

## GIS を活用した傾斜地水田における指標のマップ化

正田大輔\*・川本 治\*

## 目 次

I 緒 言	1	VI 流入・流出指標および防災指標の評価	5
II 調査対象現地の概要	1	VII 結 言	6
III 解析の概要	2	参考文献	6
IV 浸透水流入・流出指標の評価とマップ化の手法	2	Summary	7
V 浸透水流動指標のマップ化	3		

## I 緒 言

少子高齢化や担い手の減少による農地・農業用水等の資源管理にかかる人的制約や、気候変動に伴う渇水・洪水等の災害リスクの増大などの問題が懸念されるなかで、農村が持つ潜在力を最大限に引き出し、地域を活性化・再生していくことが課題となっている。近年の北陸農政局（2006）の報告では、農業の生産活動や農地管理が継続的に行われることにより、土砂崩壊の防止も含めた、いわゆる多面的な機能を維持・増進させることが注目されている。一方で、耕作放棄率が50%以上になると耕作放棄率が10%未満の時より約4倍の確率で地すべり災害が生じることも、北陸農政局（2006）により報告されている。また同局は、乾燥型耕作放棄地と湿潤型耕作放棄地について、地下水位変動や耕盤の亀裂などの調査を行い、地すべりの発生機構の検討も行っている。

今後も、継続的な営農活動あるいは、中山間地域での担い手の減少が土砂災害にどのような影響を及ぼすのかという知見を蓄積する必要がある。このような傾斜地水田における既往の研究として、川本ら（2010）は、浅層浸透解析により傾斜地水田の防災管理指標をマップ化している。このマップをGIS上でわかりやすく普及させていくことは、意義のあることと考えられるが、国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）10mメッシュ（標高）などを解析に使用する場合の結果の信頼性については不明であり、防災管理マップの普及を図るためにはGIS適用技術の検討とあわせて、解析結果のメッシュ依存性の検討を行う必要がある。

本報では、集中豪雨の影響を、土質などの現場条件と地形条件、浅層地下水流動を用いて浸透シミュレーシ

ンを行った。そのシミュレーションから得られる浸透水流動指標を用いて、GISを活用した防災管理マップの作成技術の検討と、メッシュサイズを変えた浸透水流動指標の定量評価を行った。

なお、本報をまとめるにあたり、石川県中能登農林総合事務所、七尾市農林水産課、小栗地区地権者各位から多大なご協力を得た。さらに、現地で使用したGPS測量方法について施設資源部基礎地盤研究室 黒田清一郎博士に懇切丁寧にご指導戴いた。関係者各位に感謝の意を表する。

## II 調査対象現地の概要

対象地区は、Fig.1の青枠で囲われた石川県七尾市小栗町内の、片田地区と大島・前田地区である。Fig.1中には、以下の3つのデータについてESRI® ArcGIS™ 9.3.1のkml変換ツールにより作成されたファイルをGoogle Earth™上に貼り付けている。データは、(財)日本水土総合研究所の日本水土図鑑GISから農業集落界位置と平成10年3月31日時点で農林水産大臣が指定した地すべり防止区域、国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）10mメッシュ（標高）石川である。小栗町は、中山間地域に位置する傾斜地水田がある集落である。担い手の減少や営農者の高齢化により、耕作地と耕作放棄地が点在している。また、赤枠で示す地すべり防止区域内にも含まれている。これらのことから、浅層における地下水流動の浸透解析から得られる、農業生産基盤の防災・管理上の指標について検討する上で、有用な現地と考えられる。

また、現在、小栗町片田地区において石川県の里山利用・保全プロジェクトに関連して、水土保持システムの構築等を地域住民や県民にわかりやすく説明するための各種調査が行われている。ここでは、その一環として土砂崩壊防止機能の維持・増進を目的とした浅層地下水流

\* 農村総合研究部

平成23年1月19日受理

キーワード：防災管理, マップ, 流入・流出指標, 傾斜地水田

動(浸透)シミュレーションによる浸透水流動指標のマップ化と定量評価を行っている。

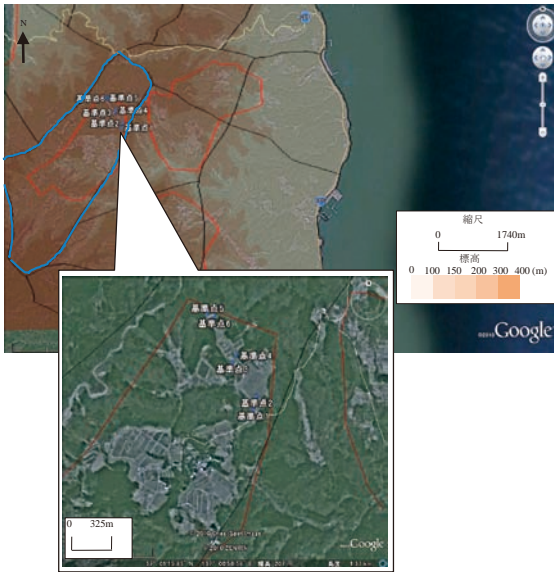


Fig.1 調査対象地区の周辺地図  
Map around analysis conducted area

### III 解析の概要

石川県七尾市小栗町の事例地区の周辺では平成19年10月15～16日の豪雨時(日雨量187mm, 時間雨量70mm)に山腹崩壊と溪流侵食が発生した。小栗地区全体は、このブロックに加えて大島・前田ブロックから構成されているが、これらのブロックでの浸透水流動指標の詳細は不明である。また、今後解析入力データとして用いることを考えている国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル)は、現時点において10mメッシュで4mよりも大縮尺となるので、ここでは大島・前田ブロックの4mメッシュと併せて、Fig.2に示す小栗地区の全域(片田及び大島・前田ブロック)における10m・20mメッシュによる解析結果との比較を行って、メッシュサイズが防災指標マップの表示結果に及ぼす影響を明らかにする。4m解析メッシュは、原則として2m間隔の等高線図や圃場区画平面図、これら二つの図で標高値が不明な部分については光波測量によりFig.1の6つの基準点を実測して作成した。10m・20mメッシュについては、4mメッシュデータをもとにメッシュを作成した。透水係数は、片田ブロックから採取した試料から実測された $1.42 \times 10^{-5}$ cm/secを浅層浸透解析に用いている。なお、この解析領域の地質は(独)産業技術総合研究所の統合地質図データベースにおいて中-後期中新世(N2)の海成または非海成堆積岩類であった。

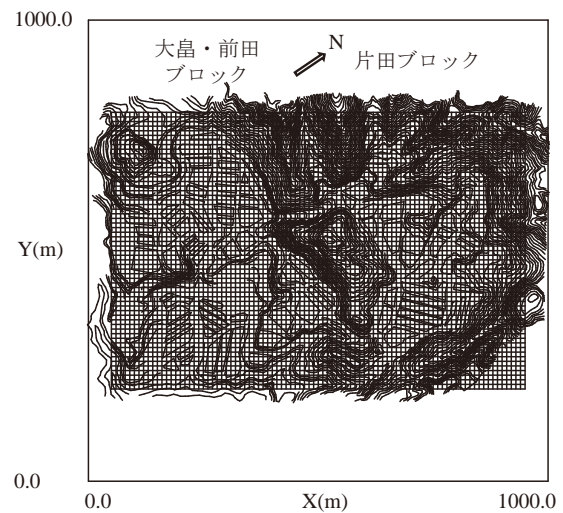
解析は、豪雨時に地表面まで飽和した状態を想定して、地下水位が地表面に達した状態になったものとする。解

析方法は、詳細な地形データを考慮した広域的な解析を効率よく実施できる田中ら(1987)が考案した動的緩和法を用いた川本ら(2010)が行った浸透解析を実施した。解析を行う際の境界条件として、豪雨時の浸透状況を推定するために地表面節点の浸透ポテンシャルを地表面標高と等値とする。側方境界からの流入・流出を許容するため、地表面以外の側方境界節点の浸透ポテンシャルも直上の地表面節点の標高値と置き換える。地盤深部の透水係数は未知であり、浅層での実測透水係数を用いて、均一型地盤と仮定して解析を行う。

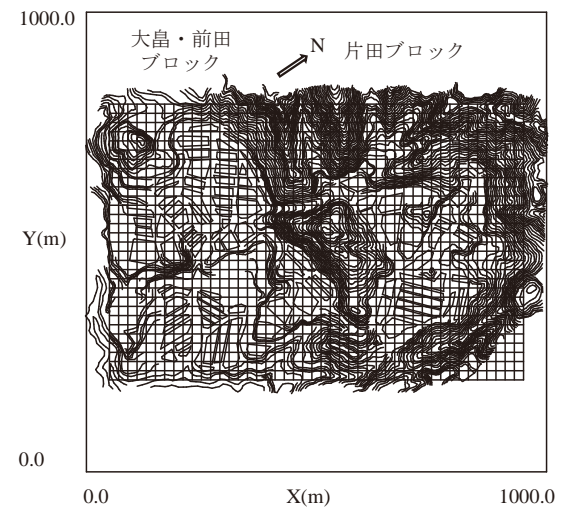
### IV 浸透水流入・流出指標の評価とマップ化の手法

#### 1 流入・流出指標の定義

豪雨時の浅層浸透水流動の浸透解析シミュレーションに基づいて以下の指標を評価する。



(a) 10m メッシュ



(b) 20m メッシュ

Fig.2 小栗地区の解析メッシュ  
Analysis mesh in Oguri district

$$\text{浸透水流入指標} = \frac{\text{地表面直下各点における下降流速}}{4\text{mメッシュ下降流速最大値}}$$

$$\text{浸透水流出指標} = \frac{\text{地表面直下各点における上昇流速}}{4\text{mメッシュ上昇流速最大値}}$$

上式中の下降流速と上昇流速は、三次元浸透解析結果における流速ベクトルの、それぞれ鉛直方向下向き成分と鉛直方向上向き成分の絶対値である。両式とも分母には片田地区 4m メッシュの解析で上昇および下降流速が最大となる値の絶対値を用いた。豪雨時の浸透水流入指標と浸透水流出指標をマップ上に記入し、傾斜水田における防災・管理方式の検討を行う。

## 2 マップの作成方法

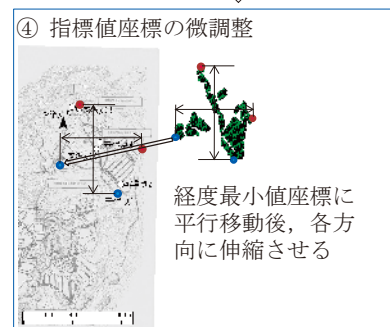
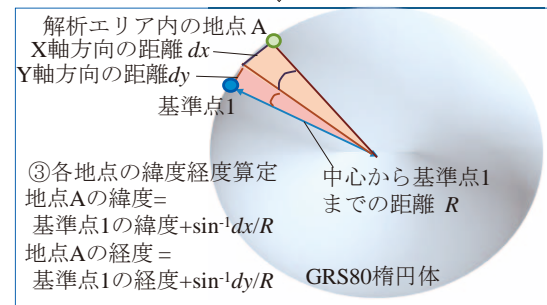
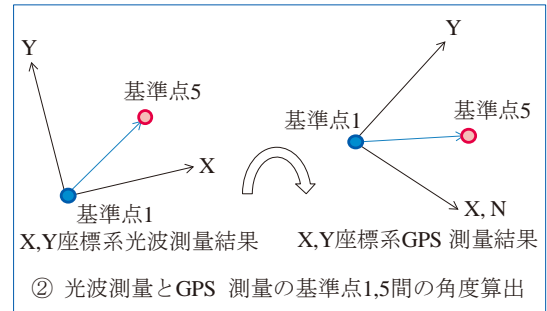
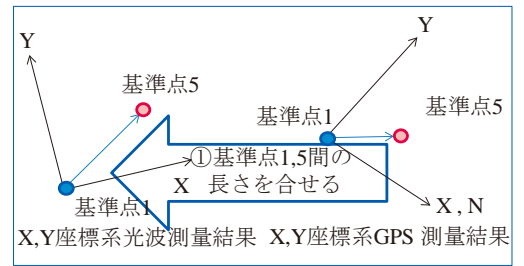
**Fig.2** の座標系で得られる流入・流出指標を ArcGIS 上で世界測地系の度単位のデータと重ね合わせできるようにするため、以下の手順で緯度経度への変換を行った。

片田地区の **Fig.1** に示す 6 つの基準点で光波測量ならびにライカジオシステムズ社のスマートローバーで GPS 単独測位を行っている。GPS 単独測位では測地系 WGS84 での緯度経度と、メートル単位の直行座標を使用した。

- ①基準点 1-5 のラインを基線として、光波測量結果すなわち **Fig.2** の解析座標系から GPS 座標系の伸縮率を決定する。
- ②①で求めた距離を用いて、光波測量の基準点 1-5 のラインと GPS 測量の基準点 1-5 のラインのなす角を算出する。
- ③地球は GRS80 楕円体として、長半径 6378.137km、扁平率  $f$  の逆数 298.257 として計算を行った。基準点 1 の緯度に合わせた地球半径を決定し、各緯度方向・経度方向の距離を上記の地球半径で除して  $\sin^{-1}$  の値を得る。このそれぞれの  $\sin^{-1}$  値と、基準点 1 の緯度と経度の値をたし合わせ、各点の緯度・経度を算定する。
- ④しかし、③までの手順でのマップでは、**Fig.1** に示す 6 つの基準点で、GPS 単独測位により得られた緯度・経度値を持たせた小栗地区の地図と若干のずれが生じる。そこで、上記の小栗地区の地図で、各解析範囲での圃場の最大・最小経度と最大・最小緯度の座標値を読み取る。次に、③までの手順で得られている、各解析で上記の圃場に対応する緯度と経度の座標値を読み取る。最後に、最小経度座標値へ全データを平行移動し、緯度・経度の最大と最小座標値の差から得られる各方向の倍率と、緯度・経度方向の最小値から、最終的な座標値の決定を行った。

