-1、WP-3からの送信データは受信できず、WP-2のみデータの回収が可能であった。後述するが、このことはワイヤレス間隙水圧計に内蔵された電池の内部抵抗が原因であると考えている。このことから、ワイヤレス間隙水圧計テストモデルは設置から5年半程度でその計測寿命を迎えたこととなる。

設置当初の築堤時から試験湛水期間を経てデータ回収が不能となるまでの期間についてフィルタに埋設したWP-1と貯水圧とを比較した結果をFig.11に示す。また、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の計測値を比較した結果をFig.12およびFig.13に示す。ここで、計器設置から初期湛水時に貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間1”、その後一旦満水位まで到達した貯水位が設置標高まで低下する期間を“期間2”、貯水位低下後再び貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間3”、それからデータの回収が不能となるまでの期間を“期間4”としている。Fig.11より、フィルタに埋設したWP-1の計測値と算定した貯水圧とは初期湛水時の“期間2”においてはWP-1が高い値を示すものの2度目の湛水時にあたる“期間4”では両者はほぼ等しくなっている。初期湛水時にWP-1の計測値が高くなった原因は不明であるが、その後の結果からWP-1は適切な計測を行ってきたものと考えている。

Fig.12およびFig.13から、コアに埋設したケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計では、若干値が異なるものの、全期間を通して両者は良い一致を示すことがわかる。以上の結果より、ワイヤレス間隙水圧計は従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能であることを確認した。



Fig.4 ケーブルトレンチおよび間隙水圧計設置位置の概観  
Views of cable trench and the location for the transducers



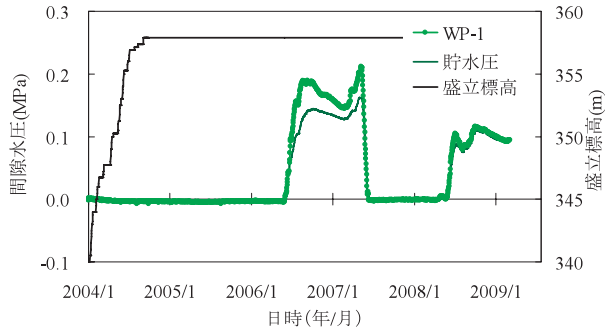
Fig.5 ケーブル式間隙水圧計の設置状況  
Views of setting up the transducers with cable



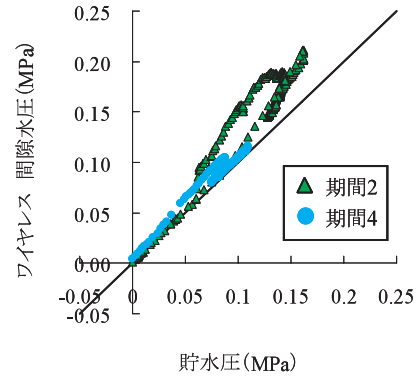
Fig.6 ワイヤレス間隙水圧計の設置状況  
Views of setting up the wireless transducer



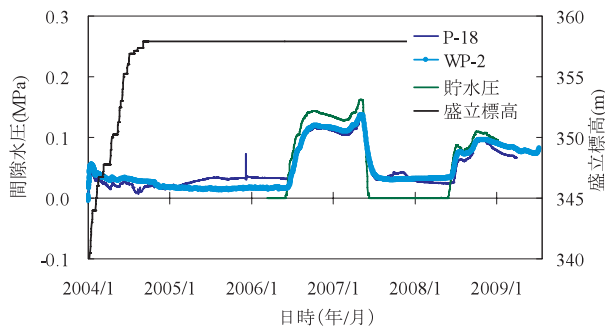
Fig.7 ケーブルトレンチの埋め戻し状況  
Views of burying the cable trench



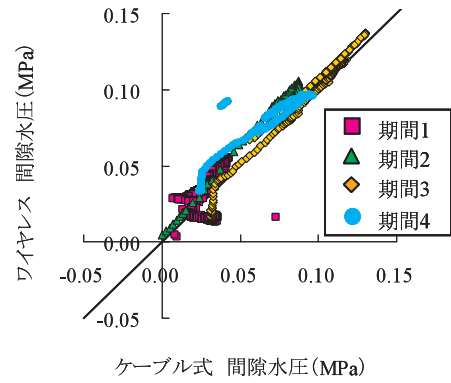
**Fig.8** WP-1 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressure measured by WP-1



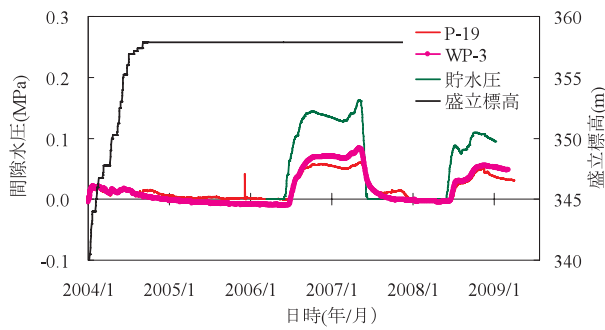
**Fig.11** 貯水圧と WP-1 との比較  
Comparison between the pressure of reservoir water and pore water pressure measured by WP-1



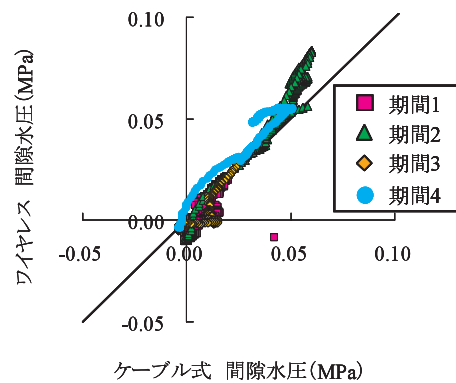
**Fig.9** P18 および WP-2 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P18 and WP-2



**Fig.12** P18 と WP-2 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P18 and WP-2



**Fig.10** P19 および WP-3 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P19 and WP-3



**Fig.13** P19 と WP-3 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P19 and WP-3



2 B ダム

a 試験の概要

Fig.14 に示す B ダムは、堤高 50.0m、堤頂長 256.0m、堤体積 801 千 m<sup>3</sup> の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムである。EL.215.0m に設置されているケーブル式間隙水圧計 (P35, P36, P37, P38, P39) の近傍に、ワイヤレス間隙水圧計 (WP-1, WP-2, WP-3, WP-4, WP-5) を試験的に設置し両者の比較を行っている。これら間隙水圧計の設置位置の概要を Fig.15 に示す。ワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置される No.11+15.00 断面から 5m 左岸側に離れた箇所コア抜き法で設置している。半透水性ゾーン (ゾーン 2U またはゾーン 2D) およびコアにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況をそれぞれ Fig.16 および Fig.17 に示す。A ダム同様にケーブル式間隙水圧計、ワイヤレス間隙水圧計ともに計器周辺部は木槌等を用いた人力で締固めを行っている。埋設に当たっては、コアでは、ケーブル式間隙水圧計の周辺にコンタクトクレイ材およびコンタクトコア材を用いている。また、ワイヤレス間隙水圧計の接地部にコア材の 5mm ふるい通過分、周辺部にコンタクトクレイ材を用いている。なお、ケーブルトレンチお

よびワイヤレス間隙水圧計設置のための掘削部の埋め戻しには、コンタクトコア材を用いている。半透水性ゾーンではケーブル式間隙水圧計の周辺は 50mm 以下に調整した半透水性材料 (ゾーン 2U 材またはゾーン 2D 材)、ワイヤレス間隙水圧計の周辺は 5mm 以下に調整した半透水性材料または砂を用い、ケーブルトレンチおよびワイヤレス間隙水圧計設置のための掘削部の埋め戻しには半透水性材料を用いている。

b 試験結果

No.11 断面 EL.215.00m 周辺における間隙水圧計の経時計測結果を Fig.18 ~ 22 に示す。Fig.18 は P35 および WP-1, Fig.19 は P36 および WP-2, Fig.20 は P37 および WP-3, Fig.21 は P38 および WP-4, Fig.22 は P39 および WP-5 の計測結果を示している。また、それぞれに築堤時の盛り立て標高の経時変化と試験湛水開始後の埋設標高における貯水圧の経時変化を併記している。なお、貯水圧は貯水位と設置標高の差に水の密度を乗じて算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には 0 としている。

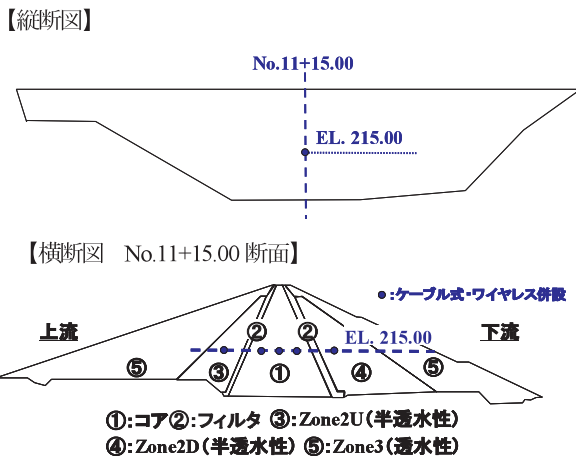


Fig.14 B ダムの概観と間隙水圧計設置位置  
Schematics of B dam and the arrangement of the transducers

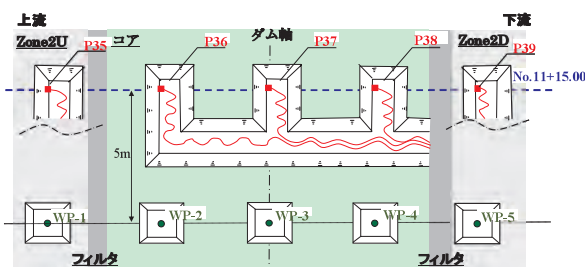


Fig.15 間隙水圧計設置平面の概要  
A schematic of the location for the transducers

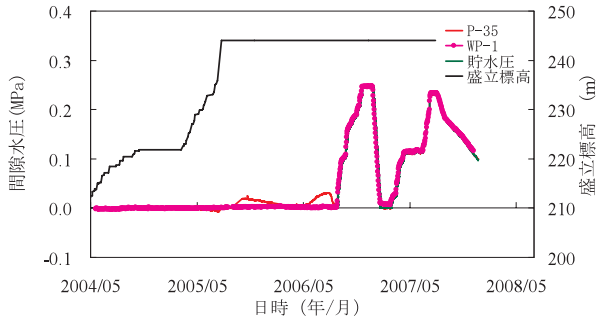


Fig.16 半透水性ゾーンにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況  
Views of setting up the wireless transducer in semi-permeable zone

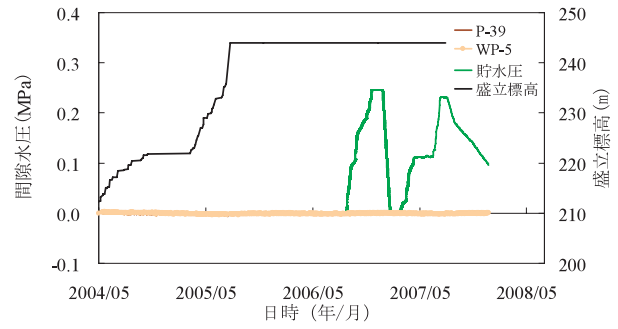


Fig.17 コアにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況  
Views of setting up the wireless transducer in core zone

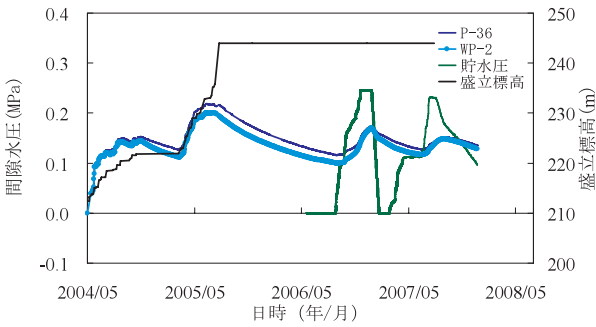




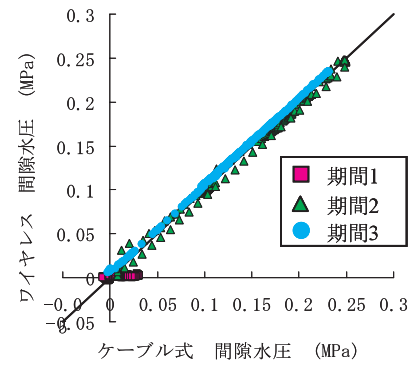
**Fig.18** P35 および WP-1 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P35 and WP-1



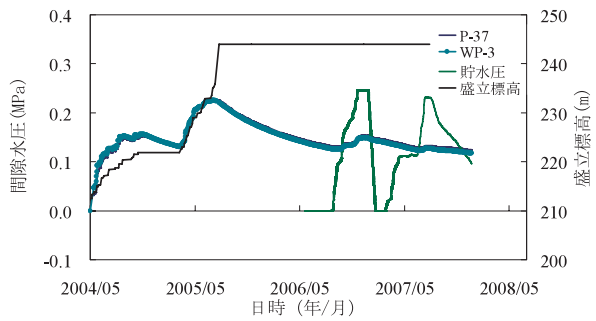
**Fig.22** P39 および WP-5 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P39 and WP-5



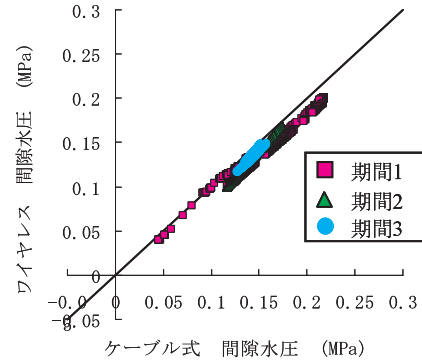
**Fig.19** P36 および WP-2 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P36 and WP-2



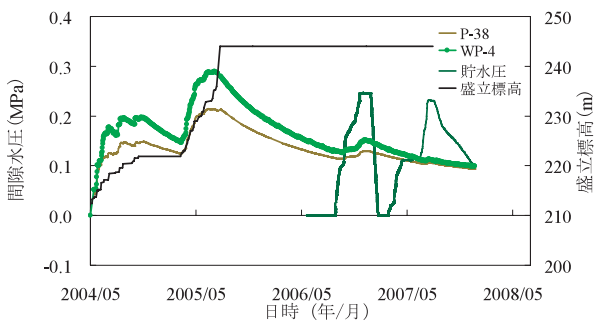
**Fig.23** P35 と WP-1 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P35 and WP-1



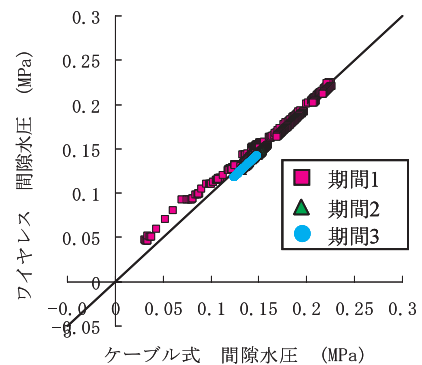
**Fig.20** P37 および WP-3 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P37 and WP-3



**Fig.24** P36 と WP-2 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P36 and WP-2



**Fig.21** P38 および WP-4 による間隙水圧の経時変化  
Time history of the pore water pressures measured by P38 and WP-4



**Fig.25** P37 と WP-3 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P37 and WP-3

ワイヤレス間隙水圧計については、2007年12月27日にデータ回収を実施した際には全ての計器から送信データを受信することが可能であったが、その後データの回収を実施していない。Aダムと同様のテストモデルを設置していることから、2009年10月時点でデータ回収不能と推定されたため、データ回収を試みずに試験を中止した。

築堤時から試験湛水期間を経た2007年12月27日までの期間について、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の計測値を比較した結果を Fig.23 ~ 27 に示す。ここで、埋設時から初期湛水時に貯水位が当該標高に達するまでの期間を“期間1”，その後一旦満水位まで到達した水位が設置標高以下に低下し、再び貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間2”，それから2007年12月27日までの期間を“期間3”としている。Fig.23 ~ 27 より、P38 および WP-4 以外では、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計が全期間を通して良い一致を示していることがわかる。一方、“期間1（埋設時から初期湛水時に貯水位が埋設標高に達するまで）”において、WP-4 が P38 と比較し、かなり大きな過剰間隙水圧の発生を示している。しかしながら、その増減の

傾向は一致しており、貯水位が埋設標高に達して以降の“期間2, 3”において、両者の値はほぼ等しくなっている。“期間1”において両者の値が異なった理由として、設置位置や設置方法の違いが過剰間隙水圧発生量の違いとして現れたことが考えられるが、それらの影響は貯水により緩和されたのではないかと考えている。以上の結果から、Aダムと同様に、Bダムにおいても、ワイヤレス間隙水圧計は従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能であることが確認された。

#### IV 電池容量試験

##### 1 試験装置および試験条件

ワイヤレス間隙水圧計に用いる電池性能を評価するため、ワイヤレス間隙水圧計を模擬した実験装置を作製し、室内電池負荷実験を実施した。試験装置は Fig.28 に示す負荷回路ブロックからなり、R1, R2, R3, R4 は、それぞれスリープ時、受信待機時、計測時、データ送信時の消費電力を模擬した負荷抵抗である。ここで、時計のみが動作している状態をスリープ時、地上からの送信要求が受信可能な受信待機状態を受信待機時、間隙水圧の測定を行う測定状態を計測時、地上へのデータ送信を行う送信状態をデータ送信時としている。また、電圧計により、各負荷をかけた際の電池電圧を計測している。各負荷回路ブロックの設定値を Table 1 に、電池負荷試験における負荷パターンを Fig.29 に示す。本試験では、計測条件として1日に1回の計測及びデータ送信を設定した。このため、1回の負荷パターン中に受信待機、計測、データ送信の各負荷を1回負荷し、スリープ負荷は常時

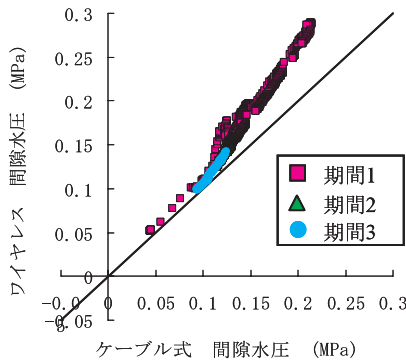


Fig.26 P38 と WP-4 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P38 and WP-4

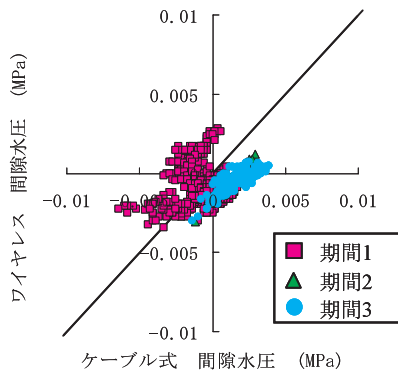


Fig.27 P39 と WP-5 との比較  
Comparison between the pore water pressures measured by P39 and WP-5

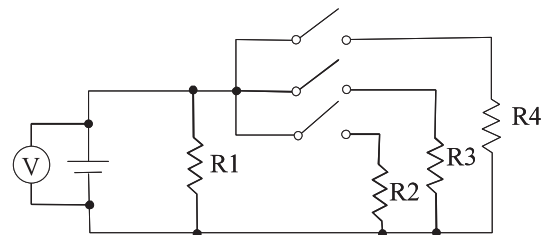


Fig.28 試験装置回路図  
Schematic of a circuit testing the battery

Table 1 負荷条件設定値  
Specifications of the test condition

負荷条件	試験ケース	抵抗値	定格電流	負荷時間
R1 スリープ	case1	3.3 k Ω	1 mA	常時
	case2	6.6 k Ω	0.5 mA	
	case3	16.5 k Ω	0.2 mA	
	case4	66.0 k Ω	0.05 mA	
R2 受信待機	共通	432.2 Ω	8 mA	180 s
R3 計測	共通	39.3 Ω	80 mA	10 s
R4 送信	共通	14.1 Ω	200 mA	18 s

負荷している。

ワイヤレス間隙水圧計は、動作期間10年を目標としているが、開発期間が目標動作期間に比べ短かった。そこで、Fig.29に示す負荷パターンで10年間に消費される電力を模擬できるよう、1日に実施する負荷パターンの頻度を変えた4つの促進試験ケースを実施し、電池容量の検証を行った。Table 2に示すように、“case1”では、Fig.29に示す負荷パターンを1日に20回繰り返すことで、想定期間中に消費される電力を0.5年で消費するよう模擬されている。同様に、“case2”では1日に10回、“case3”では1日に4回、“case4”では1日に1回繰り返すことで、試験期間を想定動作期間10年の1/10、1/4、1倍となるようにしている。なお、これに併せて、スリープ負荷時の負荷抵抗はTable 1に示すように設定している。

試験に用いたリチウム電池のカタログ仕様をTable 3に示す。この電池は無負荷状態であっても、一年当たり公称容量の3%を放電するため、長期間の使用を考えると、電池の自己消費量は無視できない。また、終止電圧2.0Vに至った時点で、安定した動作が保証されなくなる。

2 試験結果

各試験ケースにおけるスリープ負荷時、送信負荷時の

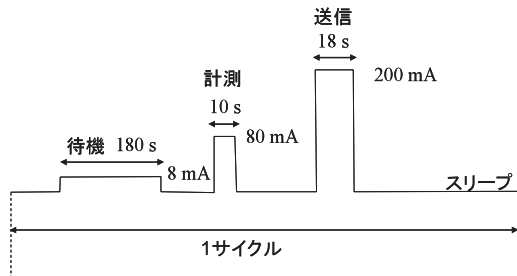


Fig.29 負荷パターンの概要  
Schematic of the loading pattern

Table 2 試験ケース  
Test series

試験ケース	試験期間	1サイクル時間	負荷頻度
case1	0.5年	72分	20回/日
case2	1年	144分	10回/日
case3	2.5年	6時間	4回/日
case4	10年	24時間	1回/日

Table 3 電池仕様  
Specifications of the battery

公称容量	13.0Ah
公称電圧	3.6V
終止電圧	2.0V
自己消費率	3%/年以下

電池電圧の経時変化をFig.30に示す。なお、各ケースともに4個の電池を用いて同時に試験を実施しており、Fig.30に示す結果は、その平均値である。

Fig.30より“case1, 2, 3”と“case4”では、送信負荷時の電池電圧計測結果の傾向が大きく異なることがわかる。前者3つのケースでは、試験期間中3.0V以上の電圧を維持し、試験期間終了頃に急激に電圧が減少し、終止電圧である2.0Vを経て0Vになる。スリープ負荷時の電池電圧も同様の傾向を示している。このような挙動は、試験期間中に電池容量が使い切られたためとだと考えられる。一方、“case4”の場合、送信時の電池電圧が経時的に緩やかに減少し、終止電圧に至るのに対して、スリープ負荷時の電池電圧は公称電圧値の3.6Vを保持している。このことから、“case4”については、電池容量が使い切られることなく送信負荷時の電池電圧が終止電圧に至ったものと考えられる。

このことを確認するため、Fig.29に示す負荷パターン中の電池電圧と各負荷抵抗値から、負荷パターン中の電流値を算出した。これに負荷時間を乗じ、負荷パターン中に消費される電池容量を算出した。これを、送信負荷時の電池電圧が、終止電圧2.0Vに至るまでの実動作期間分積算することで、実動作期間中の負荷時使用容量を求めた。また、Table 3に示すように使用した電池は3%/年の自己消費が見込まれることから、初期容量13.0Ahの3%にあたる0.39Ah/年に実動作期間を乗じ、実動作期間中の自己消費容量を算出した。これら実動作期間中の負荷時使用容量と自己消費容量を足し合わせ、実動作期間中における実使用容量とした。また、実動作期間中における実使用容量と電池の公称容量の割合を容量使用率とした。各試験ケースにおける、実動作期間、負荷時使用容量、実使用容量、容量使用率をTable 4に示す。また、各試験ケースにおけるスリープ時、受信待機時、計測時、送信時の各消費容量および自己消費容量の内訳比較をFig.31に示す。これらの結果から、case1, 2および3では電池容量がほぼ全て消費されているのに対し、“case4”では26%程度の電池容量が消費されず残っていることが確認された。

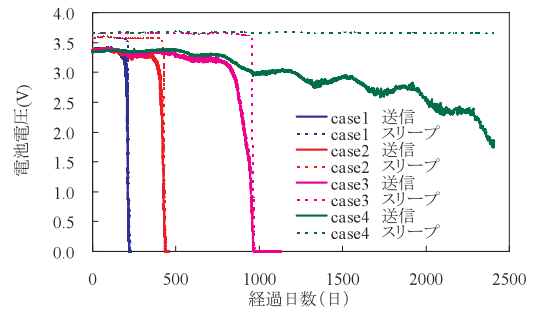


Fig.30 スリープおよび送信負荷時における電池電圧の経時変化  
Time histories of the battery voltage measured on the sleep and data sending condition

**Table 4** 試験結果から算定した容量使用率  
Electric capacities calculated from the test results

試験ケース	想定試験期間	実動作期間	負荷時使用容量	使用容量	容量使用率
case1	0.5 年	0.57 年	13.0 Ah	13.3 Ah	102.3 %
case2	1 年	1.14 年	13.0 Ah	13.4 Ah	103.1 %
case3	2.5 年	2.49 年	11.4 Ah	12.3 Ah	94.6 %
case4	10 年	6.45 年	7.0Ah	9.6 Ah	73.8 %

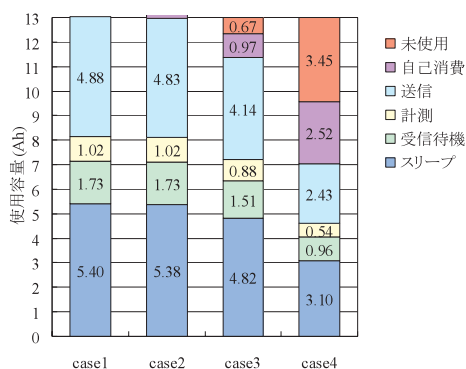
一般に電池を負荷抵抗に接続し電流を流した場合、電池の起電力（無負荷の状態の端子電圧）よりも端子電圧は低くなる。この原因は負荷抵抗と直列に接続された電池内部の抵抗によるものと考えられ、電池の内部抵抗と表現される。電池の内部抵抗によって起こる電圧降下は、流れる電流の大きさに比例するため、負荷抵抗に供給する電流が小さい場合は、その影響がほとんどない。一方、大きな電流が流れる場合には、電圧降下の影響が問題となる。一般に電池の内部抵抗は、放電による電池の劣化により増大する。その原因のひとつは、電池の極板の有効面積の減少だと考えられる。ワイヤレス間隙水圧計テストモデルに使用している塩化チオニルリチウム電池は、放電により、負極であるリチウム電極表面に LiCl 膜が生成し内部抵抗が増加する。

そこで、電池の内部抵抗が試験結果に与えた影響を確認するため、“case3” および “case4” について内部抵抗を試算した。試算に当たっては、スリープ負荷時の電池電圧が起電力に等しいと仮定し、送信負荷時の電池電圧値とその際に算定される電流値から次式により電池の内部抵抗を算出した。

$$R_{in} = (V_{sleep} - V_{send}) / I_{send} \quad \dots\dots (1)$$

$$I_{send} = V_{send} / R_{send} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $R_{in}$ ：電池の内部抵抗（ $\Omega$ ）、 $V_{sleep}$ ：スリープ負荷時の電池電圧（V）、 $V_{send}$ ：送信負荷時の電池電圧（V）、 $I_{send}$ ：送信負荷時の電流（A）、 $R_{send}$ ：送信負荷抵抗（ $\Omega$ ）である。



**Fig.31** 各負荷による使用電池容量の内訳  
The electric capacity items consumed by each loading

算出した電池内部抵抗の経時変化を Fig.32 に示す。

Fig.32 より、算定された電池内部抵抗は 750 日経過頃までは “case3, 4” とともに同様な傾向を示す。その後、“case3” では電池内部抵抗の増加率が急増し、Fig.30 において送信負荷時の電池電圧が終止電圧 2.0V に低下した 900 日経過頃には電池内部抵抗が 10  $\Omega$  に達している。一方、“case4” では経時的に電池の内部抵抗が増加しており、その関係は指数関数として次式で近似することができる。

$$R_{in} = 1.0094 \exp(0.0009 t) \quad \dots\dots (3)$$

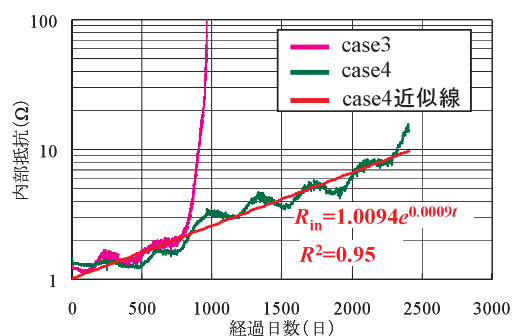
ここに、 $R_{in}$ ：電池内部抵抗（ $\Omega$ ）、 $t$ ：経過日数（日）である。

なお、Fig.30 に示される周期的な電池電圧値の増減や Fig.32 で示される電池内部抵抗値の周期的な増減は、温度変化と密接な関係にあることが温度計測データより判明している。

以上の電池容量および電池内部抵抗に関する検証結果から、“case4” では電池容量は残存しているものの、電池内部抵抗が時間経過により増大し、比較的大きな電流が流れる送信負荷時に電圧降下が起こり、電池電圧が終止電圧を下回る結果となることが明らかとなった。

### 3 実ダムにおける試験計測結果との比較

A ダムでは、実際のワイヤレス間隙水圧計テストモデルにおいて、データ送信時の電池電圧の経時変化を測定している。埋設当初からデータ回収時毎に測定されたデータ送信時の電池電圧の結果を Fig.33 に示す。なお、



**Fig.32** 電池内部抵抗の経時変化  
Time histories of the internal resistance



比較のため、電池負荷試験における“case4”の結果を併記している。テストモデルと電池負荷試験では、使用している電池の本数が異なる。このため、Fig.33では電池負荷試験の“case4”の結果を補正し、両者の比較を容易にしている。

Fig.33から、Aダムにおける試験計測結果、電池負荷試験結果ともに約500日経過頃から電池電圧の低下率が大きくなり、その後ほぼ一定の低下率で電池電圧値が減少している。このことから、電池負荷試験の結果同様、Aダムにおいて埋設後約5年半でワイヤレス間隙水圧計のデータ回収が不能となった原因は、電池容量が完全に消費されたためではなく、電池内部抵抗の経時的な増加によりデータ送信時に電圧降下が発生し、電池電圧が終止電圧を下回ったためと考えられる。ワイヤレス間隙水圧計テストモデルの開発終了時までには、電池負荷試験における“case1”および“case2”の結果しか得られず、ワイヤレス間隙水圧計は想定動作期間の10年で電池容量をほぼ消費するものと判断した。しかしながら、電池内部抵抗の経時的な増加の影響は考慮しなかった。このことが、Aダムにおいてワイヤレス間隙水圧計が想定動作期間の10年を大きく下回る約5年半で、通信途絶状態に至った原因だと考えられる。

#### 4 耐用年数を満たす方策と課題の検証

ワイヤレス間隙水圧計の想定動作期間は、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件で設定している。一方、電池容量試験では、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/日、の使用条件を想定しており、使用条件が異なる。そこで、Fig.31に示す“case4”の送信負荷時の使用電池容量を、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件となるよう補正し、想定動作期間10年分に換算した負荷時使用電池容量を算出した。これに、10年分の自己消費容量を足し合わせた結果、想定動作期間10年間に消費される使用電池容量は11.6Ahとなり、電池の公称容量13.0Ahを下回る。このことから、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件の場合、電池容量は、想定動作期間10年を十分に満足すると考

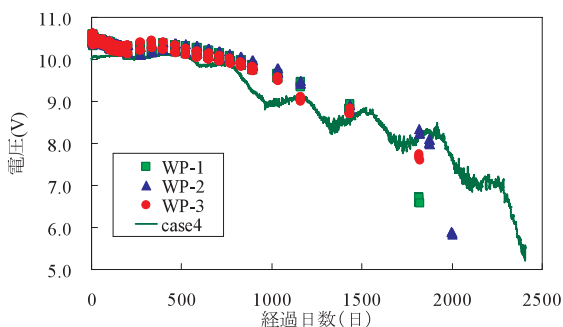


Fig.33 Aダム送信時の電池電圧の変化  
Time histories of the battery voltage measured on the data sending condition in A dam

えられる。

電池容量が満足することが確認されたことから、想定動作期間中のワイヤレス間隙水圧計テストモデルの正常な動作を保証するためには、電池の内部抵抗の経時的な増加に起因する電圧降下の影響を適切に評価し、これを低減する必要がある。

データ送信時の電圧降下の影響を低減するためには、データ送信時の消費電流を小さくすればよい。そのためには、データ送信回路の省電力化、使用する電池の個数を、並列で増加させることが考えられる。後者の方策は、前者に比べ容易である。このことから、ここでは、電池の並列化による耐用年数の延長の可能性を検証する。なお、電池内部抵抗の増加傾向は、電池を並列化することにより、前出の電池負荷試験の結果と異なる可能性が考えられる。しかし、ここでは、電池の内部抵抗は式(3)に示す近似式で表現されると仮定し考察を行う。

電池を並列化することで、電池一本当たりが流す電流は減少する。このため、並列化数を  $n$  とすることで電池一本当たりの消費電流は  $1/n$  となるため、電池の消費容量も  $1/n$  となる。

また、並列化数を  $n$  とした場合の  $t$  年後の送信負荷時の電池電圧は次式により試算できる。

$$V_{send}(t, n) = V_{nomi} - V_{in}(t, n) \quad \dots \dots (4)$$

$$V_{in}(t, n) = 1.0094 \exp(0.0009 t) \frac{I_{sendrat}}{n} \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 $V_{send}(t, n)$ ：送信時電池電圧 (V)、 $V_{nomi}$ ：公称電池電圧 (V)、 $V_{in}(t, n)$ ：電池内部抵抗による電圧降下量 (V)、 $I_{sendrat}$ ：送信時定格電流 (A)、 $t$ ：経過日数 (日)、 $n$ ：電池並列数である。

なお、無負荷時の電池電圧は容量が無くなるまで公称電圧 3.6V を維持すること、送信時に消費される電流は常に定格電流 0.2A に等しいと仮定する。

式(4)、(5)から試算した電池並列数と経過日数に伴う送信時電池電圧の変化を Fig.34 に示す。

Fig.34 から、電池を 2 並列とした場合、少なくとも 3000 日 (8.2 年) は送信時電池電圧が終止電圧を上回り、

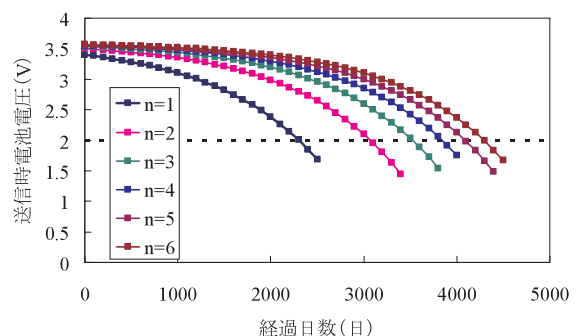


Fig.34 電池並列数と経過日数に伴う送信時電池電圧の変化  
Changes of the battery voltage estimated by equation (4) and (5)

正常に動作するものと推定される。同様に、耐用年数10年を満足するためには4並列以上の電池並列数が必要であることがわかる。なお、ここで得られた結果は、テストモデル相当のワイヤレス間隙水圧計にのみ適用可能であり、それ以外の基板を有するものについては別途検証が必要である。

上記の検証結果から、電池内部抵抗によるデータ送信時の電圧降下の影響を、電池の並列化により緩和し、ワイヤレス間隙水圧計の長期性能が向上することが示された。しかしながら、電池を並列化すると、未消費のままの電池容量が増大するため、結果的に電池容量の無駄が多くなり経済性が悪くなる。今後の課題として、効率的な電池運用が可能な基板および電源システムの開発が重要となる。

## V 結 言

平成13～15年度の官民連携新技術研究開発事業により開発したワイヤレス間隙水圧計のテストモデルに関して、実ダム設置後5年半にわたり計測された結果から、従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能ことが明らかとなった。その結果、施工時の利便性と併せ、ワイヤレス間隙水圧計の有効性が示された。しかしながら、実ダム設置後、想定動作期間10年を下回る5年半で通信途絶状態となった。その原因は、ワイヤレス間隙水圧計内部に搭載されたリチウム電池の内部抵抗が経時的に増大し、大きな電流が必要となるデータ送信時に電池が電圧降下を起し、正常に動作しなくなったためであることが明らかとなった。開発時には消費される電池容量については検証を行い、計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件で、10年以上の計測が可能と想定した。しかしながら、電池内部抵抗の経時的な増

加については、検証を実施しなかった。ワイヤレス間隙水圧計により長期計測を実施する際は、今回提案を行った評価手法により、電池の内部抵抗の状態を評価することが重要である。また、ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証には実時間規模での検証が不可欠である。

今回明らかにしたワイヤレス間隙水圧計の長期計測化への対応については、更なる研究開発による改良が必要となる。現在稼動しているワイヤレス間隙水圧計は、テストモデルと比べ、電池量、回路基板ともに改良されており、電池内部抵抗による電圧降下の影響が緩和されていると考えられる。このため、これら計器の挙動について、継続的にデータの検証を行い、その長期計測性能を評価していくことが重要である。

末筆になりましたが、本研究に当たり、データの提供等ご尽力いただきました関係各機関の皆様には謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 林田洋一・向後雄二・浅野 勇・増川 晋・田頭秀和 (2008)：低周波電磁波を用いたワイヤレス計測システム，農業農村工学会誌 第76巻 第9号 13-16
- 2) 浅野 勇・林田洋一・田頭秀和・増川 晋 (2009)：ワイヤレス埋設計器の現状について，平成21年度ダム工学会研究発表会・講演会 講演集 1-4.
- 3) 財団法人日本ダム協会 (2009)：フィルダムの施工，587-589，財団法人日本ダム協会
- 4) 向後雄二・浅野 勇・林田洋一・遠目塚良一 (2006)：ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測，ダム工学，Vol.16，No.3，165-176

# Long Term Performance of Wireless Pore Water Pressure Transducers

HAYASHIDA Yoichi, TOHMETSUKA Ryoichi, ASANO Isamu,  
MASUKAWA Susumu and TAGASHIRA Hidekazu

## Summary

We have developed wireless transducers to measure pore water pressure in the fill dams. We call them “the Wireless Pore Water Pressure Transducers”. This transducer has no wire cables for applying electrical energy and sending measured data. For these features, it is easy to set up in fill materials of dam because we don't have to dig and bury long cable trenches during constructions. To examine performance of wireless transducers, we have measured pore water pressures by them and compared the data with that measured by ordinary pore water pressure transducers with cable set up near them in two rock fill dams since 2004. Then, we clarify that wireless transducers can measure pore water pressure correctly and steadily as well as ordinary pore water pressure transducers with cable.

However, after five and half years, the wireless transducers set up in two rock-fill dams became out of order and don't send measured data. We supposed that the wireless transducer would work well for more than ten years because we examined electrical capacities consumed by its working and compared them with that of the built-in batteries. Then we examine a reason why the wireless transducers become out of order. From a result of electrical capacity test of batteries that have been performed since 2002, voltages of battery on data sending conditions gradually become lower and reach the final voltage but electrical capacities of batteries remain fully. This phenomenon is observed in the data measured by the wireless transducers set up in one rock fill dam.

In the results of study, we can clarify that increase of internal resistances of battery cause voltage drops on data sending conditions and in order to prolong lives of wireless transducers we have to reduce influences of internal resistance of battery. Then we propose a method to reduce voltage drops on data sending conditions caused by internal resistances of batteries.

**Keywords:** Wireless transducer, Fill dams, Long term performance

## 農業用開水路壁面の健全度評価指標構築の課題

本間新哉\*・加藤 敬\*\*

目 次	
I 緒 言	255
II 算術平均粗さ (Ra) の標準的な値と健全度 評価に対する現場データによる適用検討	256
1 検討に用いたデータ	256
2 供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) の 指標への適用性	257
III 凹凸容量を用いた健全度評価手法の検討	257
1 凹凸容量の算定の方法と健全度評価の検討	257
IV 中性化の健全度評価指標への適用性の検討	259
1 調査対象	259
2 調査の方法	259
3 中性化深さ調査の結果	259
V テストハンマー調査によるコンクリート強度 推定の健全度評価指標の適用性への検討	260
1 実施概要	260
2 調査結果と考察	260
VI 水路壁面ひび割れの健全度評価指標への 適用性の検討	261
1 各用水路のひび割れ状況	261
2 経年に対するひび割れ状況	261
VII 劣化評価項目と健全度評価指標への適用性	262
VIII 結 言	262
参考文献	263
Summary	264

## I 緒 言

農地・農業用水等の資源を農業・農村の基盤を支える社会共通資本として、将来にわたって良好な状態で保全管理する「農地・水・環境保全向上対策」及び「農業水利施設のストックマネジメント」の施策が進められている。このように、更新時期を迎える農業水利施設の施設診断や適時の予防保全対策の実施により、施設の長寿命化を図り、ライフサイクルコスト (LCC) を低減することが求められているが、LCC 低減のためには、施設点検時点の健全度の把握だけでなく、将来の施設の劣化状態を予測すること (劣化予測) が重要である。農業水利施設のうち現場打ち鉄筋コンクリート製農業用開水路 (以下「農業用水路 (RC)」とする) は長大な延長を有することから、農業用水路 (RC) の点検・診断においては、目視もしくは簡易な器具を用いた点検管理が主体となっている。施設の長寿命化と LCC の最小化算定に大きく影響する劣化予測の精度向上のためには、劣化予測の基礎となる水利施設の点検・診断情報を的確に収集することが重要である。

このような背景の下、筆者らは農業用水路 (RC) を対象とした目視による施設の劣化状態を判定する健全度の評

価基準の確立や、簡易な計測調査から求まる健全度評価の定量的な指標づくりの取り組みを進め、水路壁面等の凹凸に対し、算術平均粗さ (Ra) を用いた健全度評価手法の提案及び健全度評価基準の提案を行ってきた。農業用水路 (RC) の目視による劣化診断では、水路壁面の凹凸状態が構造物の劣化状態を判断する指標の一つと考えられるが、筆者らが行った 2006 年の調査 (本間ら, 2007b) での診断評価は定性的なものが主であった。このため評価者が異なる場合、診断の熟練度の違いによって健全度評価の結果が異なる可能性があることが指摘されている (北村ら, 2008c)。

定性的な健全度評価結果の相違を回避するためには、健全度評価の定量的な指標が必要となる。水路壁面の凹凸を型取りゲージを用いて測定し、粗度係数を計算した事例が報告されている (日本水土総合研究所, 2006)。筆者らは、水路壁面凹凸の健全度評価の定量化と評価精度の向上を目的として、簡易な計測器 (型取りゲージ) を用い、水路壁面の凹凸計測を行うとともに、凹凸を数値表現するため、算術平均粗さ (Ra) の指標の水路壁面の健全度評価への適用性の検討を行った (本間ら, 2007a)。

また、北村ら (2008c) は、用水路の壁面の粗化 (水路壁面の表面の粗化とは、摩耗などによって水路壁面の表面の凹凸が経年的に増大していくことと定義) による凹凸について型取りゲージを用いて数値化し、算術平均粗さ (Ra) と供用年数の相関関係について述べている。また、水路壁面凹凸の健全度評価と構造的機能の関連については、流水等により水路壁面のコンクリート断面の減少した量と許

\* 農村総合研究部地域資源保全管理研究チーム

\*\* 農村総合研究部上席研究員

平成22年1月14日受理

キーワード：農業用水路 (RC), 算術平均粗さ (Ra), 供試体, 凹凸容量, 健全度, 中性化



容応力度についての構造的検討が行われている(本間ら, 2008a)。

このように、算術平均粗さ(Ra)を用いて水路壁面凹凸を数値化し定量的に表現する可能性が示され、健全度評価基準への指標化の研究が進められてきた。一方、これらの報告の中では、調査対象地区が北陸地域(西蒲原地区)を中心としたものであったこと、現地で相当に進んだ劣化状態が確認されていないこと、現地の水路の表面露出骨材寸法が地域によって異なる等の課題が生じていた。より精度の高い定量的な算術平均粗さ(Ra)の指標化のため、供試体を用いた定量化の検討が行われた。この検討では、コンクリートの骨材寸法の違いが算術平均粗さ(Ra)算定におよぼす影響や、粗骨材が剥離する直前までの状態と算術平均粗さ(Ra)の適用性について報告されるとともに、供試体から求められた算術平均粗さ(Ra)と健全度の標準的な関係の値の提示と凹凸容量の健全度評価の指標としての可能性が提案されている(本間ら, 2009)。なお、算術平均粗さ(Ra)の算定方法、水路壁面凹凸状態の健全度評価基準、供試体から求められた算術平均粗さ(Ra)の標準的な値及び供試体から求められた凹凸容量についての詳細については報告(本間ら, 2009)を参照されたい。

しかしながら、供試体から求められた算術平均粗さ(Ra)標準値の健全度への適用や供試体から求められた凹凸容量の標準値から求められる健全度を現場調査に適用した事例はない。また、中性化やテストハンマーを用いたコンクリートの推定強度及び水路壁表面のびびり割れについての測定結果の報告はなされているが、それぞれの項目を単独で施設の劣化予測を行うための健全度評価指標として用いている例は見当たらない。

これまで我々が3年間にわたり蓄積してきた現地調査データ(約1,400バレルを対象)と分析データを基に、供試体から求められた算術平均粗さ(Ra)の標準的な値の現場への適用性や、テストハンマーを用いたコンクリートの推定強度、ひび割れ及び中性化の深さについてこれらの劣化評価指標としての有効性について検討を行

い、現時点におけるそれぞれの健全度評価指標を現場へ適用する際の課題を取りまとめたので技術資料として報告する。

本報告をまとめるにあたり関係土地改良区の方々に多大なるご理解とご協力を賜りましたことを記して感謝申し上げます。

## II 算術平均粗さ(Ra)の標準的な値と健全度評価に対する現場データによる適用検討

### 1 検討に用いたデータ

供試体計測から求められた算術平均粗さ(Ra)の標準的な値と健全度の検討には、2006年度、2007年度に実施された北陸地域(西蒲原地区)の農業用水路(RC)を対象とした型取りゲージを用いた凹凸現地調査と健全度評価データ及び2009年度までにまとめられた算術平均粗さ(Ra)のデータを用いた。調査対象地域は、北陸の沖積平野に位置する約19,000haの広さを持つ水田地帯であり、土地改良区が総延長約671kmにわたる用水路を長年管理し、供用期間が概ね10年から40年の異なる用水路施設が存在しているという特徴がある。また同一水系内の水路は同様の気象条件を受けるとともに、水質や灌漑期間も同じであることから、水路壁面の劣化は同様の条件下で進むと判断される。

算術平均粗さ(Ra)の値は灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均を用いた。これは、北村ら(2008a)が健全度と算術平均粗さ(Ra)の相関の分析を行い、良い相関関係を表すとの結果を示している。

2009年度までに求められた算術平均粗さ(Ra)と健全度の相関関係をFig.1に示す。この傾向は北村ら(2008a)の分析した相関傾向は一致しているが、筆者ら(本間ら, 2009)の提案した供試体から求められた算術平均粗さ(Ra)の標準的な値と健全度の相関関係とは異なる傾向が見られた(Fig.2)。

現場水路壁面の凹凸は壁面の測定位置により異なり一様でないため、算術平均粗さ(Ra)の分布も一様とはならない。Fig.1では壁面の凹凸を代表する算術平均粗さ(Ra)の値として、灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均値を用いている。一方、供試体を用いて求められた算術平均粗さ(Ra)の標準的な値は、計測面全体が一様の凹凸状況を表すように作成された供試体から求められた値である。このため供試体から求められた標準値と、現地の水路壁面の算術平均粗さ(Ra)の平均から求められた値が異なると考えられる。提案している標準値と現場で得られる算術平均粗さ(Ra)との関係を明確にすることは標準的な値の適正な活用を図るためには重要な事項である。関係を検討するため水路壁面の凹凸から得られた算術平均粗さ(Ra)の灌漑期水位以下における算術平均粗さ(Ra)の平均値、最大値及び供試体から求められた標準値と健全度の分布関係を調べた

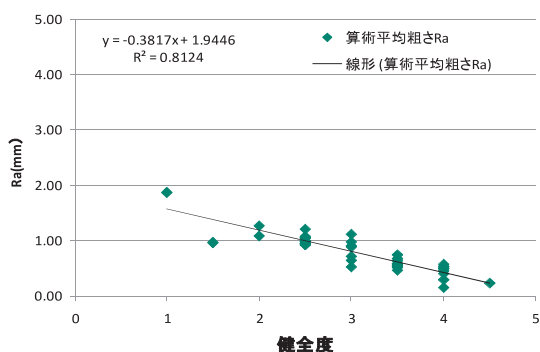
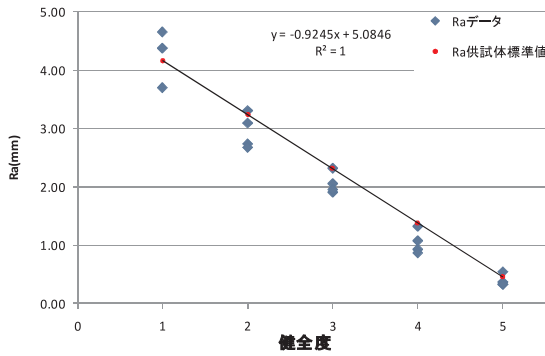
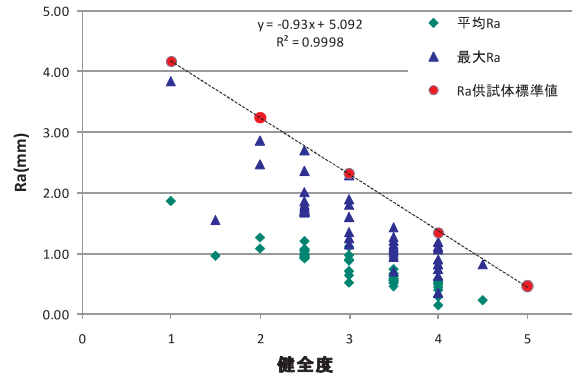


Fig.1 灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均値と健全度の相関

Correlation between Ra means and soundness index less than water level for the irrigation period



**Fig.2** 供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) と健全度の相関 (本間ら, 2009)  
Correlation between Ra which was demanded by test specimen and soundness index (Honma, 2009)

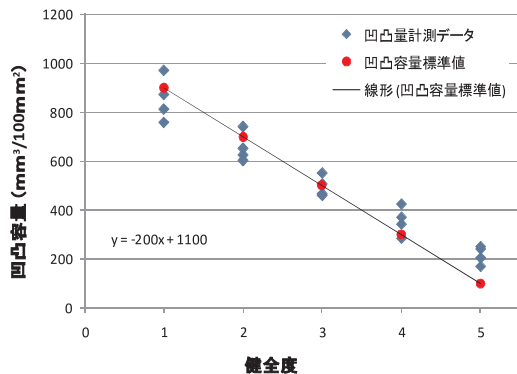


**Fig.3** 算術平均粗さ (Ra) の平均値, 最大値及び供試体標準値の分布  
Distribution of mean and maximum of Ra and test specimen standard level

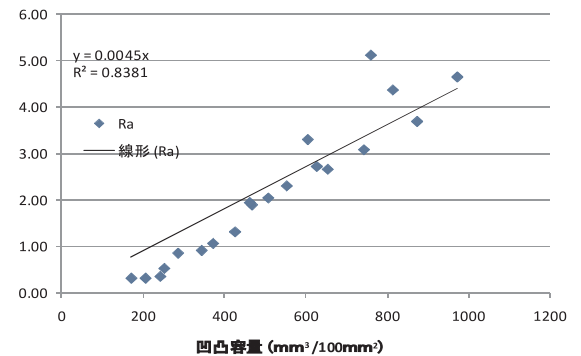
(Fig.3)。

2 供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) の指標への適用性

灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) 最大値の分布と、供試体計測から求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値の分布を比較した結果、求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値が、実測から求められた算術平均粗さ (Ra) の最大値の上限値と接する位置に分布することが分かった。すなわち、筆者らが提案した供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値は、5段階に設定した各健全度評価基準における上限を示す値であることが明らかとなった。供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) の値を健全度評価判断基準の算術平均粗さ (Ra) の上限を表す基準値として用いることにより、各現場において設定する健全度評価基準を順当なものに導くことができると考える。なお、最大値だけで水路壁面の凹凸の健全度を評価する場合、最大値は局部的な凹凸の影響を大きく受けるという課題があるので注意が必要である。



**Fig.4** 凹凸容量と健全度の相関  
Correlation between quantity of unevenness and soundness index



**Fig.5** 凹凸容量と Ra の相関  
Correlation between quantity of unevenness and Ra

III 凹凸容量を用いた健全度評価手法の検討

筆者らは、水路施設の健全度評価指標の開発を目的として、算術平均粗さ (Ra) を使用した壁面凹凸の健全度評価指標の提案を行ってきた。更に、現時点では十分確立されていない水路の健全度評価の新たな指標開発の検討を行った。凹凸容量 (供試体を用いて計測された、コンクリート打設面からの減少した容量) と健全度の相関関係について、その標準的な値を筆者ら (本間ら, 2009) は提案していた (Fig.4)。しかしながら現場において凹凸容量を直接かつ容易に把握する手法は確立されていない。このため本報告では、型取りゲージ以外の簡易な計測器 (ノギス) を用いて壁面の凹凸量を推定し、凹凸容量と算術平均粗さ (Ra) の関係 (Fig.5) を用いその分布状況を比較することにより、凹凸容量の健全度評価指標としての適用性について検討を行った。

1 凹凸容量の算定の方法と健全度評価の検討

凹凸容量の算定には、水路壁面を垂直線に対し直角方向に凹凸をノギスで測定する方法を用いた。まず水路壁に近接した2つの地点 (A 地点, B 地点) を選定する。

次に2つの地点の壁面凹凸をノギスにより測定し、その値を基に凹凸容量を求めることとした。

具体的には、A地点において水路壁面に対し約50cm離れた垂線（下げ振りを用いて垂線を設定）と水路壁面凹凸間の距離をノギスを用いて水路高さ方向に1cm間隔で測定した（Fig.6）。次にA地点から15cm上流をB地点として、A地点と同様の計測を行いデータを収集した。

それぞれの深さ位置における凹凸量を算定するために想定面を設定した。本来施工時表面からの凹凸量を計測することが望ましいが、施工時の表面位置は不明であり想定することも難しい。そのためここでは設計図を基に壁面は垂直であると想定した。想定面の位置については、凹凸量の最低値が0.1mmとなる地点とした。このように設定した想定面を基に凹凸量を計算した。各水位における値をA地点においては $ai$ 、B地点においては $bi$ とし、

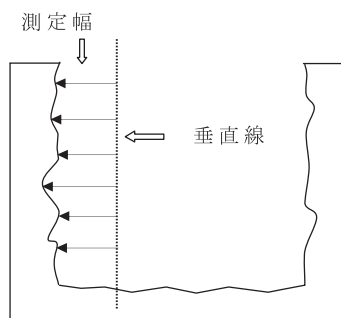


Fig.6 水路壁の凹凸測定  
Unevenness measurement of canal wall

$ai$  と  $bi$  の値の平均をその深さ位置における凹凸量 ( $ci$ ) とした。求められた凹凸量 ( $ci$ ) を  $100 \text{ (mm}^2\text{)}$  当たりの凹凸容量に換算 ( $di = ci \times 10 \times 10$ ) して各深さの凹凸容量  $di$  とした。

縦軸に天端からの深さ (cm)、横軸に測定幅 (mm) を設定した計測データのプロットを Fig.7, Fig.8 に示す。なお、図中の垂直のプロット線は凹凸量算定に用いた当初の想定断面位置を表す。

求められた各凹凸容量 ( $di$ ) に対し、Fig.5 に示す関係式 ( $y = 0.0045 \times x$ ) を用いて、それぞれを算術平均粗さ (Ra) とした。凹凸容量から換算して求められた算術平均粗さ (Ra) 分布を Fig.9, 同一地点の型取りゲージを用いて求められた算術平均粗さ (Ra) 分布を Fig.10 に示す。凹凸容量から求められた灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値は 1.27, 最大算術平均粗さ (Ra) は 2.39, 実測により求められた灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値は 0.52, 最大算術平均粗さ (Ra) は 0.98 となり、値としては開きがあった。この値の違いは、供試体から求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値と凹凸容量の相関を用いて Ra 分布を設定したためと考えられる。

Fig.9 の Ra の最大値を Fig.3 の供試体標準値に照らし合すと健全度は 2.5 ~ 3.0 の間にあると読み取れる。目視による判定の健全度は 2.5 であったことから、この場合、近似的には表現できていると考えられるが、今後さらに算術平均粗さ (Ra) の標準値の取り扱いと、凹凸容量算出手法について検討を重ねる必要がある。

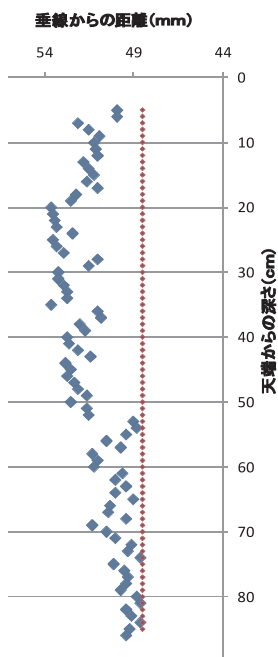


Fig.7 A地点計測結果  
Point A measurement result

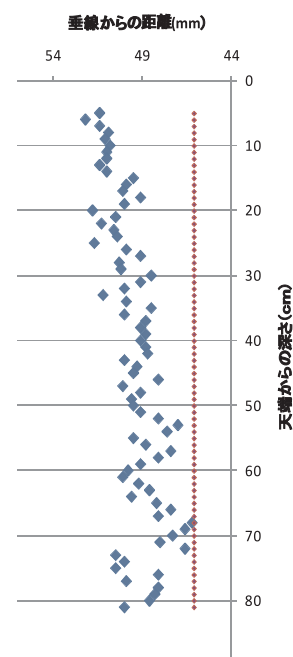


Fig.8 B地点計測結果  
Point B measurement result

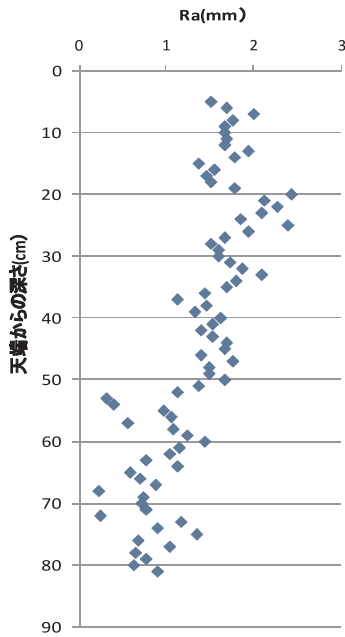


Fig.9 凹凸容量から換算して求められた Ra 分布  
Distribution of Ra demanded by quantity of unevenness

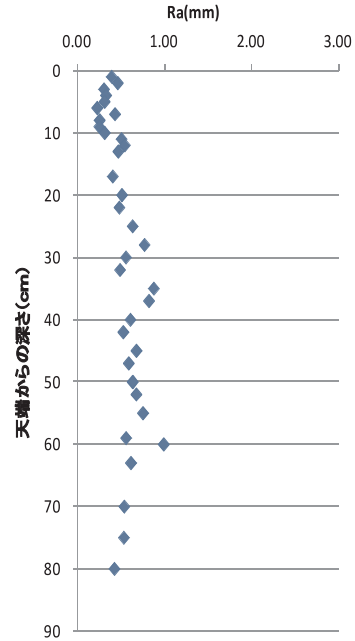


Fig.10 実測により求められた Ra 分布  
Distribution of Ra demanded by actual survey

#### IV 中性化の健全度評価指標への適用性の検討

##### 1 調査対象

筆者らの報告（本間，2008a）で、灌漑期水位位置より上方部と下方部で中性化の進行傾向が異なることや、クラックが入っている部分については、より中性化が進んでいることを報告したが、これらの現象傾向について、追加して収集された水路壁面の中性化深さの測定結果（6水路，67バレル）を用い指標としての検討を行った。

##### 2 調査の方法

コンクリートの中性化は大気中の二酸化炭素がコンクリート表面から内部に侵入しコンクリートの pH を時間の経過とともに低下させる現象である。このため中性化深さの測定は、施設表面から施設内部方向に必要最小限の破壊で中性化の進行状況を把握できるドリル法で行った（Fig.11）。調査箇所数は1バレル当たり、左右両岸の2面）とし、またそれぞれの壁面においては、灌漑期想定水位の上部と下部の2か所で計測データを収集した。調査手順を以下に示す。

- ・ろ紙に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、吸収させる。
- ・携帯型振動式ドリル（ビット径5mm）を用いてコンクリート面と垂直にゆっくり削孔する。
- ・落下した削孔粉が集積しない様に、ろ紙を移動させながら削孔し、ろ紙が紅色に変色した時点で削孔を直ちに停止する。
- ・ドリルの刃を孔から抜き取り、ノギスを用いて孔の深

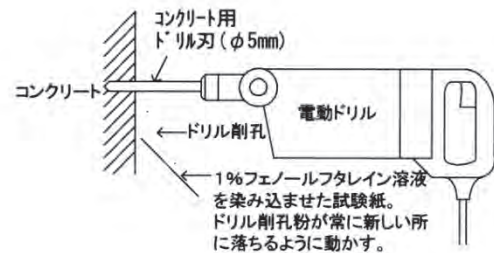


Fig.11 ドリル法による中性化深さ測定  
「コンクリート診断技術'02〔基礎編〕」を一部修正  
Measurement of neutralization depth by drill method

さを測定する。

- ・削孔後の孔は、固練り型のエポキシ樹脂を充てんして補修する。

##### 3 中性化深さ調査の結果

Fig.12に各水路での健全部（クラックのない部分）における中性化深さの平均値を示す。また、ひび割れ部における中性化深さと、健全部の中性化深さ及びコンクリートの中性化深さを $\sqrt{t}$ 則に基づいて計算した結果を Fig.13に示す。ひび割れ部の測定値の一部で中性化深さが大きいものが観測されているが、全てのひび割れ地点で大きい値が観測されていない結果となっている。しかし、これは中性化深さの測定方法・精度 Fig.14と合わせて検討する必要があると考えられる。すなわち、ひび割れに接しているコンクリートの中性化がそれほど進んでいなければ、ドリル法ではドリルビット径の方が、ひび割れ方向に対して直角に進む中性化の進行深さより大きくな



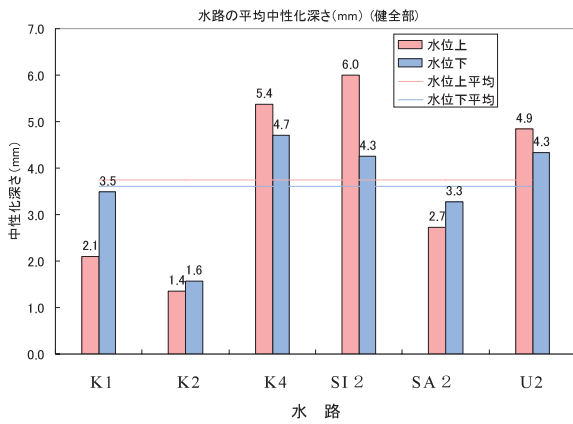


Fig.12 水路の中性化深さの平均値  
Neutralization depth mean of canals

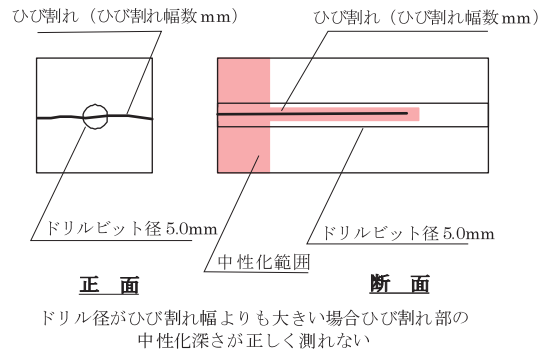


Fig.14 ドリル法によるひび割れ地点の中性化深さの測定  
Measurement of neutralization depth by drill method

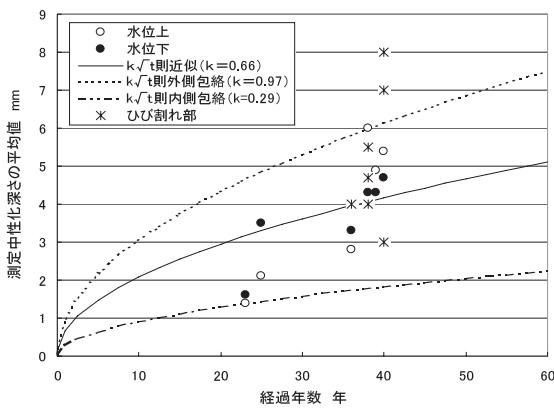


Fig.13 経過年数と中性化深さ  
Relations between elapsed years and neutralization depth

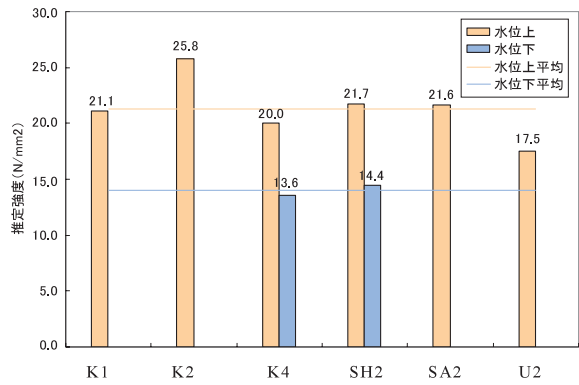


Fig.15 水路のコンクリート推定強度の平均値  
Concrete estimate strength mean of canals

り、中性化進行が適切に計測されない場合がある。

但し、材令係数  $a$  の補正は行わなかった。

## V テストハンマー調査によるコンクリート強度推定の健全度評価指標の適用性への検討

### 1 実施概要

テストハンマーによるコンクリート強度の推定値の劣化評価指標としての適用性について、供用年数の異なる6水路(66バレル)のデータを用いて検討を行った。テストハンマーを水路壁面に垂直に打撃し、反発硬度を測定した。調査箇所数は1バレル当たり左右岸の2面を測定した。一部の水路では灌漑期想定水位の上部と下部で調査を実施した。灌漑期想定水位は壁面の付着物等で水位跡を識別して定めた。

コンクリートの推定強度  $f_{cl}$  は、式(1)より求めた。

日本材料学会推定式

$$f_{cl} = a \times \{13 \times (R0 + \Delta R) - 184\} \times 0.098 \quad \dots (1)$$

ここで、 $a$  : 材令係数,  $R0$  : 反発硬度の平均値,  $\Delta R$  : 角度補正

### 2 調査結果と考察

水路毎のコンクリートの推定強度の平均値を Fig.15 に示す。

想定水位より上部でのコンクリートの推定強度の平均は水路によって異なるが、17.5 ~ 25.8 N/mm<sup>2</sup>であった。調査資料によれば、昭和40年代前後のコンクリートの仕様はA号、あるいはAコンクリートという表現で示されており、この場合設計基準強度を特定することはできない。一方、昭和50年代のコンクリートは8A-210と示されていること、また調査水路が昭和40年代に施工されていることから、調査水路の設計基準強度は21 N/mm<sup>2</sup>であると推定できる。推定した設計基準強度に比して、ほぼ同じ強度、もしくはそれ以上であるといえる。

灌漑期想定水位下部での推定強度は水位上部に比べて明らかに小さい値であった。これは、灌漑期想定水位下部ではコンクリート表面の付着物や摩耗によって露出した骨材の分布状況が影響したためと考えられる。

## VI 水路壁面ひび割れの健全度評価指標への適用性の検討

### 1 各用水路のひび割れ状況

ひび割れも目視で観察可能な健全度評価指標となりうるが、現時点で十分に定量化された指標にまでは至っていない。ここでは蒲原地区の供用年数の異なる3水路(236バレル)についての調査結果の取りまとめを報告する。

目視観察されたひび割れはほとんどが、壁面天端からの縦ひび割れであった。各用水路のひび割れ発生率、平均ひび割れ本数、平均ひび割れ長さ、平均ひび割れ幅を **Table 1** に示す。

主な特徴は、①ひび割れ発生率は24～38%で、全バレルの約1/3でひび割れが発生していた。②ひび割れが発生しているバレルの平均ひび割れ本数は約3～4本であった。③平均ひび割れ長さは約30～50cmで平均ひび割れ幅は0.2～0.4mm程度であった。

ひび割れ深さについては、超音波測定器を用いて4バレルについて測定したものである。ひび割れ深さの大きいものは8cm程度になっており、鉄筋位置まで達していると推定された。ひび割れ深さについて測定された結果を **Table 2** に示す。

### 2 経年に対するひび割れ状況

気象条件などから、ひび割れは乾燥収縮や自己収縮に

よるひび割れであり、経年的に成長するひび割れでは無いと考えられるが、参考として各用水路のひび割れ本数と壁面数、ひび割れ長さ分布、ひび割れ幅分布、ひび割れ発生位置分布について経年的に整理した結果を **Fig.16** に示す。

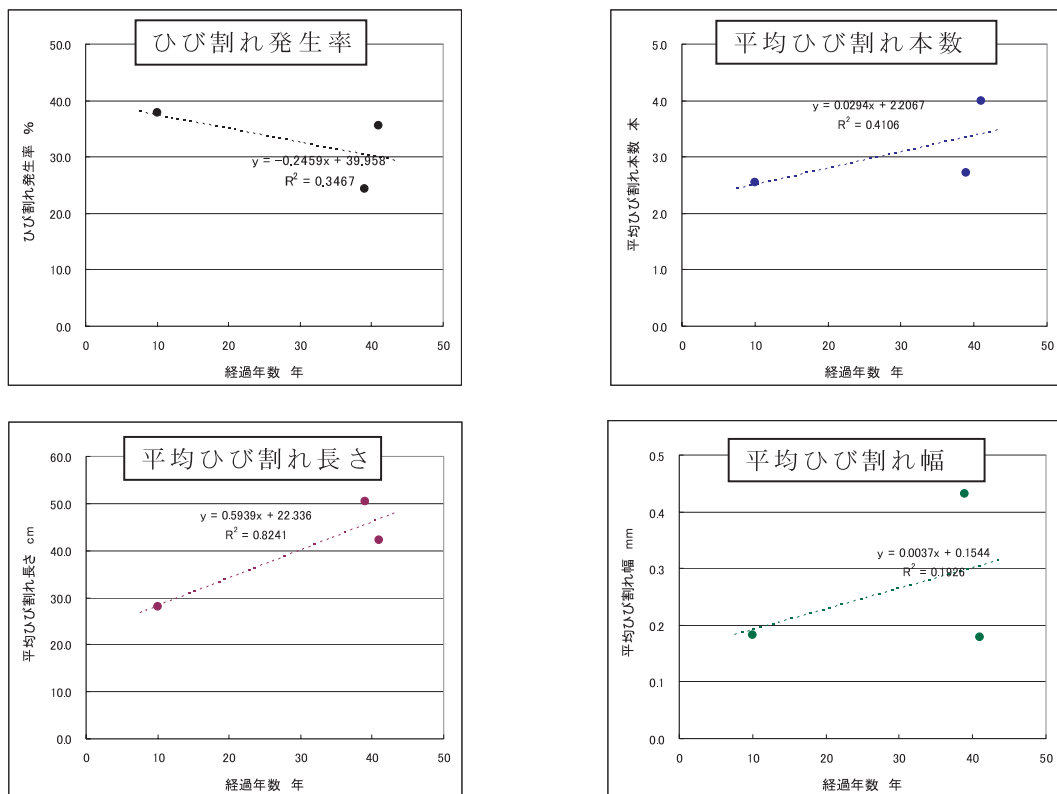
**Table 1** 水路のひび割れ状況  
Crazing situation of canals

( )内は施工年度	K4 (1967)	SH2 (1969)	SH1 (1998)
全バレル数	38	37	161
全左右岸数	76	74	322
ひび割れ発生の左右岸数	27	18	122
ひび割れ発生率*1 %	35.5	24.3	37.9
平均ひび割れ本数 本	4.0	2.7	2.5
平均ひび割れ長さ cm	42.1	50.4	28.0
平均ひび割れ幅 mm	0.18	0.43	0.18

\*1：ひび割れ発生率＝ひび割れ発生の左右岸数／全左右岸数

**Table 2** 水路のひび割れ深さ  
Crazing depth of canal

水路名称	バレル番号	左右岸	ひび割れ深さ cm
SH1 (H10)	147	左岸	2.0
	152	右岸	7.0
	156	右岸	8.0
	160	左岸	5.5



**Fig.16** 経過年数とひび割れ深さ  
Relation between elapsed years and crazing

## Ⅶ 劣化評価項目と健全度評価指標への適用性

農業用水路を対象として凹凸評価をはじめとする健全度評価の各指標について現場への適用性について現地測定データを用いて検討を行った。その結果次のことが分かった。

- (1) 供試体計測から求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値を現場において適用する場合は、健全度評価基準における各レベルの上限値として利用するとよい。
- (2) 供試体計測から求められた凹凸容量の標準的な値を、健全度評価指標として用いるためには、ノギスによる凹凸容量算定手法など、凹凸容量を推定する手法の確立が必要である。
- (3) 調査対象地区の農業用開水路においては中性化の進行は遅く、現時点では、中性化による影響が出るのは、更に数十年後と推定されることから水路を対象とした場合、補修・補強の時期を設定する主要指標とはなりにくいと考えられる。
- (4) 調査対象地区の農業用開水路のひび割れは乾燥収縮や自己収縮によるものであり、経年的に成長するひび割れは見られなかった。本報告で収集されたデー