## V 浸透水流動指標のマップ化

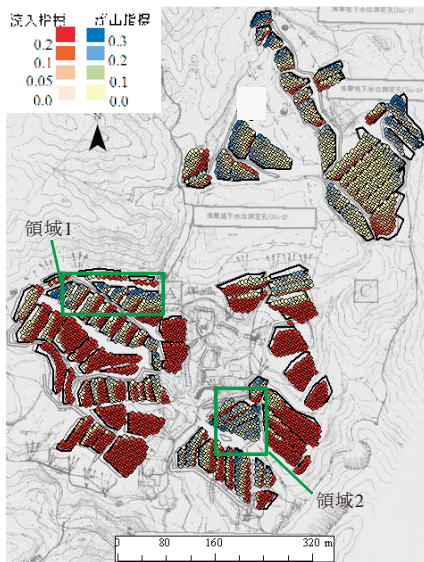
**Fig.4** に、各メッシュサイズで実施した解析により得られた、圃場内に含まれる浸透水流動指標を GIS 上で



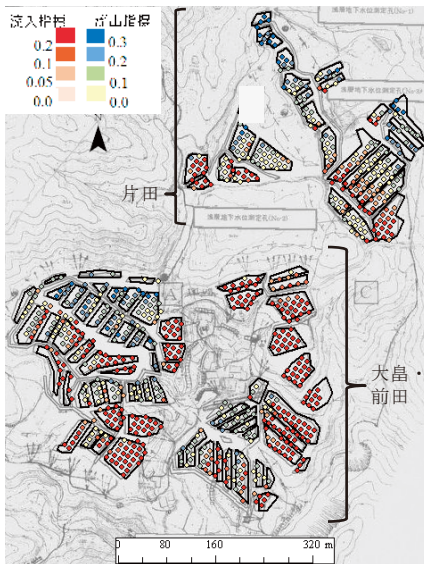
**Fig.3** マップの作成手順  
Procedure for drawing map

示した結果を示す。流入指標が大きくなる領域は、畦塗や代かきなど浸透抑制を目的とした農地管理と適切な地表排水によって防災機能の向上が見込める領域である。また、流出指標が大きくなる領域は、比較的地下水変動が小さいため、耕作放棄による災害リスクが小さく、畦畔の草刈りを入念に行い必要に応じて、フトンかごの設置や、抑制工・抑止工の設置といった土木的な防災対策を検討すべき領域である（川本ら（2010））。

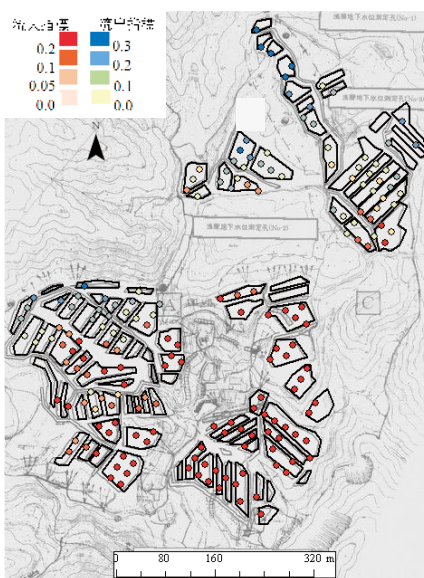
主に考察する領域を **Fig.4** (a) に、各ブロック名を **Fig.4** (b) に示す。大畠・前田ブロックにおいて比較的



(a) 4m メッシュ



(b) 10m メッシュ



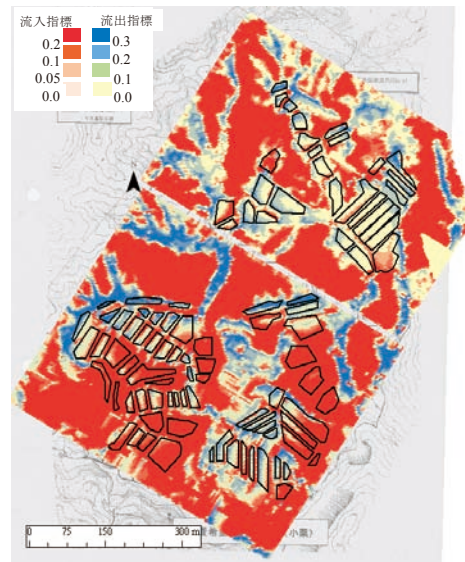
(c) 20m メッシュ

Fig.4 圃場区画内の浸透水流動指標のマップ化  
Map of seepage flow index in paddy fields

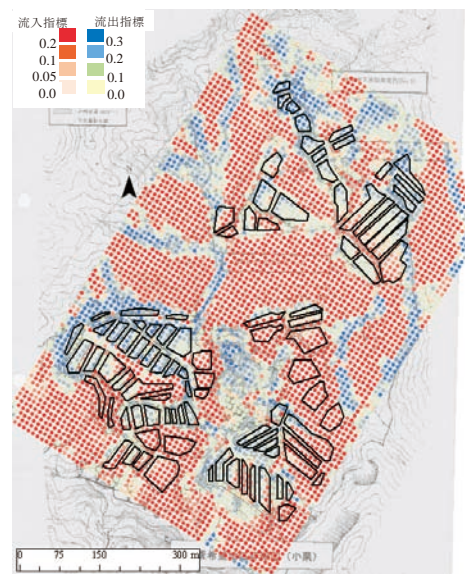
急峻な山地部からの地形遷急領域である領域1に流出指標の大きな箇所が、4 m・10 m・20 mいずれのメッシュサイズにおいても見られた。また、住居の集中する図中の下方に位置する領域2周辺で、4・10mメッシュの流出指標が中位となる箇所が見られる他は、浸透水流入指標が大きくなる領域が数多く見られる。一方で、20mメッシュによる指標は領域2において流入域が分布していることがわかる。メッシュの粗さが解析結果に影響を及ぼしたものと考えられる。

これらの結果は、浸透水流出域が数多く見られる片田ブロックとは異なる結果となる。片田ブロックに湿潤な農地が多いことは現地踏査の結果からも伺うことができる。片田と大島・前田における現地踏査の結果からの地表近傍で観察される湿潤状況と、両地区における解析結果の違いはある程度の対応関係が見られる。

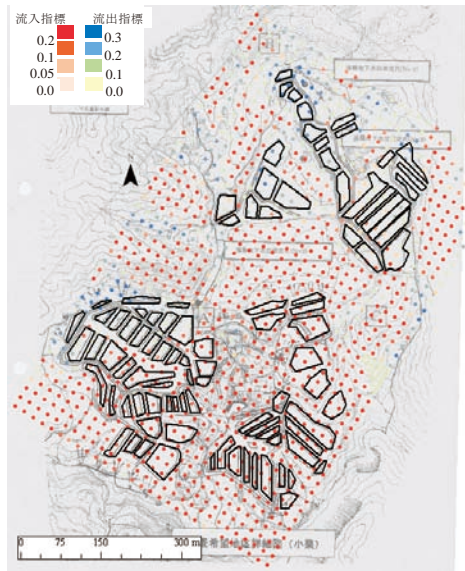
Fig.5に、全ての浸透水流動指標をGIS上で示した結果を示す。どのメッシュについても、Fig.4(a)の領域1



(a) 4mメッシュ



(b) 10m メッシュ



(c) 20m メッシュ

Fig.5 全データによる浸透水流動指標のマップ化  
Map of all seepage flow index

の北側にある山間地において流入指標が卓越していることがわかる。また、防災管理に全データを使用する当マップでは、圃場内の指標が埋もれてしまうので、防災管理マップとしては Fig.4 のような圃場内の指標で評価することが妥当である。

## VI 流入・流出指標および防災指標の評価

ここでは、Fig.2 の座標系での各指標について評価を行う。Fig.6 に、片田と大島・前田地区の圃場区画と、防災管理指標について考察を行うための領域を示している。ここで、防災管理指標とは、流入・流出指標を Table 1 のように整数値で置き換えたものである。また、領域については、Fig.4 (a) で考察を行った大島・前田地区の領域 1, 2 および、片田地区の領域 3, 4 として Fig.6 中に示している。Table 2 に各領域で対象となったメッシュ数と、各地点でのメッシュ間隔の違いによる防災管理指標の差を 1 メッシュあたりに換算した値について示す。ここでは、4m と 10m メッシュ、10m と 20m メッシュでのそれぞれのメッシュ間隔の違いによる検討を行った。大島・前田地区にある領域 1, 2 の方が片田地区にある領域 3, 4 より、4m と 10m メッシュ、10m と 20m メッシュいずれのケースでも防災管理指標の誤差が大きくなっている。このことから、地形によって 10m より細かい小スケールでの解析を行うことの重要性が示唆される。また、領域 2 においては、4 と 20m メッシュの防災管理指標の差が特に大きくなっている。この結果は、Fig.4 を定性的に評価してもわかることではあるが、メッシュを粗くする場合には、解析の考察に十分注意する必要があることを示している。

Table 3 に各領域の各地点におけるメッシュ間隔の違いによって、流入が流出指標に、流出が流入指標に変化したメッシュ数と、全メッシュに対する指標が変わったメッシュの割合を示している。領域 1 では、10 m ・ 20 m とともに 4m のものと指標が異なる傾向が他の領域よりあり、Fig.4 (a) からわかるように領域 1 北側の急峻な地形変化の影響を受けている可能性がある。さらに、領域 2 における 4m と 20m メッシュの間では 4m と 10m メッシュの間のケースと比較して多くのメッシュで指標が異

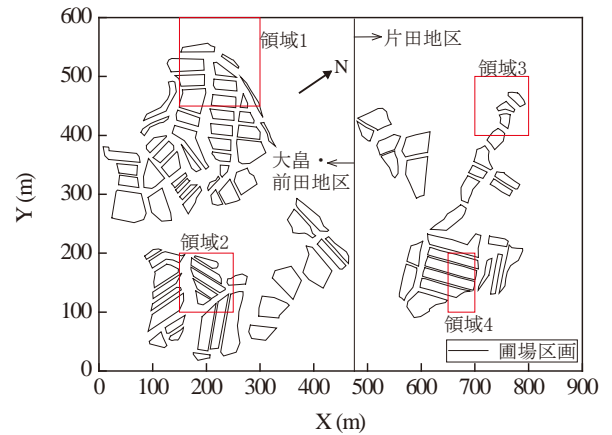


Fig.6 圃場区画と各領域  
Farm fields and each area

Table 1 流入・流出指標と防災管理指標の関係  
Relationship between seepage flow index and disaster reduction index

流入指標			流出指標		
~0.1	0.1~0.05	0.05~0.0	0.0~0.2	0.2~0.3	0.3~
↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	2	3	4	5	6
防災管理指標					

Table 2 各領域における防災管理指標の差  
Disaster reduction index in each area

	xの範囲	yの範囲	メッシュ数	4mと10mメッシュでの防災管理指標の差 (1メッシュあたり)
領域 1	150 300	450 600	493	1.998
領域 2	150 250	100 200	286	1.052
領域 3	700 800	400 500	77	0.818
領域 4	650 700	100 200	183	0.655
	xの範囲	yの範囲	メッシュ数	4mと20mメッシュでの防災管理指標の差 (1メッシュあたり)
領域 1	150 300	450 600	403	1.702
領域 2	150 250	100 200	235	3.37
領域 3	700 800	400 500	77	0.818
領域 4	650 700	100 200	183	0.721

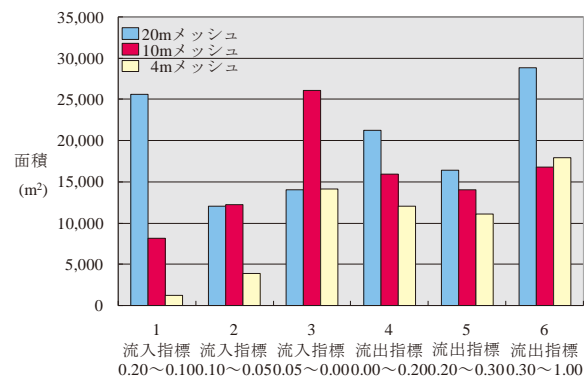
なり、粗いメッシュを使用する場合は、流入・流出指標の大小だけでなく、流入・流出の結果に関しても十分注意して評価する必要があると考えられる。その他、流出傾向が強い片田ブロックの領域では、他の領域と比べ目立った変化は見られなかった。

浸透水流動指標ごとに圃場内に含まれるメッシュ面積が、4m・10m・20mメッシュでどのように変化するかをFig.7に示している。国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル)は、現時点において多くは10mメッシュである。この数値情報に準拠して指標マップを作成するならば、当面はこのメッシュサイズでの表示を採用せざるを得ない。しかしながら、Fig.7に示す4mと10mメッシュの流入指標を比較すると、10mメッシュよりも細分化されたメッシュによる結果の変動も無視できない場合があることを示している。

圃場区画デジタルデータの処理結果では対象としたFig.6に示す全96圃場の平均圃場面積 $A_{ave}$ は834.8m<sup>2</sup>であり、等区画長は $\sqrt{A_{ave}}$  27.5mとなるが、これは正方形

**Table 3** 流入・流出指標が変化したメッシュ数とその割合  
Number and ratio of seepage flow index reversed inflow and outflow

	xの 範囲	yの 範囲	4・10mメッシュで指標が 変化したメッシュ数	左記メッシュ数
				全メッシュ数
領域 1	150	450	207	0.4198
	300	600		
領域 2	150	100	65	0.2272
	250	200		
領域 3	700	400	9	0.1168
	800	500		
領域 4	650	100	8	0.0437
	700	200		
	xの 範囲	yの 範囲	4・20mメッシュで指標が 変化したメッシュ数	左記メッシュ数
				全メッシュ数
領域 1	150	450	152	0.3771
	300	600		
領域 2	150	100	162	0.6893
	250	200		
領域 3	700	400	9	0.1168
	800	500		
領域 4	650	100	38	0.2076
	700	200		



**Fig.7** 各メッシュサイズにおける浸透水流動指標ごとの面積  
Area of seepage flow index in each mesh size

圃場を仮定した場合の圃場辺長である。実際のメッシュでは、圃場短辺長などの小スケールの要因によって解析結果が規定される可能性があり、今後、より小スケールでの地形データベース構築の重要度が高いことが明らかである。

## Ⅶ 結 言

土砂崩壊防止機能の維持・増進を目的とした浅層地下水流動(浸透)シミュレーションによる浸透水流動指標を用いて、GISを活用した防災管理マップの作成技術の検討と、メッシュサイズを変えた浸透水流動指標の定量評価を行った。平成19年10月15~16日の豪雨時(日雨量187mm, 時間雨量70mm)に山腹崩壊と溪流浸食が発生した石川県七尾市小栗町を解析対象とし、これまでに解析結果が示されている片田ブロックに加えて大島・前田ブロックの防災管理マップを示すとともに、メッシュサイズの解析結果への影響を検討した結果は以下のとおりである。

- (1) 防災管理マップの作成にGIS(ArcGIS)を活用することにより、傾斜地水田における防災管理方策を汎用的に、よりわかりやすく検討することが可能になる。
- (2) 石川県七尾市小栗地区に適用した結果、大島・前田ブロックにおける浸透水流動指標は一部を除くと浸透水の流入が卓越する傾向が見られた。この傾向は現地踏査による片田ブロックの結果と比較すると整合する。
- (3) メッシュサイズを変えた解析を実施し、10m程度のメッシュサイズでの解析でも、防災管理上での目安としての結果を与える。
- (4) 地形単元が比較的小スケールの中山間地圃場では、圃場短辺長等の小スケールの要因によって解析結果が規定される可能性があり、今後も、より小スケールメッシュサイズの地形データベースによる評価も必要性が高い。

## 参考文献

- 1) 北陸農政局農村計画部資源課(2006): 多面的機能増進調査報告書, 56-69
- 2) 川本 治, 山田康晴, 井上敬資, 正田大輔, 瀬川徳子(2010): 浅層浸透解析による傾斜地水田の防災管理指標のマップ化, 水土の知, 78(9), 7-10
- 3) 田中忠次, 川本 治(1987): 地盤・斜面崩壊の三次元有限要素法解析—動的緩和法の適用—, 農土論集, 131, 79-86

# Map of Seepage Flow Index for Paddy Fields Using GIS

SHODA Daisuke and KAWAMOTO Osamu

## Summary

Recent social and natural problem causes a high incidence of disaster damage at an agricultural community of intermountain regions. Above problem involves declining birthrate, a growing proportion of elderly people, warming temperature and so on. Control and maintenance of paddy fields have attracted attention to reduce damage of paddy fields and an agricultural community. However, relationship between control and maintenance of paddy fields and disaster reduction is not clarified adequately. In this paper, for the purpose of disaster reduction, maps of disaster reduction management are drawn up on the basis of seepage flow index calculated from seepage flow analysis in fields of Oguri town, Nanao city, Ishikawa. Influence of analysis mesh sizes, which is 4m, 10m and 20m is also considered.

Conclusions in this paper were obtained in the followings. Using GIS, results of seepage flow analysis can be used for various purposes of disaster reduction management. The seepage flow condition of analysis result matches a current state of the fields. In agricultural fields of intermountain regions, analysis mesh had better segmentalize because the analysis result may be determined by short sides of the field. However, mesh size of about 10m is currently a reasonable mesh for analysis mesh because digital elevation data is generally 10m.

**Keywords** : disaster reduction, map, seepage flow index, paddy field of intermountain region





## 物理探査手法を用いた地下水中の塩淡境界測定

石田 聡\*・吉本周平\*・小林 勤\*\*・幸田和久\*\*  
土原健雄\*・中里裕臣\*\*\*・増本隆夫\*・今泉眞之\*\*\*\*

## 目 次

I 緒 言	9	1 電気伝導度鉛直分布	13
II 調査地区の概要	10	2 地盤の見かけ導電率	13
1 地形・地質	10	3 地盤の比抵抗分布	13
2 地下水利用状況	10	V 考 察	16
III 調査方法	11	1 比抵抗分布と塩淡境界深度の関係	16
1 観測孔における地下水の電気伝導度測定	11	2 地盤の見かけ導電率の塩淡境界深度への換算	17
2 電磁探査法による地盤の導電率測定	12	VI 結 言	18
3 電気探査法による地盤の比抵抗測定	13	参考文献	18
IV 調査結果	13	Summary	20

## I 緒 言

太平洋などの海洋上の小島嶼においては水源を地下水に求めている場合が多い。近年生活水準の向上、経済発展、発展途上国の人口増加などに伴い、世界的に水需要が増加する傾向にあるが、特に小島嶼の地下水資源は、地球温暖化に伴う海面上昇によって塩水化が進むと予想される (IPCC AR4 WG2, 2007) とともに、揚水量の増加や干ばつ等による涵養量の減少の影響を受けやすい。将来的に地下水の保全および持続的な利用を図るには、島嶼における地下水の賦存形態・賦存量をまず明らかにする必要があるが、帯水層中に淡水域と塩水域が混在している場合、淡水賦存量を推定することは容易ではない。

1つの帯水層中に淡水と塩水が混在している場合、密度差によって淡水は塩水の上部に位置し、帯水層中に塩水域と淡水域の境界（ここでは塩淡境界と呼ぶ）が形成される。ある地点における淡水域の厚さは、塩水と淡水の密度差による Ghyben-Herzberg の式

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (1)$$

$z$  : 海水準以下の淡水の厚さ

$h_f$  : 海水準以上の淡水の厚さ = 地下水位標高

$\rho_f$  : 淡水の密度

$\rho_s$  : 海水の密度

より、地下水位標高に比例するとされる (Hubbert, 1940; Vacher, 1984 など)。しかし (1) 式によって塩淡境界深度を地下水位測定だけで決定するためには、長期的な測定値が必要な上、降雨や潮汐による一時的な変動を取り除く必要があるため見積りが難しく、誤った結果を導やすい (Schneider and Kruse, 2003)。このため深度毎に地下水中の塩分濃度や電気伝導度を測定できる地下水観測孔を設置して、塩淡境界を直接的に測定する方法が一般的に用いられている (Rotzoll et al., 2010 など)。また太平洋上の島嶼に多く見られる石灰岩帯水層は、水の循環と石灰岩の溶解・再結晶などによって不均質な透水性を有しており (Legrand and Stringfield, 1971)、塩淡境界深度も透水性が高い領域では浅く、低い領域で深くなるなど不規則な形状を呈していることが多い (Vacher, 1978, Ayers, 1998 など)。このため淡水厚分布形状を正確に把握するためには観測孔を数多く設置し、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、水資源賦存量の算定を難しくしている。このようなことから近年の研究では塩淡境界深度を明らかにするため、物理探査によって限られた観測孔のデータを補間する例が多く見られる。地下水中の塩淡境界深度推定には、一般に電気探査法、電磁探査法が用いられる。

地下水中の塩淡境界測定という観点から電気探査法と

\* 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム

\*\* (独)国際農林水産業研究センター農村開発調査領域

\*\*\* 施設資源部基礎地盤研究室

\*\*\*\* 農村環境部

\* 平成23年1月20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, 電気探査

電磁探査法の特徴をまとめると次のとおりである。どちらも送信コイルと受信コイルの距離（コイル間隔）、送信電極と受信電極の距離（電極間隔）を大きくするほど地下深部の導電率が測定結果に反映されるので、同じ箇所でコイル間隔、電極間隔を変化させ、浅層から深層までのデータを取得し、地盤の層構造を推定するが、電気探査法では電極間隔を任意に取れるので、多層構造の解析が可能である。これに対して電磁探査法はコイル間隔に制限がある場合が多い。例えばEM34では1箇所の層構造の解析で3つの異なるコイル間隔の測定データを用いるので、導電率と層厚を決定できる層構造は3層までである（Stewart, 1988）。また、電磁探査法は近傍に電線があると測定が難しいが、電気探査法は影響を受けない。測定の簡便さという点では、電気探査法は地盤に接地電極を打ち込む必要があるため、石灰岩地域や乾燥地では電極と地盤の接地抵抗が大きくなり測定が難しいが、電磁探査法は地盤に非接触で測定が可能なので対象地質を選ばない。また電気探査法は1箇所での測定中接地電極を何度も移動させる必要があるため、1箇所あたりの測定時間は電磁探査法に比べて長くなる。さらに電気探査法は電極が打ち込める直線状の測線を取る必要があり、障害物があると測定が難しい。島嶼の地下水を対象とした既往の研究では電磁探査法の適用例が多い。これは、塩水と淡水の導電率に大きな違いがあるため、電磁探査法でも境界を検出することが可能であること、1箇所あたりの探査時間が短いこと、広範な現場条件に対応できること等がその理由と考えられる。

電磁探査法による地下水中の塩淡境界測定では、測定間隔が異なる3点の測定データを逆解析して塩淡境界深度を求める手法が一般的に用いられてきたが、石田ら（2010）は7箇所の地下水観測孔において実測した塩淡境界深度と、電磁探査によって得られたみかけ導電率を比較し、構成地質や地下水位がほぼ等しければ1点の測定データのみで塩淡境界深度が推定できることを示した。しかしこの方法はみかけ導電率を塩淡境界深度に変換するため、複数の地下水観測孔を必要とし、塩淡境界深度を実測できる観測孔に乏しい小島嶼に適用することは難しい。このため本研究では、電気探査法と電磁探査法を併用し、電気探査法によって求めた地盤の比抵抗分布によって、電磁探査データを塩淡境界深度に換算することで、小島嶼においても効率的に地下水賦存形態の把握が可能となる手法について検討した。

本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト研究「地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発」（45150）、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（独）国際農林水産業研究センター万福裕造主任調査員、マーシャル諸島共和国資源開発省および環境保護局の各位にご協力頂いた。ここに感謝の意を表す。

## II 調査地区の概要

### 1 地形・地質

調査地が存するマーシャル諸島共和国は中部太平洋に位置する29の環礁と5つの島を有する島嶼国で、総面積は約181km<sup>2</sup>、人口は約5.5万人である。首都の存するマジュロ環礁は北緯7°東経171°に位置し、人口は約2万人（Republic of the Marshall Islands Embassy to the US, 2010）である（Fig.1）。1971～2000年における年平均降水量は3,300mm、平均気温は27.5℃であり、住民の水源は貯留した降水及び地下水である（緑資源機構, 2008）。調査地であるローラ島は面積1.8km<sup>2</sup>、平均標高数mの低平な島である。

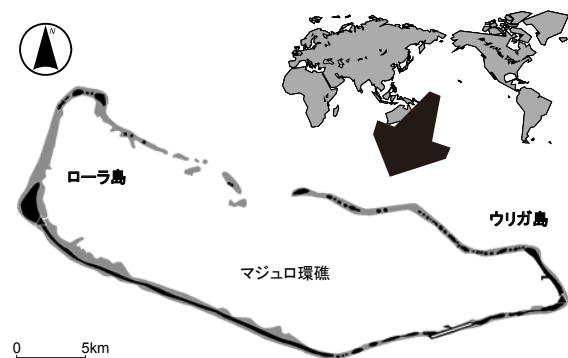


Fig.1 調査地位置図  
Location map of study area

ローラ島は全域に亘って石灰砂に覆われている（Anthony et al., 1989）。Table 1 にボーリングによって確認されたローラ島の地質層序を示す。地質は上位から層厚1.7m程の石灰砂、層厚9.7m程の礫混じり石灰砂、層厚3.6m以上の石灰砂礫が分布している（国際農林水産業研究センター, 2010）。

Table 1 ローラ島の地質層序  
Stratigraphic sequence in Laura Island

層厚	地質	記事
1.70m	石灰砂	粒子均一な細砂
9.65m	礫混じり石灰砂	礫径2～5mm
3.63m	石灰砂礫	礫径50～60mm

### 2 地下水利用状況

環礁西部に位置しているローラ島では、地下水が淡水レンズとして賦存しており、井戸及び地下水面上部に埋設された横孔（シャフト）によって取水され、パイプラインで首都マジュロが存するウリガ島に送水されてい

る。Fig.2 にローラ島における取水施設位置図を、Fig.3 に取水施設構造図をそれぞれ示す。この他に住民が補助水源として使用している小規模な農家井戸が存在するが、取水量は僅かと見込まれるのでここでは掲載していない。Presley (2005) は農家井戸における地下水中の塩分濃度測定から、淡水地下水の平面分布を明らかにしており、Fig.2 に分布域を併せて示す。ここでは淡水の定義を塩化物イオン濃度 500mg/l としているが、これは電気伝導度 200mS/m 程度に相当する。地下水は、地下水面下 0.6~0.9 m に水平に埋め込まれたシャフト(有孔管)によって取水されている。このような取水方法は淡水レンズからの取水方法として一般的である。

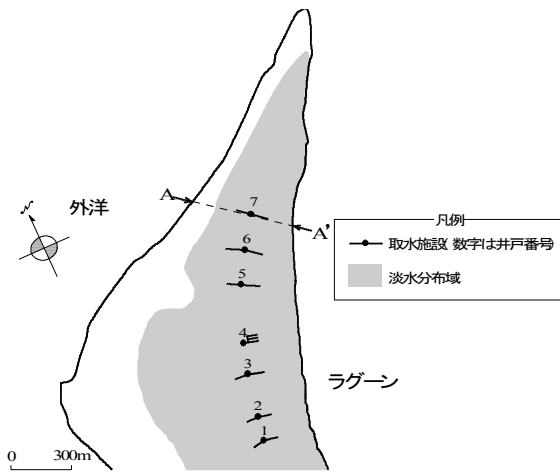


Fig.2 ローラ島における取水施設位置図(Presley(2005)に加筆)  
Water-supply well sites, and cross-section locations for the Laura area  
(retouched with Presley (2005))

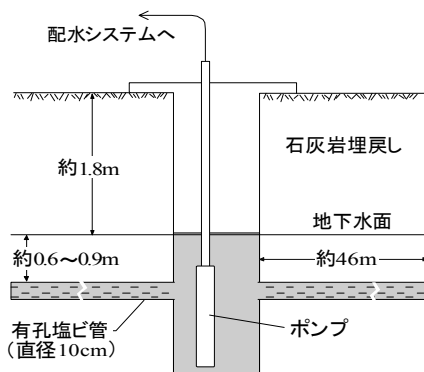


Fig.3 取水施設構造図 (Presley (2005) に加筆)  
Water-supply well construction (retouched with Presley (2005))

マジュロ環礁(以下マジュロ)において1954~2000年の間に乾季である1~4月の降水量が平年値の約30%未満であった年は1970, 1977, 1983, 1992, 1998