タからは評価指標とりにくいと考えられる。

- (5) テストハンマーを用いた推定強度を評価指標として用いる場合には、テストハンマーの使用の基本条件である調査対象面の均一を凹凸状態の水路壁面に求めることが難しいため、調査箇所が限られる、あるいは適正な調査場所が見当たらないなどの課題が生じる。劣化評価指標として用いるには難があると考えられる。

以上の健全度の評価指標への適用性についての概要を **Table 3** に示す。

## Ⅷ 結 言

農業用水路 (RC) の劣化評価は、目視もしくは簡易な器具を用いた診断が主となる。本報告で述べたように、劣化評価項目はいくつかあるが、補修・補強工法の時期を設定するための決定的な評価指標は現時点では見当たらないことから、現場では複数の判断項目・基準を用いることが望ましいと考えられる。このように、現状では健全度評価手法が十分に確立されたとはいえず、更なる研究開発が望まれる状況にある。今後とも、簡易で、大量の情報収集に対応しかつ分析処理が早い手法開発を目指すこととする。

**Table 3** 劣化評価項目と健全度評価指標への適用性  
Deterioration evaluation item and applicability of soundness evaluation index

劣化評価項目	検討結果	課題等	健全度評価指標への適用性
水路壁面凹凸 (算術平均粗さ (Ra))	供試体を用いて求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値と健全度の相関関係を適切に用いることにより、現場において定量的な健全度評価基準の設定が可能となる。	水路壁面の算術平均粗さ (Ra) 測定箇所 (灌漑期水位以下) に留意が必要。	算術平均粗さ (Ra) と健全度の相関関係を適切に用いることにより、定量的な健全度評価指標となる。
水路壁面凹凸容量	供試体から求められた凹凸容量と算術平均粗さ (Ra) の相関関係を用いて、健全度評価を行うには、凹凸容量の推定精度の良否が大きく左右する。	凹凸容量を高い精度で推定する手法がない。	現時点では、現場で凹凸容量を求めることが容易でないため、適用には難がある。
中性化	現時点で、農業用開水路のコンクリートの中性化の進みは、灌漑期水位の上部・下部とも遅い。	中性化進行状況把握の精度を向上させるためには、多くの調査箇所が必要となるが、基本的には破壊試験となり、管理者には歓迎されない。	農業用開水路のコンクリートの中性化の進みは、灌漑期水位の上部・下部とも遅いため、補修・補強の時期を判定する主要な評価指標にはなりにくいと考えられる。
ひび割れ	目視調査で観測される、劣化指標の一つとなるものであるが、進行性のひび割れを目視で観察するのは難しい。	ひび割れ深さを容易に高い精度で観測する手法が確立されていない。	ひび割れの多くが乾燥収縮や自己収縮によるものであり、経年的に成長するひび割れを目視で観測することは難しいことから評価指標とりにくいと考えられる。
テストハンマーによる強度推定	テストハンマーによる強度推定では調査対象面 (凹凸や藻等付着物) の影響を受ける。	調査対象面の均一を、凹凸状態の水路壁面に求めることが難しい。	調査箇所が限られるあるいは適正な調査場所が見当たらないなどの課題が生じるため、劣化評価指標としては難があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 土木学会 (2007)：コンクリート標準示方書 (維持管理編), p.1-228
- 2) 本間新哉・北村浩二・今泉眞之・加藤 敬 (2007a)：農業用鉄筋コンクリート製開水路の壁面の凹凸評価手法, H19 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.312-313
- 3) 本間新哉・北村浩二・今泉眞之・加藤 敬 (2007b)：農業用水路における劣化予測手法について, ARIC 情報 86 号, p.20-26
- 4) 本間新哉・北村浩二・加藤 敬 (2008a)：水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察, 農工研技報 207, p.1-11
- 5) 本間新哉・北村浩二・加藤 敬 (2008b)：農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法, H20 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.202-203
- 6) 本間新哉・北村浩二・加藤 敬 (2009)：農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法, 農工研技報 209, p.17-27
- 7) 加藤 敬・本間新哉・北村浩二・今泉眞之 (2008)：開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み, 農工研技報 (技術資料), p.183-193
- 8) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤 敬 (2007a)：インフラ資産のアセットマネジメントに関する研究レビューと農業水利施設を対象とした研究の方向性, 農村工学研究所技報 第 206 号, p.83-104
- 9) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤 敬 (2007b)：農業用水路 (RC) の劣化予測曲線と LCC 算定システムの構築, H19 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.314-315
- 10) 北村浩二・本間新哉・加藤 敬 (2008a)：農業水利施設へのインフラ会計導入の必要性と諸課題, 農工研技報 207, P.13-23
- 11) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤 敬 (2008b)：農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測, 農業農村工学会論文集 254, p.39-50
- 12) 北村浩二・本間新哉・加藤 敬 (2008c)：農業用水路における壁面粗化による劣化予測の定量的評価, 農業農村工学会誌 76 (9), p.35-40
- 13) 財団法人日本水士総合研究所 (2006)：水利施設の機能評価, 「水土の知」を語る (性能設計を考える その 3), p.95-116
- 14) 社団法人農業土木事業協会 (2007)：農業水利施設の機能保全の手引き, p.1-86



# Problems of Soundness Index Evaluation of Irrigation Canal

HONMA Shinya and KATO Takashi

## Summary

About the soundness index of irrigation canals, various indexes were examined. A standard value of an arithmetical mean roughness expresses an upper limit level of the soundness index evaluation level. Neutralization is hard to consist to an index to decide a repair time of a canal at present. A crazing that occurred because of a dry shrinkage is hard to consist to an evaluation index. Because there is circumscription in the investigation point, a concrete strength to estimate with a test hammer is hard to consist to a deterioration index.

**Keywords:** irrigation canal, arithmetical mean roughness (Ra), test specimen, quantity of unevenness, soundness index, neutralization

# Application of Multi-attribute Stated Preference Methods and Conjoint Analysis in Agricultural Economics in Japan

– From the Latter Half of the 1990s to 2005 –

AIZAKI Hideo\*

## Contents

I	Introduction	265
II	Application in consumer research on agricultural and livestock products	266
1	Consumers' valuation of commodity characteristics	266
2	Consumers' valuation of food safety	267
3	Features and further issues of application in consumer research on agricultural and livestock products	268
III	Application in farm management research	269
1	Farmers' valuation of new technology	270
2	Farmers' valuation of inputs and farmer support services	270
3	Farmers' decision-making related to farmland use	271
4	Features and further issues of application in farm management research	272
IV	Application in Rural Planning Research	274
1	Environmental valuation	274
2	Valuation of plan for constructing facilities	275
3	Features and further issues of application in rural planning research	276
V	Concluding remarks	277
	References	278
	Summary (in Japanese)	284

## I Introduction

The purpose of this paper, which is the English version of Aizaki (2005b, chap.3), is to assemble topics related to agriculture and rural areas that were treated using multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis in Japan and to elucidate the features of these studies and further relevant issues in Japan. In this paper, multi-attribute stated preference methods include choice experiments, contingent ranking, contingent rating, and paired comparisons (Bateman et al., 2002) that are based on discrete choice models. On the other hand, conjoint analysis implies traditional conjoint analysis (e.g., Louviere, 1988). The following three research areas are reviewed in this paper: (1) consumer research including consumers' valuation of agricultural product characteristics and food safety; (2) farm management research including farmers' valuation of new technologies, inputs and farmer support services, and farmers' decision-making related to farmland use; and (3) rural planning research including environmental valuation related to agriculture and rural areas, and the valuation of a plan for constructing facilities.

In order to be able to review various studies, previous studies were gathered using the following policy. First, studies applying conjoint analysis were included in this review since conjoint analysis has been used in some areas before introducing multi-attribute stated preference methods. Although multi-attribute stated preference methods and conjoint

---

\* Laboratory of Project Evaluation, Department of Rural Planning

Received, January, 5, 2010

Keywords : Choice experiment, discrete choice model, consumer research, farm management research, rural planning research

analysis differ from the viewpoint of designing choice sets and analyzing responses statistically, the topics to which each of these methods is applicable are almost similar. It is possible to present more wide-range studies by including conjoint analysis studies as the objective of this review.

Second, national and local agricultural research institute publications were also included in this review along with references of academic journals and books. Multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis have been used in various research projects in the institutes. They document interesting cases related to developing new agricultural technologies. However, these projects do not necessarily produce academic papers. Given that the objective of this review is limited to papers published in academic journals, a considerable number of research results using multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis produced in the institutes are excluded. Therefore, publications from the institutes have also been included in the objective of this review.

On the other hand, the objective of this review is limited to agricultural economics. For example, applied studies related to the consumers' valuation of food might exist in the business and commerce fields. However, I am not very familiar with fields other than agricultural economics, and therefore, find it difficult to gather and systematically review publications. Moreover, abstracts of academic conferences have been excluded from the objective of this review. These abstracts are not easily available to non-participants of the conferences. It is also difficult to obtain detailed information of relevant researches using multi-attributes stated preference methods or conjoint analysis from these abstracts.

## II Application in consumer research on agricultural and livestock products

Consumer research on agricultural and livestock products includes the following two topics: (1) consumers' valuation of commodity characteristics of agricultural and livestock products and (2) consumers' valuation of food safety with regard to agricultural and livestock products.

### 1 Consumers' valuation of commodity characteristics

First among this topic is the consumers' valuation of food labels. Hirao (1997) conducted a conjoint analysis to measure the relative importance of the content of the food labels of rice, such as the region of origin, variety, growing method, and price. Ooura et al. (2002) measured the region of origin indicating regional brand power and the growing method for each fruit and vegetable (mini tomato, Welsh onion, broccoli, onion, and kiwi fruit) using choice experiments. Kodama (2001) interpreted a regional product value as a brand power and measured the value of beef using contingent ranking. Kurihara (2002) implemented a conjoint analysis of measuring consumers' valuations of the form of package, country of origin, and growing method for green tea.

The second topic pertains to measuring the value of new technology and the effect of new marketing. Relevant studies tend to be examined in the national and local agricultural research institutes. Sugitani et al. (2002) set a hypothetical purchase situation of the Satsuma orange and conducted choice experiments that aimed to measure the consumers' valuation of the optical sensor technology that reduces the difference in the taste of the Satsuma orange. The introduction of the technology into a certain region relatively raised the brand power of the region compared with other regions wherein the technology was not introduced. Kono et al. (2005) divided the participants into two groups. One group of participants was informed that the merit of the optical sensor was that it nullified the difference in the taste of the Satsuma orange. The other group of participants was not informed about this merit. The informed participants placed high value on the Satsuma orange inspected by the sensor. In the case of the non-informed group, although the participants who were aware of the sensor highly valued the sensor-inspected Satsuma orange, the participants who were not aware of it evaluated the sensor-inspected Satsuma orange as lower than that of the non-inspected Satsuma orange. These results highlight the importance of the manner in which information is provided to the consumers, which in turn focuses on consumers' benefit from the new technology.

Isayama et al. (2003a) applied choice experiments to clarify the consumers' valuation of the summer spinach improved in the element (vitamin C, iron content, and nitric acid) by a new growing method compared with the conventionally grown spinach. From the result of these experiments comprising attributes of each element and the price, it was revealed that the aim of developing the new growing method was sufficient to increase the iron content in the summer

spinach by twice that in the conventionally grown spinach.

Hiramatsu (1999), Okubo (2000), Yutthana and Monma (2004), and Hoshino (2002) conducted studies related to new marketing. Hiramatsu (1999) analyzed the consumers' valuation of the quality factor of Shizuoka melon grown in the greenhouse for a family exchange gift by conducting conjoint analysis. Okubo (2000) evaluated the commodity characteristics of the Yamanashi grape considered by consumers when purchasing it from a mail-order sale. Yutthana and Monma (2004) conducted a conjoint analysis to clarify consumer requirements for organic food (kale) in Thailand; price, quality, freshness, the reliability of producer, and the reliability of shop were set as attributes and evaluated. Hoshino (2002) used conjoint analysis as the one measure of the agricultural product development techniques corresponding to consumer needs. Conjoint analysis was also used to clarify what kind of green soybean was most requested by consumers based on the commodity concept drawn from the examination of consumer requirements.

Shimoyama applied conjoint analysis and choice experiments for the consumers' valuation of various agricultural and livestock products in order to clarify the kind of commodity characteristics that were given a high value by the consumers, such as spinach (Shimoyama, 2000a, 2001), strawberry (Shimoyama et al., 2002), apple (Shimoyama, 2002), ice cream (Shimoyama, 2003), and bread (Shimoyama and Taniguchi, 2003). Moreover, Shimoyama (2000b) examined consumers' needs for mango, which is an important cash crop for farmers in the Mekong delta region in Vietnam by using conjoint analysis.\*1

## 2 Consumers' valuation of food safety

Consumers' valuation studies of food safety would be classified into the following three categories: rice, fruits and vegetables, and livestock products.

Sato et al. (2001) and Yoshida and Peterson (2003) conducted researches with regard to the theme of food safety to which rice belongs. Sato et al. (2001) implemented choice experiments for Sapporo citizens to measure the market power of Hokkaido rice with regard to whether it could be considered a food safety attribute (growing method) such as organic or low-chemical. Rice has four attributes—the growing method, the variety and prefecture of origin, the presence of the name of the city of origin and farmer, and the price. A conditional logit model was used to analyze the responses to the choice experiment questions; individual characteristics were also included in the model in order to examine the effects of the individual characteristics of the valuation of food safety. By means of the simulation based on the estimated results, the market power of Hokkaido rice with the food safety attribute was clarified. Yoshida and Peterson (2003) executed choice experiments for the consumers' valuations of domestic rice and foreign rice (United States rice, Australian rice, and Chinese rice). It was clarified that consumers with a negative impression of the food safety and taste of foreign rice placed a relatively low valuation on foreign rice.

Kamioka (2002), Aizaki and Iwamoto (2004), and Ohtani and Yabe (2004) analyzed the food safety of vegetables and fruits. Kamioka (2002) examined the influence of the form of package, price, county of origin of raw material, and growing method on the university students' valuation of orange juice by using conjoint analysis. Aizaki and Iwamoto (2004) conducted choice experiments of the consumers' valuation of the mini tomato with four attributes—price, country (region) of origin, growing method, and traceability. As a result of a statistical analysis of the responses to the choice experiment questions with the help of a latent class logit model, it was discovered that the consumers' valuation of the traceability tended to be lower than that of organic farming, no-chemical farming, or low-chemical farming. Ohtani and Yabe (2004) conducted choice experiments for the consumers' valuation of the traceability system and the second generation genetically modifying technology aiming at increasing consumers' benefits. They also analyzed the responses using the latent class logit model. It was revealed that a portion of consumers might accept the second-generation genetically modifying technology if it made way for no-chemical farming.

In the research conducted to evaluate food safety with regard to livestock products, noteworthy researchers were Sawada et al. (2002), Iwamoto (2004), Iwamoto et al. (2004), and Hosono (2003, 2004) for milk, Yabe et al. (2002, 2003) for egg, and Aizaki et al. (2004bde) for beef. Sawada et al. (2002), Iwamoto (2004), and Iwamoto et al. (2004) conducted

---

\*1 Shimoyama et al. (2004) developed a Web system for supporting agricultural marketing and integrated conjoint analysis into one of the functions of the system.



choice experiments for the consumers' valuation of milk with four attributes—the HACCP label ensuring the food safety of milk at the processed stage, an ecolabel certifying environmental protection at the fresh milk production stage, the days before the expiry date, and the price. Hosono (2003, 2004) distinguished three groups—a group informed about calcium, a group informed about HACCP, and a group not informed about calcium and HACCP, and examined the effect of information on the valuations of the food safety attribute (HACCP) and nutrition attributes (fortifying with calcium, and milk fat rate control). Yabe et al. (2002, 2003) applied choice experiments of consumers' choice behavior of egg in order to value the living conditions of hens, the use of agrochemicals and fertilizers in the production of chicken feed, the certification of health standards and quality of eggs, and the genetically modified content in chicken feed. Aizaki et al. (2004b) applied contingent ranking for valuing products (beef) derived from bovine embryo clones. Structural equation modeling was conducted for analyzing the relationship between knowledge and attitudes concerning bovine embryo cloning technology. By introducing forecasted attitudes into independent variables of the contingent ranking analysis, the effects of knowledge and attitudes on beef valuation were examined. Aizaki et al. (2004de) analyzed the relationship between consumers' choice behavior among beef (domestic Wagyu beef, domestic dairy beef, US beef, and Australian beef) and the consumers' valuation of food safety of beef after the Bovine spongiform encephalopathy (BSE) outbreak in Japan by using choice experiments and structural equation modeling.

Although the above-mentioned studies assumed the situation of purchasing agricultural and livestock products in daily life, Kurihara et al. (1999) tried to value food safety pertaining to school lunch. After the mass food poisoning caused by the school lunch in 1996 in order to clarify the feasibility of the ideal content of the school lunch requested by the students' parents, Kurihara et al. (1999) asked families with elementary or junior high school student(s) in Chiba city to answer choice experiment questions. These questions comprised six alternatives (hypothetical school lunches) with four attributes such as the cooking method, the school lunch expense, the food safety measures, and the nutritional balance.

### **3 Features and further issues of application in consumer research on agricultural and livestock products**

#### **a Features**

The features of consumer research on agricultural and livestock products are summarized in the following five points. The first feature is the difference of the analysis technique; conjoint analysis is mainly applied in the valuation of commodity characteristics, whereas choice experiments are used in almost all food safety valuation studies. Empirically estimated value of food safety is frequently expected to be interpreted based on economics. Although choice experiments based on the random utility theory generally satisfy this requirement, the same does not apply to conjoint analysis. Moreover, several researchers among those who evaluate food safety have been working on environmental valuation research. Contingent valuation method (CVM) has been applied in the environmental valuation research and is similar to choice experiments from the viewpoint of theoretical background; therefore, choice experiments may be frequently used in food safety valuation studies. Learning conjoint analysis may be relatively easy with the advent of the Japanese version software for conjoint analysis (creating profiles and analyzing the responses) and Japanese books on conjoint analysis in the marketing research area. Therefore, it seems that conjoint analysis has been widely applied to commodity characteristics valuation studies.

The second feature is to create profiles using photos or the technical details of the agricultural products when the survey is conducted by researchers in national or local agricultural research institutes. In the research institutes, projects together with natural science researchers have been frequently carried out. In such cases, profiles can be created based on the technical information about the target product. Therefore, a more realistic situation is usable in questionnaires.

The third feature is the characteristics of participants. Although many studies have used a telephone directory database or list of voters as the population list, others construct original consumer panels. Since the size of the monitor is limited, one must be careful in the generalization of the result. However, the monitor survey has advantages in that all the participants can be gathered in one place and asked to answer questions after foretasting actual samples of food (Shimoyama, 2003).

The fourth feature is the use of a variety of discrete choice models. In addition to the conditional logit model, several studies used a random parameters logit model (Yabe et al., 2003; Yoshida and Peterson, 2003), a latent class logit model

(Yabe et al., 2002; Aizaki and Iwamoto, 2004; Ohtani and Yabe, 2004), and a nested logit model (Hosono, 2003; Yoshida and Peterson, 2003). Even when the conditional logit model was used, Sato et al. (2001) and Aizaki et al. (2004bde) examined the effects of individual characteristics (including attitudes) on the consumers' valuation of attributes. The use of various such models can be interpreted as the subjective reflection of wide differences in food safety valuation.

The last feature is to examine the reliability of the responses or the method of designing the choice sets. Hosono (2003, 2004) confirmed the reliability of the responses toward choice experiment questions by presenting the same choice set to participants in the first question and the eighth question and by checking the consistency of the responses in the two questions. Yabe et al. (2003) investigated the effect of an opt-out option on participants' response behavior toward choice experiment questions by comparing the responses in two types of questionnaires—"I would not buy any eggs" as the opt-out option, while the other set was "I would buy my usual brand of eggs."

#### **b Further issues**

Further issues related to consumer research on agricultural and livestock products are summarized in the following three points. The first issue pertains to the use of actual purchasing (revealed preference) data. In the consumers' valuation study related to agricultural and livestock products, completely virtual situations do not exist. In any case, one or few hypothetical elements (attributes and/or their levels) are simply introduced into the decision-making situation in real. Therefore, it is important to use revealed preference data when multi-attribute stated preference methods were applied in the consumers' valuation studies. However, excepting a few studies such as Yabe et al. (2003), no multi-attribute studies have revealed preference data. It is recommended that information related to real purchase behaviors should be asked in the multi-attribute stated preference questionnaires. An alternative is to conduct test-marketing of sample food jointly with the multi-attribute stated preference questionnaire.

The second issue is with regard to an examination of the utility function type. When participants were asked to evaluate each characteristic of the commodity, some of them answered, "Never purchase it if it has a certain characteristic." Similarly, it has been observed that some of the participants never select an alternative (product) with a certain characteristic (e.g., genetically modified food) from among choice sets. Such participants might have the tendency to not select a product with a certain characteristic that they dislike. In other words, there is a possibility that they have a non-compensatory utility function. Almost all studies have assumed a compensatory utility function by accepting the trade off between each attribute (e.g., I would purchase the product if its price is reasonable even if it is produced by using genetically modifying technology). If an individual characteristic can be assumed to be the factor that decides whether the individual has a compensatory or non-compensatory utility function, the behavior of the participant with a non-compensatory utility function might be traced by the compensatory utility function including the individual characteristic as an independent variable. However, it might be difficult to assume observable individual characteristics as the only factors that decide the type of utility function. Therefore, statistically selecting the function type seems to be suitable in this issue.

The third issue is to clarify a latent factor that influences the choice behavior of the agricultural and livestock products. In multi-attribute stated preference methods, the individual choice behavior of agricultural and livestock products is assumed to be determined by the attribute of the products. When the individual characteristics also seem to affect choice behavior, these can be included in the analysis of the multi-attribute stated preference data. However, the individual characteristics that can directly be observed are limited. According to previous research concerning food safety (e.g., Nakashima, 2004), the latent individual characteristics that cannot directly be observed also influence the evaluation of food safety. The existence of the latent factor can be clarified by using factor analysis, principal component analysis, or structural equation modeling (e.g., Aizaki et al., 2004bde). If it is able to handle the latent factor, findings of consumer research on food safety in various fields such as social psychology (e.g., Kikkawa, 1999; Takeda et al., 2003) can be reflected in the analysis of multi-attribute stated preference data without limiting oneself to the observable individual characteristic variables.

### **III Application in farm management research**

The application of multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis in farm management research

could be divided into three topics, namely, farmers' valuation of new technology, farmers' valuation of inputs and farmer support services, and farmers' decision-making related to farmland use.

### **1 Farmers' valuation of new technology**

Multi-attribute stated preference and conjoint analysis studies aimed at the farmers' valuation of a new agricultural technology have been executed by Naka and Fujimoto (2002), Konya et al. (2002), Isayama et al. (2003b), Fujii et al. (2003), Kudo et al. (2003), Kato (2000), and Kitabatake et al. (2001).

Naka and Fujimoto (2002) conducted choice experiments for the farmers' valuation of strawberry cultivation with high bench culture system that has the effect of comfortable working. The system was expressed according to four attributes—income decrease depending on the extent of the target when failing, facilities introduction cost, change in the profit from which the direct cost is extracted, and form of work. The relationships between farmers' characteristics and their valuations of each attribute were analyzed. Konya et al. (2002) used conjoint analysis for the farmers' valuation of an environment-friendly rice farming method. According to the result of the microeconomic model analysis of farmers' decision-making with regard to selecting technology, the environment-friendly rice farming method was assumed to be composed of the price of rice, fixed costs, fertilizers and agrochemicals costs, working hours, and the presence of technical assistance. Conjoint analysis based on these attributes was conducted for rice farmers in Hokkaido, and the condition of spreading the method was simulated based on the results of the conjoint analysis. Isayama et al. (2003b) applied choice experiments for the farmers' valuation of a new large-scale paddy field's levee management technology—multi coating and moss phlox planting—that replaces conventional levee technology (weeding). The new management technology was assumed to consist of four attributes—transplant materials costs, transplant working hours, planting maintenance years, and the presence of weeds after transplanting. The condition of planting maintenance years for accepting the new management technology was examined based on the results of choice experiments conducted for farmers who had the experience of testing the technology with an intention to introduce it into their own paddy fields. Fujii et al. (2003) proposed the use of conjoint analysis in order to obtain information that was used for the development and improvement of agricultural machinery from farmers. They conducted a study of the onion harvest machine. The machine was assumed to be composed of four attributes, namely the size of the machine and efficiency of work, the presence of new storage mechanisms corresponding to the dry work after harvesting the onion, the presence of new washing mechanism improving the efficiency of brushing soil down from the harvested onion, and the price of the machine. They examined the attribute that was evaluated as being higher by farmers. Kudo et al. (2003) analyzed farmers' decision-making with regard to purchasing a field map service by using choice experiments in order to examine the effects of introducing a precision farming system from the viewpoint of farm management research. The field map service was assumed to consist of information for the farmers (the kind of soil element information and the presence of slope information of paddy field) and the price of the service. From the results in the case of rice farmers in Ishikawa prefecture, the farmers' willingness to pay for the contents of the service was measured.

In addition to the above-mentioned farmers' valuation studies, Kato (2000) used conjoint analysis for the non-farmers' valuation of a new agricultural technology. Kato (2000) pointed out that there was a possibility that the new technology affected the residents' comfort in their daily life; therefore, their valuation of the new technology by conjoint analysis was needed. Kato (2000) conducted a case study of a computer-controlled (unmanned) agricultural tractor with three attributes—type of operator, size of the tractor, and time zone of work. Kitabatake et al. (2001) examined the possibility of using conjoint analysis for measuring the relative importance of various influences of agriculture on the environment when evaluating the environmental impacts of the environment-friendly farming system from the viewpoint of the life-cycle assessment.

### **2 Farmers' valuation of inputs and farmer support services**

This topic includes the farmers' valuation of compost and of a drying harvested rice service. Tarumoto (1997, 2001) highlighted that it was important to measure farmers' intentions to purchase compost in order to increase the amount of distribution of compost and then proposed the application of conjoint analysis for analyzing the farmers' purchase behavior toward compost. The compost consisted of five attributes, namely, the kind of domestic animal that produces the

raw material of the compost, the presence of sawdust, the degree of decomposition of raw material, the style of packing, and the price. Kumamoto farmers' valuation of the compost was extracted using conjoint analysis with these attributes. Uraya (2004) also proposed a way to improve the administration of a compost supply center, which made and supplied compost to farmers in a certain region, based on the conjoint analysis of farmers' valuations of compost. However, Aizaki (2004ab) pointed out that it was difficult for conjoint analysis to predict the demand for compost even if it is possible to forecast the share of each compost product in the compost market, since conjoint analysis has a limitation in that it does not distinguish between farmers who intend to purchase compost and those who do not. Prediction of the amount of demand for compost is required to plan the construction of the compost supply center; therefore, Aizaki (2004ab) proposed the application of choice experiments for predicting the amount of demand of the compost. Aizaki (2001) used choice experiments for building the farmers' decision-making model of the use of the rice center, which is a facility that accepts harvested rice from farmers and dries and processes the rice. Rice farmers were required to select the most preferred one from among the administration plans created based on the following three attributes: the fee of the facility, the time required until unloading the harvested rice after they arrive at the facility, and the time of closing the facility. Aizaki (2002) developed an administration simulator for the rice center by integrating the above-mentioned farmers' decision-making model, a waiting time function (Aizaki, 2000), and a fee (average cost) function calculated from the administration cost of the rice center.

Studies related to the farmers' valuation of farmer support services include those by Kurihara and Maruyama (1998) and Morishima and Tanaka (2001). Kurihara and Maruyama (1998) proposed an application of conjoint analysis on constructing the contents of programs supporting farmers who were approved by the local government as being self-motivated for improving their own management. In order to efficiently support approved farmers, it was essential to capture their preference for contents of the support program, to construct specific support programs based on the preference information, and to be able to simulate their degree of satisfaction toward the programs. Since conjoint analysis satisfied these requirements, Kurihara and Maruyama (1998) conducted it with the following five attributes: preferential treatment in the tax system; support for accumulation of farmland; preferential treatment in the financing; consultation and training related to farm management; and consultation and training related to agricultural technology. Morishima and Tanaka (2001) pointed out that the communication system between rice farmers and agricultural extension workers was important for spreading direct sowing in paddy field technology and conducted conjoint analysis for examining the kind of system required by rice farmers. As a result, it was revealed that a system combined with a personal computer and fax machine was preferred.

### **3 Farmers' decision-making related to farmland use**

Studies related to the farmers' decision-making with regard to farmland use and the farmers' valuation of farmland conditions include Laboratory of Farm Management, Kyushu National Agricultural Experiment Station (1998), Endo et al. (2003), Endo (2004a), and Hirano et al. (2005).

Laboratory of Farm Management, Kyushu National Agricultural Experiment Station (1998) examined farmers' needs for farmland conditions by using conjoint analysis with five attributes: the scale of farmland division, the depth of effective soil strata, the type of farmland, the capacity of drain, and the time required from home to the farmland. A conjoint analysis was conducted for dairy farmers, vegetable farmers, indoor farmers, and industrial crop farmers and measured differences in farmland condition between these farmer types.

Endo et al. (2003) stated that the prediction of farmers' farmland use was essential to examine regional plans of farmland use and tried to predict it by using choice experiments. Factors that affect farmers' decisions to increase the growing area of Japanese pear or to discontinue their own management were assumed to have the following three attributes: the price of Japanese pear (Kousui) cultivated indoors, the price of Japanese pear (Kousui) cultivated outdoors, and the prices of other types of Japanese pear. With the help of the estimated results, both the number of farmers increasing the farmland area of cultivating Japanese pear and the number of farmers deciding to discontinue their own management were forecasted according to the change in these prices. Endo (2004a) constructed a farmers' decision-making model of renting farmland by using choice experiments in order to build a micro-simulation system for predicting farmland use in rural areas. The model was built by analyzing the responses toward choice behavior among farmland lease conditions



created from the combination of four attributes, the price of rice, the level of rent, the amount of direct payment received from the government, and the farmland condition.

Hirano et al. (2005) analyzed the effects of change in a paddy field crop diversion policy on farmers' behavior by using choice experiments. Two scenarios were set—one analyzed factors affecting the acceptance of the control of rice production, while the other analyzed factors affecting the expansion area of the crop diversion. In the former scenario, based on an assumption that each farmer freely decides whether or not to accept the control of rice production, farmers were asked to select the most preferred option from among control of rice production plan alternatives created from a combination of three attributes—the price of rice when they sell rice through agricultural co-operation, the amount of compensation for income loss while accepting crop diversion, and the amount of subsidy for the establishment of high-productivity paddy field farming. In the latter scenario, farmers were asked to select the most preferred option from among crop diversion plan alternatives, which were created from the combination of four attributes—the amount of consignment charge, the prices of wheat and soybean, the yields of wheat and soybean per 10 a, the condition of paddy field where crops were diverted.

#### **4 Features and further issues of application in farm management research**

##### **a Features**

The features of farm management research are summarized in the following three points. Integration of the results of multi-attribute stated preference methods into a decision-making support system for regional agricultural planning (Aizaki, 2002; Endo, 2004b) is the first feature and makes it possible to evaluate more real scenarios compared with simulation based on only the results of multi-attribute stated preference methods. For example, Aizaki (2001) paid attention to the user fee and the time required until unloading the harvested rice after they arrived at the rice center as factors affecting the rice farmers' use behavior of the facility. Both factors can be changed by the number of farmers who use the facility, while the levels of the two factors are changed in the opposite direction. That is, if the number of user farmers increases, the congestion of the entrance to the facility becomes violent and the waiting time increases (since the capacity of accepting harvested rice is constant), while the user fee can be reduced (since the fee is equal to the average cost of the facility). It is difficult to predict the rice farmers' use behavior as setting the combination of appropriate waiting time and user fee merely based on the results of the choice experiments. Therefore, a simulator that includes the farmers' behavior, the waiting time, and the level of fee as endogenous variables can appropriately forecast their behavior.

The second feature is with regard to the farmers' valuations of support programs or policies as well as those of agricultural machinery or the growing method. One may consider multi-attributes stated preference methods as one of the marketing research methods, and its application would be on the agricultural machinery or agricultural materials and services that the farmers would avail of. However, with a perspective that multi-attribute stated preference methods are tools for analyzing individuals' decision-making with regard to characteristics of the decision-making process, one may understand that the methods are suitable for analyzing the farmers' valuation of various systems or policies. Particularly, when a policy will be largely changed, it may be difficult to predict the behaviors based on revealed preference data (data on recorded farmers' behavior in the past). In such a case, the farmers' valuation of the policy change by using multi-attribute stated preference methods would have a large advantage. For example, in order to examine the effects of rice policy reforms that have been implemented since 2004, Hirano et al. (2005) measured, in 2002, the effects of the price levels of rice, the amount of compensation for income loss when accepting control of rice production, and the amount of subsidy for establishing high-productivity paddy field farming on the farmers' behavior in accepting the control of rice production

The third feature is with regard to the qualitative characteristics of agricultural technology. If the agricultural technology can be valued only based on the quantitative attributes, mathematical programming based on data obtained from farm surveys or econometric analyses derived from revealed preference data can be applied for valuing agricultural technology. However, if qualitative factors play an important role when the technology is evaluated by farmers, the farmers' preference toward the technology must directly be extracted from the farmers. For example, Naka and Fujimoto (2002) applied choice experiments for the farmers' valuation of strawberry cultivated with a high bench culture system that has the effect of comfortable working, since it was difficult to value the effect by using quantitative data.

## b Further issues

Further issues related to farm management research are summarized in the following four points. The first issue is with regard to the use of revealed preference data. Along with the consumers' valuation of the agricultural and livestock products, complete virtual situations do not exist in the farmers' valuation of agricultural technology; one or few hypothetical elements are introduced into the decision-making situation in real. Therefore, revealed preference data corresponding to the situation that is assumed in the multi-attribute stated preference method could be gathered. Moreover, accuracy of prediction or reliability of evaluation would increase by integrating the revealed preference data into the analysis of multi-attribute stated preference data. For example, as a result of modifying the estimated results of choice experiments of the farmers' use behavior of the rice center with the help of real data such as the demand for services from the facility, the accuracy of prediction of current (real) situations was improved (Aizaki, 2002). However, the result of multi-attribute stated preference methods cannot be necessarily corrected by using real data. For example, in the case where a new facility will be introduced into a certain region, real data according to the facility do not exist for the region. Therefore, it is necessary to measure the extent of differences between the actual value and predicted value derived from the estimated results of multi-attribute stated preference data and to examine the strategy that reflects the differences in the prediction by multi-attribute stated preference methods.

The second issue is to examine a method by which to inform farmers about agricultural technology especially by taking into consideration its qualitative characteristics. Although it was pointed out that one of the features of multi-attribute stated preference methods is its ability to measure the farmers' valuation of agricultural technology in consideration of its qualitative characteristics, an explanation of the qualitative characteristics of the agricultural technology might be more difficult than that of its quantitatively measurable characteristics. If the explanation of quantitative characteristics is invalid, farmers' understanding of the technology would differ subjectively and their valuation would be biased. This issue is not avoided by explaining the technology in detail. When a considerable amount of information is provided to participants in order to explain it in detail, they would tire of understanding the explanation; they might be negligent in answering relevant questions or might not respond at all. Moreover, the participants' degree of tiredness in understanding the information might differ according to the kind of media providing the information. It is necessary to examine the manner in which one may inform farmers and the extent of information provided to farmers from the viewpoint of both the degree of cognitive load in understanding the information as well as the degree of understanding the information.

The third issue is to modify the method in order to be able to directly predict a continuous variable. Although the dependent variable of discrete choice models comprises the qualitative variable indicating alternative that is selected, the prediction of a quantity is required in some cases. For example, Aizaki (2002) required predicting the amount of harvested rice loaded into the rice center. However, the farmers' use behavior model was constructed with the help of a discrete choice model. Moreover, farmers' behaviors with regard to some amount of their harvested rice being loaded into the rice center and the other amount being dried by their own dryer facility were also observed. In Aizaki (2002), the farmers' use behavior model was modified with the help of the average number of farmers who used the rice center that was calculated by using real data. In order to specify the model in a more concrete manner, it is necessary to construct both the discrete choice model that predicts the farmers' use behavior toward the rice center and the continuous variable model that predicts the amount of rice that is loaded into the rice center on the condition that farmers use the rice center.

The fourth issue is to develop and apply a multi-attribute stated preference method considering the social interactions between farmers. According to previous researches on the diffusion of agricultural technology (e.g., Fujita, 1987; Sajiki, 2000), a farmer's decision with regard to introducing a new technology is affected by other farmers' previous introductions of it. Konya et al. (2002) set an attribute about technical support of a new technology from other farmers (it has three levels; "advices from farmers who are experts at the new technology," "exchange information related to the new technology with farmers who have same ability," and "no support") and examined the effects of each level of technical support on farmers' decisions with regard to introducing the new technology.\*2 In order to treat a situation where farmers make decisions by taking into consideration other farmers' decision-making, it is necessary to introduce social interaction

---

\*2 For example, Aizaki and Nagaki (1998), who used a contingent valuation method, included mutual dependent relationships between farmers as a factor of their willingness-to-pay for decreasing congestion of common use facility. Partial farm work trust in a village was defined as a mutual dependent relationship and measured by using social network analysis.

into the attribute of multi-attribute stated preference methods and to examine the use of the discrete choice model with social interaction (Brock and Durlauf, 2001; Fukuda et al., 2004).

## IV Application in Rural Planning Research

The application of multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis in rural planning research can be classified into two topics—environmental valuation related to agriculture and rural areas (e.g., multifunctional roles of agriculture and rural areas) and valuation of plans for constructing facilities.

### 1 Environmental valuation

Environmental valuation studies related to agriculture and rural areas<sup>\*3</sup> include those by Sasaki et al. (2000), Yoshida et al. (2002), Yoshida (2003a), Fujimoto (2002), Isayama et al. (2003b), Aizaki (2003a), and Aizaki et al. (2004c).<sup>\*4</sup>

Sasaki et al. (2000) applied choice experiments for the environmental valuation of a park in Kumamoto prefecture that was constructed by a rural improvement project. On the basis of a hypothetical situation where “If residents were unwilling to pay some money to construct the park, some portion of the park would not be built,” they tried to value construction components such as the planting of trees, the presence of a stroll road, the presence of a belvedere, and the presence of other components. Yoshida et al. (2002) and Yoshida (2003a) applied choice experiments for evaluating the effects of preservation plans of terrace paddy fields from the viewpoint of both environmental benefits (“rural landscape and wildlife protection,” and “the preservation of disaster and land protection”) and environmental burden (“pollution of surface and ground water”). Yoshida et al. (2002) verified the possibility of benefit transfers of the estimated results among four regions. Yoshida (2003a) examined the influences of respondents’ individual characteristics on their responses toward the choice experiment questions in one region.

Fujimoto (2002) and Isayama et al. (2003b) analyzed the relationship between the maintenance method of levee and slope of paddy fields and environmental valuation of the method. Fujimoto (2002) used choice experiments for valuing the countermeasures for abandoned farmland in hilly and mountainous areas, such as land improvement and coating the levee and the slope, from the viewpoint of the multifunctional role of agriculture (landscape preservation). In the choice experiments, respondents were requested to select the most preferred option from among alternatives that were created from the combination of three attributes, the condition of farmland, the maintenance methods of the levee and the slope, and the monetary burden. Isayama et al. (2003b) also valued the environmental benefits of a large scale paddy field’s levee management technology by using choice experiments with three attributes—the condition of paddy field, the condition of levee, and the monetary burden.

Aizaki (2003a) applied choice experiments for valuing environmental benefits of plans for promoting ecologically-friendly paddy fields. In order to make participants understand that a number of intermediate egrets per paddy field of 10 ha was usable as an indicator of the ecological condition of paddy field as a wildlife habitat, relationships between the population density of intermediate egrets in a paddy field area and the number of aquatic prey animals in the paddy field area (Fujioka and Yoshida, 2001) were explained using text and figures in the questionnaire. Then, the participants were required to select the most preferred option from among alternative plans for promoting ecologically-friendly paddy fields that created using four attributes, the population density of intermediate egrets in a paddy field area, the presence

\*3 Studies related to environmental valuation included the following. Kuriyama (1998) examined the relationship between the environmental benefit of the conservation plan of the Kushiro marsh and the amount of targeted area of the plan by using choice experiments. Takeuchi et al. (1999) valued the effect of decreasing damage of oil spills by using paired comparisons and contingent ranking. Kuriyama (1999) used contingent ranking for citizens’ valuation of forest management. Saito et al. (2002) applied conjoint analysis to countermeasures for damage by great cormorants in Lake Biwa. Tsuge (2001) conducted choice experiments for measuring the environmental benefits of forests. Kuriyama et al. (2002) used paired comparisons to value the company’s environment-conscious behavior from the viewpoint of investors. Yoshida (2003b) analyzed the environmentally-improved effects of fountainhead protection policies by using choice experiments. Itsubo et al. (2003) applied choice experiments to develop the weighting factor for life-cycle impact assessments.

\*4 See Aizaki (in press) for a detailed review of choice experiment studies related to economic valuation of multifunctional roles of agriculture and rural areas by the author.

of a bird-watching field, which was a paddy field used for bird-watching, the presence of an eco-field that was used for a paddy field where children could capture animals living in the paddy field, and the monetary burden. Aizaki et al. (2004c) used choice experiments for valuing each role of multifunctional roles of agriculture and rural areas. Eight functions were evaluated, namely, flood prevention, groundwater conservation, soil erosion prevention, health and rest, wildlife protection, landscape management, water environment conservation, and organic waste disposal.

A research area related to the environmental valuation of agriculture and rural areas measures the consumers' valuation of products produced with consideration of the environment (eco-products). Itohara and Ooba (2003) used conjoint analysis for the non-farmers' valuation of attributes of compost. In the study, the attributes of compost were assumed to consist of the producer, the price, the recognition of recycling product, the weight, and the kind of domestic animal that produce raw material of compost. Aizaki (2005a) tried the consumers' valuation of rice produced with consideration of harmony with the ecosystem (eco-rice) by using choice experiments. Eco-rice was defined as "rice produced considering that various animals can easily live in the paddy field" and consisted of three attributes—the distance from home to farmer producing the eco-rice, the ticket for using eco-field where children can directly capture animals living in the paddy field, and the price. Oizumi (2004) conducted conjoint analysis for examining the kind of terrace paddy fields owner system that was preferable. Three types of participants, that is, customers of the owner system, the village office staff who was the provider of the owner system, and the prefecture office staff who was a supporter or conductor of the owner system, were set, and the differences in evaluation of the owner system depending on the three types were examined. In addition to the above-mentioned studies, Sawada et al. (2002), Iwamoto (2004), and Iwamoto et al. (2004), whose studies have been reviewed in the section of the consumers' valuation of food safety, also featured the valuing of the benefits in consideration with the environment at the stage of producing raw milk.\*5

## 2 Valuation of plan for constructing facilities

Studies related to valuing plans for constructing facilities include those by Ooura et al. (1999), Aizaki (2003b), Kobayashi et al. (2003), Laboratory of Rural Life, National Agricultural Research Center (2001), and Aizaki et al. (2004a).\*6

In order to manage the direct sale store of agricultural products, Ooura et al. (1999) pointed out that it was necessary to understand the conditions of residents' choice behavior toward the store for purchasing vegetables and fruits and to reflect the conditions in the store design, and conducted conjoint analysis for measuring the residents' valuation of the direct sale store of agricultural products. The store profiles in conjoint analysis consisted of five attributes, namely, the parking lot size, the variety of goods in stock compared with a super market, the rate of products produced in the local area, the type of growing methods, and the range of price compared with a supermarket. The relationship between respondents' characteristics and valuation of the store was examined using the partial utilities of the attributes calculated from the results of conjoint analysis.

Aizaki (2003b) analyzed the effects of the content of the agriculture and rural park on the residents' visit behavior toward the park by using choice experiments. The park consisted of four squares—flower-watching, bird-watching, experience of agriculture, and wildlife-catching. In addition to each square, the distance from home to the park and the fee of the park were set as attributes of the park. Kobayashi et al. (2003) used conjoint analysis to clarify the relationship between landscape evaluation of an agricultural canal and the condition of the agricultural canal. Agricultural canal landscape profiles were created from five attributes, the angle, the materials of the canal, the depth of the canal, the hedge along with the canal, and the conditions of location.

Laboratory of Rural Life, National Agricultural Research Center (2001) applied conjoint analysis for the residents' valuation of allotment gardens considering four attributes, the presence of selling agricultural products, the presence

\*5 Other studies related to eco-products are as follows. Kuriyama and Ishii (1999) applied choice experiments to measure the consumers' environmental value of recycled products in the case of water cleaning purifiers. Kuriyama (2000) used choice experiments for valuing a wooden house and an eco label. Taguchi and Sakagami (2000) applied choice experiments to measure consumers' valuation of paper made from non-wood pulp. Sakagami (2000) evaluated recycled fiber by using choice experiments.

\*6 One of the related studies was by Akazawa et al. (2003) who analyzed the relationship between the characteristics of forest recreation sites and visit behaviors toward the site by using choice experiments.



of guidance of growing, the contents of facilities, and the size of division of the garden. Aizaki et al. (2004a) applied choice experiments for modeling the residents' use behavior of the allotment garden and integrated the model into a decision support system for regionally planning the allotment garden based on a Geographical Information System. In the questionnaire, respondents were requested to select one of two alternatives: "I would use the allotment garden," and "I would not use the allotment garden." Allotment garden alternatives consisted of five attributes—the distance from home to the allotment garden, the fee per year, the type of guidance of growing method, the presence of facility for rest, and the presence of a small warehouse for agricultural machines and implements.

### 3 Features and further issues of application in rural planning research

#### a Features

The features of rural planning research are summarized in the following three points. The first feature is to examine the method of analyzing several attributes in the application of multi-attributes stated preference methods. When the numbers of attributes and/or their levels increase, the size of choice set and/or the number of trials increase; consequently, it would be difficult to efficiently conduct the survey. Moreover, it is pointed out that there is an upper bound in the number of attributes that can be presented to participants simultaneously because our information processing ability is limited (Miller, 1956). If the number of attributes exceeds the upper bound, there is a possibility that a problem is caused in the reliability of the responses toward the questionnaire. Aizaki et al. (2004c) examined the method of measuring several attributes by choice experiments based on a pencil and paper questionnaire survey. The reason why the paper and pencil questionnaire survey was targeted was that the survey method has been used generally for measuring the valuation of multifunctional roles of agriculture and rural areas in Japan. This method was as follows, first, eight functions contained in the multifunctional roles of agriculture and rural areas were explained to the respondents; second, the respondents were requested to rank each function in terms of subjective importance and to respond up to the 3rd function; third, they were asked to answer the choice experiment questions for valuing the functions that each respondent selected as the first, second, and third most important at the above-mentioned second step; finally, a data set was created by integrating responses to ranking questions with responses to the choice experiment questions, and valuation of the eight functions was measured by conducting a discrete choice model analysis base on the data set.<sup>\*7</sup>

The second feature is that there are two ways of expressing the attribute. One is a way of expressing the attribute by each physical unit. For example, Aizaki (2003a) used the population density of the intermediate egret as an index showing the ecological condition of the paddy field. Another is a way of expressing the difference rate from the current state (percent display). In particular, the second way was frequently used in studies that valued the multifunctional roles of agriculture and rural areas or forests because there were some functions that were difficult to express in physical units (Tsuge, 2001; Yoshida et al., 2002; Yoshida, 2003a; Aizaki et al., 2004c). For example, Yoshida et al. (2002) valued environmental benefits and environmental load of plans for preserving terrace paddy fields by using three attributes—rural landscape and wildlife protection, disaster prevention and land conservation, and water pollution. These attributes were expressed by the difference rate from the current situation such as "60% improved" or "50% deterioration."

The third feature is to use an efficient way of making profiles based on the photographs. In the same case, reality of alternatives (profile) can be improved by using the photograph compared with using only text. The photograph has been used sometimes in studies of the consumers' valuation of the agricultural and livestock products. However, it is difficult to efficiently create profiles by using general image processing software because many photographs have to be processed. In order to overcome this problem, Kobayashi et al. (2003), who clarified the evaluation structure of the agricultural canal landscape by using conjoint analysis, efficiently made photograph profiles by using a rural landscape simulation system based on the personal computer (Matsuo, 2000).

---

\*7 Kuriyama (2000) gathered stated preference data with several attributes for wooden houses by using the Adaptive Conjoint Analysis (ACA) from Sawtooth Software Inc. ACA is personal computer software and is able to treat many attributes in the conjoint analysis by selecting attributes used in conjoint analysis depending on participants through some kind of questions. Kuriyama (2000) applied ACA only for gathering data. With the help of other software, marginal willingness-to-pays for the attributes that could not be calculated by using only ACA were estimated.

## **b Further issues**

Further issues related to rural planning research are summarized in the following three points. The first issue is to examine the way of improving transferability of the result. Transferability is the possibility that a result obtained in a certain area for valuation or forecast is used also in a different area or at a different time. It is called “benefit transfer” in the environmental evaluation studies. Yoshida (2003c) pointed out that it was an important issue to examine the method of the benefit transfer because the survey cost could be reduced and the project valuation that guaranteed neutrality and objectivity became possible. Such advantages exist in valuing plans for constructing facilities. If residents’ visit behavior models obtained in a certain area could be transferred to other areas or the transfer could be feasible by the model modified using an additional small size survey, the total survey cost would decrease.

The second issue is to examine indicators for expressing the state of each function of the multifunctional roles of agriculture and rural areas. This issue consists of two parts. One is the examination of a concrete index. The reason why the percentage display has been used for valuing each function of the multifunctional role of agriculture and rural areas is that each concrete index corresponding to each function has not been decided (Yoshida, 2003a). The decision of a concrete index is not only demanded from the viewpoint of the respondents’ understandability of the index but is also related to the above-mentioned issue of benefit transfer. For example, in order to be feasible in the benefit transfer from area A to area B, it is necessary not only that the transfer would be supported statistically but also that the index can be used by both areas A and B or the rule that converts the index used in area A into the index used in area B is fixed. Statistical transferable presupposes fixing the index with common meanings from the viewpoint of substance sciences. Therefore, the index should be decided by not only economics and statistics but also other research areas such as ecology or engineering. The other is an examination of manner in which to inform participants about the meaning of the index. Even if the concrete and proper index is decided, it is difficult to correctly determine the meaning of the index to lay participants. If the information that is provided to participants in a questionnaire increases, the participants soon tire of understanding the information; they might provide inaccurate answers to the multi-attribute stated preference questions or refuse to respond to the questionnaire. Theoretical and empirical examinations are necessary for establishing the efficient and effective way of informing participants about the meaning of the index.

The third issue is to consider the environment-conscious behavior model that has been constructed in social psychology and consumer behavior research. Since environmental valuation studies in rural planning research were mainly concerned with the valuation results (i.e., willingness-to-pay), an individual decision-making process tended to be treated as a black box. Of course, there are some studies that used participants’ knowledge or attitudes related to the environment as part of independent variables included in the model; however, the selection of knowledge and attitudes has tended to be ad hoc. There were few studies aiming at analyzing the participants’ behavior based on the environment-conscious behavior model. If multi-attribute stated preference methods would be used for clarifying factors of consumers’ environmental behaviors such as purchasing eco-products, it is necessary to be based on the environmental-conscious behavior models such as that by Hirose (1995) and Sugiura (2003). Moreover, it is important to create a scenario considering others’ behaviors in studies for researching the condition of consensus building related to environment management, in view of the issue of social dilemma (e.g., Fujii, 2003). In this case, the reality of the scenario would be spoiled by setting the scenario such that there is no external influence. It is necessary to set an attribute showing others’ behaviors such as “rate of others agreement with a plan” when the environmental management issues would be analyzed by using multi-attribute stated preference methods.

## **V Concluding remarks**

This paper assembled the application of multi-attribute stated preference methods and conjoint analysis in agriculture and rural areas in Japan, and clarified features of these studies and further issues. While other issues were pointed out for each research area—consumer research, farm management research, and rural planning research—some of them were common to the three research areas, such as integrating revealed and stated preference data. The common issues would be examined efficiently by referring to the research results of each area, mutually.

## References

- 1) Aizaki, H. (2000): Characteristics of congestion and the estimation of a waiting time function: A case of grain related facilities. *The Review of Agricultural Economics Hokkaido University*, **56**, 63–75 (in Japanese with English summary)
- 2) Aizaki, H. (2001): Demand analysis of agricultural services and the possibility of introducing a discriminatory pricing system: A choice-based conjoint analysis of farmer's behavior. *Hokkaido Journal of Agricultural Economics*, **9**(2), 31–48 (in Japanese)
- 3) Aizaki, H. (2002): Developing a grain-related facilities simulator for an evaluation of management policies. *Journal of Rural Economics*, **73**, 51–160 (in Japanese)
- 4) Aizaki, H. (2003a): Comparison of the environmental benefits of paddy fields considering a harmony with ecological system. *Journal of Rural Economics*, Special Issue, 347–349 (in Japanese)
- 5) Aizaki, H. (2003b): Economic pre-evaluation of facilities for promoting leisure activities in rural areas based on hypothetical travel behavior. *Journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, **71**, 1069–1072 (in Japanese)
- 6) Aizaki, H. (2004a): Sentakujikken niyoru biomass saisei shigen no juyou yosoku to manual ka. *Biomass no Rikatsuyou wo ikani Hyouka suruka*, 23–32, Nourin Suisan Bio-recycle Kenkyuu “System ka sub team” and Nourin Kouryuu Center (in Japanese)
- 7) Aizaki, H. (2004b): Marketing syuhou niyoru biomass saisei shigen no juyousha hyouka. *Chiiki no Biomass Rikatsuyou Suishin ni Muketa Challenge*, 67–75, Nougyou Doboku Gakkai (in Japanese)
- 8) Aizaki, H. (2005a): Choice experiment analysis of consumers' preference for ecologically friendly rice. *Agricultural Information Research*, **14**, 85–96 (in Japanese with English summary)
- 9) Aizaki, H. (2005b): *Economic Valuation of Agricultural and Rural Development Projects: Stated Preference Methods*, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)
- 10) Aizaki, H. (in press): Choice experiment approach to measure the economic value of the multifunctionality of agriculture and rural areas. *Japan Agricultural Research Quarterly*.
- 11) Aizaki, H. and Iwamoto, H. (2004): Sentakujikken niyoru seisen yasai no traceability kinou no shouhisha hyouka. M. Sawada (ed.), *Valuing Food Safety: Stated Preference Methods Approach*, 64–87, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)
- 12) Aizaki, H. and Nagaki, M. (1998): Adjustments of rice drying and processing plant and the mutual dependent relations among rice farms. *Journal of Rural Economics*, **70**, 18–27 (in Japanese)
- 13) Aizaki, H., Endo, K. and Yagi, H. (2004a): Supporting system of construction plans for allotment garden considering potential users' requests. *Journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, **72**, 933–936 (in Japanese)
- 14) Aizaki, H., Sato, K. and Iwamoto, H. (2004b): Effects of consumers' knowledge and attitudes on public acceptance of products derived from bovine embryo clones. *Agricultural Information Research*, **13**, 139–154 (in Japanese with English Summary)
- 15) Aizaki, H., Sato, K. and Osari, H. (2004c): Improvement of choice experiments for economic evaluation of agriculture and rural areas' multifunctional roles: reducing displayed attributes to respondents. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, **232**, 89–97 (in Japanese with English abstract)
- 16) Aizaki, H., Sato, K., Kikkawa, T. and Sawada, M. (2004d): Effects of attributes concerning food safety on choice behavior of beef: A choice experiment including social and psychological factors. *Japanese Journal of Farm Management*, **42**(2), 22–32 (in Japanese)
- 17) Aizaki, H., Sato, K., Kikkawa, T. and Sawada, M. (2004e): BSE to shokuhin anzensei ni kansuru shouhisha no chishiki to taido oyobi gyuuniku sentaku koudou no tougou bunseki. M. Sawada (ed.), *Valuing Food Safety: Stated Preference Methods Approach*, 88–129, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)

- 18) Akazawa, K., Murakami, Y. and Tamura, H. (2003): Assumption relaxation of conditional logit model by using neural network. *Journal of Rural Economics*, **74**, 160–172 (in Japanese)
- 19) Bateman, I. A., Carson, R. T., Day, B., Hanemann, M., Hanley, N., Hett, T., Jones-Lee, M., Loomes, G., Mourato, S., Özdemiroglu, E., Pearce OBE, D. W., Sugden, R. and Swanson, J. (2002): *Economic Valuation with Stated Preference Techniques: A Manual*, Edward Elgar, UK
- 20) Brock, W. A. and Durlauf, S. N. (2001): Interaction-based models. J. J. Heckman and E. Leamer (eds.), *Handbook of Econometrics*, **5**, 3297–3380, Elsevier, Amsterdam
- 21) Endo, K. (2004a): Nouchi riyou yosoku no tameno nouka koudou no haaku houhou: Nouchi riyou yosoku shuhou (ouyou hen). *Murazukuri Tekudasu*, Department of Rural Planning, National Institute for Rural Engineering (in Japanese)
- 22) Endo, K. (2004b): A simulation method of agricultural land use about terrace paddy fields. *Journal of Rural Planning Association*, **23**, 29–40 (in Japanese with English summary)
- 23) Endo, K., Hirano, N. and Aizaki, H. (2003): Analysis of farmer's behavior about deciding whether to change a cultivating size of Japanese pear. *Journal of Rural Economics*, special issue, 5–10 (in Japanese)
- 24) Fujii, S. (2003): *Shakaiteki Jirenma no Shohousen*, Nakanishiya Syuppan, Kyoto (in Japanese)
- 25) Fujii, Y., Ohnishi, M. and Tsuga, K. (2003): Negi shuukaku ki wo jirei to shita nouka no manzokudo senkouhyouka shuhou. *Heisei 14 Nendo Kyoutsuu Kiban Kenkyuu Seika Jouhou*, National Agricultural and Biooriented Research Organization. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 26) Fujimoto, T. (2002): Measuring Benefits and Costs of Paddy Amenity Conservation in mountainous region. *Osaka Keidai Ronshu*, **53**(2), 45–57 (in Japanese with English summary)
- 27) Fujioka, M. and Yoshida, H. (2001): The potential and problems of agricultural ecosystems for birds in Japan. *Global Environmental Research*, **5**(2), 151–161
- 28) Fujita, Y. (1987): *Nougyou Shidou to Gijutsu Kakushin*, Rural Culture Association, Tokyo (in Japanese)
- 29) Fukuda, D., Ueno, H. and Morichi, S. (2004): Modelling travel behavior and microeconomic analysis in the presence of social interactions. *Proceedings of JSCE*, **765**, 49–64 (in Japanese with English summary)
- 30) Hiramatsu, H. (1999): Consumer needs of muskmelon. *Kanto Tokai Journal of Farm Management*, **90**, 85–92 (in Japanese)
- 31) Hirano, N., Endo, K. and Aizaki, H. (2005): A prediction of farmer behavior when faced with a paddy field crop diversion policy. *Japanese Journal of Farm Management*, **43**(3), 11–21 (in Japanese)
- 32) Hirao, M. (1997): Marketing senryaku to sono shien model. S. Matsubara (ed.), *Senryakuteki Nougyou no tameno Ishikettei*, 165–180, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)
- 33) Hirose, Y. (1995): *Kankyō to Shouhi no Shakai Shinrigaku: Kyōueki to Shieki no Jirenma*, The University of Nagoya Press, Aichi (in Japanese)
- 34) Hoshino, Y. (2002): The technique of development of goods by green soybean which respond to consumer needs. *Journal of the Niigata Agricultural Research Institute*, **5**, 1–10 (in Japanese with English summary)
- 35) Hosono, H. (2003): Consumer preference for milk attributes: A choice experiment approach with focus on food safety and nutrition. *Journal of Rural Economics*, special issue, 317–319 (in Japanese)
- 36) Hosono, H. (2004): Nutritional and safety information and consumers' evaluation of commodity attributes: A choice experiments approach to milk demand. *Journal of Food System Research*, **10**(3), 34–47 (in Japanese)
- 37) Isayama, T., Fusao, K., Kawaguchi, T. and Kitano, T. (2003a): Seibun jouhou wo hyouji shita kaki hourensou no shijou kyousouryoku. *Heisei 14 Nendo Kinki Chyugoku Shikoku Nougyou Kenkyuu Seika Jouhou*, National Agricultural and Biooriented Research Organization. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 38) Isayama, T., Hoshina, T. and Shimosawa, H. (2003b): Multi hifuku to shibazakura shokusai wo kumiawaseta dai-kibo keihan kanri gijutsu no tamenteki hyouka. *National Agricultural Research Center for Western Region Rural Economy Research*, **5**, 81–88 (in Japanese)
- 39) Itohara, Y. and Ooba, T. (2003): Analysis of discriminated factor and sale strategy of cow dung by conjoint model. *Japanese Journal of Farm Management*, **41**(1), 49–54 (in Japanese)



- 40) Itsubo, N., Sakagami, M., Kuriyama, K., Washida, T., Kokubo, K. and Inaba, A. (2003): Development of weighting factor for LCIA based on conjoint analysis. *Environmental Science*, **16**, 357–368 (in Japanese with English abstract)
- 41) Iwamoto, H. (2004): Consumers' willingness-to-pay for HACCP and eco labeled milk. *Hokkaido Journal of Agricultural Economics*, **11**(2), 48–60 (in Japanese)
- 42) Iwamoto, H., Yamamoto, Y. and Sawada, M. (2004): Shouhisha no gyuunyuu sentaku koudou ni okeru sendo anzen-sei green kounyuu shikou no conjoint bunseki. M. Sawada (ed.), *Valuing Food Safety: Stated Preference Methods Approach*, 9–48, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)
- 43) Kamioka, M. (2002): An analysis of young consumer's consciousness of food safety and buying concerning descriptive labels of food: Questionnaire survey targeting college students. *Journal of Rural Community Studies*, **95**, 14–26 (in Japanese with English summary)
- 44) Kato, K. (2000): Technique of evaluating the residents' response to new farming technology. *Journal of the Rural Life Society of Japan*, **44**(2), 35–42 (in Japanese with English summary)
- 45) Kikkawa, T. (1999): *Risk Communication*, Fukumura Shuppan, Tokyo (in Japanese)
- 46) Kitabatake, A., Hannda, T. and Kaname, T. (2001): Application of LCA methodology to environmental conservation functions of agriculture. *Kanto Tokai Journal of Farm Management*, **92**, 65–69 (in Japanese)
- 47) Kobayashi, H., Tsutsui, Y., Kojima, Y. and Senga, Y. (2003): Analyzing the evaluation structure of irrigation channel landscape using conjoint analysis. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, **223**, 1–10 (in Japanese with English abstract)
- 48) Kodama, Y. (2001): Analysis of consumer preference on local brands. *Journal of Rural Economics*, special issue, 149–151 (in Japanese)
- 49) Kono, Y., Oura, Y., Aizaki, H. and Sugitani, M. (2005): A discussion of the development of Satsuma orange products: A case study of producing area A in Kumamoto prefecture. *Review of Agricultural Economics*, **56**(1), 111–119 (in Japanese with English abstract)
- 50) Konya, N., Aizaki, H. and Kondo, T. (2002): An economic and conjoint analysis of rice-farmers' choices of environmentally conscious technologies. *Japanese Journal of Farm Management*, **40**(1), 43–48 (in Japanese)
- 51) Kudo, T., Tanemoto, H., Sato, K. and Morio, A. (2003): Suitou saku ni okeru seimitsu nouhou no dounyuu keitai to keieiteki hyouka. *Heisei 14 Nendo Kanto Tokai Hokuriku Nougyou Kenkyuu Seika Jouhou*, National Agriculture and Biooriented Research Organization. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 52) Kurihara, Y. (2002): An analysis of the consumer preferences for green tea attributes. *Japanese Journal of Farm Management*, **40**(2), 77–82 (in Japanese)
- 53) Kurihara, S. and Maruyama, A. (1998): An efficient support program for approved farmers using conjoint analysis. *Japanese Journal of Farm Management*, **36**(2), 35–44 (in Japanese)
- 54) Kurihara, S., Maruyama, A. and Matsuda, T. (1999): Evaluation of food safety in school lunch program. *Journal of Food System Research*, **6**(2), 57–68 (in Japanese)
- 55) Kuriyama, K. (1998): *Environmental Value and Valuation Method*, Hokkaido University Press, Hokkaido (in Japanese)
- 56) Kuriyama, K. (1999): The estimation of public demand for the forest management: A contingent ranking study. *Journal of the Japanese Forestry Society*, **81**, 10–16 (in Japanese with English summary)
- 57) Kuriyama, K. (2000): Conjoint Analysis. E. Oono (ed.), *Kankyou Keizai Hyouka no Jitsumu*, 1105–132, Keiso Shobo, Tokyo (in Japanese)
- 58) Kuriyama, K. and Ishii, Y. (1999): Environmental value of recycled goods and market share: conjoint analysis study. *Environmental Science*, **12**(1), 17–26 (in Japanese with English abstract)
- 59) Kuriyama, K., Kokubu, K. and Hatano, H. (2002): Kigyuu ni okeru kankyou taisaku no keizaiteki hyouka to kankyou kaikei heno ouyou. Society for Environmental Economics and Policy Studies (ed.), *Kankyouhozen to Kigyoukeiei*, 57–69, Toyo Keizai, Tokyo (in Japanese)
- 60) Laboratory of Farm Management, Kyushu National Agricultural Experiment Station (1998): Einou ruikai betsu ni

- mita kikan sakumotsu gotono hojou zokusei senkoudo no chigai. *Heisei 9 Nendo Kyushu Nougyou Kenkyuu Seika Jouhou*, Kyushu National Agricultural Experiment Station. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 61) Laboratory of Rural Life, National Agricultural Research Center (2001): Chokubai wo hukashita shimin nouen no kanousei. *Heisei 12 Nendo Sougou Nougyou Kenkyu Seika Jouhou*, National Agricultural Research Center. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 62) Louviere, J. J. (1988): *Analyzing Decision Making: Metric Conjoint Analysis*, Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, 07-067, Sage, Newbury Park, CA
- 63) Matsuo, Y. (2000): Fundamentals and applications of rural landscape simulation technique (1): Purposes and contents of a series of lectures. *Journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, **68**(8), 63–68 (in Japanese)
- 64) Miller, G. A. (1956): The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review*, **63**, 81–97
- 65) Morishima, T. and Tanaka, H. (2001): Suitou jikamaki gijutsu teichaku no tameno jouhou koukan system no kouyou. *Heisei 12 Nendo Hokkaido Nougyou Kenkyuu Seika Jouhou*, Hokkaido National Agricultural Experiment Station. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 66) Naka, T. and Fujimoto, T. (2002): A multiple aspects evaluation of farming technology using a choice based conjoint analysis: A case-study of strawberry bench culture. *Japanese Journal of Farm Management*, **40**(1), 1–9 (in Japanese)
- 67) Nakashima, Y. (2004): *Syokuhin Anzen Mondai no Keizai Bunseki*, Nihon Keizai Hyouronsha, Tokyo (in Japanese)
- 68) Ohtani, T. and Yabe, M. (2004): Consumers' preference on the second generation GMO and tracability system: An approach from latent class model based on web questionnaires. *Japanese Journal of Farm Management*, **42**(2), 66–71 (in Japanese)
- 69) Oizumi, K. (2004): Evaluation for the rice terrace ownership system using conjoint analysis: A case study in Kiwa town. *Journal of Rural and Food Economics*, **50**(2), 33–41 (in Japanese)
- 70) Okubo, T. (2000): Analysis of consumers needs on mail ordering grapes. *Kanto Tokai Journal of Farm Management*, **91**, 17–26 (in Japanese)
- 71) Ooura, Y., Kono, Y., Aizaki, H. and Sato, K. (2002): Estimation for brand power on fresh vegetables and fruits producing districts with choice-based conjoint analysis. *Japanese Journal of Farm Management*, **40**(1), 106–111 (in Japanese)
- 72) Ooura, Y., Takahashi, K., Yamada, I. and Sato, K. (1999): Needs for farmer's market in rural area: A choice-based conjoint analysis. *Journal of Rural Economics*, special issue, 321–326 (in Japanese)
- 73) Saito, T., Koba, K., Sakai, T., Kameda, K. and Yoshioka, T. (2002): Evaluation of model plans for a wildlife issue by conjoint analysis: The case study of wildlife issue of Great Cormorant in Lake Biwa. *The Japanese Journal of Evaluation Studies*, **2**(2), 79–90 (in Japanese with English abstract)
- 74) Sajiki, T. (2000): The effects of the neighbor's experience in the own output and planted acreage: The case of cut flower production in Mitsuishi-cho in Hokkaido. *Journal of Rural Economics*, special issue, 79–81 (in Japanese)
- 75) Sakagami, M. (2000): Estimating value of recycled fiber: Using Choice Experiments. *SEN'I GAKKAISHI*, **56**, 487–492 (in Japanese with English abstract)
- 76) Sasaki, J., Sato, K., Iwamoto, H. and Demura, K. (2000): Economic evaluation of rural development projects using choice based conjoint analysis. *Journal of Rural Economics*, special issue, 174–176 (in Japanese)
- 77) Sato, K., Iwamoto, H. and Demura, K. (2001): Using choice based conjoint analysis to assess competitiveness of chemicalfree Hokkaido rice. *Journal of Rural Problem*, **37**(1), 37–49 (in Japanese with English summary)
- 78) Sawada, M., Iwamoto, H. and Yamamoto, Y. (2002): Shouhisha no HACCP oyobi kankyuu taisaku ninshou hyouji gyuunyuu ni taisuru kachi hyouka. A. Higuchi and K. Awaji (eds.), *Nougyou no Yoken Henka to Taiousaku*, 46–58, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo (in Japanese)
- 79) Shimoyama, T. (2000a): Nousanbutsu no shouhisha need no bunseki shuhou to nappa rui tou heno tekiyou kekka. *Issues concerning the Development of Marketing Systems in the Mountainous Vegetable Producing Area of Tohoku*

- District (Tohoku National Agricultural Experiment Station Report of Integrated Research for Agriculture, 17)*, 17–27, Department of Integrated Research for Agriculture, Tohoku National Agricultural Experiment Station (in Japanese)
- 80) Shimoyama, T. (2000b): Mekon delta chiiki ni okeru mango no shouhisha need no kaimei. *Nougyou Keiei Tsuushin*, **205**, 18–21 (in Japanese)
- 81) Shimoyama, T. (2001): Marketing science no nousanbutsu heno tekiyou jirei (dai 1 hou): logistics model to conjoint bunseki. *Issues concerning the Development and Marketing of Agricultural Products in Mountainous Region (Tohoku National Agricultural Experiment Station Report of Integrated Research for Agriculture, 25)*, 88–96, Department of Integrated Research for Agriculture, Tohoku National Agricultural Experiment Station (in Japanese)
- 82) Shimoyama, T. (2002): Dai 4 kai yuusou chousa (heisei 14 nen 1 gatsu jisshi) ringo no shouhi need. *Issues concerning the Development and Marketing of Agricultural Products in Mountainous Region (National Agricultural Research Center for Tohoku Region Report of Integrated Research for Agriculture, 5)*, 88–96, Department of Integrated Research for Agriculture, National Agricultural Research Center for Tohoku Region (in Japanese)
- 83) Shimoyama, T. (2003): Dai 2 kai shokumi shiken kekka gaiyou (soba sprout, soba aisu). *Issues concerning the Development and Marketing of Agricultural Products in Mountainous Region (National Agricultural Research Center for Tohoku Region Report of Integrated Research for Agriculture, 11)*, 48–50, Department of Integrated Research for Agriculture, National Agricultural Research Center for Tohoku Region (in Japanese)
- 84) Shimoyama, T., Iizaka, T., Nonaka, A., Kawate, T., Shibuya, M., Yui, S. and Yamazaki, A. (2002): Ichigo ni taisuru shouhisha need no kaimei. *Nougyou Keiei Tsuushin*, **214**, 22–25 (in Japanese)
- 85) Shimoyama, T., Nonaka, A., Iizaka, T., Isojima, A., Watanabe, M. and Moriyama, M. (2004): Web jou de katsuyou dekiru chuusankan chiiki ni okeru marketing shien system. *Heisei 15 Nendo Tohoku Nougyou Kenkyu Seika Jouhou*, National Agriculture and Biooriented Research Organization. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 86) Shimoyama, T. and Taniguchi, Y. (2003): Takou logit model wo riyoushita conjoint bunseki. *Nougyou Keiei Tsuushin*, **218**, 22–25 (in Japanese)
- 87) Sugitani, M., Kono, Y., Oura, Y. and Aizaki, H. (2002): Unshuu mikan no shouhisha need to sanchi no taiou housaku. *Nougyou Keiei Tsuushin*, **212**, 18–21 (in Japanese)
- 88) Sugiura, J. (2003): *Kankyou Hairyo no Shakai Shinrigaku*, Nakanishiya Shuppan, Kyoto (in Japanese)
- 89) Taguchi, M. and Sakagami, M. (2000): Research on the economic behavior of potential green consumers using conjoint analysis: the example of the purchasing behavior of paper. *Environmental Science*, **13**(2), 181–192 (in Japanese with English abstract)
- 90) Takeda, Y., Ohtsubo, H. and Kikkawa, T. (2003): An Analysis of BSE scare from the perspective of risk communication. *Japanese Journal of Risk Analysis*, **14**(2), 71–78 (in Japanese with English abstract)
- 91) Takeuchi, K., Kuriyama, K. and Washida, T. (1999): Abura ryuushutsu jiko no engan seitaikei heno eikyou. T. Washida, K. Kuriyama and K. Takeuchi (eds.), *Kankyou Hyouka Workshop*, 91–104, Tsukiji Syokan, Tokyo (in Japanese)
- 92) Tarumoto, Y. (1997): Nouka no taihi riyou ni tsuitenno ikou bunseki shuhou. *Kyushu Nougyou Shikenjou News*, **67**, Kyushu National Agricultural Experiment Station (in Japanese)
- 93) Tarumoto, Y. (2001): The subject of animal waste treatment and its utilization in Kyushu region. *National Agriculture Research Center Rural Economic Research*, **49**, 25–32 (in Japanese)
- 94) Tsuge, T. (2001): The valuation of the externalities of forest on citizen's preferences and possibility of use in a policy-making: A choice experiment study. *Environmental Science*, **14**, 465–476 (in Japanese with English abstract)
- 95) Uraya, T. (2004): Conjoint bunseki wo riyoushita taihi center no unei shuhou. *Heisei 15 Nendo Hokkaido Nougyou Kenkyu Seika Jouhou*, National Agriculture and Biooriented Research Organization. Available from <http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/seika-index.html> (in Japanese)
- 96) Yabe, M., Kontoleon, A., Ryan, E. and Yoshida, K. (2002): Consumer preferences for food safety and labels in the United Kingdom: A latent class model in the GM content in chicken feed. *Journal of Rural Economics*, special issue, 221–224 (in Japanese)