年の5回であり、特に1998年は、乾季の降水量が平年値の8.2%と極端な干魃であった。この年の乾季の降水量は上記期間中最低であったことに加え、その前年の6~12月の降水量が平年値の81%、直前2ヶ月では63%と少なく水不足はより深刻であった。干魃期間中の住民達の水源は、当時日本から寄贈された海水淡水化装置から得られる水と、ローラ島から取水される地下水であった。地下水取水量は施設全部で、干魃前の1995, 1996年は最大で640m<sup>3</sup>/d程度であったが、1998年1月~3月には720~840m<sup>3</sup>/dとなり、4月は1,080 m<sup>3</sup>/d、5月は970 m<sup>3</sup>/dに達し、この年の平均は810 m<sup>3</sup>/d、年間総取水量は30万 m<sup>3</sup>であった(Presley, 2005)。しかし1998年以降、データが入手できた2007年までの間、月間降水量が50mmを下回った月は2回しか出現しておらず、マジュロはここ暫くの間大きな干魃に見舞われていない。また、1999年から2006年の年間地下水取水量は平均で8.2万 m<sup>3</sup>であった(国際農林水産業研究センター, 2009)。

### III 調査方法

#### 1 観測孔における地下水の電気伝導度測定

Fig.4 に調査地点位置図を示す。測定地点の標高は概ね2m程度である。地下水観測孔は1998年の干魃時にUSGS(アメリカ地質調査所)が深度別にストレーナを持つ観測孔を設置しており、そのうち現存しているものを使用した。測定に使用した観測孔の構造をFig.5に、諸元をTable 2にそれぞれ示す。地下水の電気伝導度測定は投げ込み式電気伝導度計(ドイツWTW社製Cond315i)を用い、それぞれの観測孔のストレーナ深度にセンサーを下ろし、数値を読み取った。

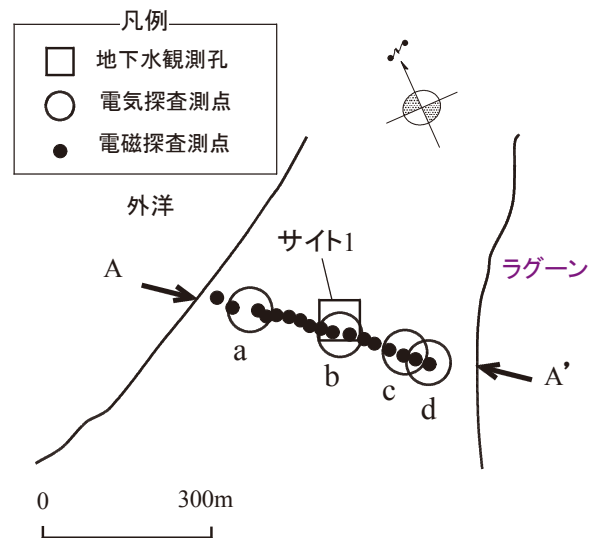


Fig.4 調査地点位置図  
Observation points

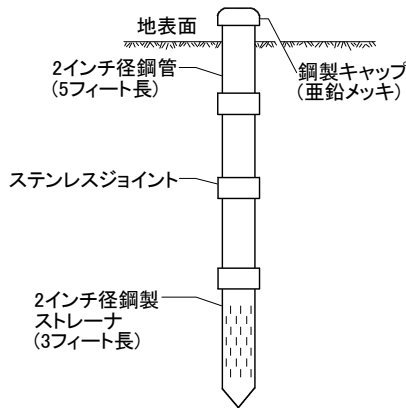


Fig.5 ローラ島における地下水観測孔構造図  
(Presley (2005) に加筆)  
Monitoring-well construction in Laura Island  
(retouched with Presley (2005))

Table 2 観測孔諸元  
Specifics of the observation holes.

箇所名	地点名	地盤標高	深度 (m)
サイト	1-33	1.95m	10.06
1	1-43	1.95m	13.11

電気伝導度の測定は2009年10月27日、及び2010年10月16日に行った。

## 2 電磁探査法による地盤の導電率測定

電磁探査法は電磁誘導現象を利用して地中の比抵抗構造を推定する物理探査法である。主な手法としては、地球磁気圏、雷放電、人工送信源などから発生する電磁場を利用するMT法 (Magneto Telluric Method)、人工送信源の電磁場を急激に変化させ、時間に対する二次磁場の変化を測定するTDEM法 (Time Domain Electromagnetic Method) などが挙げられ、比較的深い部分の地質構造の推定に用いられることが多い (物理探査学会, 1998)。これに対して深度数~数十mの比較的浅い部分の探査には、直径数十cm~1m程のコイルを送受信にそれぞれ1つつ用いるループ・ループ法、世界各地にある発信局からの長波帯の電波を信号源として用いるVLF法など、より小規模な装置が用いられる。島嶼域の地下水を対象とした既往研究では、送受信にそれぞれ直径1m程のコイルを用いるループ・ループ法の電磁探査装置であるカナダ Geonics 社製 EM-34 を用いる例が多い (Anthony, 1992, Schneider and Kruse, 2003, Ruppel et al., 2000 など)。

本研究では地下水中の塩淡境界深度分布を求めるため、ループ・ループ法による電磁探査を行った。測定地

点は、ローラ島を東西に横断する測線沿いとし (Fig.4)、使用機材は既往の研究で地下水中の塩淡境界測定に実績のあるカナダ Geonics 社製 EM34-3XL を用いた。

一般に地下水中の塩淡境界はシャープな形状を示さず、淡水と海水の間で塩分濃度が連続的に変化する汽水域が発達していることが多い。しかし電磁探査結果の解析では、地盤の導電率を複数層の水平構造とみなし、それぞれの層の導電率と厚さを未知のパラメータとして、観測結果に適合するそれぞれのパラメータを求める方法をとるので、このような連続的に濃度が遷移する汽水域を表現できない。そこで既往研究では汽水域はまとめて1層、あるいはその下の塩水域も合わせて1層と扱っている。EM34を用いた既往研究においては、いずれも地盤を地下水面より上部である不飽和帯+毛管帯、地下水面下の淡水を含む汽水域、塩水域の3層構造と仮定した解析が行われている。EM34-3は送信コイルから発する一次磁場によって地盤中に発生した二次磁場の強度を受信コイルで測定する装置であり、基礎方程式は次の式で与えられる (McNeill, 1980)。

$$H_s/H_p \approx i \omega \mu_0 \sigma s^2/4 \quad (2)$$

ここで、

$H_s$  : 受信コイルにおける二次磁場の強度

$H_p$  : 受信コイルにおける一次磁場の強度

$\omega$  :  $2\pi f$

$f$  : 周波数 (Hz)

$\mu_0$  : 空間の透磁率

$\sigma$  : 地盤の導電率 (mho/m)

$s$  : コイル間隔 (m)

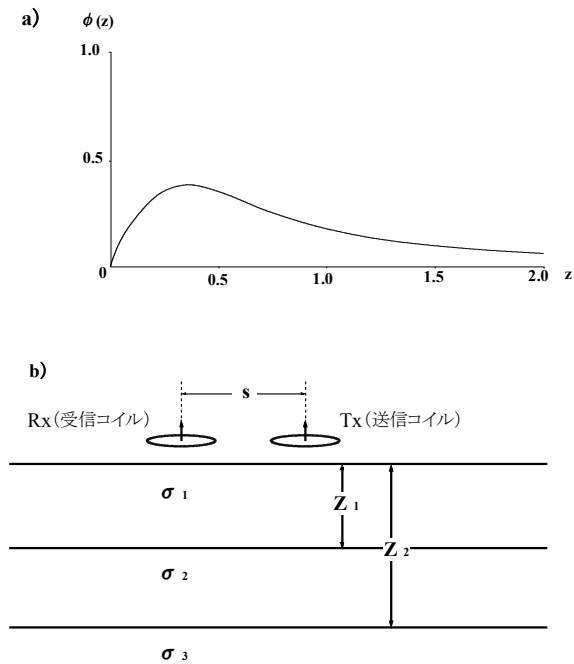
$i$  :  $\sqrt{-1}$

である。EM34-3では設定したコイル間隔によって測定した  $H_s/H_p$  より地盤の見かけ導電率、

$$\sigma_a = 4/(\omega \mu_0 s^2) (H_s/H_p) \quad (3)$$

を測定値として出力する。

ここで、深度  $z$  に存在する薄層  $dz$  が  $H_s$  に及ぼす相対的な影響度を  $\phi(z)$  とし、EM34-3における  $\phi(z)$  と  $z$  の関係を模式的に示すと (Fig.6a) のとおりとなる (McNeill, 1980)。一定深度以下では  $\phi(z)$  が深度に対して単調減少することは、浅層の導電率が深層に比べてより強く見かけ導電率に影響することを示している。



**Fig.6** a) EM34-3 の深度に対する応答特性, b) 3層構造模式図 (McNeill (1980) に加筆)  
 a) Cumulative response versus depth, b) Three layer earth model.  
 (Retouched with McNeill (1980))

**Fig.6b)** に3層構造の模式図を示す。図において、

$\sigma_1$  : 第1層の導電率

$\sigma_2$  : 第2層の導電率

$\sigma_3$  : 第3層の導電率

$z_1$  : 第1層の層厚

$z_2$  : 第1層と第2層の層厚の和

である。ここで見かけ導電率に対する  $z$  以深の地盤の影響度を  $R(z)$  とすると、

$$R(z) = \int_z^\infty \phi(z) dz \quad (4)$$

となり、見かけ導電率との関係は、

$$\sigma_a = \sigma_1 [1 - R(z_1)] + \sigma_2 [R(z_1) - R(z_2)] + \sigma_3 R(z_2) \quad (5)$$

で与えられる (McNeill, 1980)。得られる観測データはコイル間隔 10m, 20m, 40m によるそれぞれの見かけ導電率となるが、ループ・ループ法による電磁探査では、塩淡境界が地表面に近い調査地では、コイル間隔が大きくなるとデータが取得できなかつたり (Stewart, 1988)、測定した見かけ導電率が真の導電率に対応しなくなる (McNeill, 1980)。今回の調査地においてもコイル間隔 20m および 40m では測定値が安定せず、見かけ導電率が負の値を示すなどしてデータが正常に取得できなかつ

た。ここで地下水面までの深さや地質条件が殆ど同一な調査地内にあつては、(5)式における  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, z_1$  を定数と置くことができるので、単独のコイル間隔における測定値で  $z_2$  が一意的に定まると考えられる。そこで測定値を  $z_2$  に換算する式が得られれば、1通りのコイル間隔による測定によって塩淡境界深度を求めることができる。

本研究では送信コイルと受信コイルの間隔 10m の垂直ダイポールモードで電磁探査を行い、地盤の見かけ導電率を求めた。また電磁探査測定地点の標高は水準測量によって求めた。これらの電磁探査は 2009 年 10 月 22 日に実施し 5 回の測定の実験値を取った。1 地点あたりの測定時間はコイルの移動時間を含めて 5 分程度であった。

### 3 電気探査法による地盤の比抵抗測定

電気探査法は地中に電流を流し、その応答電位を測定して地盤の比抵抗構造を推定する物理探査法であり、地下水を対象とした研究では調査地点の比抵抗の層状構造を推定する垂直探査法が主に用いられている。例えば Jacobson et al. (1997) はナウル共和国ナウル島において電気探査法による垂直探査を行い、測定結果から推定した比抵抗鉛直分布より、不飽和帯の地質構造、石灰岩帯水層中の淡水域、汽水域、塩水域の厚さを推定している。また Birgit and Luis (1996) はメキシコ国ユカタン半島北西部において電気探査法による垂直探査を行い、測定結果より推定した比抵抗鉛直分布より、塩淡境界深度、帯水層の空洞を充填している粘土、セノーテ (石灰岩地帯の陥没穴) の分布を推定している。

本研究では測定機器としてアメリカ Advanced Geosciences Limited 社製 Sting R1 を使い、ウェンナー法により原則として電極間隔を 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32m, 電流値 10mA にて垂直探査を行った。測線の方向は Fig.4 に示す A-A' 方向とした。これらの電気探査は 2010 年 10 月 21 日に実施し、1 地点あたりの測定時間は移動時間等を含めて 1.5 時間程度であった。

電磁探査結果の校正のために電気探査を実施した箇所は、既往研究から淡水が存在しないとされる地点 (地点 a)、測線近傍の観測孔であるサイト 1 (地点 b)、淡水が存在すると予想される地点 c、地点 d の計 4 箇所である。

電気探査結果解析には、非線形最小二乗法による一次元逆解析ソフト、アメリカ Interpex Limited 社製 IX1D (v3.42) を用いた。解析条件は 24 層構造、最大解析深度 32m の多層モデルとし、汽水域を表現するため、層ごとの比抵抗の変化が滑らかであると仮定するオッカムの逆解析 (解析例: DeGroot-Hedlin and Constable, 1993 など) によって比抵抗の層状構造を求めた。

### IV 調査結果

#### 1 電気伝導度鉛直分布

**Table 3** に地下水観測孔における電気伝導度測定結果を示す。本報では白旗・長田 (2009) を参考に、電気伝導度 200mS/m 以下の地下水を淡水と呼ぶ。なお、2009 年 10 月 27 日の測定において 1-43 地点の蓋が開かず、測定することが出来なかった。2009 年の測定では電気伝導度が 1-33 で 207mS/m であった。2010 年の測定では、電気伝導度が 1-33 で 101mS/m, 1-43 で 833mS/m であり、深度による差が見られた。また 1-33 においては 2010 年の方が 2009 年より低い値を示した。

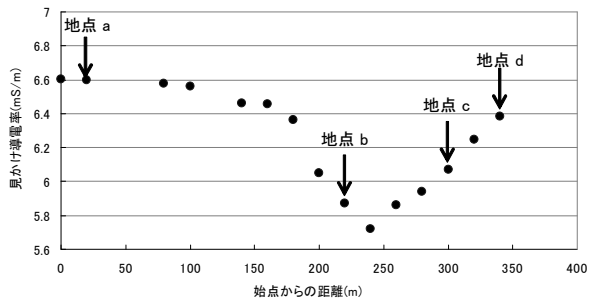
**Table 3** 地下水中の電気伝導度測定結果  
Electric conductivities of groundwater.