- 97) Yabe, M., Yoshida, K. and Kontleon, A. (2003): The choice experiment studies of combined model using stated preference and revealed preference data: Assessing the impact of alternative 'opt-out'. *Journal of Rural Economics*, special issue, 320–325 (in Japanese)
- 98) Yoshida, K. (2003a): A choice modeling approach to test on order effect of environmental risk information. *Journal of Rural Planning Association*, **21**, 303–312 (in Japanese with English summary)
- 99) Yoshida, K. (2003b): A demand analysis by stated preference methods as a straw vote for the headwater conservation tax. *Journal of Rural Planning Association*, **22**, 188–195 (in Japanese with English summary)
- 100) Yoshida, K. (2003c): Seisaku hyouka ni okeru kankyou hyouka riyou no genjou to kadai. Society for Environmental Economics and Policy Studies (ed.), *Koukyou Jigyou to Kankyou Hozen*, 68–81, Toyo Keizai, Tokyo (in Japanese)
- 101) Yoshida, K. and Peterson, H. H. (2003): Estimating the consumer response toward the country-of-origin labeling and food safety of imported rice. *Journal of Rural Economics*, special issue, 297–302
- 102) Yoshida, K., Ohtani, T. and Kubozoe, M. (2002): Benefits transfer of choice experiments for policy evaluation. *Journal of Rural Economics*, special issue, 179–181 (in Japanese)
- 103) Yutthana, V. and Monma, T. (2004): Thai ni okeru yuuki nousanbutsu ni taisuru shouhisha need to koubai koudou no kaimei. *Japanese Journal of Farm Management*, **42**(1), 171–174 (in Japanese)



# わが国の農業経済学分野における多属性型表明選好法と コンジョイント分析の応用

－ 1990 年代後半から 2005 年まで －

合崎英男

## 要 約

本資料では、わが国の農業経済学分野において、多属性型表明選好法とコンジョイント分析を利用して取り組まれてきた研究テーマを整理し、その特徴と今後の課題を明らかにした。本資料における多属性型表明選好法は、確率効用理論をベースとした離散選択モデルにより回答結果を分析するものであり、回答形式が選択実験、仮想順位付、仮想評定、および一対比較であるものを含む。コンジョイント分析とは、いわゆる伝統的コンジョイント分析に該当する。取り上げている研究領域は、消費者研究（農畜産物の特徴の消費者評価、食品安全性の消費者評価）、農業経営研究（農業者による新技術、生産要素、および農家支援サービスの評価、農地利用に関する意思決定分析）、および農村計画研究（農業・農村の多面的機能の経済評価、施設整備計画の住民・利用者評価）である。各研究領域には固有の特徴や課題が見られる一方、顕示選好データと表明選好データの統合による分析精度の向上などの共通する課題も見られた。共通する課題については、各研究領域での成果を相互に参照することで、効率的に対応することが可能となろう。

キーワード：選択実験、離散選択モデル、消費者研究、農業経営研究、農村計画研究

# 流域水資源および農業への 温暖化影響評価に関する世界の先進研究調査

吉田武郎\*・増本隆夫\*\*・堀川直紀\*

## 目 次

I 緒言	285	2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル	291
II 影響評価研究における基盤技術	285	3 気候変動が食料生産に与える影響に関する 情報提供サービス	291
1 全球気候・流量データベース	285	V 結言	292
2 ダウンスケーリング	287	参考文献	292
III 地球温暖化が水資源に及ぼす影響	287	Summary	294
1 全球スケールの水資源への影響評価	287	参考資料	295
2 流域スケールの水資源への影響評価	289	I 調査の全行程	295
IV 地球温暖化が食料生産に及ぼす影響 評価	291	II 訪問した機関・大学の概要と研究分野	296
1 将来気候値を用いた食料生産予測手法	291		

## I 緒言

地球温暖化に伴う気候変動に関連して関心が大きい課題の一つは、降水量やその分布、降雨強度等に代表される地球上の水循環がどのように変化するか、そしてそれが我々の生活にどのような影響を及ぼすかという点である。地球温暖化が将来、我々の生活や環境に及ぼす潜在的な影響を評価することが急務であり、これらの研究課題に対しては、気候学から水文学、農学まで各国で幅広い分野の研究機関が取り組んでいる。現在研究を進めている分野の全体像を概観するとともに、先進事例を収集するために、平成21年2月15日から3月8日の22日間にわたり、世界7カ国の14研究機関・大学を訪問し、地球温暖化に係わる分布型水循環モデルの開発と利用、大気大循環モデルと分布型水循環モデルの結合、地球温暖化の水資源・農業への影響評価に関する研究事例調査を行った。ここでは、1) 地球温暖化の影響評価に関する基盤研究・技術、2) 流域レベルの水資源への影響評価、3) 農業・食料生産に与える影響評価を中心にその概要を報告するとともに、農業における水資源分野の影響評価に向け、今後取り組むべき課題についてまとめた。

\* 農地・水資源部 水文水資源研究室

\*\* 農村総合研究部 地球温暖化対策研究チーム（兼農地・水資源部 水文水資源研究室）

平成21年12月14日受理

キーワード：気候変動，地球温暖化，影響評価，農業，水資源

**Table 1, Fig.1**に訪問した研究機関，大学を示し，調査の全行程と，それぞれの機関の概要や個別の研究テーマやその成果を，末尾に参考資料として示す。

なお，本調査は，農林水産省農村振興局海外土地改良技術室から(財)日本水土総合研究所を通して受託した「かんがい施設温暖化適応策検討調査に係る温暖化影響予測評価業務（H20～24年度，最終年は予定）」の元に行われた。また，訪問先の情報収集や現地との調整に当たっては，小尻利治・寶馨（京都大学防災研究所），国安法夫（FAO日本事務所），小野寺文彦（FAO本部），村瀬勝彦（WMO），森健（在豪州日本大使館参事官），小林保幸（在フランス日本大使館一等書記官），安中正実（国際農林水産業研究センター），藤田光一（国土交通省国土技術政策総合研究所），吉谷純一（土木研究所），上田達己（イーストアングリア大学）の諸氏（敬称略，いずれも当時の所属）の協力を得た。ここに記して，感謝の意を表す。

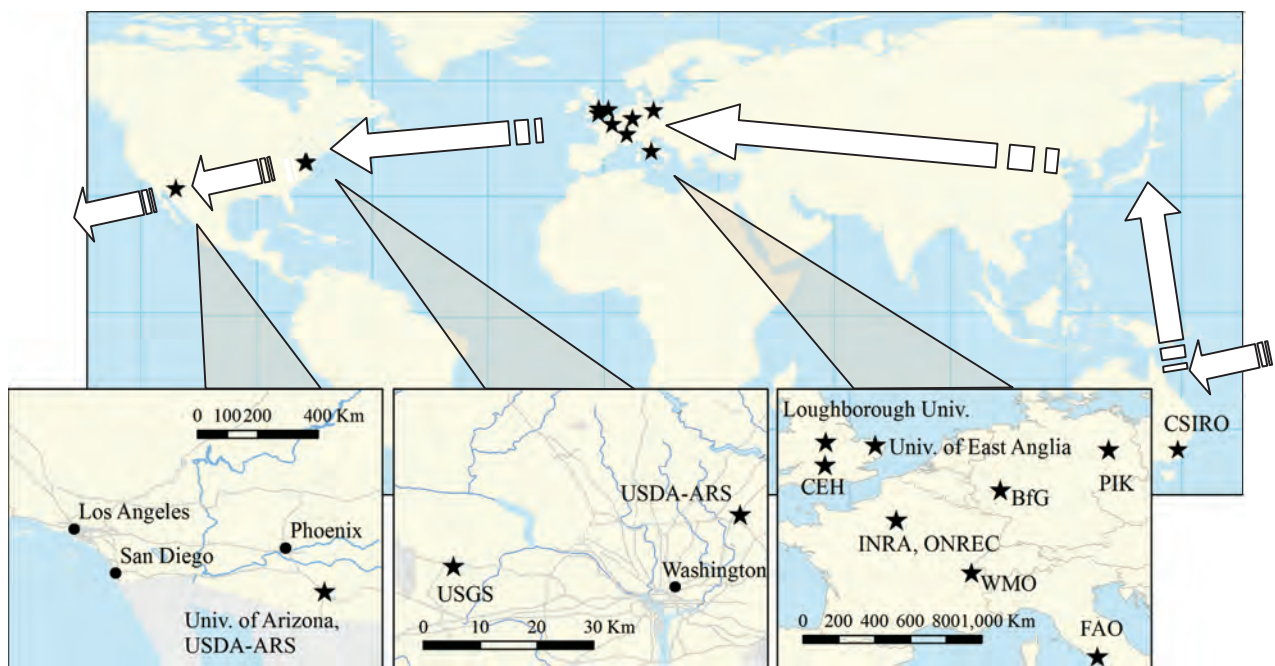
## II 影響評価研究における基盤技術

### 1 全球気候・流量データベース

地球規模の気候変動については，長期間の全球規模の気候，流量の観測データの蓄積によって，その解明と検証がなされており，現在も世界気象機関 World Meteorological Organization（WMO）の下，気候，水文データのデータベースの構築と共有，気候変動に関する情報提供サービスは強化されつつある。

**Table 1** 訪問した機関 (訪問順)  
Visited institutes and universities in chronological order

機関・大学名	英名 (略称)	所在地
生態・水文研究所	Centre for Ecology & Hydrology (CEH)	Wallingford, イギリス
ラフバラー大学	Loughborough University	Leicester, イギリス
イーストアングリア大学	University of East Anglia	Norwich, イギリス
ポツダム気候影響研究所	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)	Potsdam, ドイツ
ドイツ連邦水文研究所	Federal Institute of Hydrology (BfG)	Koblenz, ドイツ
世界気象機関	World Meteorological Organization (WMO)	Geneve, スイス
国連食糧農業機関	Food and Agriculture Organization (FAO)	Rome, イタリア
フランス国立農業研究所	National Institute for Agricultural Research (INRA)	Paris, フランス
フランス国立気候温暖化影響観測網	National Observatory on Impacts of Climate Warming (ONREC)	Paris, フランス
米国地質調査所	United States Geological Survey (USGS)	Reston, アメリカ合衆国
米国農務省農業研究局	United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS)	Beltsville, アメリカ合衆国
アリゾナ大学 乾燥地流域持続性研究センター	University of Arizona Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas (SAHRA)	Tucson, アメリカ合衆国
米国農務省農業研究所 南西流域研究センター	United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS), Southwest Watershed Research Center	Tucson, アメリカ合衆国
豪州科学研究機構 ブラックマウンテン研究所	Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO), Black Mountain Laboratories	Canberra, オーストラリア



**Fig.1** 訪問した研究機関の位置  
Locations of visited institutes and universities

WMOの世界気候研究計画 World Climate Research Program (WCRP) は、WMO、国際科学会議 (ICSU) および国連教育科学文化機関 (UNESCO) の政府間海洋学委員会 (IOC) がスポンサーとなり 1980 年より実行されている世界気候計画 World Climate Program (WCP) のサブプログラムの 1 つである。WCRP は、気候の予測可能性および人間活動の気候影響の程度を評価するために必要な、基礎的な気候システムおよび気候プロセス

の科学的理解を発展させることを目的とし、その研究分野は 10 年ごとに重点化が図られている。これまで、第 1 期には地球気候システムの現象解明と人間活動の影響評価、第 2 期には全球の気候観測の重要性の認識に重点が置かれてきたが、現在の第 3 期では気象、気候のデータを関連機関に提供するサービスに重点を移し、気候変動研究者と影響評価研究者、行政機関との情報交換を図ることが重要な目的の一つとなっている。

全球気候データの収集とそのデータベース化において世界の気候変動研究に大きな役割を果たしているのが、イギリスのイーストアングリア大学 (University of East Anglia) にある気候研究ユニット Climate Research Unit (CRU) である。1972年に設立された当初のCRUの役割は全球の気候データを可能な限り集め、気候の長期変動の形成過程、植生との相互影響の現象解明を行うものであった。1978年には、これを発展させて全球の陸域における気温グリッドデータの作成が開始され、その後イギリス気象庁との協働により海域にもその対象が拡張され、過去157年間の地球の気温上昇傾向を明らかにした。この研究成果についてのサッチャー首相と当時の所長Tom Wigley氏の会談により、イギリス政府は気候変動研究の重要性を認識し、気象庁傘下ハドレー気候研究センター Met Office Hadley Centre の設置に結びついた。さらに、CRUでは降水量の全球データも同様に作成し、このデータベースは現在気候値の再解析データ作成に関する基礎的なデータとなっている。再解析データとは、風、気温、水蒸気場や降水量等の全球観測値を、データ同化システムによって力学的な整合性を図ったものであり、統一的な解析手法のもとで再現された現在気候の長期データである。CRUの作成したデータベースに基づく再解析データによって気候の長期的変動が見いだされ、今回訪問した他の研究機関をはじめ、多くの研究機関で用いられている (Rost et al., 2008, Meigh et al., 1999)。

全球気候のデータ配信に関しては、CRUが主体となっていたLINKプロジェクト (Climate Impacts LINK) では、ハドレーセンターの気候予測値を影響評価研究者に提供する枠組みが構築された。この枠組みを活用し、再解析値および全てのGCMの気候予測値の整備、配布を行うIPCCデータ配布センター (Data Distribution Center) が設立、運用されている。それにより、2009年から、英国全土の将来気候シナリオ (5kmグリッド、日単位) を、インターネットで配信するプロジェクトが開始されている。

気候のデータベース化に比べて、全球水文データベースの構築は遅れていたが、WCRPの下、全球流量データセンター Global Runoff Data Center (GRDC) が、ドイツ連邦水文研究所 Federal Institute of Hydrology (BfG) に設置、運用されている。GRDCは各国の水文行政機関との連携を図り、大河川の流量データを収集、データベース化、公開を行い、地表水の水文学に関する全球規模の情報交換を円滑に行っている。データは使用者の要求に応じて無料で公開され、政策決定者に対して水文学的問題の解決に必要な情報が提供されている。

## 2 ダウンスケーリング

数十～数百kmの空間解像度と、1日～月単位の時間解像度を持つ大気大循環モデル General Circulation Model

(GCM) の計算結果を、対象とする時間、空間領域での細かいスケールまで細分化することをダウンスケールとよび、GCMによる計算値と観測気象データの統計的な関係に基づく統計的ダウンスケールと、細かい格子間隔で計算する領域気候モデル Regional Climate Model (RCM) をGCMに組み込む (ネスティング) 力学的ダウンスケールに大別される。統計的ダウンスケールやGCM, RCMには多数の種類があり、近年ではLinuxやWindows上で起動する多くのパッケージモデルが開発され、研究者だけでなく多くの実務者により用いられている。

計算の初期値・境界値や、物理過程のパラメタリゼーションに起因する不確実性によって、GCMやRCMの解析結果には系統的誤差 (バイアス) が含まれ、IPCCの報告書等では、できる限り全ての原因を考慮した予測値の信頼幅の定量表示を目指している。初期値に起因する不確実性を評価するためには、初期値を少しずつ変えながら計算を繰り返すを行い、その結果を統計的に処理する方法 (アンサンブル法) が採られる。他方、物理過程のパラメタリゼーションに起因する不確実性の定量的評価には多くの手法があるが、世界各国で開発された複数のGCMによって再現された物理過程の比較研究 (マルチモデルアンサンブル) が、その一つとしてあげられる。例えば、EUの出資によるプロジェクト ENSEMBLES (2004～2009年) は、将来気候の予測を複数のGCM, RCMを用いてアンサンブル予測を行うためのシステムの構築と、人間活動によるフィードバックに起因する不確実性の減少を行っている。

## III 地球温暖化が水資源に及ぼす影響

地球温暖化が水資源に及ぼす影響評価は、GCMやRCMの計算値を集中型や分布型の水循環モデルに入力して行われるが、その際、GCM計算値や全球気候データセットを直接入力値とし、全球や大陸規模の水循環への影響を評価する研究と、GCM計算値をダウンスケールして流域スケールの研究を行うものに大別される。

### 1 全球スケールの水資源への影響評価

ドイツポツダム気候影響研究所 Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) で開発中のLPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land) は、陸面過程、植生モデルが統合された全球モデルで、この100年間の全球気候データセットを入力として、全球スケールの灌漑農業の発達、植生の変化傾向を高い精度再現することができる。LPJmLは、9種類の自然植生と、12種類の灌漑・天水農業を含めた植物の生育と、それに伴う炭素、水移動量をダイナミックに計算する全球植生モデルで、0.5度のグリッドで日単位の計算を行う。LPJmLの特徴のひとつは、河道流モデル、貯水池モデル、灌漑モデルに



改良が加えられ、河川、湖沼、貯水池からの取水、灌漑に起因する蒸発散量「ブルーウォーター」と、降水に起因する蒸発散量「グリーンウォーター」を明確に区別し (Fig.2), それらを全球で定量化できることである (Fig.3)。1901年から2003年までの気候データセットをこのモデルに適用した研究結果では、現在までの全球の植生分布の変化が過去の気候データをよく反映していることや、天水・灌漑農業、その他生態系システムによる水消費量の定量的な評価が可能であることが明らかにされている。また、農地の水循環は、全球規模で見れば小さいものの、灌漑が卓越した流域においては農業用取水の流域への影響が大きいことが確認されている。ただし、水田水利用などのアジアモンスーン域の特徴的な水利用が組み入れてあるかは不明である。

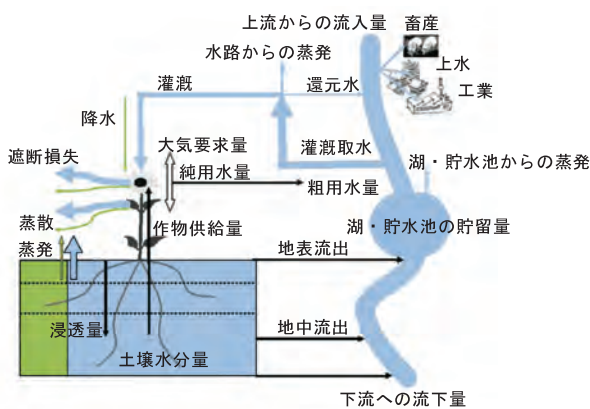


Fig.2 全球 LPJmL モデル中のブルーウォーターとグリーンウォーター計算の概念図 (Rost et al., 2008)  
Schematic representation of green and blue water flows as computed in the LPJmL model

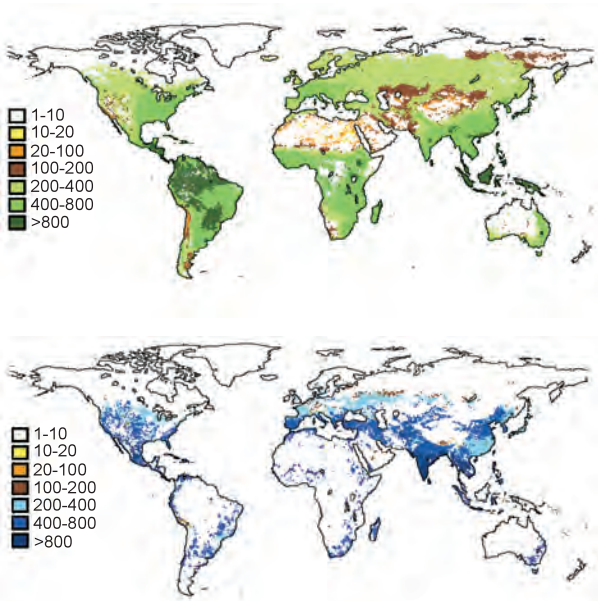


Fig.3 農地におけるグリーンウォーター (上) とブルーウォーター (下) の1971年から2000年の年平均消費水量 (Rost et al., 2008)  
1971-2000 average annual green (above) and blue (below) water consumption on cropland

LPJmL モデルを用いた全球水資源予測では、気候変動が灌漑農業を含めた農業用水資源に及ぼす影響を評価できる点に特徴がある。モデル中では灌漑農業、天水農業が区別され、それらにどのくらい水が消費され、河川流量にどの程度影響があるかが示されている。また、農業用水の起源やその構成率を推定することができる。水源としては降水、地表河川水、地下水の他、再生不可能な深層地下水等も挙げられ、農業の持続可能性といった観点からの議論も可能である。このように、他の全球灌漑モデルに比べて農業用水を詳細に取り扱う LPJmL モデルにより、気候変動により将来の水資源ストレスの発生をより合理的に推定できる (Rost et al., 2008)。

また、イギリス生態・水文研究所 Centre for Ecology and Hydrology (CEH) で開発された全球水資源評価モデル Global Water Availability Assessment model (GWAVA) は、全球スケールの分布型流出モデルと GCM, RCM を結合した水利用可能量の推定モデルである (Meigh et al., 1999, Folwell et al., 2006, Fung et al., 2006)。GWAVA は、主にイギリス国際協力事業省 (DFID: Department for International Development) の国際援助事業を通して南アフリカ、ロシア、西アフリカ、バングラデシュ等の世界各国の流域への適用を通して改良が加えられ、氷河の融解や洪水等の各流域に特徴的な流出過程を取り込みながら発展してきた。同モデルは全球に適用可能だが、個々の成果は地域研究の側面が強いといえる。また、開発当初のメッシュサイズは 0.5° であったが、現在では RCM 計算値を利用し、水資源管理者に詳細で有用な情報を提供するために、メッシュサイズは 0.1° へ変更されている。各メッシュの地表流出量の推定は、集中型の概念モデルである確率分布モデル Probability Distributed Model (PDM) を用いて、土地利用と土壌のタイプ別に行われ、河道部分は Muskingum 法で計算される。そこでは、それぞれのメッシュ内の水供給可能量、用水需要が日単位で計算され、水需要に対して地表・地下を含めた供給可能量が充分なメッシュでは需要分が取水され、不足する場合には供給可能量が取水される。そこで、需要と供給の割合から水ストレスを指標として示すことが可能である。各メッシュの水需要は上水、工業用水、農業用水の和として計算されるが、具体的なデータが得られない場合には FAO や UNESCO 等の各種データベースが用いられている。

その中では、地球温暖化に対して洪水、渇水の両面から水資源が最も脆弱な国のひとつと考えられるバングラデシュにおいて、将来の水資源予測が行われた (Fung et al., 2006)。そこでは、地域の水資源予測に重要な影響を持つ氷河生成・融解モデルを精緻化するとともに、ハドレーセンターの GCM である HadCM2 を領域気候モデル PRECIS でダウンスケールして GWAVA への適用を行い、乾季流量の減少と人口の増加により、流域内の水ストレスが急激に上昇することが示されている。

2 流域スケールの水資源への影響評価

a モデルの不確実性の評価

数十～数百 km の空間解像度を持つ GCM の出力を流域評価研究に用いるためには、ダウンスケールして解像度を上げる必要があるが、この際 GCM や RCM のデータに含まれていた誤差やバイアスは、水資源評価モデルに引き継がれる。このため、単一のモデル、気候シナリオによって導き出される結果は「将来の可能性のひとつ」であり、それぞれの不確実性（シナリオ、GCM、RCM、水文モデル）による予測の幅を提示することが必要となる（Fig.4）。

ドイツの河川舟運の需要は、1997 年から 2015 年の間に 43% 増大することが予測されているが（Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs, 2007）、一方で河川水位の低下、河床の上昇等の問題が顕在化し、その原因の一端として、降水量の空間分布の変動が指摘されている。また、東部の年降水量は西部に比べて約 300mm 少ないが（東部で 500mm、西部で 800mm）、気候モデルの将来の降水量分布の予測は、東部降水量が約 100mm 減少し、西部では逆に約 100mm 増加することを示しており、東西の河川水位を適切なレベルに管理しつつ、水資源の東西の格差を解消することが課題である。

この課題に対して、東西の河川を結ぶ導水路の建設が計画されている。ドイツ運輸・舟運省傘下の機関で、将来の水資源変化予測に基づいて水路の管理、整備方針を提言する機関であるドイツ連邦水文研究所 Federal Institute of Hydrology では、導水路の規模を推定することを目的の一つとして、気候変動がドイツの運輸（河川・舟運部門）に与える影響の将来予測を行うプロジェクト Impact of Climate Change on Waterways and Shipping Sector (KLIWAS, 2009～2013 年) を遂行している。この事業は巨額の資金を投入する公共事業に関する調査プロジェクトであるため、解析に用いる気候シナリオ、温室効果ガスの濃度、大気大循環モデル、領域気候モデル、水文モデルがそれぞれ持つ誤差やバイアスを定量的に把握し、取るべき対応策が持つ不確実性の幅を評価するこ

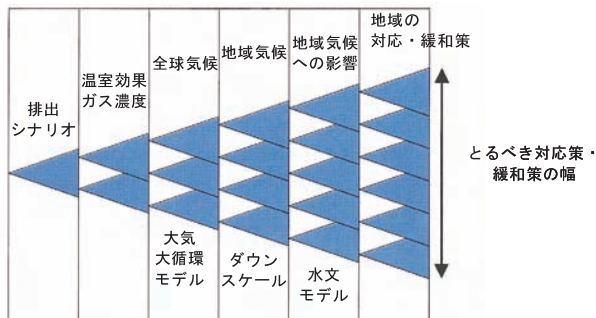


Fig.4 GCM から RCM にダウンスケールする際に生じる不確実性 (Viner, 2002)

Decreasing statistical significance that arises from the transfer of climate scenarios to regional climate impacts and measures

とが重要となる。そのため KLIWAS 開始前に、水文部門のみで実行されたパイロットプロジェクト（2007 年）とそのレビュー（2008 年）が行われ、5 本の気候シナリオ、5 種の GCM、7 種の RCM の組合せにより国内各河川の流量が計算され、結果の検証が行われている。

b 地球温暖化による確率洪水規模の変化

イギリス生態・水文研究所（CEH）で開発された分布型流出モデル Grid2Grid モデル（G2G モデル）は、汎用的な構造をもち、1km 四方の英国ナショナルグリッドを基準として開発された分布型流出モデルで、日または時間単位で計算を行う。G2G モデルは、各グリッドからの地表流、斜面流下方向の地下水流を、標高データから発生させた流路網に従ってキネマティックウェーブ法で流下させるモデルである（Bell et al., 2007a, Fig.5）。英国全土へ適用された G2G モデルに対し、英国内の 25 流域での流量との比較から、領域に共通のパラメータが試行錯誤的に与えられ、現在気候の降水量には 5km の空間解像度に空間内挿された気象庁による日降水量（1958～2008 年）、および再解析気候データ ECMWF を領域気候モデルに入力して得られた時間降水量（1979～1993 年）が用いられている。その結果、地形が流出特性に卓越した影響をもつイングランド北部、スコットランド等の地形が急峻な流域における計算結果は、既に最適化されている集中型モデルと同等に良好な結果が得られている。ただし、イングランド南東部、テムズ川流域等の基底流出が卓越した流域や、低平地、取水・排水量が多い流域での再現性は低いようである（Fig.6）。

このモデルにハドレーセンターの領域気候モデル HadRM3H による気候現在値（1961～1990 年）と将来シナリオ（2071～2100 年）を入力して、英国主要 25 河川での年最大流量の確率量が比較検討された。領域気候モデルの空間解像度の 25～50km で与えられる降雨に対して、英国ナショナルグリッドで得られる標準年降水量 SAAR (Standard Average Annual Rainfall) により重み付けを行い、領域気候モデルグリッド内の降水量の不均一性が考慮されている（Fig.7）。将来の気候シナリオ下でのイギリス北部、南東部の確率洪水量は現在気候値

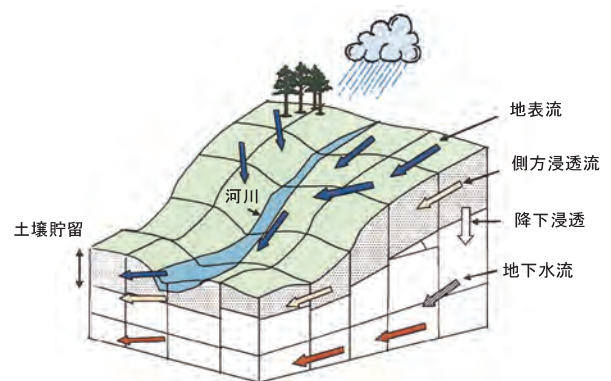
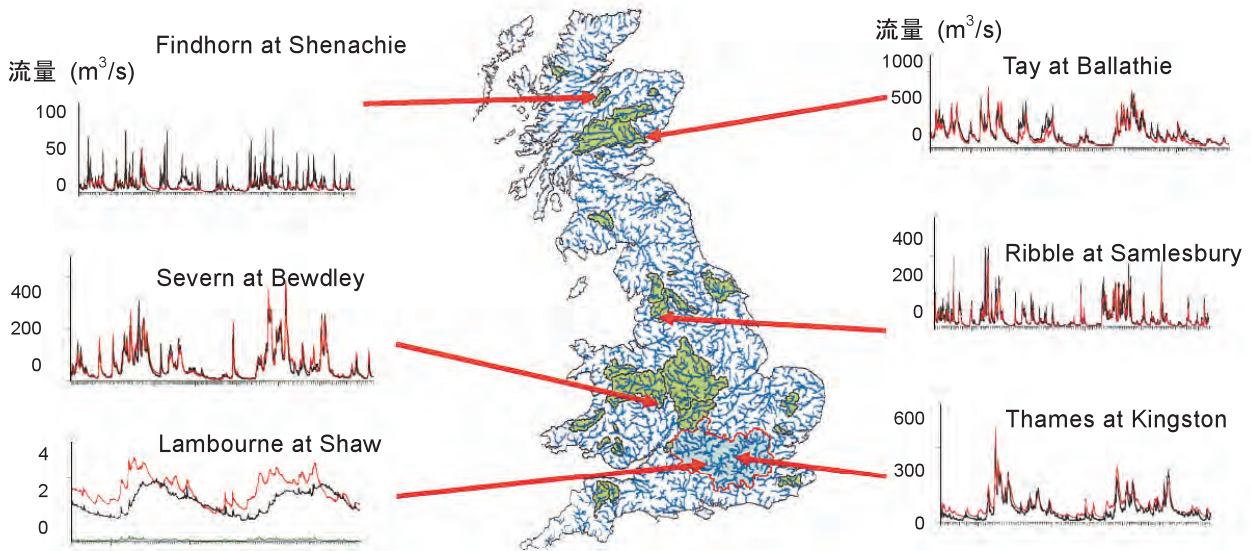


Fig.5 Soil G2G モデルの概略図 (Bell et al., 2007a) Schematic representation of G2G model





**Fig.6** G2G モデルのイギリス全土への適用結果 (Bell et al., 2007a)  
Comparison of the calculated and observed discharges in 6 representative basins of the United Kingdom

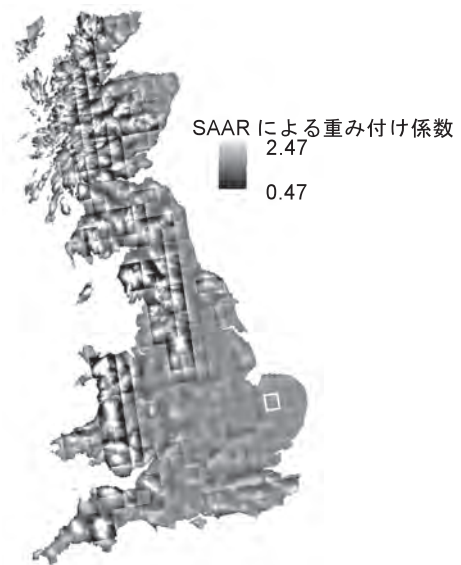
より増加し、危険度が増すことが明らかにされているが、将来予測値に極端に大きい降水量を含む単一の GCM を、複数の大気大循環モデルやマルチアンサンブルの導入による、より詳細な検討が今後の課題となっている (Bell et al., 2007b)。

また、モデルの高度化の方向として、現在の 2 層の土壌貯留構造 (Terrain G2G) から、3 層の貯留構造をもち、土壌分類ごとに異なる保留量をパラメータとして与えるモデル (Soil G2G) の開発や、CEH で開発された陸面過程モデル JULES (Joint UK Land Environment Simulator) との結合があげられている (Fig.8)。陸面過程モデルと G2G モデルとの結合は全ヨーロッパの河川を対象に行われており、多くの河川で観測流量値をよく再現することが示され、ダム管理、工業、農業等の人間活動の影響を受ける流域や、アルプスの積雪・融雪の影響を受ける流域の計算精度向上が図られている。

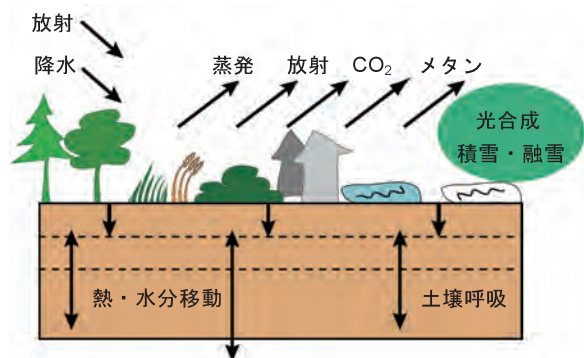
**c 分布型水循環モデルの最適化手法**

分布型流出モデルは、河道の任意地点での流量や、各メッシュでの蒸発散量、土壌水分の変化等を計算することが可能であるが、それらの計算結果を検証する面的なデータは限られる。また、分布型流出モデルのパラメータは最適化するパラメータの数が極端に多いため、最適パラメータは流域内の水文的、物理的特性の空間的不均一性が再現されず、流域の空間平均に最適化される。そのため、単純に最適化手法を適用するだけでは合理的な結果が得られない等の問題がある。

これまで、SCE-UA 法 (Duan et al., 1992)、MOCOM-UA 法 (Yapo et al., 1997)、MOSCEM-UA 法 (Vrugt et al., 2003) 等、一連の概念的流出モデルのパラメータの強力な最適化手法を開発してきたアリゾナ大学の研究グループでは、こうした分布型流出モデルの最適化問題に対し、以下の 2 つのアプローチを取ることにより、より合理的



**Fig.7** 25km の RCM グリッド降水量に対する 1km のグリッド標準降水量 SAAR の比 (Bell et al., 2007a)  
Map showing the ratio of 1km SAAR to the mean SAAR of a 25km RCM grid-cell



**Fig.8** CEH で開発された陸面過程モデル JULES の概念図  
Schematic representation of JULES, a land-surface scheme developed in CEH

で、物理的に首尾一貫したパラメータセットを推定する方法を検討している (Pokhrel et al., 2009)。

その一つは、流域の水文、物理的特性の空間分布を先験的情報として最適化過程に組み込み、最適化するパラメータの分布と数に制限をかける手法である (Pokhrel et al., 2009)。分布型流出モデルのパラメータ推定の場合、地質、土壌タイプ、植生、地形等の地表面に近い水理水文特性の空間的分布が流域の水文の応答を支配すると考え、それらがパラメータ分布の制限をかける要素として適用する。分布型流出モデルで最適化すべきパラメータの数は、対象流域のグリッド数 $G$ と各グリッドに与えられるパラメータ数 $P$ の積であるため、限られたモデルの応答を用いて非常に多数のパラメータを最適化することになる。ここで、あるパラメータ $\theta_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,G$ :地点番号,  $j=1,2,\dots,P$ :パラメータ番号) が、先験的情報 $X_i$ と、その変換パラメータセット $\phi\{\alpha,\beta,\gamma\}$ によって以下のように定式化できるとする。

$$\theta_{ij} = \alpha X_i^\beta + \gamma$$

上式が満たされると仮定すれば、モデル全体のパラメータを最適化する問題から、先験的情報をモデルパラメータに変換する関数とそのパラメータ $\phi\{\alpha,\beta,\gamma\}$ を最適化する問題に置換できる。