地点名	深度 (m)	電気伝導度 (mS/m)	
		2009/10/27	2010/10/16
1-33	10.06	207	101
1-43	13.11	—	833

#### 2 地盤の見かけ導電率

**Fig.7** に電磁探査によって測定した地盤の見かけ導電率測定結果を示す。図の始点は測線上の最も外洋に近い西端の測点としている。

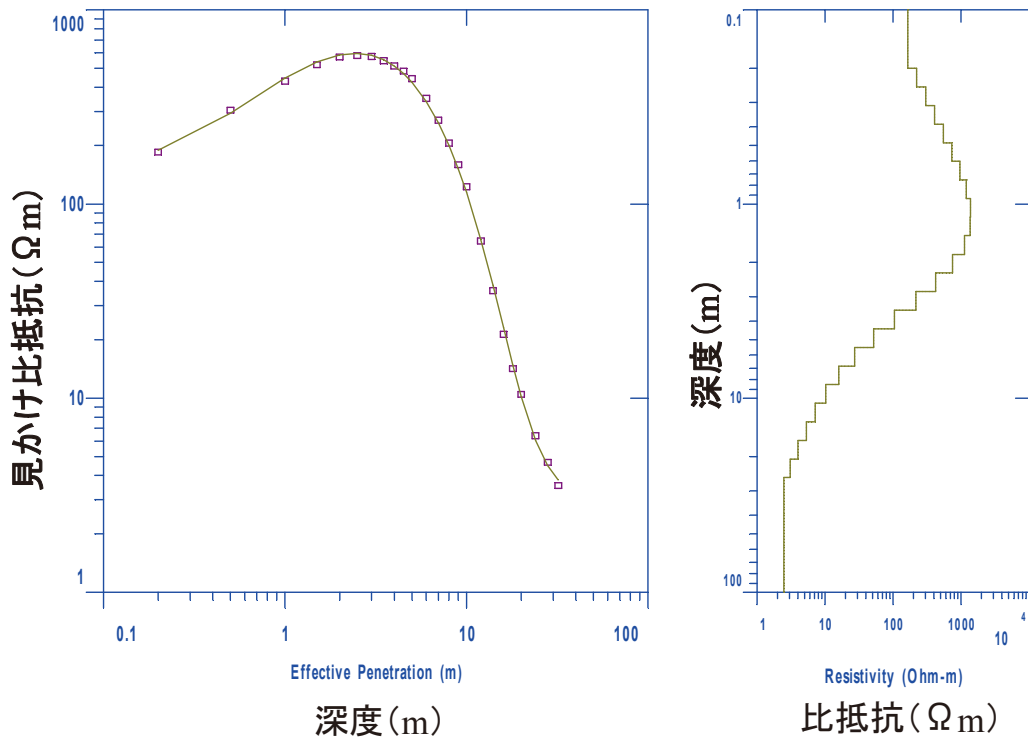
地盤の見かけ導電率は 5.7~6.6mS/m の範囲内にあり、外洋側で高くラグーン側に向けて徐々に低くなるが、始点から 240m 地点を過ぎると逆にラグーン側の方が高くなる傾向にある。



**Fig.7** 見かけ導電率測定結果  
Terrain conductivities of measurement points

#### 3 地盤の比抵抗分布

**Fig.8 ~ 11** に電気探査によって測定した地盤の見かけ比抵抗と逆解析によって求めた比抵抗の層状分布を示す。



**Fig.8** 電気探査測定結果 (地点 a)  
Result of DC measurement at poin a

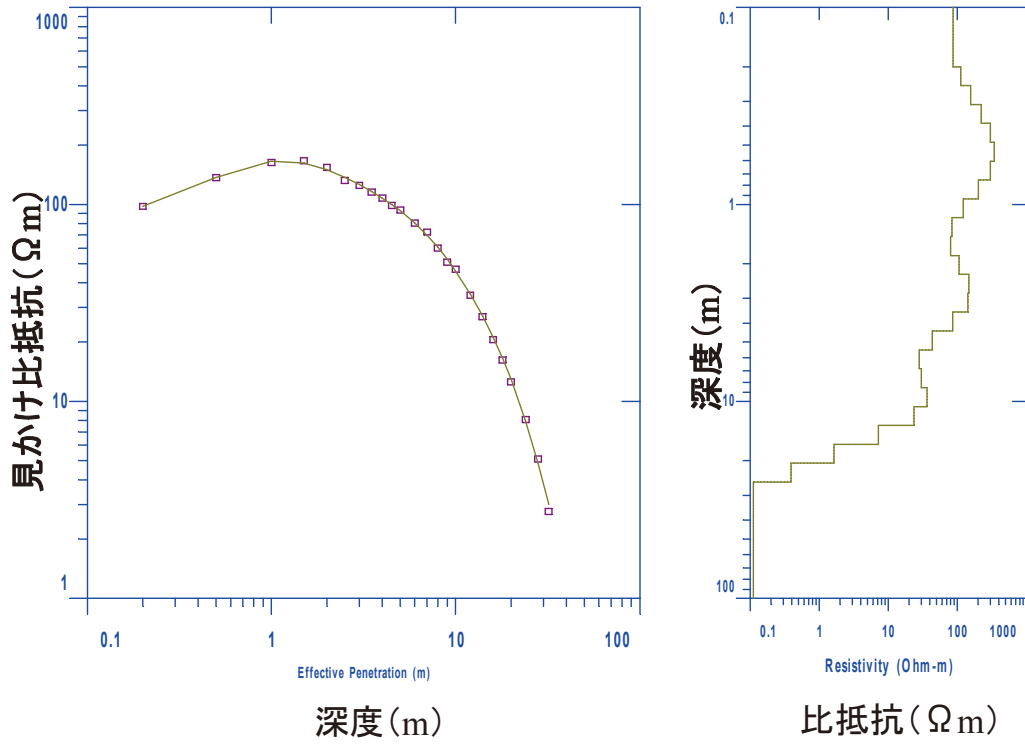


Fig.9 電気探査測定結果 (地点 b)  
Result of DC measurement at poin b

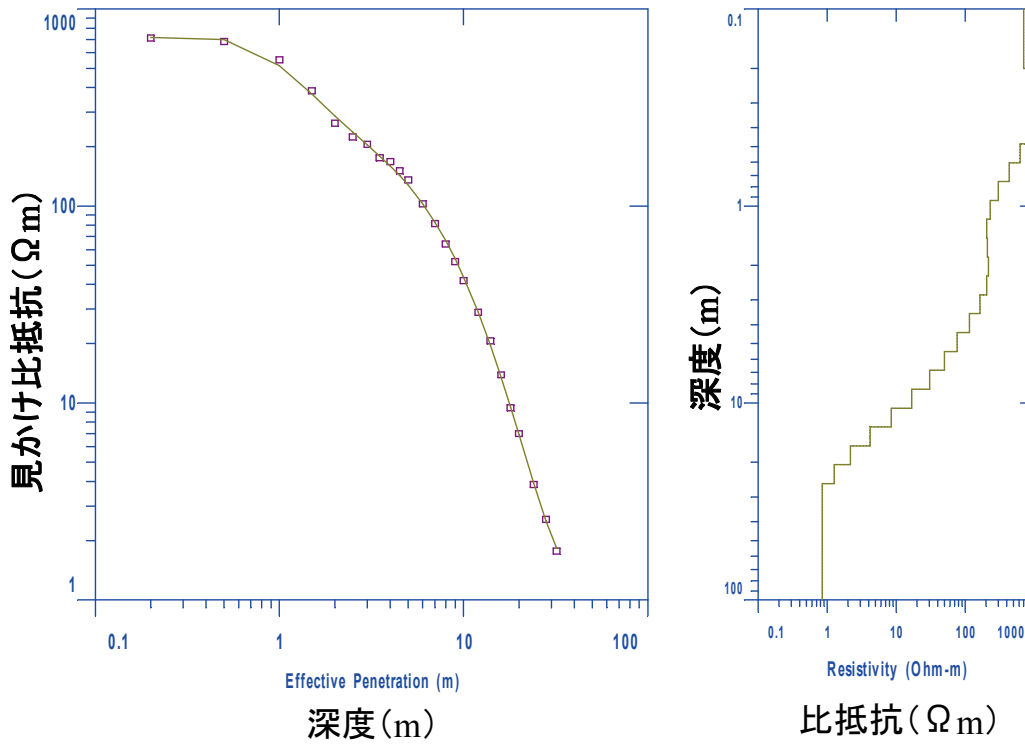


Fig.10 電気探査測定結果 (地点 c)  
Result of DC measurement at poin c

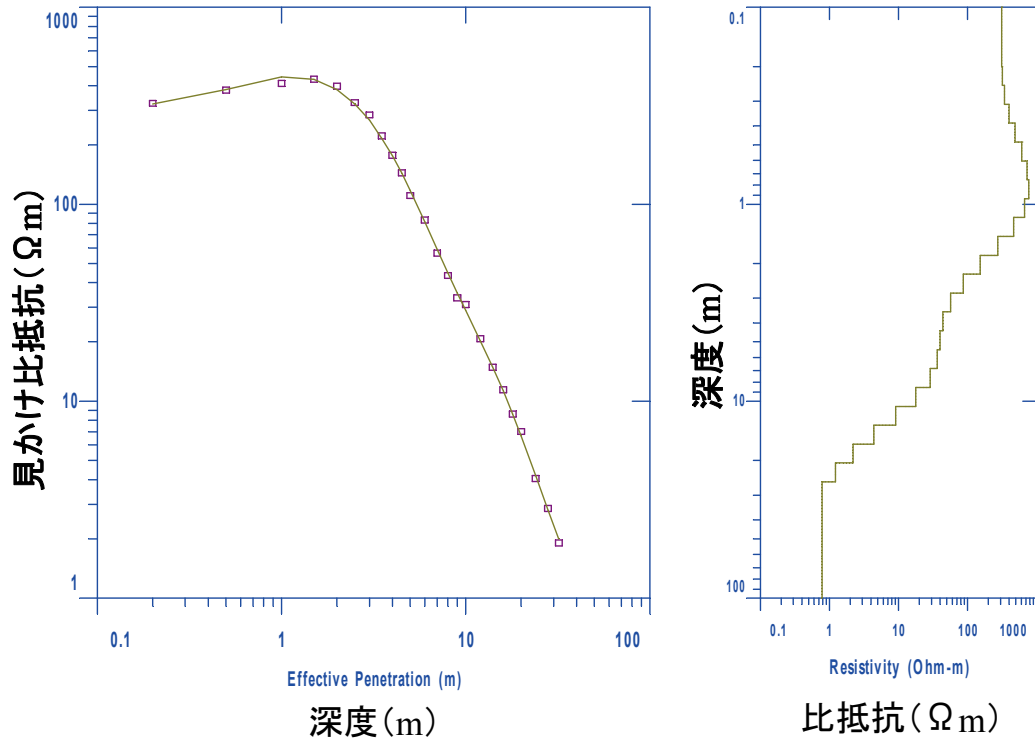


Fig.11 電気探査測定結果 (地点 d)  
Result of DC measurement at poin d

4 地点に共通する特徴は、深度 1m 前後に極大値が存在することで、これは表土とその下の石灰岩との比抵抗の差によると考えられる。最も外洋寄りの地点 a では深度 1m 付近で最大の比抵抗を示した後、深度 20m まで単調減少した。これに対し、島の中央よりの地点 b は深度 10m 付近に極大値を持っている点で地点 a とは異なっていた。また地点 b よりラグーン側の地点 c, d でも、深度 1m 以下に、深度-比抵抗曲線の形状が凸状となる領域が存在する点で、地点 a とは異なった。地点 b, c, d に見られる標高 0m 以深の極大値または凸状の比抵抗深度分布は、淡水地下水の存在に起因していると考えられる。

## V 考察

### 1 比抵抗分布と塩淡境界深度の関係

Table 4 に地点 b (サイト 1) で行われた電気探査解析結果を示す。

Table 3 よりサイト 1 の 2010 年地下水観測時における塩淡境界深度は、10.06m と 13.11m の間である。ここでサイト 1 の深度 10.06m と 13.11m の間で電気伝導度が深度に対して直線的に変化すると仮定すると、塩淡境界深度 (本報では地下水の電気伝導度 200mS/m の深度と定義する) は 10.5m、標高 -8.52m となる。

Table 4 地点 b における電気探査解析結果。  
Result of DC measurement analysis at point b

レイヤー No.	比抵抗 (Ωm)	層厚 (m)	深度 (m)	標高 (m)
1	86.8	0.20	0.20	1.75
2	111.6	0.05	0.25	1.70
3	155.1	0.06	0.31	1.64
4	222.3	0.08	0.39	1.56
5	301.4	0.09	0.49	1.46
6	343.5	0.13	0.61	1.34
7	299.5	0.14	0.75	1.20
8	201.5	0.19	0.95	1.00
9	121.9	0.2	1.2	0.8
10	83.5	0.3	1.5	0.5
11	79.9	0.4	1.8	0.1
12	106	0.4	2.3	-0.3
13	146.1	0.6	2.8	-0.9
14	142.1	0.7	3.5	-1.6
15	86.1	0.9	4.4	-2.4
16	43.1	1.1	5.5	-3.5
17	28	1.4	6.8	-4.9
18	30.1	1.7	8.5	-6.6
19	36.5	2.1	10.6	-8.7
20	23.6	2.6	13.2	-11.3
21	7.2	3.3	16.5	-14.6
22	1.6	4.1	20.6	-18.6
23	0.4	5.1	25.7	-23.7
24	0.1			

\* 各レイヤー No.の行の深度及び標高はその下位のレイヤーとの境界面の位置を表す



ここで帯水層（水で飽和した堆積岩）の導電性に及ぼす間隙水の影響についてはアーチーの経験式、

$$\sigma_{eff} = C \sigma_{fluid} \cdot \phi^m \quad (6)$$

$\sigma_{eff}$  : 帯水層の電気伝導度  
 $\sigma_{fluid}$  : 地下水の電気伝導度  
 $C, m$  : 岩相による定数  
 $\phi$  : 間隙率

より、帯水層が均質であれば地下水の電気伝導度により決定される(物理探査学会, 1989)。よって電気探査によって求められた地下水表面以下の比抵抗値は地下水中の電気伝導度に換算できると考えられる。Table 4 より、この標高に対応するレイヤー No. は 19 である。Fig.9 に示すとおり、解析上の比抵抗構造は階段状であるが、実際には深度に対して電気伝導度が連続的に変化していると考えられるので、Fig.12 に示すように、レイヤー 19 とレイヤー 20 を直線近似して、地下水の塩淡境界深度に対応する比抵抗値を求めると 31.3 Ω m であった。