もう一つのアプローチは、ハイドログラフの時系列データを出来る限り活用する診断的指標の開発である (Yilmaz et al., 2008)。モデルを評価する目的関数には、これまで平均二乗誤差、対数平均二乗誤差等が用いられてきたが、これらの目的関数は流量の観測値と計算値の差を時間的に平均化して算出されるため、流量が持つ時系列情報は失われることになる。この時系列情報を可能な限り活用し、流量の観測値と計算値によって様々な誤差診断指標を開発することにより、長期水収支、土壌層内の鉛直方向の水分分布、長期基底流出、ピークのタイミングといった流域の降雨流出応答から、モデル構造の不適切さや限界を診断的に明らかにすることが可能となる。

これらの方向性は、現在著者らが開発している農業水利用を考慮した分布型水循環モデル (Masumoto et al., 2009) のパラメータ決定において大いに参考になることが判明した。

#### IV 地球温暖化が食料生産に及ぼす影響評価

##### 1 将来気候値を用いた食料生産予測手法

世界銀行のプロジェクトとして気候変動の影響事例調査がモロッコを対象として行われ、その中で気候変動による同国内の食料生産への影響評価が行われた (FAO, 2009)。作物モデルはFAO-CCSWB (Crop Specific Soil Water Balance) を用い、現在の気象観測値と農業統計からモデルの有効性を確認した上で、GCMの計算値をダ

ウンスケールして将来の予測気候値として与え、作物ごとに収量を予測する。プロジェクトで対象としたモロッコ国内の6つの農業地帯における、50種の主要作物(灌漑、天水の区別を含む)の生産量を、2本の気候シナリオ(A2, B2)の元で検討したものである。気候モデルの不確実性を評価するため、それぞれのシナリオ、地帯、作物について100回ごとの計算を行い、予測値を統計的に評価している。

ただし、作付けされる作物、灌漑技術等は現在のトレンドが将来にも継続すると仮定し、さらに、作物に生じた水ストレスの緩和のために、常に作物が要求する量の灌漑が行われるものとしている。すなわち、現在の農業に地球温暖化した気候を適用した場合の評価方法を提示しただけで、水管理や灌漑の技術的な対応や、作付け時期や作物の変更等は考慮されていない。そのため、2100年までの検討が行われているものの、時間の経過とともに信頼性は低くなり、2030年までの予測に関してのみ信頼できる推定結果とされている。

##### 2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル

生態・水文研究所 CEH では、前述した水資源評価モデルとは独立して、乾燥農地における圃場レベルでの水分、溶質移動を計算する農地水循環モデル SALTMED (Ragab et al., 2005a) を開発している。そのモデルは乾燥農地における灌漑水管理、作物要求水量を計算するだけでなく、収量や土壌の塩類化の進行の予測・評価を行うモデルで、エジプト、シリアにおける生産量予測プロジェクトにおいて実証的に有効性が確認され (Ragab et al., 2005b)、乾燥地における農業生産予測の強力なツールの一つとなっている。また、Windows上で作動する SALTMED モデルは、ウェブ上で公開されている。

さらに同研究グループは、地球温暖化にともなう気候変動や土地利用、水管理の変化が、河川流量、土壌水分の空間分布、沿岸域の地下水資源に及ぼす影響を評価するために、地下水モデル MODFLOW、分布型流出モデル DiCaSM、海水浸入モデル SWI を統合した流域統合水文モデル Integrated Hydrological Modeling System (IHMS) を開発している。ただし、対象は乾燥地域であり、モンスーンアジアの湿潤な水田農業地帯への多くの課題を残しているとの印象を持った。

##### 3 気候変動が食料生産に与える影響に関する情報提供サービス

世界気象機関 WMO では、地球温暖化の影響が各国の農業分野に与える影響に関する情報を提供し、また途上国の関連機関の担当者に研修を行って、担当者の情報理解、発信に関する能力向上を図っている。世界気象機関気候・水資源部 Climate and Water Department では、水文学、農学、気象学に関する技術委員会を設け、既存の気候、作物、水文モデルを活用して気候変動の影響を途



上国の気象機関に提供するサービスを行う。そのサービスの内容は、気候変動が地域に与える影響を予測するためのダウンスケール手法に力点がある。気象データが得られる国、地域では、対象国の気象機関に統計的ダウンスケール手法 Climate Predictability Tool (CPT) を提供するとともに、研修を行って技術移転を図っている。気象データの得られない国の場合には力学的ダウンスケールを用いるが、そこではイギリスハドレーセンターで開発された PRECIS が用いられることが多く、統計的ダウンスケールと同様に技術移転が図られている。また、農業気象機関を対象として食料生産への気候変動の影響に関する情報を提供する農業気象委員会 CAgM (Commission for Agricultural Meteorology) があり、農民を対象としたセミナー、ワークショップの開催、農業気象機関と協働して政策決定への貢献を行っている。

また、気候変動がもたらす極端現象の増大に伴い、既往の統計値による発生頻度予測を上回る頻度で気象災害が発生することが懸念されている。オーストラリアの灌漑農地で20年確率の干ばつが5年以上連続して発生したことはその一例としてあげられる。そこで、WMOの気象・災害リスク低減サービス部 Weather and Disaster Risk Reduction Services Department では、気象災害による被害の予測や低減を図るため、WMOの全ての部門が関わって気候変動による極端現象の増大や、気候パターン自体の変動に関する情報を各国機関に提供するとともに、気象災害の発生を準リアルタイムで共有する枠組を構築している。

## V 結 言

本報告では、地球温暖化の影響評価を行う世界の研究機関における先進事例調査の結果を、流域スケールの水資源と食料生産に対する影響評価という観点から概観した。ここで、農業用の水資源への影響評価に向けた課題を以下の2点にまとめた。

地球温暖化に伴う気候変動による降水量や降水分布、気温変化のモデル予測値を流出モデルに入力し、洪水規模等の流出特性の変化を評価する研究事例は多い。また、水資源への影響評価は、全球スケールで農業用の水資源の消費量を評価した研究にみられるように、数十kmオーダーのメッシュごとにメッシュ内の供給可能水量と需要量を比較し、マクロな評価が行われている。ただし、利用者間での水資源の配分や管理等の実態に即した評価を行う必要があり、特に灌漑水資源への影響を評価する場合には、複数のメッシュに跨った灌漑地区における取水量の決定や地区内の用水配分・管理の判断等といった、流域の地域性や人間の判断過程をモデル化することが、重要な課題の一つといえる。

また、農業用水資源への影響評価を行うためには、分布型水循環モデル等によって任意の地点、時点での河川

流量や、土壌水分、蒸発散量を的確に表現することが不可欠である。しかし、流出モデルのパラメータの最適化手法の多くは流域末端の流量計算精度の向上を図るものであり、それらの最適化方法では任意地点での流量や農地の土壌水分等の陸面過程の再現精度が必ずしも向上しないことから、モデル全体の水循環の挙動を妥当に再現するパラメータセットの推定法の検討も、今後は是非とも取り組むべき課題としてあげられる。

## 参考文献

- 1) American Geographic Union (2008): Fifty years of research and data collection, *U.S. Department of Agriculture Walnut Gulch experimental watershed*
- 2) Anderson, Martha C., William P. Kustas and John M. Norman (2007): Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing, *Agronomy Journal*, **99**, pp.240-254
- 3) Bell, V. A., A. L. Kay, R. G. Jones and R. J. Moore (2007a): Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output, *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**(1), pp.532-549
- 4) Bell, V. A., A. L. Kay, R. G. Jones and R. J. Moore (2007b): Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk, *International Journal of Climatology*, **27**, pp.1657-1671
- 5) Crow, T. Wade (2003): Correcting land surface model predictions for the impact of temporally sparse rainfall rate measurements using an ensemble Kalman filter and surface brightness temperature observation, *Journal of Hydrometeorology*, **4**, pp.960-973
- 6) Crow, T. Wade and Eric F. Wood (2003): The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97, *Advances in Water Resources*, **26**, pp.137-149
- 7) Crow, T. Wade (2008): A novel method for quantifying value in spaceborne soil moisture retrievals, *Journal of Hydrometeorology*, **8**, pp.56-67
- 8) Duan, Q. Y., S. Sorooshian and H. V. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, **28**(4), pp. 1015-1031
- 9) FAO (2009): World Bank - Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector, *FAO component: impact on crop yields*
- 10) Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs (2007): Navigation and waterways in Germany – Meeting the challenges of climate change – A review, 7p.
- 11) Folwell, Sonja and F. Farquharson (2006): The impacts of

- climate change on water resources in the Okavango basin, *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, Nov. 2006)*, IAHS Publ. **308**, pp.1-7
- 12) Fung, C. F., F. Farquharson, J. Chowdhury (2006): Exploring the impacts of climate change on water resources - Regional impact at a regional scale: Bangladesh, *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, Nov. 2006)*, IAHS Publ. **308**, pp.389-393
- 13) Krysanova, Valentina and Jeffrey Arnold (2008): Advances in ecohydrological modeling with SWAT- a review, *Hydrological Sciences*, **53**(5), pp.939-947
- 14) Masumoto, T., T. Taniguchi, N. Horikawa, T. Yoshida and K. Shimizu (2009): Development of a distributed water circulation model for assessing human interaction in agricultural water use, M. Taniguchi, W. C. Burnett, Y. Fukushima, M. Haigh and Y. Umezawa (Eds.), “*From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*”, pp.195-201: Taylor and Francis
- 15) Meigh, J. R., A. A. McKenzie and K. J. Sene (1999): A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa, *Water Resources Management*, **13**, pp.85-115
- 16) Moran, M. Susan, Debra P. C. Peters, Mitchel P. McCaran, Mary H. Nichols and Mary B. Adams (2008): Long-term data collection at USDA experimental sites for studies of ecohydrology, *Ecohydrology*, **1**, pp.377-393
- 17) Pokhrel, P., H. V. Gupta and T. Wagener (2008): A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model, *Water Resources Research*, **44**, W12419, doi: 10.1029/2007WR006615
- 18) Pokhrel, P., K. K. Yilmaz and H. V. Gupta (2009): Multiple-criteria calibration of a distributed watershed model using spatial regularization and response signatures, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.004
- 19) Ragab, R., N. Malash, G. Abdel Gawad, A. Arslan, A. Ghaibeh (2005a): A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management, 1. The SALT-MED model and its calibration using field data from Egypt and Syria, *Agricultural Water Management*, **78**, pp.67-88
- 20) Ragab, R., N. Malash, G. Abdel Gawad, A. Arslan, A. Ghaibeh (2005b): A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management, 2. The SALT-MED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria, *Agricultural Water Management*, **78**, pp.89-107
- 21) Reddy, V. R., D. N. Baker and H. F. Hodges (1991): Temperature effects on cotton canopy growth, photosynthesis and respiration, *Agronomy Journal*, **83**(3), pp.699-704
- 22) Reddy, V. R., K. R. Reddy and B. Acock (1995): Carbon dioxide and temperature interactions on stem extension, node initiation and fruiting in cotton, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **55**, pp.17-28
- 23) Reddy, V. R., Ya. A. Pachesky (2000): Predicting crop yields under climate change conditions from monthly GCM weather projections, *Environment Modeling and Software*, **15**, pp.79-86
- 24) Reddy, V. R., Ya. A. Pachesky (2001): Testing a convective-dispersive model of two-dimensional root growth and proliferation in a greenhouse experiment with maize plants, *Annals of Botany*, **87**, pp.759-768
- 25) Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, and S. Schaphoff (2008): Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resources Research*, **44**, W09405, doi: 10.1029/2007WR 006331
- 26) Viner, D (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies, A short discussion paper, *Advances in Global Change Research*, **10**, pp.139-151
- 27) Vrugt, J. A., H. V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten and S. Sorooshian (2003): effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models, *Water Resources Research*, **39**(8), 1241, doi:10.1029/2002WR001746
- 28) Yapo, P. O., H. V. Gupta and S. Sorooshian (1998): Multi-objective global optimization for hydrologic models, *Journal of Hydrology*, **204**, pp.83-97
- 29) Yilmaz, K. K., H. V. Gupta and Thorsten Wagener (2008): A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resources Research*, **44**, W09417, doi: 10.1029/2007WR 006716
- 30) Zhang, Y. Q., F. H. S. Chiew, L. Zhang, R. Leuning and H. A. Cleugh (2008): Estimating catchment evaporation and runoff using MODIS leaf area index and Penman-Monteith equation, *Water Resources Research*, **44**, W10420, doi: 10.1029/2007WR006563

# Intensive Investigations of Advanced Researches on Impact Assessment of Global Warming on River Basin-wide Water Resources and Agriculture

YOSHIDA Takeo, MASUMOTO Takao and HORIKAWA Naoki

## Summary

One perspective of global warming we are keenly interested in is spatial and temporal variation of precipitation and its subsequent impact on water resources utilization. This report summarizes the outcomes of our intensive investigation for research institutes and universities that have been carrying out advanced studies of the assessment of potential impacts of global warming on water resources utilization. Here, we present 2 aspects of impact assessment studies on water resources for irrigated agriculture.

Many researches are carried out to estimate potential changes in water availabilities and/or river discharges by applying projected climatic data for forced input to various types of rainfall-runoff models. Compared to the assessment of hydrological characteristics variations, fewer attempts were made to perform impact assessment of water resources, especially that of agricultural water. Potential water stresses were estimated in the framework of grid-based distributed water circulation models, in which water availability and demand are roughly compared in large-scale grids on the order of 10~100km. However, in mid- and small-scale basins, where we carry out impact assessment studies on the order of 1~10km, we need schemes to estimate the irrigation intake and its allocation, because agricultural water is highly dependent on human decision making processes such as water management.

In addition, we need distributed water circulation models which provide river discharges at any point and time of interest to us, and the spatial dynamics of actual evapotranspiration and soil moisture content, because agricultural water intake points and irrigated agricultural area are spread over basins. In previous attempts, most of the optimization procedures, mainly for lumped models, were developed to obtain the optimal parameter which will improve the accuracy of the discharges at the outlet of target basins. Therefore, new approaches in parameter optimization strategies for distributed water circulation models are required to obtain optimal parameter sets.

**Keywords :** climate change, global warming, impact assessment, agriculture, water resources

## 参考資料

## I 調査の全行程

アメリカで訪問した調査機関の位置を **Fig.A-1**, **Fig.A-2** にそれぞれ示す。

調査の全行程を **Table A-1** に示し、ヨーロッパおよび

**Table A-1** 調査の全行程 (St.: 駅, Apt.: 空港をそれぞれ表す)  
Itinerary of the investigation (St. and Apt. represent station and airport, respectively)

日程	訪問機関および移動の概要 (出発地, 到着地)		移動手段
平成 21 年 2 月 15 日 (日)	東京 (成田空港)	London (Heathrow Apt.)	バス 鉄道 タクシー
	London (Heathrow Apt.)	Reading St.	
	Reading St. Didcot Parkway St.	Didcot Parkway St. Wallingford	
2 月 16 日 (月)	<b>Center for Ecology and Hydrology (CEH)</b> 訪問		
2 月 17 日 (火)	Didcot Parkway St.	Oxford St.	鉄道 鉄道 鉄道
	Oxford St. Derby St.	Derby St. Loughborough St.	
	<b>Loughborough University</b> 訪問		
2 月 18 日 (水)	Loughborough St.	Leicester St.	鉄道 鉄道 鉄道
	Leicester St. Peterborough St.	Peterborough St. Norwich St.	
	<b>University of East Anglia</b> 訪問		
2 月 19 日 (木)	Norwich (Norwich Apt.)	Amsterdam (Schiphol International Apt.)	飛行機 飛行機 鉄道 鉄道
	Amsterdam (Schiphol International Apt.)	Berlin (Tegel Apt.)	
	Berlin (Tegel Apt.)	S+U Zoologischer Garden St.	
	S+U Zoologischer Garden St.	Potsdam Central St.	
	<b>Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)</b> 訪問		
2 月 20 日 (金)	Potsdam Central St. Berlin (Tegel Apt.)	Berlin (Tegel Apt.) Frankfurt (Frankfurt Apt.)	鉄道 飛行機
	<b>Federal Institute of Hydrology (BfG)</b> 訪問		
2 月 21 日 (土)	Frankfurt (Frankfurt Apt.)	Koblenz	車 飛行機
	<b>National Institute for Agricultural Research (INRA)</b> 訪問		
2 月 23 日 (月)	Koblenz Frankfurt (Frankfurt Apt.)	Frankfurt (Frankfurt Apt.) Genève (Geneva Cointrin International Apt.)	車 飛行機
	<b>World Meteorological Organization (WMO)</b> 訪問		
2 月 24 日 (火)	Genève (Geneva Cointrin International Apt.)	Rome (Fumicino Apt.)	飛行機
2 月 25 日 (水)	Roma Termini	Paris	鉄道
2 月 26 日 (木)	<b>National Institute for Agricultural Research (INRA)</b> 訪問		
2 月 27 日 (金)	<b>National Observatory on impacts of Climate Warming (ONERC)</b> 訪問		
3 月 1 日 (日)	Paris (Charles de Gaulle International Apt.)	Washington D.C. (Dulles International Apt.)	飛行機
3 月 2 日 (月)	<b>United States Geological Survey (USGS)</b> 訪問		
3 月 3 日 (火)	<b>United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (USDA ARS), Beltsville Agricultural Research Center</b> 訪問		飛行機
	Washington D.C. (Dulles International Apt.)	Tucson (Tucson International Apt.)	
3 月 4 日 (水)	<b>University of Arizona, Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas (SAHRA)</b> 訪問		飛行機
	<b>United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (USDA ARS), Southwest Watershed Research Center</b> 訪問		
	Tucson (Tucson International Apt.) Los Angeles (Los Angeles International Apt.)	Los Angeles (Los Angeles International Apt.) Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	
3 月 6 日 (金)	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	Canberra (Canberra International Apt.)	飛行機
	<b>Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO), Black Mountain laboratories (ACT), Land and Water</b> 訪問		
3 月 7 日 (土)	Canberra (Canberra International Apt.)	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	飛行機 飛行機 飛行機
	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	Singapore (Singapore Changi International Apt.)	
	Singapore (Singapore Changi International Apt.)	東京 (成田空港)	





Fig.A-1 ヨーロッパの訪問機関位置図

Map showing the visited institutes and universities in Europe

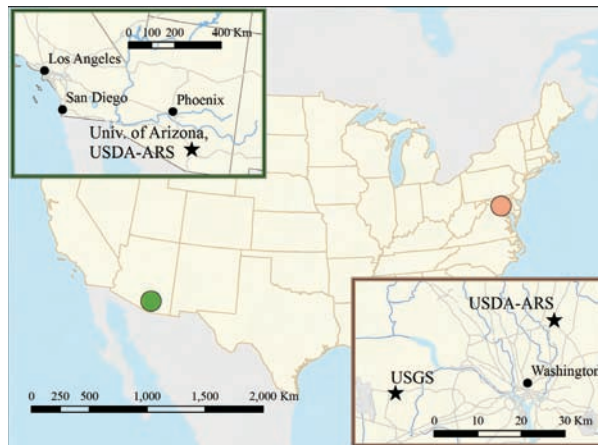


Fig.A-2 アメリカ国内の訪問機関位置図

Map showing the visited institutes and universities in the United States

## II 訪問した機関・大学の概要と研究分野

### 1 生態・水文研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Mark Bailey (Director, CEH Biodiversity Programme)	
Neil Runnells (Business Development manager)	研究所概要紹介, ミーティング調整
Eleanor Blyth	乾燥地・熱帯雨林・北極圏での研究と陸面過程モデル JULES の構築
Victoria Bell	英国全土の分布型流出モデル G2G モデルの開発と気候モデルとの結合 (参照: III-2-b 地球温暖化による確率洪水規模の変化)
Simon Dadson	G2G モデルと気候モデルの結合とヨーロッパ全土への適用
Gwyn Rees (Head of National river flow archive) Egon Dumont	地域・全球水資源モデル GWAVA の構築 (参照: III-1 全球スケールの水資源への影響評価)
Richard Harding (Section Head, Global processes and WATCH coordinator)	ヨーロッパにおける気候・水研究分野紹介 プロジェクト WATCH の概要
Nick Reynard (Head of Hydrological extremes and climate modeling)	中国南部における洪水予測プロジェクト
James Blake	湿地モデル構築と気候変動による影響予測
Ragab Ragab	乾燥・半乾燥地における農地水循環モデルの構築 (参照: IV-2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル)

生態・水文研究所 Centre for Ecology and Hydrology (CEH) は、Wallingford にあるイギリスの地圏と淡水域の生態系に対する総合研究機関である。当センターはイギリス自然環境研究評議会 Natural Environment Research Council (NERC) に属し、50%の予算を同評議会から受ける。CEH には 450 ~ 500 人の研究者が在籍し、そのうち本部のある Wallingford には 250 名ほどが勤務し、その他には 5 つの地域事務所 (Bangor, Edinburgh, Lancaster, Monks Wood, Oxford) がある。職員が大学の教師を兼任することも多く、ヨーロッパの多くの大学院生が当研究所で研究を行っている。CEH で取り扱う研究分野は、

陸面での微気象観測とそのモデル化や、分布型流出モデルの構築、圃場レベルでの農地水管理のモデル化等の基礎的研究から、気象モデルとの結合、流域水資源の評価にいたる応用的研究まで幅広いことが特徴である。また、イギリスにおける気候分野と水資源分野の協働関係が深いことも大きな特徴の一つであり、イギリス気象庁、ハドレーセンターとの人事交流や、計算機、気候シナリオデータの共有も行われている。

最初に、陸面過程の観測とそのモデル化について、Eleanor Blyth 研究員からその概略の説明を受けた。JULES (Joint UK Land Environment Simulator) は、CEH

が開発中の陸面過程モデルであり、農地をはじめ、北極圏（土壌凍結、メタン発生）、西アフリカの乾燥地域、森林地帯でのフィールドワークと観測に基づいたプロセスベースのモデルである。JULES はメタン、二酸化炭素のフラックスの他、9種類の植生それぞれの光合成、陸面からの熱フラックス量が計算でき、ハドレーセンターのGCMの下部境界条件として用いられている。流域内の土地利用、土壌水分の変化といった地表面の環境変化が、気候に影響を与えやすい乾燥地、半乾燥地や極地方での観測とモデル化を通して、モデルの精緻化が図られている。また、陸面過程モデル JULES だけを独立させ、RCMの将来気候値と植生の変化を入力し、大気中の二酸化炭素濃度、日射量の変化に応じた農業用水資源の将来予測や、エネルギー作物の栽培による、気象、水資源の影響予測が行われている。

次に、ハドレーセンターの領域気候モデル (HadRM3) と陸面過程モデル JULES、さらに G2G モデルを結合により流出を計算する研究について、Simon Dadson 研究員から説明を受けた。HadRM3の空間解像度は25km、鉛直方向には大気38層、4土壌層を持ち、蒸発散量の計算にはペンマン・モンテイス法、地表流出の発生には確率分布法 PDM (Probability Distribution Model) を適用し、標高データは USGS の Hydro-1K データセットを用いている。まず、欧州の中の6流域で GRDC の流量データ (Rhine 川下流の Maas 川, Elbe 川 (ドイツ), Loire-Bretagne 川 (フランス), Danube 川等) を用いて各種パラメータの同定が行われ、その結果、多くの河川で観測と計算の流量はよく一致するが、ダム管理、工業、農業等の人間活動による水利用のモデル化やアルプス地帯の融雪現象には改良の余地があることが示されている。

同時に検討している課題には、西アフリカの洪水、湛水現象によって生じる季節的な湿地へのモデル適用により、湿地域が乾燥地の気候システムに対するフィードバックを評価している。陸面過程モデルと気候モデルのカップリングを行ったところ、湿地の上空で観測された8℃の冷却効果をモデルで再現できることが確認された。

さらに、EU のプロジェクト WACTH (WATER and global CHange) において、CEH はそのリーダーを務める機関である。WATCH は EU が出資する4年間のプロジェクトで、ヨーロッパの25の気候研究、水文研究機関が参画している。プロジェクトの目標は、1) 現在の全球水循環を解析・モデル化し、将来の気候値による全球水循環とその極端現象の変化を調べること、2) モデルによる予測の不確実性を評価すること、3) 将来の水資源脆弱性を評価するためにモデル・データベースの枠組みを構築することである。プロジェクトの一つの研究課題として、共通の気象データセットを入力データとして全球水循環モデルの比較検討が行われている。現在と将来の気候シナリオ、土地利用、人口のデータセットを共有し

て各機関が有する全球水循環モデルによる計算を行い、大流域の水収支をモデル間で比較したところ、流出量、蒸発散量にはモデル間で差がみられ、モデル自体に大きな不確実性があることが示されている。WATCH の推進リーダー Richard Harding 氏は、気候変動の影響は流域レベルで評価する必要があること、また政策決定等の判断を行うためにはさらなる流域研究が重要であることを強調していた。

## 2 ラフバラー大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Dapeng Yu (Department of Geography)	地理学科の紹介 氾濫モデルの構築と温暖化影響評価
Koji Shiono (Department of Civil Building Engineering)	水理学

ラフバラー大学は、1909年に設立されたラフバラー・カレッジをルーツとし、1966年に大学となり、2009年に創立100周年を迎える。スポーツ、土木工学が高く評価されており、現在の学生数は約1万5000人、そのうち約15%が100カ国以上からの留学生である。日本との関係が深く、日英交流150周年を記念した Japan Day というイベントが2009年3月7日に開催された他、ロンドンオリンピック(2012年)の日本選手のキャンプの有力候補地となっている。

地理学部の Rob Wilby 教授とコンピューター科学学部の Christian Dawson 講師は、開発した統計的ダウンスケール手法をパッケージ化して SDSM (Statistical DownScaling Model) として公開している。SDSM は、途上国での地球温暖化影響評価を行う世界銀行、FAO 等のプロジェクトでの統計的ダウンスケール手法として広く用いられている。また、Wilby 教授は、統計的ダウンスケール手法に関する IPCC のガイドライン Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods (2004) を執筆している。温暖化に関しては、英国ハドレーセンター (Hadley Centre) の HadCM3 (Hadley Climate Model) の結果を Wilby 教授等がダウンスケールを行い、その結果も公開している。これらは、UKCIP02 と呼ばれ、2002年に行われた50kmグリッドの英国における気候変動影響評価シナリオに基づいている。

一方、Yu 講師らがこれまで行ってきた洪水に関する研究は、航空測量による詳細な標高データにより対象域の精緻なモデル化を行い、小流域を対象に CFD (Computer Flood Direction) モデルを適用したものである。さらに、温暖化により土砂流出がどのように変化するかを検討を、CAS-HYDRO モデルを用いて解析を行っている。

塩野教授は工学部土木建設学科において湾内水理から洪水水理を専門にしている研究者で、HR Wallingford に

において博士号を取得し、その後英国を拠点に研究を継続している。英国の河川整備では、日本等で施工されている複断面と堤防による河川整備は行われておらず、単断面水路で住宅地や農地にも氾濫を許容する構造となっている。また、河道近辺の景観を大切にするために、氾濫域にも植えられる木の本数が決められているため、氾濫マップを作成するためには、粗度係数だけによる解析ではなく、木や家の影響を考慮した詳細な氾濫解析が不可欠である。洪水水理に関するこれまでの研究には、ロンドン南部の York 市に設置した人工洪水発生モデルサイトにおける、ビデオ撮影による詳細な流況観測や、室内実験、内部渦発生も再現する3次元 FEM モデルでの洪水再現等の手法に関する検討がある。

### 3 イーストアングリア大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Phil Jones (Professor, Director of the Climatic Research Unit)	気候研究所所長 (参照: II-1 全球気候・流量データベース)
Tatsuki Ueda (Department of Economics)	UEA 留学中 (農村工学研究所 農地・水資源部 農地工学研究室)

イーストアングリア大学は1964年に創立された大学で、開発学、環境学が高い評価を受けており、社会科学、科学、人文、保健学部の4学部で1万3千人の学生が在席している。環境学部 School of Environment の学部生180名のうち、大気科学コース Atmospheric Science Course には約30名の学生が学び、修士課程には約25名が在籍する。

イーストアングリア大学気候研究所は1972年の設立であるが、同研究所が世界に先んじて気候分野の重要性と将来の発展性に着目していたことは必記に値する。気候研究所の役割は、1) 自然や人間が関与した気候変動の性質、予測、影響評価における先端的な研究を行うことで、その分野の世界的研究を行うこと、2) 気候に関連する問題の情報、データ、分析ツールさらに研修の主要な機関として機能すること、3) 社会の全ての分野に対して専門家としての評価や指導を行うことにより、気候変動や変化により発生する挑戦や機会に対して持続的なコミットメントを行うことである。

本文で前述したように、CRUは全球気候データの収集とそのデータベース化において、世界の気候変動研究に大きな役割を果たしている。また、英国内の温暖化影響評価予測に向けて、Hadley センターの5kmの解像度を持った日単位のダウンスケーリングデータを用いて英国の新しい温暖化シナリオを公表する予定である。第5次 IPCC 報告は2013年の公表を目指しているが、それに向けた英国の温暖化影響予測はCRUで主導したいと考えている。

### 4 ポツダム気候影響研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Uwe Böhm	力学的ダウンスケール CLM モデル
Alberte Bondeau	全球水資源・農業モデル LPJ モデル(中止)
Valentina Krysanova Fred Hattermann Shaochun Huang	土壌・水統合モデル SWIM の紹介 気候変動が流域スケールの水資源に及ぼす影響評価
Frank Wechsung Andrea Lüttger	気候変動が流域スケールの水資源に及ぼす影響評価 (中止)
Dieter Gerten	全球水資源・農業モデル LPJ モデルによる気候変動の影響評価 (参照: III-1 全球スケールの水資源への影響評価)

ポツダム気候影響研究所 Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) は1992年に設立され、自然科学、社会科学系の研究者が、気候変動とその変動が経済、生態系、社会システムに与える影響についての研究を進めている。設立当初の研究者数は約150人であったが、気候変動研究の重要性が認識されると共に増加し、現在は約230人が研究を行う。研究予算は6400万ユーロであり、その大部分(5000万ユーロ)が外部的な研究資金による。

PIK では、自然科学と社会科学の研究者が地球規模気候変動とその生態や社会経済への影響評価について、分野横断的な研究を行い、1) 地球システム解析、2) 気候変動の影響と脆弱性、3) 持続可能な対応策の検討、4) 分野をまたいだ概念及び方法の適用という4研究領域の研究が遂行されている。研究所全体が温暖化研究を主要な研究対象にしているため、地球温暖化に関する多くの分野で世界のトップレベルの研究を行っている。その範囲は気候モデルの利用、領域モデルによる力学的ダウンスケール(統合モデル CLIMER (CLIMate BiosphERe model) の開発)、統計的ダウンスケールから、それらの結果を用いた各種分野への影響評価などを精力的に行っている。対象とする地域として、流域レベルのものから全地球を対象としたものまで幅広い対象を扱っている。また、社会経済分野からの解析や灌漑や農業への影響予測など、参考になる研究が幅広くかつ深く行われている。訪問を予定していた当日に、大雪により飛行機が大幅に遅れ、予定していたプログラムの一部が中止されたことは残念であった。

まず、力学的ダウンスケールの問題に取り組む Uwe Böhm 博士らのグループの説明を受けた。領域気候モデル CCLM (COSMO Climate Local Model) は、空間解像度を200kmの全球レベルから25kmの領域モデル、7kmの局所モデルへとダウンスケールするものである。現在進行中の研究は、過去の極端現象の再現(例えば、2003年の大渇水)、水平解像度の改良、4種類の領域モデルで



の20世紀の結果の比較, COFFEE プロジェクト (COupled Fluid Flow in Energy and Environmental research) の推進, REACCT (REsimulated Agro-landscapes to Climate Change in Tanzania) での検討等がある。さらに, 将来の研究方向は, 極端現象が再現可能となる2~3km程度への空間解像度の向上, 気候モデルと水文モデルの統合であり, 我々の研究グループが目指すものと一致していた。

次に, PIK が開発中の陸面過程モデル SWIM (Soil Water Integrated Model) に関して, 気候変動影響・脆弱性研究チームの Valentina Krysanova 博士 (Climate Impacts and Vulnerabilities) に説明を受けた。SWIM (Krysanova and Arnold, 2008) は, 擬似分布型流出モデル SWAT をベースとして開発された陸面過程モデルで, 陸面過程と流出過程を結合した点に特徴がある。陸面過程モデルは, 2層の土壌構造からなる水循環過程と植生過程から構成され, 土地利用, 土地管理, 標高, 土壌タイプが小流域ごとに基礎的な情報として与えられる。蒸発散量は, 放射量, 降水量, 気温, 比湿, 風速の気象要素, 葉面指標 LAI, 表面粗度により推定され, 2層の土壌貯留と地下水帯からは, 地表流, 側方浸透流, 地下水フラックスがそれぞれ計算される。また, 植生部分は, 植生の成長過程, 光合成過程, 窒素循環過程がサブモデルとして組み込まれている。基礎条件として与えられた作物, 森林等の植生は気象要素, 水分ストレスから植生の成長が LAI を指標として得られ, それに基づいて蒸発散, 窒素循環過程も計算される。

上記の SWIM を用いてドイツの主要5流域での水資源予測を行ったところ, 5流域24カ所の観測流量データの再現性は非常に高く, Nash-Sutcliffe 係数で0.8~0.9の好結果が得られているとのことであった。ただし, 低平地と人間活動が卓越する地域と, フランスでの気象データを用いるモーゼル川流域, アルプスの融雪の影響を受ける流域の流量再現性には課題があり, 今後の検討事項となっている。ドイツの年降水量は, 北部で500~800mm, 中部で700~1500mm, 南部山岳地帯で2000mm以上であり, また西部より東部が少ないという傾向がある。将来の気候シナリオでは, 東部の降水量が100mm程度減少し, 逆に西部では100mm程度上昇しており, 水資源の東西の格差をいかに解消するかが将来の課題となると予測されている。

## 5 ドイツ連邦水文研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
—Ing. Thomas Maurer (Department Head, Water Balance, Forecasting and Predictions)	研究プロジェクトリーダー (参照: I-1 全球気候・流量データベース)
Peter Krahe (Department of Water Balance, Forecasting Methods)	水文モデル研究者 (参照: III-2-a モデルの不確実性の評価)

ドイツ連邦水文研究所 Federal Institute for Hydrology (BfG) は, ドイツのコブレンツに位置する組織で, ドイツ国内水路・河川の持続的で経済的な利用に関する科学的知見に基づき, コンサルティングや応用研究を行うとともに, 連邦水路の水文データの観測記録を行っている。1902年に設立され, 1952年にコブレンツに移動する際に, 河川輸送・舟運を中心として河川水文研究を行う機関として再編された。BfG はドイツ連邦水路・舟運省傘下の機関であり, 行政機関と研究機関との人事交流が盛んであり, 水文部, 水質水文部, 生態部の265名のスタッフ(その内70名前後はプロジェクトで雇用)で構成されている。予算は, 85%は連邦政府(特に, 運輸・都市建設省)からの資金が主であるが, EUからの外部資金も5%程度ある。国際協力の点では, 1988年に設立した世界流量データセンター (GRDC) の役割を担い, WMO や UNESCO の下で世界の河川流量データの収集と水資源評価の活動を行う他, 国際水文プログラム (IHP), WMO の HWRP に参画し, ドイツ政府の代表事務局として活動している。

BfG における地球温暖化に関する研究は, 主に水文部を中心に行っており, 2008年からは, BMVBS-KLIWAS と称して, マックスプランク研究所から2名の専門家を招聘し, 研究所を挙げて温暖化対応策の検討を重点的に始めている。

温暖化対応の検討は4つのグループに分けられ, 1) 気候, 流量の将来予測, 2) セクター毎の影響評価や変動性の分析, 3) 対応策, 適応戦略等の決定, 4) 分野横断的な総合的対策・管理の検討を行っている。まず, 2008年にはドイツにおける温暖化研究のレビューを行うとともに, 2009~2013年のプロジェクトとして30名の研究者が関与する課題を開始している。ここでは, 気候モデルの利用, 地域レベルの気候変動予測, 不確実性の評価などを目的として, 気温, 降水量, 両極端現象(洪水と渇水)について, マックスプランク研究所 (MPI) の気候モデル, 河川流域のモデル等を利用して解析している。気候シナリオは MPI の REMO モデルにより空間解像度18km (2006年は10km), 時間解像度1時間へ力学的ダウンスケールされた。まず, 計算負荷の小さい半分布型流出モデル HBV-SMHI モデルにより気候変動による流況の大まかな変化が把握され, 次に18kmのメッシュで14種の土地利用を表現できる水収支モデル LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model), さらに低平地ではオランダの低平流域の解析にも用いられた RhineFlow-3 モデルにより詳細な温暖化影響評価が行われる予定である。ドイツ国内の河川流域で重要なライン川, イン川, エルベ川, オデル川を中心にした解析を行い, ライン川流域での洪水に関しては, 冬に増大傾向を示すが夏期は将来も同レベルであると予測されている。



## 6 世界気象機関

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Masahiko Murase	洪水管理、水文水資源プログラム専門官（国土交通省から出向）
Avinash C. Tyagi (Director, Climate and Water Department)	気候・水資源部長
Rupa Kumar Kolli (Chief, World Climate Applications and Services Div., Climate Prediction and Adaptation Branch)	気候変動予測・緩和対策課長 (参照：Ⅳ-3 気候変動が食料生産に与える影響に関する情報提供サービス)
Geoff Love (Director, Weather and Disaster Risk Reduction Services Department)	気象・災害リスク軽減サービス部長
Ghassem R. Asrar (Director, World Climate Research Program)	世界気候研究プログラム長

世界気象機関 World Meteorological Organization (WMO) は、ジュネーブに本部を持ち、職員数 230 名の国際機関である。各国の気象庁に相当する行政機関と連絡・調整を行い、気象・水文観測所の国際的なネットワークの構築、気象情報の迅速な交換の促進、気象観測の標準化、一定のフォーマットでの観測結果および統計結果の公表、航空・海運・水問題・農業等の人間活動に対する気象学の応用を目的とした機関である。その課題の実行は WMO の職員が行うのではなく、加盟している先進国の研究者や行政官と発展途上国の政府職員が協力して行い、協働の場として会議やワークショップをコーディネートするのが WMO の役割である。主要プログラムには、全球規模の気象観測ネットワークを整備する世界気象監視計画 (WWW: World Weather Watch)、全球規模の気候変動研究を行う世界気候研究プログラム (WCRP: World Climate Research Program) 等が挙げられる。また、気候変動に関連する部門には、気候・水資源部 (CWD: Climate and Water Department)、気象・災害予測サービス (Weather and Disaster Risk Reduction Services Department) と前述の WCRP が挙げられる。

気候・水資源部においては、気象、農業気象、気候の各種観測、研究、データ解析に関するガイドラインの作成、気候・水に関する会議の開催等を行っている。水文水資源、農業気象の各分野に技術委員会が設けられ、メンバー国でモデル開発を共同で行い、途上国への技術移転を図っている。水文分野ではデンマーク水理研究所 (DHI) やデルフト水理研究所 (Delft Hydraulics) と協力してモデルを構築し、特に DHI の SHE モデルを用いた温暖化リスク解析のため検討会を開催している。また、気候変動下の将来気候を予測するための解析ツールを参加国に提供するとともに、技術移転を図っている。解析ツールの基礎には、コロンビア大学国際気候研究

所 International Research Institute for Climate and Society の統計的ダウンスケールモデル CPT (Climate Project Tool) や、英国 Hadley Center のユーザーフレンドリーな力学的ダウンスケールモデル PRECIS (Providing Regional Climate Impact Study) が広く用いられている。

気象・災害予測削減サービスでは、温暖化影響予測と結びつけて災害リスクの削減や初期警報システムに対する検討を行う。気象災害としては渇水と洪水の両面を扱い、それらの規模に関してはこれまで再起確率の概念が使われてきたが、気候変動により極端現象の発生頻度が増大している現況では、既往の再起確率だけでは説明できない状況も生まれている。そこで、EU や UN の援助の下で、温暖化に伴う極端現象の発生を発展途上国が準リアルタイムで知ることの出来る全球データベース構築が行われ、特に、気象データに対して整備が遅れている水文データを先進国と発展途上国で同じレベルで収集、配信されている。また、水文モデル研究に対しても、先進国と発展途上国間のギャップを取り除くような人材育成やモデルの標準化を目指している。

最後に、WCRP において世界の気候変動研究の方向性について討議した。WCRP は、気候の予測可能性および人間活動の気候影響の程度を評価するために必要な、基礎的な気候システムおよび気候プロセスの科学的理解の発展を目的としている。WCRP における研究の連携による近年の目覚ましい成果のひとつは、100 年単位の地球規模の気候の長期変動予測と、地域での各年内の季節予測や 10 年単位の年間変動、日内変動を継ぎ目なしに行う事が可能となったことである。

また、その研究分野は 10 年ごとに重点化が図られ、第 1 期には地球気候システムの現象解明と人間活動の影響評価、第 2 期には全球の気候観測の重要性の認識に重点が置かれ、現在の第 3 期では気象、気候のデータに関連機関に提供し、気候変動研究者と影響評価研究者、行政機関との情報交換を図ることが重要な目的とされている。特に、2009 年 8 月 31 日～9 月 4 日に開催された第 3 回世界気候会議 (WCC-3: World Climate Conference) は、全世界の気候変動の研究成果を取り纏め、極端現象に対するリスク管理、適応緩和策の検討に結び付ける重要な機会であり、WCC-3 においては、気候モデル研究と影響評価研究・政策決定プロセスのギャップを埋めるための活動が討議された。

## 7 国連食料農業機関

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Fumihiko Onodera (Associate Professional Officer, Field Development Service (TCAP), Policy Assistance and Resources Mobilization Division, Technical Cooperation Department)	技術協力部農地開発課専門官（農林水産省農村振興局から出向）

Rene Gomme (Senior Agronomist, Climate Change and Bioenergy Unit (NRCB), Environment, Climate Change and Bioenergy Division (NRC), Natural Resources Management and Environment Department (NR))	自然資源管理・環境部 気候変動・バイオエネルギー研究領域 上席研究員 気候変動が食料生産に及ぼす影響評価 (参照：IV-1 将来気候値を用いた食料生産予測手法)
Hideki Kanemaru (Climate Modelling Officer, NRCB, NRC)	自然資源管理・環境部 気候変動・バイオエネルギー研究領域 気候モデリング専門家 気候変動が食料生産に及ぼす影響評価
Pasquale Steduto Jacob J. Burke Jippe Hoogeveen	自然資源管理・環境部 土地・水資源課

国連食料農業機関 Food and Agriculture Organization (FAO) は、ローマに本部があり、ローマの本部に 2,500 人、世界の地方事務所には 500 人の職員を持つ。局、部、課に分かれて職員が配置されているが、各課に所属する少人数の職員はそれぞれのプロジェクトや課題を持っている。温暖化に関して 2008 年に自然資源管理・環境部 Natural Resources Management and Environment Department (NRCB) の下に、環境・気候変動・バイオエネルギー部門 Environment, Climate Change and Bioenergy Division (NRC) が創設され、温暖化に関する課題を従来からの組織と協力しながら重点的に遂行している。自然資源管理・環境部の約 60 人の職員のうち環境・気候変動・バイオエネルギー部門に 20 人が所属する。また、農業開発を行ってきた土地・水開発部 Land and Water Development も自然資源管理・環境部へ組み込まれており、環境問題への取り組みが盛んとなっている。

気候変動の分野では Rene Gomme 上席研究員や金丸専門家が中心となり、気候変動によるモロッコの食料生産への影響評価が世界銀行のプロジェクトで行われた。作物モデルは、15～20ヶ国が所属する南アフリカ開発委員会 SADC (South African Developing Communities) で開発された FAO CCSWB (Crop Specific Soil Water Balance) が用いられた。同モデルは、実蒸発散量と土壌水分と収量の経験的な関係から将来の気候下における収量を予測するもので、現在の気象観測値と地域ごとの農業統計からモデルをキャリブレーションした上で将来の予測気候値として与え、作物ごとの地域収量が予測される。プロジェクトでは、対象としたモロッコ国内の 6つの農業地帯における 50種の主要作物(灌漑、天水の区別を含む)の生産量を、2本の気候シナリオ(A2, B2)で検討し、それぞれのシナリオ、地域、作物について 100回の計算を行って予測値を統計的に評価している。ただし、将来の作物収量には施肥量、農薬使用量、灌漑技術や作付けパターン等の技術・政策の長期的な変化にも影響を受けるため、30年以上長期の影響予測の

信頼性は低いとされている。

土地・水資源部 水管理開発課では、FAO がデータベース化している全世界の土地利用データと 1/6° のグリッドで、B2 シナリオ下の 2050 年の流出量と農業生産量への影響予測が行われた。この気候データセットでは、作物収量に最も影響の大きい雨量の精度に問題があることが明らかにされている。また、同課は自然資源管理・環境部 NRCB のプロジェクトとの連携も行っており、前述したモロッコにおける食料生産予測プロジェクトにおいて、同国における将来の水利用可能量の予測結果を提供している。

## 8 フランス国立農業研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Yves Griveau (Mission Relations Internationales, Secrétaire general et responsable Asie - Océanie)	国際研究計画部門アジア太平洋担当
Bernard Seguin (Head of the Climate Change and Greenhouse Effect Unit, INRA Research Center of Avignon)	気候変動・温室効果研究ユニット長

フランス国立農業研究所 INRA (National Institute for Agricultural Research) は職員数約 10,000 名(うち研究職員 3,000 名)の農業分野の総合的な研究を行う組織で、フランス国内外の 21 カ所に研究拠点がある。それぞれの研究拠点の専門分野は異なっているが、分野横断的な研究部では他の研究拠点との協働研究も行われている。INRA での温暖化研究は、約 20 年前から生態学、土壌、農学等の分野で個別に研究されてきたが、1979 年に開催された二酸化炭素濃度上昇やその影響に関する会議を契機とし、その後地域レベルへの影響も研究されるようになり、2000 年頃に本格化した。現在の温暖化研究は、Avignon を主要な拠点として環境・農業部 Environment and Agronomy Department で生物気象学、農学、土壌学の研究者が行うほか、森林に関する研究がボルドー Bordeaux 事務所で行われている。

フランスにおける将来の気候変動は、夏期の降水量の 20～30% の減少と 3～4℃ の気温上昇があると予測されている。現在までもこの変動傾向は現れており、ここ 50 年間のワインの開花時期、収穫時期の変化を追跡した研究において、開花は 2 週間、収穫に至っては 1 ヶ月早期化している傾向が確認されている。また、全ヨーロッパに熱波が襲来し多数の死者を出した 2003 年は特徴的な年で、夏は高温日が続き、通常約 600mm (地域により 300～1,000mm) 期待できる年間降水量が 300mm 程度に止まった。さらに、過去 5 年間の気象データも IPCC の A1, B1 シナリオで示された将来の気候予測に近い傾向を示す。

遂行中の研究テーマには、土壌中への二酸化炭素の貯留、森林や土壌における炭素循環、バイオ燃料やバイオ

マスの社会経済評価, 作物や生体燃料のための土地利用, 最適な肥料投入などがあり, 特に近年では農地からのガス放出の影響や緩和策の検討が本格化している。また, 作物収量の予測は大変重要であり, 作物モデルの開発による農作物の収量への影響予測が行われている。

### 9 フランス国立気候温暖化影響観測網

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Jean-Luc Redaud (Water Resource Specialist, the General Council for Agriculture, Food and Rural Space)	フランス農漁業省 農業・食料・農村評議会 (大臣直結諮問機関) チーフ技官
Bertrand Rasset (Climate Change Adaptation Officer, ONERC/DGEC, Ministry of Ecology, Sustainable Development and Town and Country Planning)	フランス生態省 持続的開発・都市計画部 気候変動緩和策技官

フランス気候変動影響観測所 National Observatory on Impacts of Climate Warming (ONERC) は2001年2月に設立された機関で, 1) フランス国内及び海外のフランス領の気象観測網と水文観測網を連携させ, 2) 衛生, 水, リスク管理, 森林, 農業, 発電等の各分野でそれぞれ行われている気候災害に関する研究を取り纏め, 3) 警報システムの整備と気候変動への適応策の提言を行う組織である。研究者だけでなく国・地方政策者を加えた推進委員会が中心となっている点が特徴的である。また, 気候変動への適応策の策定に取り組む地方組織のために, 観測された気候変動の指標や地域の気候変動シナリオを提供する。

2006年11月, フランス政府はONERCが中心に纏めた総合的な国家対応戦略を採用した。そこでは, 温暖化の課題探索と対応策の方向性が示されており, 3種の要素, すなわち, 6分野 (農業, エネルギーと産業, 交通, 建設と居住, 観光, 金融と保険), 4種の環境 (都市, 沿岸と海洋, 山地, 森林), 4種の資源 (水, 生物多様性, 健康, リスク) について包括的な検討がなされている。そのうち, 生態省が取り纏めた水資源への影響は, 夏期の降水量減少, 雪や氷河の減少, 飲料水・灌漑水・冷房用工業用水等に対する水資源量逼迫の増大と, 土壌浸食の増大の可能性が示され, 他方, 農業への影響は, 二酸化炭素濃度の増加に伴う作物収量の増大と, 収量変動量の増加, 温暖化による牛の繁殖能力の増大, 家畜流行病の増加の可能性, 仏国南部で森林増大の一方で気候耐性や極端現象への適応力の低下等が挙げられている。

フランスの灌漑農業は南西部を流れる Adour-Garonne 流域におけるメイズ栽培と南東部を流れる Rhone-Mediterranean 流域における果樹栽培に集中しており, 北部農業地帯は天水に依存したトウモロコシ栽培が中心で, 肥料, 農薬の多投入による集約的な農業が展開されている。気候変動が農業水資源に及ぼす影響として, Adour-Garonne 流域の農業水資源問題があげられる。同

流域の6月のメイズ灌漑の水資源は融雪に依存しているが, 気温上昇に伴い融雪出水が5月頃に早まることが予想されている。6つの河川流域には水委員会 (Water Agency) があり, 河川流量がある一定基準を下回る日が続くと, 灌漑取水を止める権利を持つ。フランスにおけるダム建設は環境配慮の観点から難しいうえ, Adour-Garonne 流域の河川流量確保は, 流域下流の観光業にとっても重要な点であるため2003年には実際に取水を止める決定がなされ, 既に問題が顕在化している。

### 10 米国地質調査所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Harry Lins	洪水氾濫のモデル化, 水文気象データの非定常性

米国地質調査所 United States Geological Survey (USGS) は1879年に設立された機関で, 米国内務省に属する直轄研究所であり, 水資源部門, 地理部門, 地質部門, 情報システム部門, 事務部門の5部門に分かれている。アメリカを8地区 (北東部, 南東部, 中東部, 北中部, 南中部, ロッキー山地, 北西部, 南西部, アラスカ) に分けて組織化されており, 訪問したバージニア州レストン Reston は, ワシントン DC 中心部から西へ約30キロメートル, 車で約30分の距離に位置し, ここには北東地区の本部が設置されている。Reston では20年前には2500人の職員が勤務したが現在は1500人程度になり, 水資源部門も25人から現在8~9名に減少した。全米各地の事務所, デンバーにおける中部統括事務所等における研究プロジェクトの予算は当統括本部から予算執行がなされる。各州事務所における水文観測の費用は政府50%, 州政府50%の予算が使われる。主な研究活動として, 水資源分野では, 洪水氾濫のモデル化, 流出, 気候変動に伴う水資源変化等の研究テーマを行っている。

レストンには, 全米の河川の河川水位観測をとりまとめる部門があり, Water Watch というプログラムにおいて, 全米で7,000カ所の河川観測所における各種水質・水文量の測定値をはじめ, 全米の河川水位の現在値, 最近の変動, 過去の統計値をインターネット上で提示している。

米国全体では50億USDの予算が温暖化研究に向けられているが, その内, 200万ドルのみがUSGSに向けられている。しかし, 地球温暖化に関連する研究はレストンにある統括本部では余り行われておらず, 研究の中心は, デンバーに設置してある米国中部統括事務所において, 水資源分野として気候変動, 融雪流出, 流出モデルの開発, GISの利用等の研究が行われている。特に, 気候モデルの地域へのダウンスケールでは, 地域レベルから流域レベルへのものが精力的に行われている。そこでは, 主な実験設備等としてロッキー山脈内に試験流域を設定し, 研究目的の水文観測を継続して行っている。



## 11 米国農務省農業研究サービス（ベルツヴィル研究センター）

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Bill Kustas (Research Leader of the Hydrology and Remote Sensing Lab)	水文・リモートセンシング研究室リーダー
Wade T. Crow	リモートセンシングを活用した陸面水収支モデルの開発
Martha C. Anderson	蒸発散と干ばつモニタリング
Paul C. Doraiswamy	圃場レベルから地域レベルへの作物収量予測のアップスケール
Vangimalla R. Reddy (Research Leader of the Crop Systems and Global Change Lab)	作物システム・気候変動研究室リーダー

米国農務省農業研究所 United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services (USDA-ARS) は、米国農務省に属する直轄研究機関で、同組織の研究者数は全米で7,000人である。訪問したベルツヴィル農業研究センター Beltsville Agricultural Research Center は、ワシントン DC 中心部から約 20 キロメートルのメリーランド州ベルツヴィルに位置する。1,500 人の職員が所属しており、動物・自然資源研究室、栄養学研究室、作物・気候変動研究室、水文・リモートセンシング研究室の 4 分野が研究拠点を置いている。

最初に訪れた水文・リモートセンシング研究室には、8 名の研究者と 3 名の研究補助者が在職し、広域の蒸発散量予測から農地灌漑量・地下水取水量の推定に用いられる熱波長の観測による蒸発散量推定法、衛星観測雨量の補正のためのマイクロ波による土壌水分観測、リモートセンシングによる広域の早期収量予測モデルの開発に関する研究を行っている。

Martha Anderson 研究員は、衛星画像の熱バンドを用い、陸面熱収支から土壌からの蒸発量を推定する方法を開発している (Anderson et al., 2007)。灌漑農地へも同様な手法を適用し、60m の解像度を持つ Landsat データから、実蒸発散量／基準蒸発散量の関係に基づいた蒸発ストレス指標 Evapotranspiration Stress Index (ESI) を提案し、農地における過剰な地下水取水の防止に役立っている。また、定点観測の METEOSAT データを用いて全米の蒸発散量の推定、作物の成長過程の推定を行ってきた。一連の手法は ALEXI (Atomosphere, Land-surface EXchange Index) と名付けられ、渦相関法による全米各地点での観測実蒸発散量と比較して高い再現性を示している。

Wade Crow 研究員はリモートセンシングによる情報をさらに展開させ、広域土壌水分の推定法の開発に関する研究を行っている (Crow 2003, Crow et al., 2003,

Crow 2008)。一連の研究は、全球降水計画 GPM (Global Precipitation Mission) の広域降水データセットを陸面過程モデルに入力し、推定した地表面の土壌水分をマイクロ波による観測値とアンサンブルカルマンフィルターで修正して広域土壌水分のデータを作成するものである。この手法は、2013年に打ち上げられる NASA のミッションのひとつ SMAP (Soil Moisture Active/Passive) への適用が検討され、全球の地表層の 5cm の土壌水分量を 2～3 日間隔、10km のメッシュで把握することが期待されている。

さらに、推定された土壌水分を広域の作物収量の予測に用いようとする研究が、Paul Doraiswamy 研究員によって行われている。これらの研究を進展させ、地球温暖化に関連する二酸化炭素排出量抑制のための土壌・作物管理の提案や、流域の水質予測へと繋げたりすることも検討されている。収量予測結果については、250m 解像度の MODIS, Terra/Aqua バンドを用いて、米国中部のコーンベルト地帯の収量の早期予測が行われ、6～10月の重要な作物作期期間について、アメリカ農務省の 1ヶ月の収量予測に利用されている。

他方、作物システム・気候変動研究室では、詳細なチャンバー試験、現地実証試験に基づいた物理過程ベースの作物収量予測モデルの開発が行われている。作物学の実験室として綿、メイズ等を対象にして大気中の二酸化炭素、オゾン濃度や気温が光合成や収量に及ぼす影響について解析を行っていたが (Reddy et al., 1991, Reddy et al., 1995)、2001年に「気候変動」の名称がついた現在の研究室名に変わり、温暖化による作物収量の変化予測に研究の力点が移りつつある (Reddy et al., 2000, Reddy et al., 2001)。これまで開発されてきた作物成長シミュレーションモデルは、チャンバー試験により得られた土壌水分、炭素呼吸過程、土地利用等の変化が成長に与える影響を考慮したもので、経験的法則でなく作物成長の物理過程に基づいたモデル解析が行えることが特徴である。また、試験圃場のみならず、経営農家の圃場への適用も行われ、実用性も十分に確保されたモデルでもある。

## 12 アリゾナ大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Hoshin V. Gupta	アリゾナ大学水文水資源学部教授 (参照：Ⅲ-2-c 分布型水循環モデルの最適化手法)
Seshadri Rajagopal	SAHRA 研究員、水文モデルの開発・適用
Francina Dominguez	SAHRA 研究員、ダウンスケーリング
Juan Valdes	SAHRA 所長
Christopher Castro	大気科学部教授、領域気候モデル開発
Xubin Zheng	大気科学部教授
Koichi Sakaguchi	大気科学部大学院生



アリゾナ大学はアリゾナ州ツーソン Tucson にある。ツーソン空港から約 10 キロメートル、車で約 15 分のところに位置する大学で、1885 年創立である。水文水資源学部は全米一の研究実績とスタッフを有し、16 人の専任研究者、他学部からの併任研究者 11 人、その他 6 人の客員研究者が所属している。また、アリゾナ大学における温暖化研究は、水文・水資源学部、大気科学学部、自然地理学分野、植生分野、農業気象分野をはじめ、様々な分野との分野横断的な融合研究が行われている。そこで、水文・水資源学部と大気科学部を統合した自然科学分野を組織再編により作り、地表面と大気の大気熱循環や水循環を一体として捉え、温暖化の影響評価等も協働で行おうという動きもある。さらに、USDA-ARS, USGS との協働関係があることも特徴で、長期の観測データ（流量、土壌水分、渦相関法による蒸発散量等）をモデルの検証用、あるいは観測データからの温暖化傾向の解析を行っている。さらに、San Pedro 川流域の検討を産官学共同で行っていることも大きな特徴で、その中では地球温暖化に伴う影響変化は重要な話題の一つである。また、Tucson から北方約 50km には、土壌-水-大気-植物の相互作用や気候変動の影響を大規模実験によって明らかにする総合実験施設 Biosphere 2 が設けられており、アリゾナ大学の水資源、気象関係の研究者と共同で研究を進めている。

乾燥地流域持続性研究センター SAHRA (Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas) は、アメリカ国立科学財団 NSF (National Science Foundation) によりアリゾナ大学に設置された研究センターで、分野横断的研究によって流域単位の水循環構造を明らかにし、アメリカ南西部における気候変動が乾燥・半乾燥地の水資源に及ぼす影響を評価するとともに、その持続可能な管理手法を推進することを目指している。一連の研究では、GCM の選択とその力学的・統計的ダウンスケールがこれまでにいわれ、今後、流出モデル、陸面過程モデルによる水資源評価を行う計画である。現在のところ、複数の GCM の比較検討を行って過去の北米モンスーンの再現性が高い Hadley Center と ECHAM が GCM として選択され、アリゾナ大学大気科学部の Christopher Castro 教授が開発した領域気候モデルによる 12km へのダウンスケールが、Francina Dominguez 研究員らによって行われている。この RCM はコロラドの米国大気センター (National Atmospheric Center) の Rarry Winter 博士の開発した北米をカバーする NARCCP モデルとも比較検討されている。さらにアメリカ南西部への統計的ダウンスケールは、Seshadri Rajagopal 研究員らによって今後行われる予定であり、これらの将来気候値の下で土壌水分、地下水面がどのように変化するかを評価することが今後の課題となっている。

水資源の多くを地中水に頼る半乾燥地に用いるモデルは、土壌水分量を概念的に表すのではなく、土壌水分、

地下水面の明示的な表現が必要であり、陸面過程モデル VIC が現在主に適用されている。近年開発され、地下水水位の明示的な表現を行える懸垂帯上昇モデル capillary rising model に関する検討も他方では進んでおり、Marek Zred 教授らのガンマ線を用いた土壌水分の推定との比較検討が行われる予定である。また、地下水面の位置は地表の土壌水分にも影響し、顕熱、潜熱輸送量の推定精度向上が期待でき、USGS の観測データや USDA-ARS の Russell Scott 研究員の土壌水分観測結果等と比較検討も進行中である。詳細な土壌水分の鉛直分布により、根が伸びる深度も推定可能となるため、農業分野の影響評価予測にも有用だと考えられている。

### 13 米国農務省農業研究所 (南西流域研究センター)

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Susan Moran	リモートセンシングによる土壌水分の推定
Russell L. Scot	渦相関法によるフラックス研究

米国農務省農業研究所 United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services (USDA-ARS) の南西流域研究センター Southwest Watershed Research Center は、ツーソンのアリゾナ大学の近くに位置し、研究員は 12 名所属している。

南西流域研究センターの特筆すべき研究成果の一つは、Walnut Gulch 試験流域 (149km<sup>2</sup>) における 50 年にわたる継続した詳細な観測と、それに基づく水文・水質・土砂流出予測モデルの構築である。観測は、気象水文要素、流量、土砂流出、マイクロライシメータによる多点の土壌水分量の観測、渦相関法による農地の蒸発散測定を行っており、Water Resources Research 誌の特集号 (American Geographic Union, 2008) として取り扱われている。また、これらの全観測データは Web サイトで公表されている。同試験流域での観測に基づいて開発された KINEROS はキネマティックウェーブ法を基本とした流出モデルで、植生の違いによる流出特性の変化、土壌浸食量や水質の推定が評価できる。我々の訪問日には不在であったが、同所に属する David C. Goodrich 博士は、農業分野に限らず、水文、流出、洪水モデリング等で全米を代表する研究を行っている。

### 14 豪州科学研究機構

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Yongqiang Zhang	リモートセンシングを活用した蒸発散量の推定
Enli Wang	農業・作物モデルの構築、リモートセンシングによる土地利用の把握
Lu Zhang	プロジェクトリーダー、水文モデル開発、蒸発散量の推定

豪州科学研究機構 Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO) は、オーストラリアの連邦政府の下にある研究機関である。6,000 人の職員が各地に広がって研究を実施しており、キャンベラに位置するブラックマウンテン研究所 Black Mountain Laboratory の土地・水研究領域 Land and Water には、約 600 人の研究職員が所属している。CSIRO では数年前にプロジェクト単位の組織に移行し、研究職員は所属部署と FLAGSHIP と呼ばれるプロジェクトチームの両者に属しているのが特徴である。

気候変動に関するプロジェクトとしては、Water in a Changing Climate System が実行されており、現在気候の分類、気候変動予測の高解像度な影響評価、季節変動の予報が3つの大きなテーマとしてあげられ、気候分野、水文水資源分野、作物分野の 47 名の研究者が共同して研究している。また、プロジェクト Water Availability in Murray は1年半という短期間で行われ、行政部門への技術的提言を行う研究組織としても存在感を示している。オーストラリアにおける将来の降水量は減少傾向にあるが、一方で強度の大きい降雨イベントの増大が予

測される。これは、5年連続で渇水に見舞われた Murray 川流域や、年間降水量 600mm 程度の地域において観測された 150mm の降雨に代表されるように、近年の観測データも同様の傾向を示している。

気候変動研究の推進リーダーは Lu Zhang 博士であり、プロジェクト Water in a Changing Climate System を精力的に進めている。一連のプロジェクトでは、まず、Enli Wang 研究員らが農業・作物分野の取り纏め、リモートセンシングを利用した土地利用の抽出および作物モデルの構築を行っている。ここでは、作物の生長過程や収量予測は、1次元モデルの APSIM を基礎としたモデルを用いて行われ、作物の生産量と自然生物、地下水の上昇による塩害発生予測等の解析可能性である。また、植生や土地利用の変化による流出特性の変化や、河川流量の将来予測、流量の季節的予測、長期予測などについて検討している。特に、流域内の土地利用ごとの実蒸発散量の推定には、MODIS Tera/Aqua を利用した土地利用の情報、作付時期の特定などが行われている (Zhang et al., 2008)。

# デジタル航空センサー ADS40 による オルソ画像を用いた耕作放棄田の把握

福本昌人\*・吉迫 宏\*・小川茂男\*\*

## 目 次

I 緒 言	307	3 耕作放棄田の判読性	310
II 調査方法	308	IV 考察	313
1 調査地域	308	1 耕作放棄田の判読性の整理	313
2 ADS40 による航空撮影	308	2 オルソ画像による現地調査の省力化	313
3 現地踏査	308	3 活用可能なオルソ画像	314
4 オルソ画像の目視判読	308	4 オルソ画像プリントの活用	315
III 調査結果	308	V 結 言	315
1 転作田の判読性	308	参考文献	316
2 不作付田の判読性	309	Summary	317

## I 緒 言

農林水産省は、耕作放棄地の解消を図るため、耕作放棄地全体調査と呼ばれる現地調査を市町村・農業委員会を通じて 2008 年度に全国規模で実施した。この調査は、市町村全域のすべての農地を踏査し、耕作放棄地の位置と状況を一筆毎に把握するものである。この調査で「農地」と判断された耕作放棄地は営農再開や保全管理（草刈り、耕起等）が求められ、その実施を確認する追跡調査が行われることになっている。しかし、その実施が確認されても、その後再び耕作放棄地になる可能性がある。また、2008 年度には耕作放棄地でなかった農地が新たに耕作放棄地になる可能性もある。このため将来、再度、現地調査を行う必要が生じると考えられる。しかし、現地調査は多大な労力を要し、容易には実施できないため、現地調査の省力化が喫緊の課題となっている。

耕作放棄地の現地調査の省力化を図る方法として、衛星画像や航空撮影画像の利用が考えられる。これらを用いた水田利用状況の把握可能性の調査（福本，2004）が、農林水産省の行政対応特別研究「中山間地域等の農地基盤の適正管理のための情報管理分析システムの開発（2000～2002 年度）」で行われた。その調査では、衛星

画像については、IKONOS 衛星データを利用し、画像分類に基づいて区画単位で水田利用の判別が行われ、耕作放棄田の正答率は 80%であったと報告されている。また、航空撮影画像については、デジタル航空センサー ADS40 によるオルソ画像（正射投影画像）を利用し、目視判読により水田利用の識別が行われ、耕作放棄田の識別可能率は 78%であったと報告されている。

このように衛星画像や航空撮影画像のみでは耕作放棄田を 100%近い精度で把握することはできないが、衛星画像や航空撮影画像は、耕作放棄地の現地調査において、踏査を要する水田の事前の絞り込み（スクリーニング）に用いることができると考えられる。しかし、そのような利用に関する研究はこれまでに行われていない。そこで、本研究では、上記の調査で取得した ADS40 によるオルソ画像を用いて耕作放棄田等の目視判読性を雑草タイプ等の面から詳細に検討し、航空撮影画像を用いた耕作放棄田の調査手法を事例的に提案する。なお、耕作放棄地の現地調査のためだけに航空撮影を行うことはコスト的に難しいが、別途、水土里情報活用促進事業等により、地理情報システム（GIS）データの整備・更新のために最新のオルソ画像が作成されていれば、そのオルソ画像を現地調査に利用することができる。また、ここでは目視判読はパソコンのディスプレイにオルソ画像を表示して行うが、オルソ画像のプリントも現地調査において有用であることから、そのオルソ画像プリントの活用についても述べる。

\* 農地・水資源部土地資源研究室

\*\* 農地・水資源部

平成21年12月9日受理

キーワード：ADS40, 航空撮影, オルソ画像, 目視判読, 耕作放棄地, 水田利用状況

## II 調査方法

### 1 調査地域

調査地域は福島県の旧東和町（現二本松市）である。同町は阿武隈山系の起伏の激しい中山間地に位置し、水田の多くは谷間に立地している。2000年農林業センサスによると、田の経営耕地面積は550ha、田の耕作放棄地面積は70ha（耕作放棄地率は11%）である。また、2000年度の生産調整実績データ（東和町、2000）によると、転作作物の作付面積は57haで、その約50%を大豆（16ha）と永年性牧草（13ha）が占めている。調整水田（作付けは行われていないが、水張りが行われている水田）の面積は14haであり、自己保全管理水田（作付けや水張りは行われていないが、草刈りや耕起が年に1～2回程度行われている水田）の面積は136haである。

### 2 ADS40による航空撮影

水稻生育初期である2002年6月7日にデジタル航空センサーADS40による航空撮影（セスナ；飛行高度約2,000m）を行い、地上解像度20cmのオルソ画像を作成した。ADS40は、3ラインスキャナ、GPSおよびIMU（慣性計測装置）から構成され、Fig.1に示すように、前方視、直下視、後方視の3方向のパンクロマティック画像（白黒写真画像）、および直下視のマルチスペクトル画像（青、緑、赤、近赤外の計4バンド）をスキャニング方式により同時撮影する。オルソ画像の作成方法については、福本ら（2003b）の文献に記述している。なお、ADS40によるオルソ画像は、従来の航空写真撮影によるオルソ画像と比べて、①近赤外バンドのデータを有するため植生の識別が容易である、②11ビット（2048階調）のデータであるため陰影部でも地物を比較的明瞭に識別できる、③スキャニング方式による撮影のため飛行進行方向への建物や樹木等の倒れ込みがない、という特徴がある。

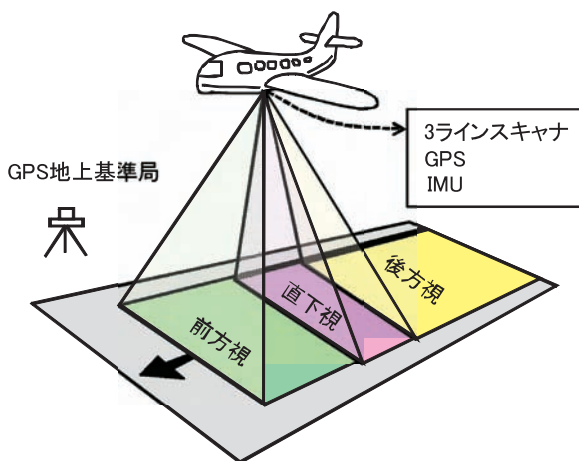


Fig.1 デジタル航空センサー ADS40の撮影概要  
Outline of photography by an ADS40 digital airborne sensor

### 3 現地踏査

航空撮影の1週間後の2002年6月14日に現地へ赴き、水稻作が行われていなかった131枚の水田を踏査した。踏査した水田の位置をFig.2に赤色の点で示す。踏査した水田は、現況から利用状況を判断し、転作田、不作付田および耕作放棄田に区分した。ここで、水稻以外の何らかの作付けが行われていた水田を転作田とした。また、転作田以外のうち、草刈りや耕起が行われていた自己保全管理水田や、水張りが行われていた調整水田等を不作付田とし、それ以外を耕作放棄田とした。草刈りや耕起が行われているか否かは、多年生の雑草の繁茂状態や、前年の草刈りの痕跡（切断された枯草）の有無を指標にして判定した。

### 4 オルソ画像の目視判読

ADS40によるオルソ画像をGISに取り込み、踏査した各水田の画像をディスプレイに順次、拡大表示して目視判読を行い、オルソ画像から利用区分（転作田、不作付田、耕作放棄田）がどの程度判読できるのかを調べた。オルソ画像は、可視域の青・緑・赤バンドのデータを用いてTrue Color（赤バンド、緑バンド、青バンドをそれぞれ赤色、緑色、青色に割り当て）で表示した。

## III 調査結果

踏査した131枚の水田のうち、27枚が転作田（うち21枚が大豆作）、69枚が不作付田（うち51枚が自己保全管理水田）、35枚が耕作放棄田に区分された。転作田の現地写真とオルソ画像をFig.3の〈1〉～〈6〉、不作付田の現地写真とオルソ画像をFig.4の〈7〉～〈15〉、耕作放棄田の現地写真とオルソ画像をFig.5の〈16〉～〈24〉に示し、各利用区分の判読性（目視）を以下に述べる。

#### 1 転作田の判読性

〈1〉と〈2〉は、大豆が作付けられていた水田である。出芽直後であり、地表面はほとんど裸地状態かつ乾燥していたため、画像は明るいクリーム色を呈する。〈1〉のように畝がある場合には、畝筋が画像上で認識できるので転作田であると判断できる。しかし、〈2〉のように畝がない場合には、〈8〉のような耕起直後の不作付田と区別できない。

〈3〉は、牧草のイタリアンライグラスが作付けられていた水田である。播種は前年秋に行われている。草丈の低い黄緑色のイタリアンライグラスが密に繁茂していたため、画像は一様に明るい黄緑色を呈する。草丈の低い黄緑色の越年生雑草（ヒメジョオン）が密に繁茂していた〈10〉や〈11〉のような不作付田とは区別できないが、耕作放棄田とは区別できる。