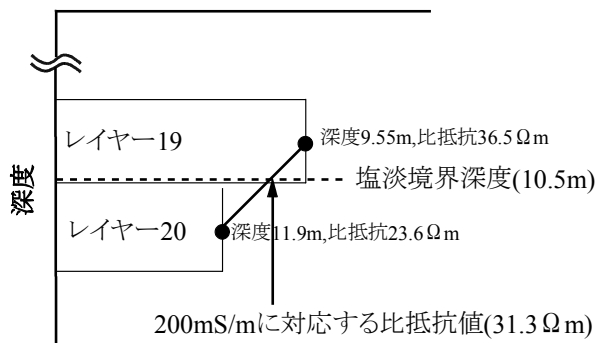


Fig.12 200mS/m に対応する比抵抗値の推定  
 Estimate of electric resistivity corresponding to 200mS/m

Fig.10, Fig.11 に示す解析結果より、比抵抗値が 31.3 Ω m となる深度を地点 c, 地点 d について求めるとそれぞれ 8.1m, 7.2m, 標高は -5.2m, -4.0m であり、この値が各地点の塩淡境界深度・標高であると考えられる。

## 2 地盤の見かけ導電率の塩淡境界深度への換算

Fig.7 に示す地点 a, b, c, d に対応する、電磁探査によって測定された地盤の見かけ導電率はそれぞれ、6.60, 5.87, 6.07, 6.39mS/m であった。これより、1 で求めた塩淡境界深度と見かけ導電率の関係は Fig.13 に示すとおりである。淡水が存在しない地点 a は塩淡境界深度として測定地点の標高値を与えている。

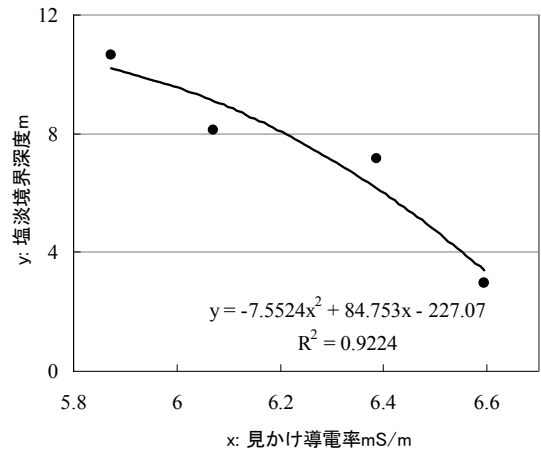


Fig.13 見かけ導電率と塩淡境界深度の関係  
 Estimate of electric resistivity corresponding to 200mS/m

Fig.13 において近似曲線を求めると、

$$y = -7.5524 x^2 + 84.753x - 227.07 \quad (7)$$

x : 見かけ導電率 (mS/m), y : 塩淡境界深度 (m)

となる。

(7) 式を用いて Fig.7 に示す見かけ導電率を塩淡境界深度に換算すると、それぞれの測定地点の塩淡境界標高は -0.3 ~ -8.4m の範囲となった。求めた塩淡境界標高より推定塩淡境界線を引いた断面図を Fig.14 に示す。

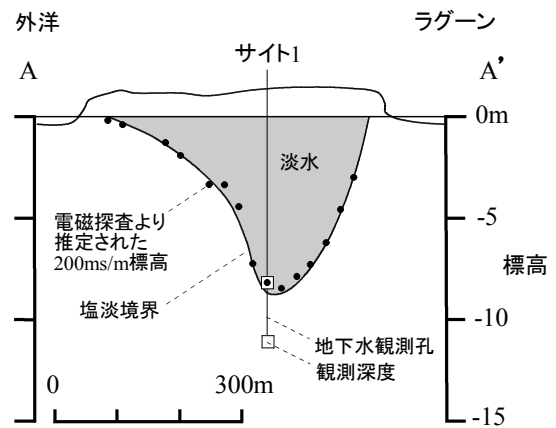


Fig.14 塩淡境界分布断面図  
 Section of boundary between firefreshwater and saltwater.

Fig.14 に示す塩淡境界は、2010 年の地下水観測・電気探査結果を基に、2009 年の電磁探査結果を塩淡境界標高に換算しているため、Table 3 に示す 1-33 孔の電気伝導度の違いから、実際より塩淡境界をやや深く推定している可能性がある。しかし、仮に 2009 年における 1-43 孔の測定値が 2010 年と同じ 833mS/m であったとす

ると、2009年と2010年の塩淡境界深度の違いは40cm～50cm程度なので、全体的な傾向は示されていると考えられる。Fig.14より淡水域は島の中央部で厚くなっており、その中心はややラグーン側に寄っている。また、ラグーン側に近い観測点においては、塩淡境界深度がラグーンに近づくにつれて急激に上昇している。

Anthony et al. (1989)によると1985年の淡水レンズ賦存量は約200万 $m^3$ と見積もられている。一方、ローラ島では蒸発散データは蓄積されていないが、グアム、ジョンストン、ヤップ島など、周辺の島での観測結果から概ね50%であるとされている(Hamlin and Anthony, 1987)。これよりローラ島の地下水かん養率を50%とすると、この10年間のかん養量は淡水地下水賦存量の約14倍である。これに対して取水量はかん養量の3%程度であることから、局所的な塩水浸入を起こさないような揚水方法をとれば、より多くの地下水を利用できる可能性がある。そのためには、複数の淡水レンズ断面からローラ島全体の淡水地下水賦存形態を明らかにする必要がある。

以上より、電磁探査によって得られた見かけ導電率を、地下水観測および電気探査によって塩淡境界深度に換算する手法により、地下水の淡水域の断面形状の推定が可能となることが示された。本研究で用いた手法は、地下水観測孔が乏しく塩淡境界を直接的に測定することが難しい現場においても、測定が容易な電磁探査を主とするため、地下水賦存量の推定のための迅速で有効な調査法であると考えられる。ただし、今回は不飽和帯の厚さが2m程度と比較的小さい条件での測定結果であることに留意する必要がある。不飽和帯の厚さが10mを超える隆起石灰岩地域においては、見かけ導電率が地下水測定によって求めた塩淡境界深度と高い相関を持つことは石田ら(2010)によって示されているが、電気探査によって塩淡境界深度が推定可能かどうかについては未知数である。また沿岸部については潮汐の影響も評価する必要があり、今後の研究課題としたい。

## VI 結 言

本研究ではマーシャル諸島共和国マジュロ環礁ローラ島を調査地として、観測孔における地下水の電気伝導度測定、垂直電気探査による地盤の比抵抗測定、ループ・ループ法電磁探査による地盤の導電率測定を行った。

観測孔における地下水の電気伝導度測定は1箇所×2深度で行い、2010年の測定では電気伝導度200mS/mの深度が10.5m、標高-8.52mと推定された。4箇所で行った電気探査結果より、電気伝導度200mS/m以下の淡水域が発達している箇所では、標高-数mに比抵抗の極大値が存在した。地下水の電気伝導度測定結果と、同地点で行われた電気探査の比抵抗分布を対比すると、比抵抗値31.3 $\Omega m$ が地下水の電気伝導度200mS/mの位

置に相当した。この結果をもとに、他の2地点において、電気探査によって求められた比抵抗分布より電気伝導度200mS/m深度を推定した。以上によって得られた3箇所の電気伝導度200mS/m深度と、同地点で行われた電磁探査による見かけ導電率を比較し、両者に正の相関があることを確認し、近似式を求めた。求めた近似式より、他の地点で行われた電磁探査によって得られた見かけ導電率を、電気伝導度200mS/m深度に換算し、淡水地下水分布断面図を作成した。地下水の塩淡境界は外洋側で浅く、ラグーン側で深くなっており、既往の研究と整合的であった。

以上より、地下水の電気伝導度測定および電気探査によって、電磁探査結果を塩淡境界深度に換算する手法によって、淡水地下水の分布状況が推定可能であることが示された。

## 参考文献

- 1) Anthony S.S., 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), 1066-1075
- 2) Anthony, S.S. (1992): Electromagnetic methods for mapping freshwater lenses on Micronesian atoll islands, *Journal of Hydrology*, **137**(1-4), 99-111.
- 3) Ayers, J.F. (1998): Groundwater flow dynamics beneath atoll islands, IAHS-AISH Publication, **253**, 397-404
- 4) Birgit Steinich and Luis E. Marin (1996): Hydrogeological Investigations in Northwestern Yucatan, Mexico, Using Resistivity Surveys, *Groundwater*, **34**(4), 577-759
- 5) 物理探査学会(1989): 図解物理探査, 物理探査学会, 231
- 6) 物理探査学会(1998): 物理探査ハンドブック手法編, 物理探査学会, 297-298
- 7) DeGroot-Hedlin, C. and Constable S. (1993): Occam's Inversion and the North American Central Plains Electrical Anomaly, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 985-999
- 8) Hamlin S.N. and Anthony S.S. (1987): Ground-water resources of the Laura area, Majuro Atoll, Marshall Islands, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4047, 69
- 9) Hubbert, M.K. (1940): The theory of groundwater motion, *Journal of Geology*, **48**, 785-944
- 10) Intergovernmental Panel of Climate Change Working Group 2 (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change 2007, **689**
- 11) 石田聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・増本隆夫・今泉眞之(2010): 沖縄県多良間島における淡水レンズ形状, 農村工学研究所技報, 210, 1-9

- 12) Jacobson, G., Hill, P.J., Ghassemi, F. (1997): Geology and hydrogeology of Nauru Island., In : Vacher, H.L., Quinn, T. (Eds.), *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands*, Elsevier, 707-743
- 13) 国際農林水産業研究センター (2009) : 平成 20 年度環礁島水資源利用プロジェクト報告書—マーシャル諸島共和国—, 65, 99-101
- 14) 国際農林水産業研究センター (2010) : 平成 21 年度環礁島水資源利用プロジェクト報告書—マーシャル諸島共和国—, 付 12
- 15) LeGrand, H.E. and Stringfield, V.T. (1971): Tertiary limestone aquifer system in the southeastern states, *Economic Geology*, **66**(5), 701-709
- 16) McNeill J.D. (1980): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, Geonics Limited Technical Note, TN-6, 6
- 17) 緑資源機構 (2008) : 平成 19 年度循環型水資源有効利用検討調査事業報告書—マーシャル諸島共和国—, xii
- 18) Presley K.T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5098, 1-40
- 19) Republic of the Marshall Islands Embassy to the US (2010): Geography, <http://www.rmiembassyus.org/index.htm>
- 20) Ruppel C., Schultz G. and Kruse S. (2000): Anomalous Fresh Water Lens Morphology on a Strip Barrier Island, *Groundwater*, **38**(6), 872-881
- 21) Rotzoll, K., Oki, S.D., El-Kadi, I.A. (2010): Changes of freshwater-lens thickness in basaltic island aquifers overlain by thick coastal sediments, *Hydrogeology Journal*, Online, DOI 10.1007/s10040-010-0602-4
- 22) 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**, 235-296
- 23) 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), 620
- 24) Stewart, M. (1988): Electromagnetic Mapping of Fresh-Water Lenses on Small Oceanic Islands, *Groundwater*, **26**(2), 187-191
- 25) Vacher, H.L. (1978): Hydrogeology of Bermuda—Significance of an across-the-island variation in permeability, *Journal of Hydrology*, **39**(3-4), 207-226
- 26) Vacher, H.L. (1984): Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses, *Geological Society of America Bulletin*, **100**(4), 580-591

# Measurement of Freshwater-Saltwater Interface Depths Using Geophysical Prospectings

ISHIDA Satoshi, YOSHIMOTO Shuhei, KOBAYASHI Tsutomu, KODA Kazuhisa, TSUCHIHARA Takeo, NAKAZATO Hiroomi, MASUMOTO Takao and IMAIZUMI Masayuki

## Summary

Electric conductivity of groundwater was measured in two wells on Laura Island, Majuro atoll, Republic of the Marshall Island to clarify the distribution of the fresh groundwater. In addition, electric underground conductivity was measured by electromagnetic surveys at 18 points, and underground resistivity was measured by DC resistivity soundings at 4 points. Underground conductivities measured by electromagnetic surveys were converted into the freshwater-saltwater interface depths by results of groundwater electric conductivity measurements and DC resistivity soundings. As a result, it was clarified that the maximum thickness of the fresh water lens (electric conductivity less than 200 mS/m) was 8 m or more at the survey line. The shape of the freshwater lens resemble those shown in the foregone studies. This result shows that the measurement method which combines electromagnetic survey with DC resistivity sounding are useful to measure the thickness of a freshwater lens.