〈4〉は、永年性牧草のシロツメクサが作付けられてい



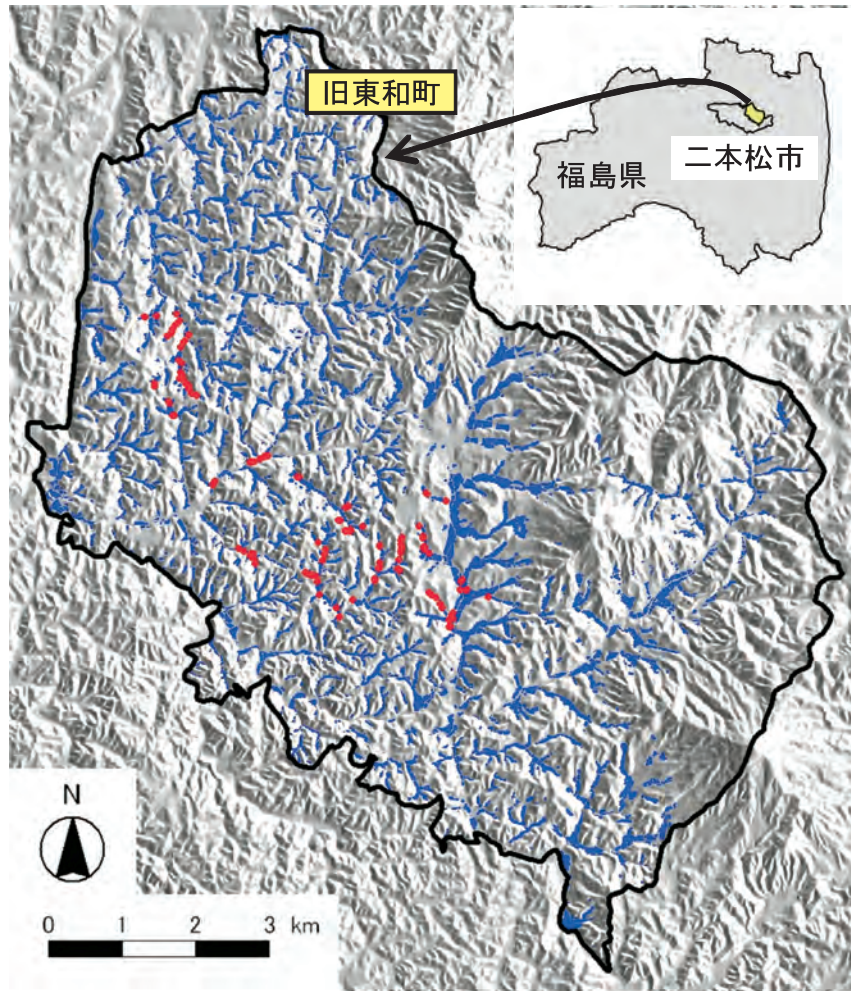


Fig.2 調査地域における水田の分布(青)と踏査した水田の位置(赤)  
Distribution (blue) of paddy fields and location (red) of surveyed paddy fields in study area

た水田である。画像上で植被の筋が認識できるので転作田であると判断できる。植被が筋状であるのは、大豆作付け時の畝跡が多少残った状態でシロツメクサが播種されたためと推察された。植被が筋状でない場合や、雑草が繁茂している場合には、不作付田や耕作放棄田との区別が難しいであろう。

〈5〉と〈6〉は、花木が作付けられていた水田である。〈5〉はサツキの花の赤色が画面で認識できるため転作田であると判断できる。〈6〉は耕作放棄田との区別が多少難しいが、画像が一様に濃い緑色を呈し独特であるので、作付けと画像との対応関係が明確になれば転作田であると判断できるであろう。

## 2 不作付田の判読性

〈7〉は、草刈りが行われて間もない自己保全管理水田である。枯草に起因して画像がざらついて見えるので不作付田であると判断できる。

〈8〉は、耕起直後の自己保全管理水田である。〈2〉のような出芽直後でかつ畝がない大豆作の転作田と区別できない。

〈9〉は、耕起が行われて少し時間が経ち、雑草が繁茂し始めていた自己保全管理水田である。画像上で植生が部分的に確認できるため、不作付田であると判断できる。

〈10〉と〈11〉は、草丈の低い黄緑色の越年生雑草(ヒメジョオン)が密に繁茂していた自己保全管理水田である。〈11〉の水田には、草丈の低い緑色の越年生雑草(アレチノギク等)も繁茂していた。〈3〉のようなイタリアンライグラス作の転作田とは区別できないが、耕作放棄田とは区別できる。

〈12〉は、ヨモギ、クズ等の地下茎で増える多年生雑草が侵入し、繁茂していた自己保全管理水田である。多年生雑草が繁茂していたのは、草刈りのみの管理が長年続いていたためと推察された。耕作放棄田との区別が難しい。

〈13〉は、水張りが行われていた調整水田である。水稻は生育初期であり、水稻作が行われていた水田(水稻作田)の植被率は8%程度で非常に小さかった。このため、現地写真では水稻作田との違いは明らかであるが、画像では水稻作田と区別できない。

〈14〉と〈15〉は、前年にそれぞれ調整水田、水稻作



田であったが、その後放置された不作付田である。調整水田であった〈14〉の水田は、水生雑草であるイの枯草で覆われている。いずれも発芽直後でかつ畝がない大豆作の転作田と区別がやや難しい。

### 3 耕作放棄田の判読性

〈16〉と〈17〉は、灌木が生えていた耕作放棄田である。灌木の樹冠が画像で認識できるので耕作放棄田であると容易に判断できる。

〈18〉～〈24〉は、灌木が生えていなかった耕作放棄

田である。繁茂していた多年草の雑草は、〈18〉と〈19〉がススキ（前年の枯草あり）、〈20〉と〈21〉がガマ（前年の枯草あり）、〈22〉がセイタカアワダチソウ、〈23〉がヨシ、〈24〉がクズである。地上で見ると植生が多いように見えるが、上空から見ると植生は比較的疎であり、画像の色調はかなりまだら（ランダムな明暗）である。画像の植被部の色が暗い緑の場合（〈19〉～〈22〉）には、耕作放棄田と判断できるが、明るい緑の場合（〈18〉、〈23〉、〈24〉）には、〈12〉のような多年生雑草が繁茂している不作付田との区別が難しい。

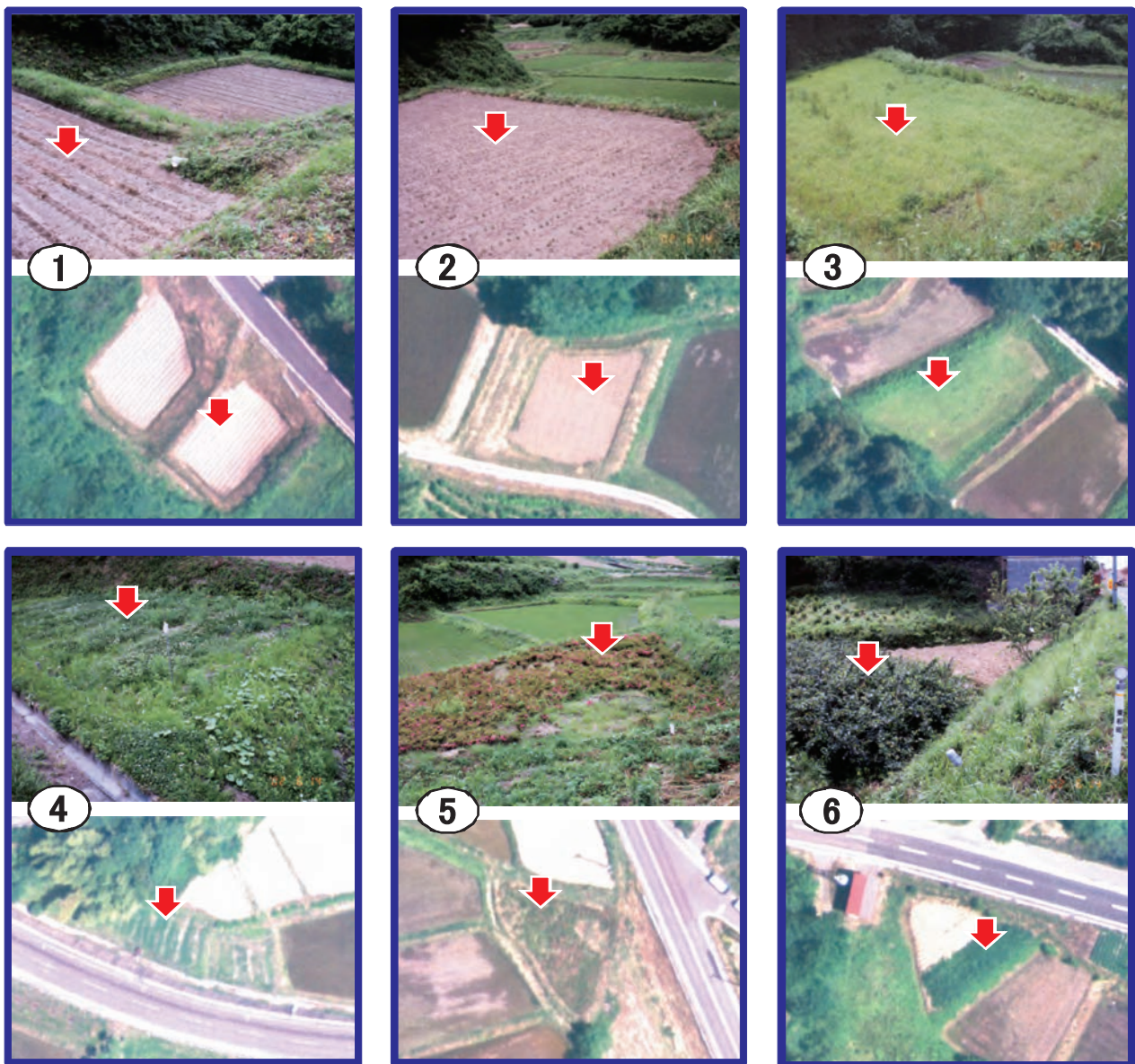


Fig.3 転作田の現地写真（上）とオルソ画像（下）  
On-site photographs (upper) and ortho images (lower) of fields planted with upland crops



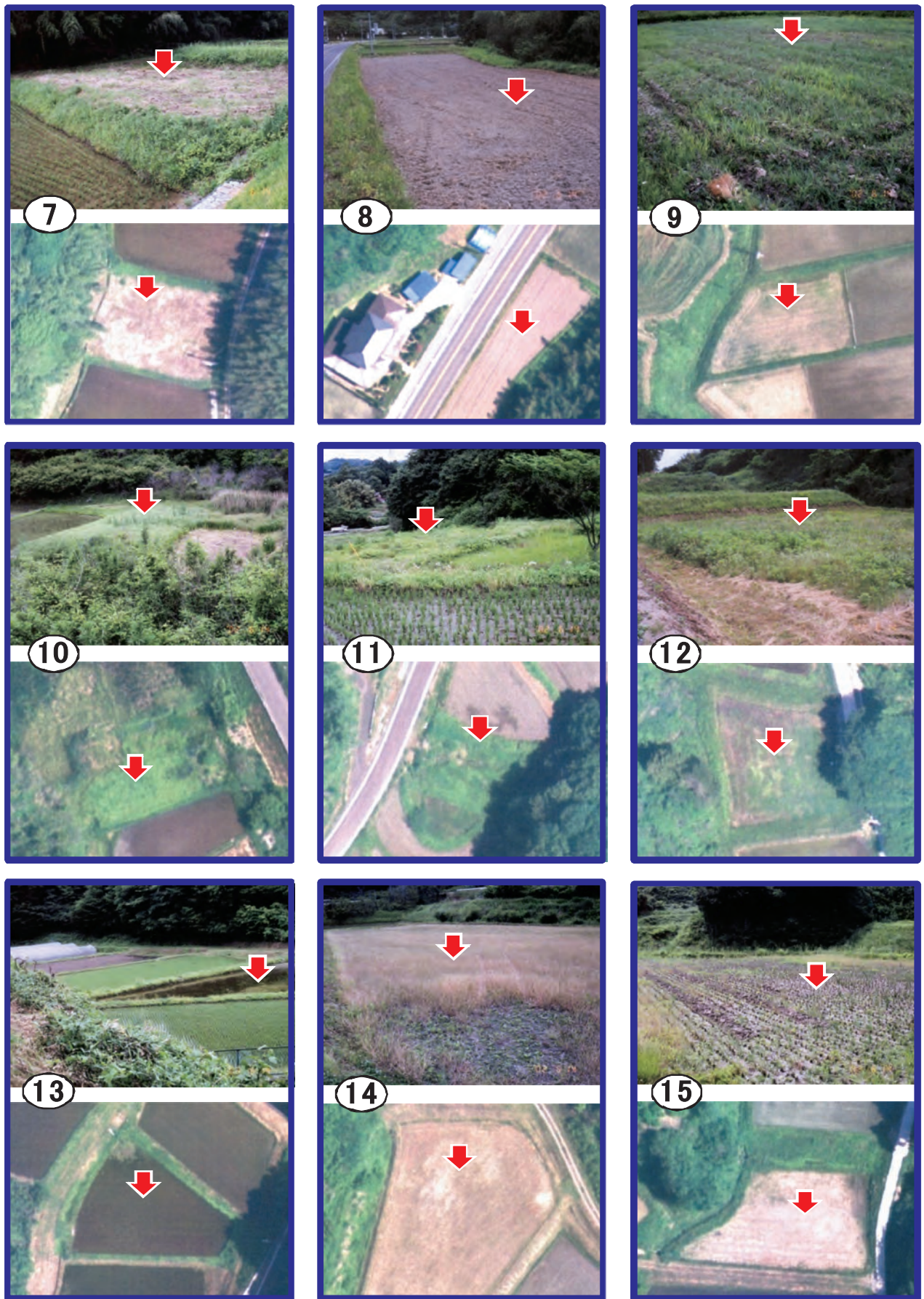


Fig.4 不作為田の現地写真（上）とオルソ画像（下）  
On-site photographs (upper) and ortho images (lower) of fallow fields



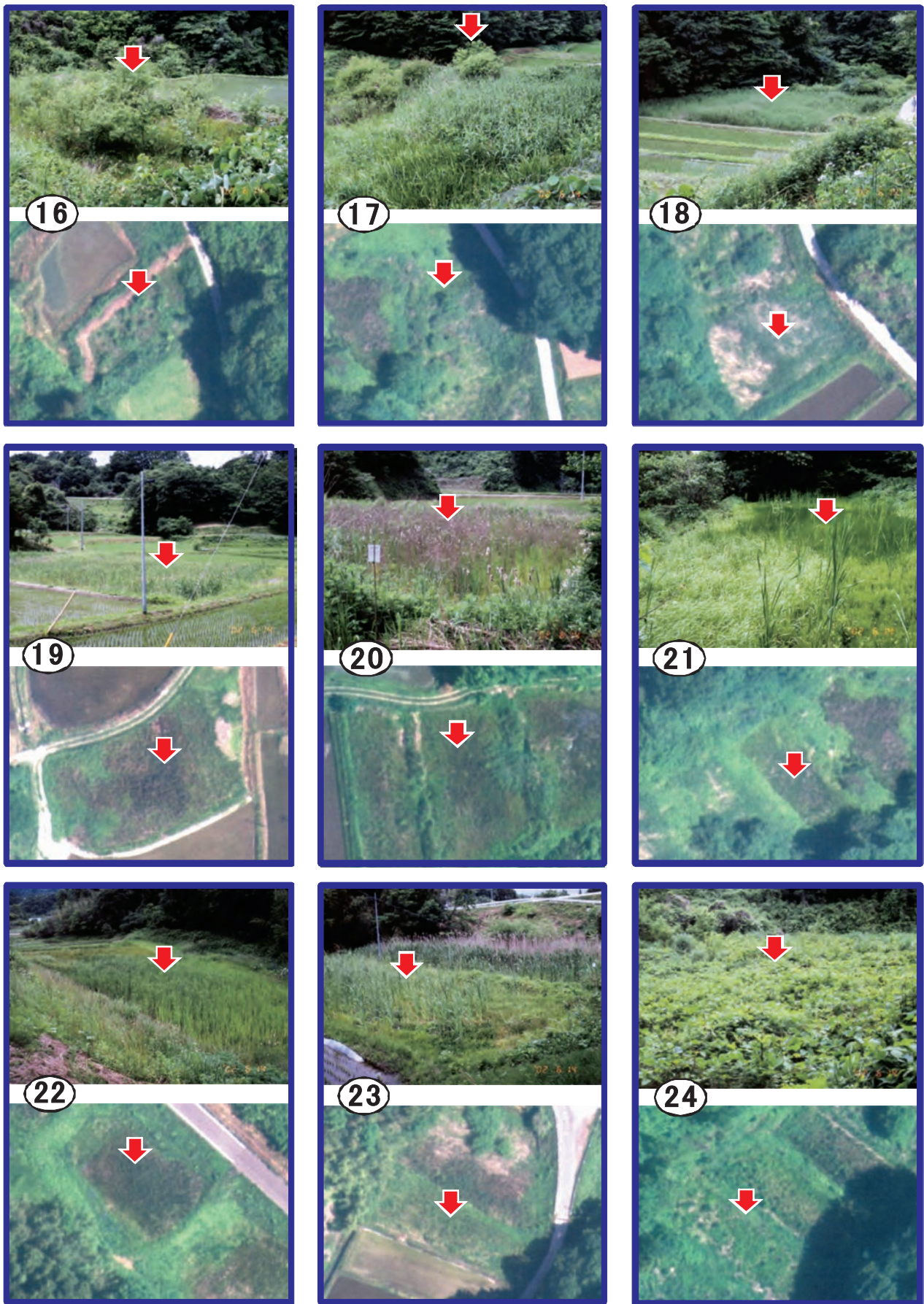


Fig.5 耕作放棄田の現地写真（上）とオルソ画像（下）  
On-site photographs (upper) and ortho images (lower) of abandoned fields



## IV 考察

### 1 耕作放棄田の判読性の整理

以上の結果より耕作放棄田の判読性をまとめると Fig.6 のようになる。水稻は生育初期、大豆は出芽直後であるため、水稻作田と大豆作の転作田には植被はほとんどない。また、不作付田のうち、草刈りや耕起が行われてからそれほど時間が経っていない自己保全管理水田や調整水田等にも植被はほとんどない。これらの水田は、画像に緑系の色つまり植被がほとんど見られないため、耕作放棄田ではないと判断することができる (Fig.6 の耕作放棄田以外①; 該当した踏査水田は 75 枚)。さらに、色調がまだらではなく、区画全体にわたって一様 (筋状を含む) である水田も耕作放棄田ではないと判断することができる (Fig.6 の耕作放棄田以外②; 該当した踏査水田は 11 枚)。

耕作放棄田については、灌木の樹冠らしきものが画像に認められれば、耕作放棄田であると容易に判断できる (Fig.6 の A; 該当した踏査水田は 3 枚)。また、画像の

色調がまだらで、かつ植被部が暗緑色であれば、耕作放棄田であると判断できる (Fig.6 の B; 該当した踏査水田は 20 枚)。しかし、画像の色調はまだらであるが、植被部が暗緑色でなければ、耕作放棄田であるかどうかは判断できない (Fig.6 の C; 該当した踏査水田は 22 枚、うち 12 枚が耕作放棄田)。すなわち、耕作放棄田である可能性があるが、多年生雑草が繁茂している不作付田 (自己保全管理水田)、あるいは、多年生雑草がかなり混入している永年牧草作の転作田である可能性もある。

### 2 オルソ画像による現地調査の省力化

ADS40 で撮影されたオルソ画像は Fig.7 のようにして耕作放棄田の現地調査に活用することができる。その調査手順は、①オルソ画像を目視判読して Fig.6 の A、B に該当する水田と Fig.6 の C に該当する水田を区別して抽出する、②前者の水田はこの時点で耕作放棄田と確定する、③後者の水田のみを現地踏査して耕作放棄田であるかどうかの現地確認を行う、というものである。このようにして調査を行えば、市町村全域の水田をくまなく

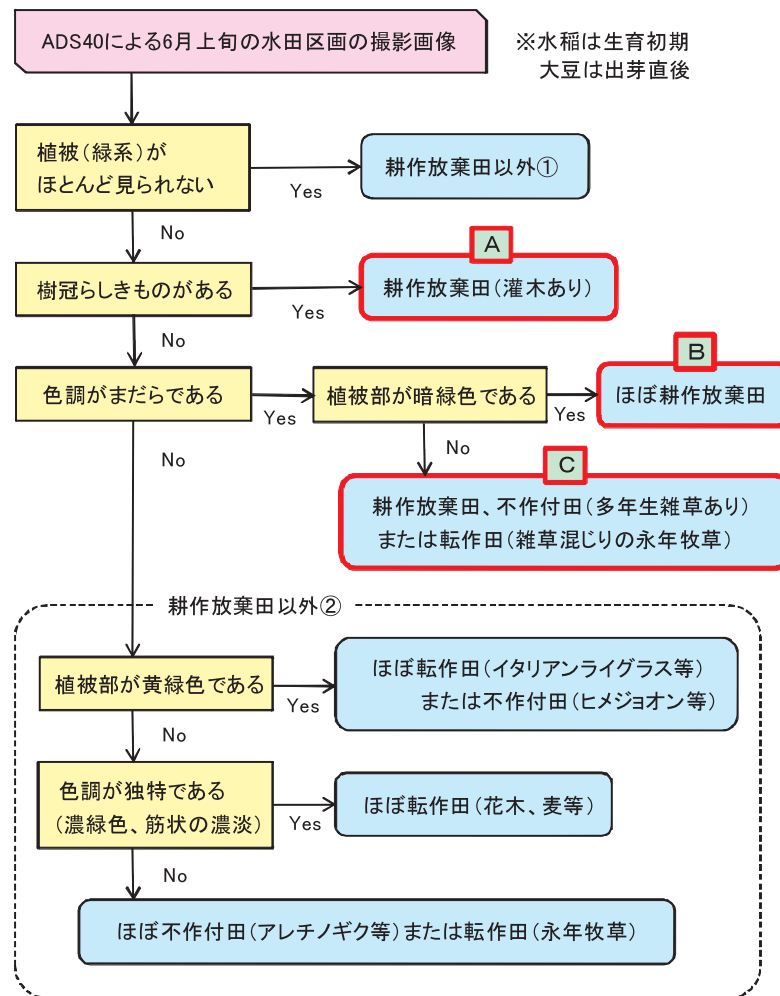


Fig.6 耕作放棄田の判読性  
Visual interpretation of abandoned fields using ortho images

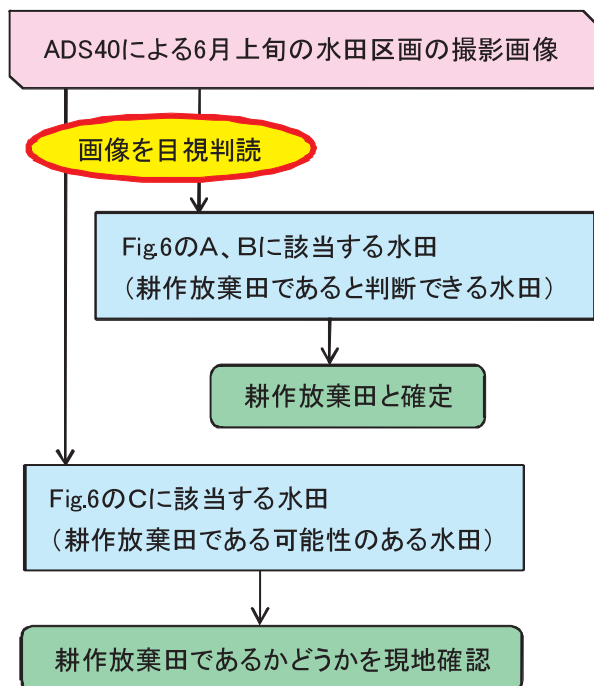


Fig.7 オルソ画像を用いた耕作放棄田の調査手順  
Investigation procedure of abandoned fields using ortho images

踏査する必要がなくなり、現地調査を省力化できる。

なお、水田団地全体が耕作放棄されて原野化しているために水田であるか林地であるかが画像から判断できない場合や、水田であるか畑であるかが画像から判断できない場合がある。そのような場合には、Fig.8のaに示すような地籍図の田データや、Fig.8のbに示すような1975年に撮影された航空写真のオルソ画像を参照すると良い。前者は、国土調査事業で整備された国土庁フォーマットのデータをGISのshapeファイル形式に変換し、田のみを抽出したものである。後者は、国土交通省のオルソ空中写真ダウンロードシステム (<http://orthophoto.mlit.go.jp/>) よりダウンロードしたものである。1974～1978年に撮影された全国（北海道の一部を除く）の航空写真のオルソ画像が同システムからダウンロードできる。

### 3 活用可能なオルソ画像

Fig.9のI～IVは、様々なオルソ画像を同じエリア（Fig.5の17, 18および21を含むエリア）で比較したものがある。

Iは、これまでに示してきたADS40による2002年6月7日撮影のTrue Colorのオルソ画像である。近赤外バンドのデータを用いてそれをFalse Color（近赤外バンド、赤バンド、緑バンドをそれぞれ赤色、緑色、青色に割り当て）で表示するとIIようになる。植生は近赤外の光を強く反射するので、False Colorで表示すると植被が際立つ画像になるが、True Colorで表示しても植被は十



Fig.8 地籍図の田データ (a; 黄色のポリゴン) と1975年撮影の航空写真オルソ画像 (b)  
Paddy field data (a; yellow polygon) of cadastral map and ortho image (b) of aerial photograph taken in 1975

分に認識することができた。すなわち、可視域の青・緑・赤バンドのデータがあれば十分であった。

IIIは、従来の航空写真撮影（撮影縮尺1/10,000）によるオルソ画像である。撮影日は2000年5月30日、地上解像度は25cmである。現地踏査の2年前に撮影されたものであるため判読性に関する調査は行っていないが、Iのオルソ画像と比較したところ、植被部の緑の発色はあまり鮮やかでないものの、灌木の樹冠を認識することができ、また植被の写り具合もほぼ同じであることから、このオルソ画像も耕作放棄田の現地調査に十分に活用できると考えられた。このオルソ画像は、中山間地域等直接支払制度の導入にあたって農林水産省の農地環境緊急対策事業で2000年に整備されたものである。現在は日本水土総合研究所の日本水土図鑑GIS (<http://www.nngis.jp/>) からダウンロードできる。

IVは、ADS40による2002年4月6日撮影のオルソ画像（True Color）である。耕作放棄田の雑草は枯れていて画像に緑系の色がほとんどないため、耕作放棄田の判読は困難である。すなわち、雑草が枯れている時期に撮影されたオルソ画像は、耕作放棄田の現地調査には活

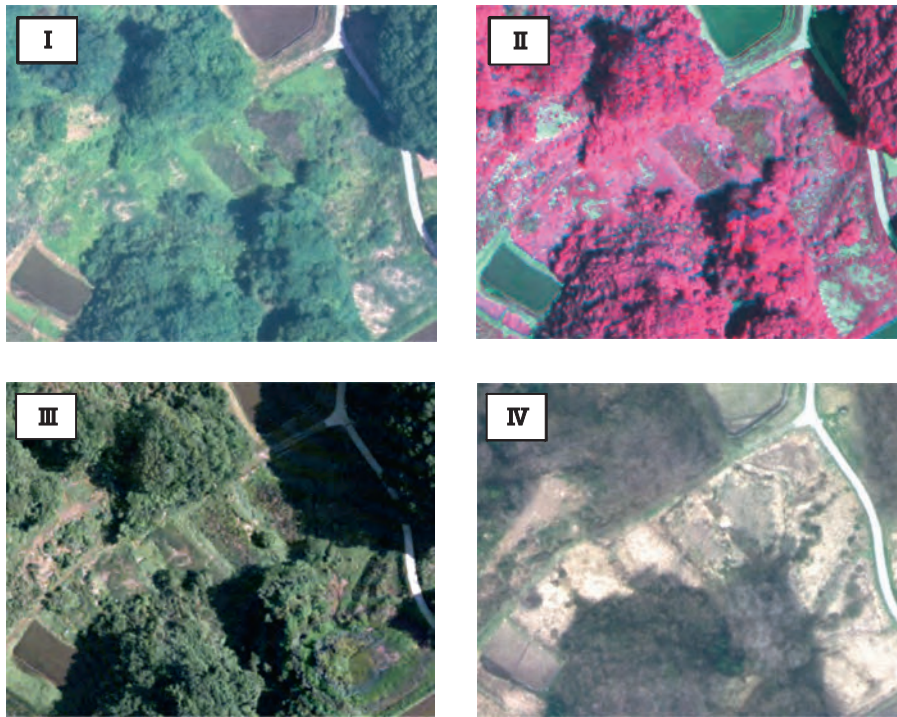


Fig.9 様々なオルソ画像の比較

(IはADS40による2002年6月7日撮影のTrue Colorのオルソ画像, IIはADS40による2002年6月7日撮影のFalse Colorのオルソ画像, IIIは航空写真撮影による2000年5月30日撮影のオルソ画像, IVはADS40による2002年4月6日撮影のTrue Colorのオルソ画像)

Comparison of various ortho images

(I is true color ortho image taken on June 7, 2002 with an ADS40 sensor; II is false color ortho image taken on June 7, 2002 with an ADS40 sensor; III is ortho image of aerial photograph taken on May 30, 2000; IV is true color ortho image taken on April 6, 2002 with an ADS40 sensor)

用できない。様々な時期に撮影されたオルソ画像の比較は行っていないが、水稲作田や大豆作の転作田が耕作放棄田と容易に区別できるという点で、田植え後から水稲生育初期までの時期（本調査地域では5月下旬～6月上旬）に撮影されたオルソ画像が耕作放棄田の判読に最も適していると考えられる。

#### 4 オルソ画像プリントの活用

Fig.10は、農地環境緊急対策事業で整備されたオルソ画像（Fig.9のIII）に地籍図の田データ（Fig.8のa）を重ねて表示した状態で図郭毎に1/5,000縮尺でA4紙に印刷し、各紙を住宅地図のように束ねたオルソ画像のプリントである。2002年当時、調査協力へのお礼として、旧東和町役場にこのオルソ画像プリントを2部（現地携帯用とカラーコピー用原本）提供したところ、水稲生産調整や中山間地域等直接支払制度等に関わる水田の毎年の現地確認において活用され、非常に重宝された。地籍図のプリントでは位置がわかりにくいので、それまでは役場担当者は地元の方に同行してもらって現地確認を行っていたが、オルソ画像プリントを携帯することにより、地元の方の同行がなくても現地確認ができるようになったとのことである。なお、2007年に旧東和町役場にその後の利用状況を問い合わせたところ、2004年に水稲生産調整の現地確認の事務が大幅に簡略化されたことも

あり、オルソ画像プリントの使用頻度はかなり少なくなったが、現在でも災害調査等で町内を巡回する際に携行することがある、という回答を得た。

近年、耕作放棄地や産業廃棄物の不法投棄等に関する農地パトロールが農業委員会により実施されている。特に中山間地域では、この農地パトロールの際に上記のようなオルソ画像プリントを携行すると、水田の位置や周辺状況が良く把握でき、非常に役立つと考えられる。2006年度から始まった土里情報利活用促進事業でオルソ画像の整備と農地情報（区画、地番等）のGISデータベース化が進められている。そのオルソ画像と農地情報データベースを用いて上記のようなオルソ画像プリントを作成・配布すると、多くの関係者が様々な実務に役立てることができるであろう。

#### V 結 言

本研究では、福島県の中山間地において水稲生育初期の2002年6月7日にデジタル航空センサーADS40による航空撮影を行い、地上解像度20cmのオルソ画像を作成した。また、航空撮影の1週間後に現地踏査を行い、水稲作が行われていなかった131枚の水田を転作田、不作付田および耕作放棄田に区分した。そして、オルソ画像を用いて各水田の区分がどの程度目視判読できるのか



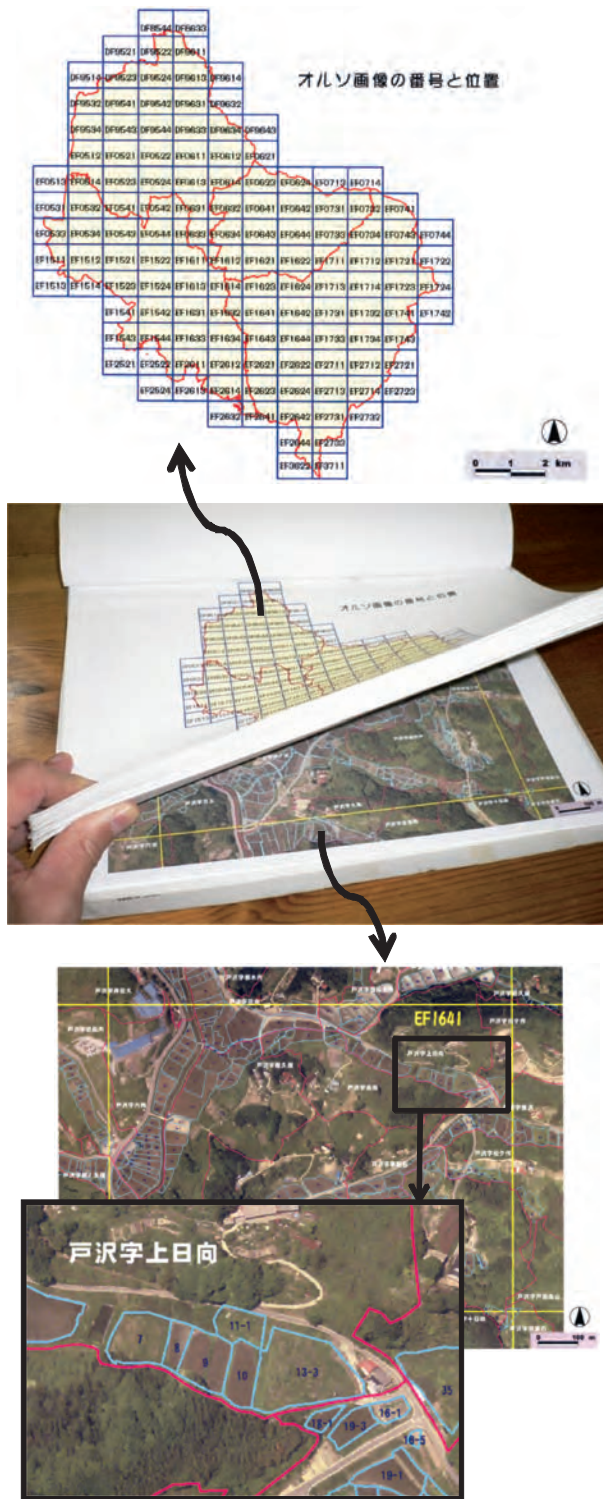


Fig.10 オルソ画像のプリント  
Ortho images print

を調べた。その結果、耕作放棄田の判読性に関して次のことがわかった。

①画像に灌木の樹冠らしきものが認められれば、耕作放棄田であると容易に判断できる。

②画像の色調がまだらで、かつ植被部が暗緑色であれば、耕作放棄田であると判断できる。

③画像の色調はまだらであるが、植被部が暗緑色でなければ、耕作放棄田であるかどうかは画像からは判断できない。

①と②に該当する水田を目視判読で耕作放棄田と確定し、③に該当する、耕作放棄されている可能性のある水田のみを現地踏査して耕作放棄田であるかどうかを現地確認する。こうすれば市町村全域の水田をくまなく踏査しなくてもすべての耕作放棄田を把握することができる。

ところで、航空撮影時には水稻は生育初期、大豆は出芽直後であったため、水稻作田と大豆作の転作田の画像には植被はほとんどなく、耕作放棄田と容易に区別できた。耕作放棄田の判読には、この時期に撮影されたオルソ画像が最も適していると考えられたが、水稻と大豆の生育が進んだ時期(7月～9月)に撮影されたオルソ画像であっても、水稻作田や大豆作の転作田の画像は独特の色調(株間に起因した筋状の濃淡等)を有し、耕作放棄田との区別は可能であると推察される。その検証については今後の検討課題としたい。

### 参考文献

- 1) 福本昌人・島 武男・小川茂男 (2003a) : IKONOS 衛星データを用いた水田利用タイプの判別精度, システム農学, 19 (1), p.80-85
- 2) 福本昌人・島 武男・小川茂男・上杉昇平 (2003b) : デジタル航空センサー ADS40 によるデジタルオルソ画像と標高データの位置精度, 農業工学研究所技報, 201, p.47-53
- 3) 福本昌人 (2004) : 高解像度衛星データによる農地管理状況のセンシング技術の開発, 農林水産省農林水産技術会議事務局, 研究成果 424 (中山間地域等の農地基盤の適正管理のための情報管理分析システムの開発), p.20-27
- 4) 東和町 (2000) : 平成 12 年度「水田を中心とした土地利用型農業活性化対策」の実績について, <http://www.city.nihonmatsu.lg.jp/towa-old/nousei/tensaku/jisseki-12.PDF>



# Detection of Abandoned Fields Using Ortho Images Obtained with an ADS40 Digital Airborne Sensor

FUKUMOTO Masato, YOSHISAKO Hiroshi and OGAWA Shigeo

## Summary

In this study, we carried out aerial photography using an ADS40 digital airborne sensor on June 6, 2002 at the initial stage of rice crop growth in the mountainous regions of Fukushima Prefecture, and made ortho images with a 20cm ground resolution. In addition, one week after the aerial photography, we surveyed 131 paddy fields and divided them into fields planted with upland crops, fallow fields, and abandoned fields. We then examined how well we could identify each type of paddy field by visual interpretation using ortho images. The following results were obtained for determining if fields are abandoned.

- (1) We can judge easily whether a paddy field is abandoned in the ortho images, if there is the crown of a shrub in the image of the paddy field.
- (2) We can judge whether a paddy field is abandoned in the ortho images, if the tone of the paddy field image is dappled and the color of the vegetation is dark green.
- (3) We cannot judge whether a paddy field is abandoned in the ortho images, if the color of the vegetation is not dark green, even though the tone of the paddy field image is dappled.

Therefore, the paddy fields that correspond to (1) or (2) by visual interpretation can be fixed as abandoned fields, and the paddy fields that correspond to (3) must be confirmed by an on site field survey. If this method is incorporated, all abandoned fields can be detected in the entire area of a city even without surveying all paddy fields.

**Keywords :** ADS40, aerial photography, ortho image, visual interpretation, abandoned paddy field, utilization of paddy field