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

# 水質及び同位体分布特性からみた水田主体扇状地における 地下水涵養源の分類

土原健雄\*・吉本周平\*・石田 聡\*・今泉眞之\*\*

## 目 次

I 緒 言	21	IV 結 果	25
II 調査地概要	22	1 地下水の水質組成	25
1 地 形	22	2 水素・酸素安定同位体比分布	25
2 地 質	22	3 放射性同位体分布	28
3 地下水利用	22	V 考 察	30
III 研究方法	23	1 浅層地下水の涵養源の分類	30
1 採水地点	23	2 浅層地下水と深層地下水の差異	31
2 水質及び同位体分析	23	VI 結 言	32
3 動的同位体分別を考慮した蒸発線の推定	24	参考文献	32
4 地下水年代の補正	24	Summary	34

## I 緒 言

日本の低地全体の半分強(54%)を占める扇状地は、我が国の広大な水田農業地帯を形成しており(瀬戸, 1986)、また扇状地を有する流域のうち集水面積が200km<sup>2</sup>を越えるものは72に及ぶ(斉藤, 1988)。扇状地ではその地形を利用し、扇頂部で取水された河川水をネットワーク状に広がるかんがい用水路を通じて水田に供給するとともに、かんがいされた用水は水田から地下水を涵養している。扇状地内の地下水の流動機構については環境同位体や希ガスをトレーサーとした研究があるが(例えば、井川ら, 2005; Althaus et al., 2009)、地表水の量、帯水層への涵養量、地下水の流動速度、被圧地下水の被圧度等においては地域的な差異が大きく(嶋田, 1998)、また時期により異なる農業用水利用は、扇状地において複雑な地表水と地下水の交流現象を生じさせている(例えば、土原ら, 2009)。特に農業用水利用に伴う地下水涵養量の変化、河川への地下水の流出、伏流といった現象、地下水質の形成メカニズムについては十分に解明されているとはいえず、実証的な調査・研究例が不足しているのが現状である。

地下水位の低下や水質の悪化といったこれまでの地下水資源管理の問題に加え、気候変動への適応という新たな問題がある。気候変動に伴う降水量、降水パターン、蒸発散量の変化は、地下水の涵養能の変化として、特に浅層の不圧地下水に影響を及ぼすと考えられる。さらに、降水の地域的・時間的変動性が強くなることにより、地表水利用の不確実性が増大し、予備的な淡水資源として相対的に地下水利用への依存が増大する可能性が指摘されている(IGES, 2008)。しかし、地下水についての気候変動による影響評価への関心は地表水と比較して低く(Kundzewicz et al., 2007)、特に浅層の不圧地下水と地表水との交流現象に関する研究はほとんど行われていない(Okkonen et al., 2010)。農業農村地域において、今後の気候変動に適応した適正な地下水資源管理を実施していくためには、水田かんがいを考慮した浅層地下水の涵養-流動-流出特性を定量的に評価する必要がある。

一般的に扇状地は、土石流の砂礫により形成される「土石流涵養型扇状地」と洪水時に運搬される掃流砂礫によって形成される「掃流砂礫堆積型扇状地」に分類され、前者は比較的小規模であり、後者は大扇状地を形成する(斉藤, 1988)。本研究で対象とした手取川扇状地(石川県)は掃流砂礫堆積型の典型例の1つであり、流路を放射状に移動しながら掃流砂礫を厚く堆積させた扇状地である。手取川扇状地では、水田を中心とした農業地帯が広がるとともに、農業用に加え、工業用・水道用としての地下水取水が行われている。近年、手取川扇状地における地下水揚水量は減少傾向にあるが、都市化・水田

\* 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23年1月18日受理

キーワード：扇状地、環境同位体、水田、地下水、涵養源、河川浸透

面積減少に伴う地下水涵養量の減少、また地下水位低下に伴う深層地下水利用の増加が問題として顕在化している。このため、地表水から地下水への水循環を正確に把握した上で、扇状地における地下水保全の手法を検討する必要があるといえる。これより、本研究では、水田農業が主体の手取川扇状地内の地表水・地下水の水質及び同位体（主要イオン、酸素・水素同位体比、放射性同位体であるトリチウム、放射性炭素）の分布特性を示し、浅層地下水の涵養源の分類を行う。また、それら水質及び同位体分布特性から扇状地の浅層地下水と深層地下水の差異を明らかにする。

なお、本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発」及び石川県委託研究「農業用水を核とした健全な水循環に関する研究」の支援を受けて実施された。ここに記して深謝の意を表す。

## II 調査地概要

### 1 地形

手取川扇状地は、白山市鶴来を扇頂部として金沢市南から能美市根上にかけて広がり、扇面面積は191km<sup>2</sup>、手取川の集水域は750km<sup>2</sup>に及ぶ。扇頂部で取水された手取川の河川水は、扇頂部から扇端部にかけて樹枝状に広がる用水路を通じて、水田にかんがい用水として供給される。扇状地主部の地表面標高は同心円状を呈し、扇頂部の標高約90m、扇端部の標高約5m、勾配は扇頂部から扇中央部にかけて1/130、扇端部で1/200である。扇頂部を中心に扇状地を4つに分割した場合（Fig.1中のzone 1～4）の土地利用割合はTable 1となる（国土数値情報土地利用細分メッシュ2006年度より作成）。zone 1～3の土地利用は水田が卓越するのに対し、都市部に近いzone 4は水田面積の割合が減少し、相対的に建物用地の割合が増加する。

### 2 地質

扇頂部にあたる白山市鶴来付近の山地は、第三紀中新世の火山岩類・同火砕岩類（緑色凝灰岩及び流紋岩類）から構成され、本扇状地区の基盤を形成している。扇状地の右岸丘陵は、鮮新統の大桑砂岩層及び下部洪積統の卯辰山層が分布する（北陸農政局計画部、1977）。扇状地砂礫層は、周辺の丘陵地の地層と断層によってできた沈降帯に形成された。すなわち、卯辰山層堆積後10万年より前の構造運動によって、東縁丘陵部と南縁丘陵部との境に断層ができ、ここに手取川による砂礫層が堆積し始め、基盤の沈降運動が継続して卯辰山層の上に厚い扇状地砂礫層が形成された（渡辺、2002）。扇中央部付近での砂礫層の厚さは130m以上を有する。Table 2に第四紀地質層序、Fig.2に地質断面図を示す。ここでは、北陸農政局計画部（1977）の区分に従い、扇状地堆積層

を上部と下部に分け、上部を沖積統AG(f)層、下部を上部洪積統相当のDG(f)層とした。洪積統は、上位より砂礫層からなるDG<sub>1</sub>層（扇状地堆積物として性質の強いものはDG(f)層）、粘土層からなるDC<sub>1</sub>層、砂礫層からなるDG<sub>2</sub>層、粘土層からなるDC<sub>2</sub>層、砂礫・粘土の互層からなるD-T層に分けられる。AG(f)層は20～30mの層厚で、DG(f)層より粗粒礫が多く透水性も大きいようである（北陸農政局計画部、1977）。本研究では、渡辺（2002）の区分に従い、AG(f)層を第一帯水層、DG(f)層を第二帯水層、D-T層を第三帯水層とする。地下水は時期により上下するが第一、二帯水層中に現れている。ここでは第一、二帯水層中の地下水を浅層地下水、第三帯水層中の地下水を深層地下水とする。

### 3 地下水利用

石川県環境部水環境創造課（2007）によれば、手取川扇状地に含まれる4市2町（金沢市、小松市、白山市、能美市、川北町、野々市町）の2005年度の地下水揚水量は1億1,190万m<sup>3</sup>であった。内訳は工業用が51.4%で最も多く、水道用31.5%、消雪用8.9%、農業用4.9%、建築物用3.3%であり、農業用は4～8月、消雪用は12～3月に揚水量が増加する。

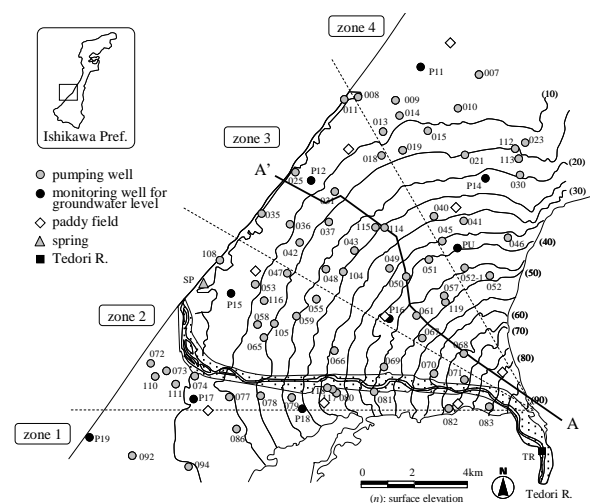


Fig.1 手取川扇状地及び調査地点位置図

Location map of the Tedori River fan and observation points

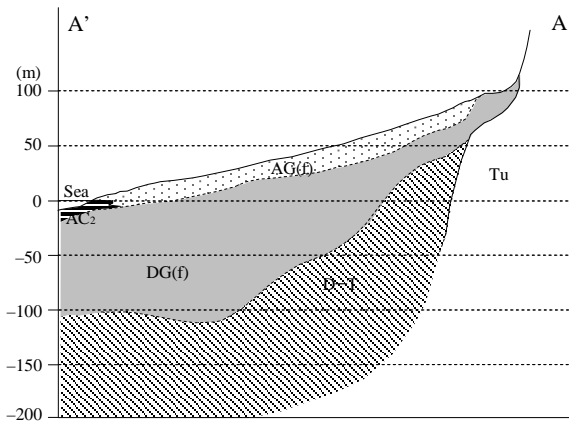
Table 1 各ゾーンの土地利用割合  
Land use ratio in each zone

zone	1	2	3	4
水田	56.3	64.2	68.2	33.2
その他農地	0.4	0.5	0.9	3.6
森林	6.4	1.2	0.3	2.0
建物用地	28.7	17.0	23.6	50.9
水面	1.3	10.6	0.4	0.7
その他	7.0	6.5	6.6	9.6

(単位：%)

**Table 2** 地質層序（北陸農政局計画部（1977）より抜粋）  
Geological stratigraphy

時代	地形面区分	水理地質区分
沖積世	砂丘	砂丘砂Ad
	潟埋積層	上部層（粘土AC <sub>1</sub> ） 下部層（砂As, 粘土AC <sub>2</sub> ）
	扇状地	扇状地砂礫層AG(f), 砂礫層（AG）
洪積後期	上部洪積統（低位段丘）	砂礫層DG <sub>1</sub> 扇状地性礫層DG(f)
	上部洪積統（中位段丘）	粘土層DC <sub>1</sub> 砂礫層DG <sub>2</sub>
洪積中期	中部洪積統（高位段丘）	粘土層DC <sub>2</sub>
洪積前期	下部洪積統堆積層	砂礫・粘土互層（D-T）
基盤	丘陵	鮮新統Tu
	山地	



**Fig.2** 地質断面図（A-A'）（北陸農政局計画部，1977）  
Geological cross section A-A'

### III 研究方法

#### 1 採水地点

手取川扇状地及びその後背流域において、主要イオン、水素・酸素安定同位体比、トリチウム (T, <sup>3</sup>H)、放射性炭素 <sup>14</sup>C 分析用の採水を行った。扇状地内の採水地点を Fig.1 に示した。井戸は市町村の水道課、学校等の公共施設や企業の取水井、石川県が保有する地下水位観測井 (Fig.1 中の P + 数字) 及び石川県立大が保有する観測井 (同 PU) を対象とした。取水井については揚水機により揚水された地下水を採水した。観測井は、ストレーナが異なる深度に設けられている場合は深度別の採水を行った。対象とした井戸において地下水の一斉採水をかんがい期の 2 時期 (2008 年 8 月, 2010 年 6 月)、非かんがい期の 1 時期 (2009 年 11 月) に実施した。本地域におけ

るかんがい期は 4 月 13 日～9 月 10 日である。

定期観測地点として浅層・深層地下水を区分して採水可能な PU 地点を選定し、浅層地下水 (PU50)、深層地下水 (PU150) の定期採水を実施した。PU50 は深度 50m, オールストレーナであり、地下水が存在する帯水層は DG(f) 層に相当する。PU150 は深度 150m, ストレーナ区間である 144～150m の帯水層は D-T 層である。採水深度は、PU50 は水面下 1m, PU150 は 145m である。採水は上記の一斉観測に加え、2009 年 5 月～2010 年 7 月の期間において 2 週間～1 ヶ月程度の間隔で採水を実施した。また、PU50, PU150 のトリチウム分析用の採水を河川水 (TR), 湧水 (SP) とともに、2009 年 11 月に実施した。さらに、PU150 において <sup>14</sup>C 分析の採水を 2010 年 9 月に実施した。

扇状地内の降水の採取を PU 地点において、2008 年 6 月～2009 年 3 月まで行った。採取には、油膜タイプ (Friedman et al., 1992) とボールタイプ (風早・安原, 1994) の両方の特性を取り入れた蒸発防止用採取器を用いた。さらに、水田における水素・酸素安定同位体比分布を明らかにするために、2009 年 5 月 28 日, 6 月 22 日, 8 月 6 日に扇状地内の水田 9 ヶ所 (Fig.1) 及び各水田の水口に接続する用水路においてかんがい水を採取した。また PU 地点の水田において、2010 年 6 月 3 日に田面水の連続採水を実施した。

手取川扇状地の後背の手取川流域では、広域の安定同位体比分布を明らかにするために、標高の異なる集水域で地表水を採取した。採水地点は、2008 年 (土原ら, 2010) の地点と重複する 13 地点であり、採取は 2009 年 11 月に実施した。

### 2 水質及び同位体分析

#### a 主要イオン

陽イオン (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>), 陰イオン (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) は、イオンクロマトグラフ (東亜 DKK 社製, ICA2000) により測定を行った。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> はアルカリ度とし、アルカリ度 (pH4.8 酸消費量) は MR-BCG 混合溶液指示薬で硫酸標準溶液による滴定法により求めた。

#### b 水素・酸素安定同位体比

自然界における D(<sup>2</sup>H), <sup>18</sup>O の存在率は非常に小さいため、測定値は VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) とよばれる標準海水の同位体比からの千分率偏差 (‰) として次式で表す。

$$\delta (\text{‰}) = (R_{\text{sample}} / R_{\text{ref}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

ここで、R<sub>sample</sub> は試料中の D/<sup>1</sup>H, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, R<sub>ref</sub> は標準海水中の D/<sup>1</sup>H, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O である。一般に δ 値が大きいほど重い同位体に富むことから重い水、逆に δ 値が小さいほど軽い水とよばれる。水素、酸素の安定同位体比の測定は、それぞれ水素、二酸化炭素ガスを試料瓶の気相部

分に加え、水とガスを同位体交換平衡の状態にさせ、平衡ガスを測定し、ガスと平衡状態にある水の安定同位体比を逆算する。Finnigan社製 GAS BENCH IIにより平衡ガスを導入し、安定同位体比質量分析計(Thermo Fisher Scientific社製, DELTA V Advantage)により測定を行った。水素・酸素安定同位体比の測定誤差はそれぞれ2%, 0.05%であった。

### c トリチウム

自然界のトリチウムは、宇宙線の中性子と大気中の窒素原子との衝突による核反応により生成され、HTOの形で水分子を構成して自然界を循環している。しかし、1952年に開始された大気中での熱核爆発実験の結果、降水中のトリチウム濃度は急激に増加し、北半球では1963年にピークに達した。以後、大気中での核実験の中止とともに、トリチウム濃度は半減期(12.4年)に従って指数関数的に減少し、現在ではほぼ自然発生レベルに回復している。採取した試料は、固体高分子電解質型自動トリチウム濃縮装置を用いて電解濃縮を行う。電解濃縮後、蒸留精製した試料を液体シンチレーションカウンタ(ALOKA社製, LB5)により測定した。検出限界は0.03Bq/Lであり、濃度の単位として1TU(Tritium Unit) = 0.12Bq/Lを用いる。

### d 放射性炭素 $^{14}\text{C}$

$^{14}\text{C}$ は半減期5568年の放射性同位体で、放射性炭素とも呼ばれる。上述のトリチウムよりも半減期が長く、 $^{14}\text{C}$ 濃度はトリチウムよりも古い地下水年代測定の指標として用いることが可能である。 $^{14}\text{C}$ 濃度はAD1950年の濃度を100とした場合の割合としてpMC(percent Modern Carbon)で表記される。また、地下水の年代値はAD1950年から何年前であるかを半減期に基づいて逆算することで推定可能であり、yBP(year Before Present)で表記される。

採水した試料は、塩化ストロンチウムを添加することで、試料水中の溶存無機炭素(Dissolved Inorganic Carbon, 以下DIC)を炭酸ストロンチウムとして沈殿させる。得られた沈殿物をリン酸と反応させ、 $\text{CO}_2$ ガスを生成し、水素ガスとともに加熱反応させグラファイトに還元する。得られたグラファイトを用いて、加速器質量分析計(AMS: Accelerator Mass Spectrometry)により $^{14}\text{C}$ 濃度を測定する。また、得られた $\text{CO}_2$ ガスから安定同位体比質量分析計(Thermo Fisher Scientific社製, DELTA plus)により年代値補正用の $\delta^{13}\text{C}$ を測定する。

## 3 動的同位体分別を考慮した蒸発線の推定

一般的に同位体分別は、平衡同位体分別と動的同位体分別に区別されている。動的同位体分別は双方向の同位体交換反応ではなく、化学反応や相変化、分子拡散等の一方的な過程において生じる同位体分別効果を指し、水田に供給されたかんがい用水は湛水中に蒸発に伴う動的同位体分別の影響を受ける。平衡同位体分離係数 $\varepsilon^*$ 、

動的同位体分離係数 $\varepsilon_K$ を合わせた同位体分離係数 $\varepsilon$ は次式で表される(Craig and Gordon, 1965)。

$$\varepsilon = \varepsilon^* + \varepsilon_K \quad (2)$$

$$\varepsilon^* = (1 - a^*) \times 10^3 \quad (3)$$

$$\varepsilon_K = C_K (1 - h) \quad (4)$$

ここで、 $a^*$ は気相に対する液相の平衡分別係数 $a$ の逆数として表される( $a^* = 1/a$ )。 $a$ はMajoube(1971)が実験的に求めた温度の関数として求めた。 $h$ は蒸発重み付き平均相対湿度(小数点標記,  $0 \leq h \leq 1$ )、 $C_K$ は水蒸気の分子拡散係数と水面上の乱流状態に応じた変数であり、水面からの自然状態での蒸発の場合、酸素、水素に対する $C_K$ はそれぞれ14.3, 12.5%である(Gonfiantini, 1986; Araguás-Araguás et al., 2000)。動的同位体分別は、蒸発線(LEL, Local Evaporation Line)に沿った濃縮を生じさせ、その傾きは4~7であり、平衡同位体分別による天水線(MWL, Meteoric Water Line)の傾きとは異なる(Gibson, 2002)。Gat(1995)は蒸発線の傾き $S_{LEL}$ を次式により求めており、湖水における蒸発線の傾きの推定に用いられている(例えば, Mayr et al., 2007)。

$$S_{LEL} = \frac{[h(\delta_A - \delta_l) + \varepsilon]_H}{[h(\delta_A - \delta_l) + \varepsilon]_O} \quad (5)$$

ここで、 $\delta_l$ は流入水の安定同位体比を示し、水田においては供給されたかんがい用水に該当する。 $\delta_A$ は大気中の水蒸気の安定同位体比を示し、 $\delta_A = (\delta_p - \varepsilon^*)/a^*$ (Gibson, 2002)より推定した。 $\delta_p$ は降雨の安定同位体比を示し、ここではPU地点で採取した降雨の降水量加重平均値を用いた。また下付き文字H, Oはそれぞれ水素、酸素を示す。

## 4 地下水年代の補正

地下水の年代は $^{14}\text{C}$ の半減期から以下のように推定される。

$$t = \frac{\ln(C_0/C)}{\lambda} \quad (6)$$

ここで、 $t$ は推定年代(yBP)、 $C_0$ は涵養時の $^{14}\text{C}$ 濃度、 $C$ は試料水の $^{14}\text{C}$ 濃度、 $\lambda$ は崩壊定数で $\lambda = \ln 2/\tau_{1/2}$ である。 $\tau_{1/2}$ は $^{14}\text{C}$ の半減期5568年である。

地下水中の $^{14}\text{C}$ 濃度は見かけの濃度であり、実際には流動過程において、地層中の炭酸塩鉱物からの溶解により $^{14}\text{C}$ を含まない炭素(dead carbon)が付与され、地下水中の $^{14}\text{C}$ 濃度は希釈される。このため、年代推定においては炭酸塩鉱物からの溶解の影響を除去するための補正が必要である。さらに溶存重炭酸の土壌 $\text{CO}_2$ への同位体分別を考慮し、 $\delta^{13}\text{C}$ を指標とした以下の $^{13}\text{C}$ 混合



モデルにより  $C_0$  を求めることができる (Clark and Fritz, 1997; Geyh, 2000)。

$$C_0 = C_{CO_2(soil)} \frac{\delta^{13}C_{DIC} - \delta^{13}C_{carb}}{\delta^{13}C_{CO_2(soil)} + \epsilon - \delta^{13}C_{carb}} \quad (7)$$

ここで、 $C_{CO_2(soil)}$  は土壌  $CO_2$  の  $^{14}C$  濃度で 100pMC と仮定される (Geyh, 2000)。 $\delta^{13}C_{DIC}$  は試料水の DIC の  $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{13}C_{carb}$  は炭酸塩の  $\delta^{13}C$  ( $\approx 0\%$ )、 $\delta^{13}C_{CO_2(soil)}$  は土壌  $CO_2$  の  $\delta^{13}C$  ( $\approx -23\%$ )、 $\epsilon$  は溶存重炭酸と土壌  $CO_2$  間の同位体分別係数であり、 $+7 \sim +10\%$ をとる (Geyh, 2000)。 $\epsilon$  は pH, 温度に依存して変化し、ここでは Clark and Fritz (1997) が示す方法により推定した。

## IV 結 果

### 1 地下水の水質組成

Fig.3 に地下水のトリリニアダイアグラムを示す。採水を実施した取水井のストレーナ位置に相当する層は概ね Ag(f), DG(f) 層であるが、深度の大きい井戸は一部 D-T 層にストレーナが位置している。採取された地下水は時期によらず、概ね  $Ca-HCO_3$  型を示し、一般的な浅層地下水の水質組成を示すことから、取水井は主に浅層地下水を揚水していると考えられる。石川県保有の地下水位観測井から採取された深層地下水は、浅層地下水と異なり  $Na-HCO_3$  型寄りの水質組成を示している。zone

1 に位置する 94 は  $Ca-HCO_3$  型を示すのに対し、86, 92 の地下水は  $Na-HCO_3$  型に分類され、他の地下水とは異なる水質組成を示した。また、沿岸部に位置する P19 地点は塩水侵入が生じている観測井であり、浅層・深層ともに  $Na-Cl$  型の水質組成を示した。

2008 年 8 月, 2009 年 11 月, 2010 年 6 月の浅層地下水の硝酸態窒素 ( $NO_3^- -N$ ) 濃度平均値は、それぞれ 0.98mg/L (0.00 ~ 3.06mg/L), 0.96mg/L (0.00 ~ 3.07mg/L), 1.10mg/L (0.00 ~ 2.88mg/L) であり、かんがい期, 非かんがい期を通じて同程度の  $NO_3^- -N$  が検出された。浅層地下水のかんがい期 (6 月, 8 月), 非かんがい期 (11 月) の  $NO_3^- -N$  濃度分布を Fig.4 に示す。 $NO_3^- -N$  濃度の空間的な分布としては、手取川近傍の地下水で濃度が低く、手取川より離れた北東部は濃度が高い傾向は調査を実施した 3 時期に共通する。手取川の  $NO_3^- -N$  濃度は 0.18 ~ 0.37mg/L と相対的に低い値を示す。後述する酸素安定同位体比の結果から、手取川からの河川水の浸透の影響が示されることから、地下水中の低い  $NO_3^- -N$  濃度は手取川からの浸透水による希釈効果といえる。また、深層地下水からはいずれの時期においても  $NO_3^- -N$  は検出されなかった。

### 2 水素・酸素安定同位体比分布

#### a 手取川流域の地表水の酸素安定同位体比分布

手取川流域の地表水の  $\delta^{18}O$  は、標高が高い白山 (2,702m) 周辺の地表水は同位体比が小さく、扇状地に近い沿岸側の地表水ほど同位体比は大きくなる (Fig.5)。

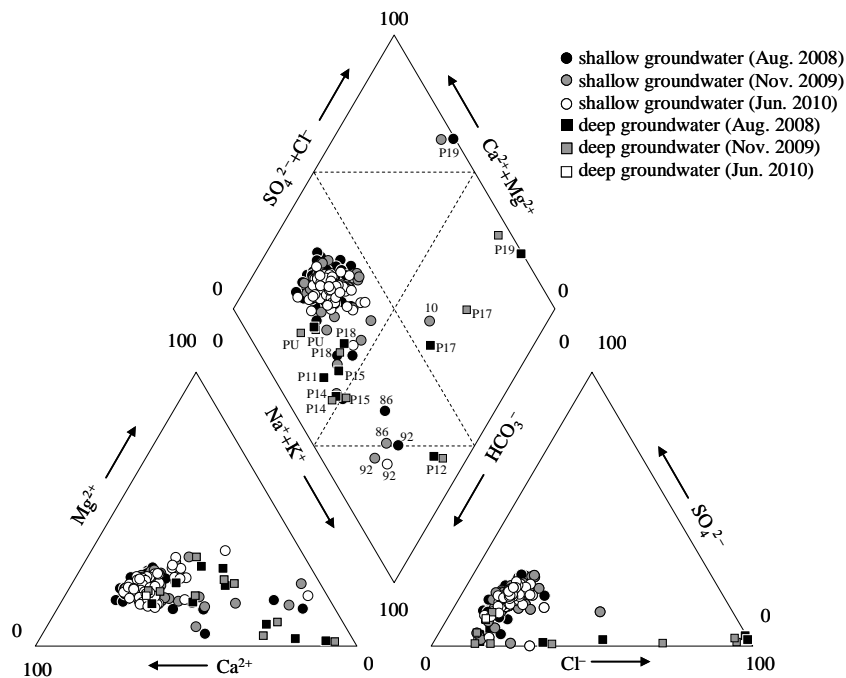
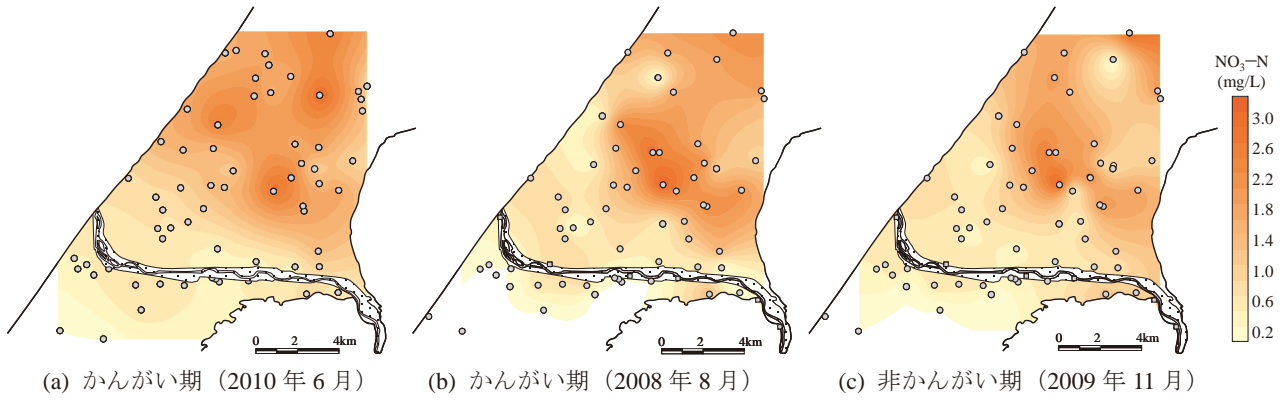
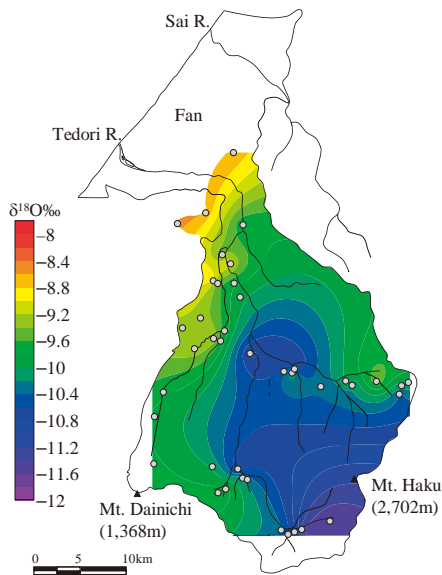


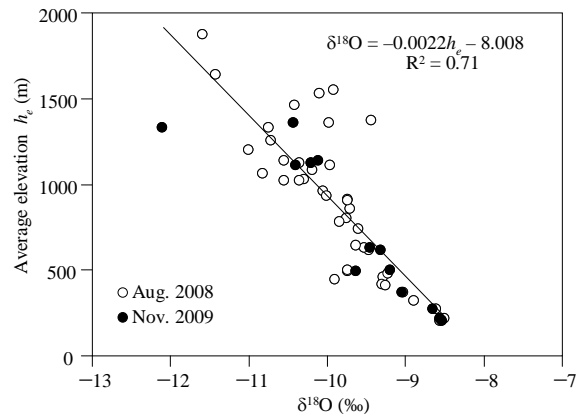
Fig.3 トリリニアダイアグラム  
Trilinear diagram



**Fig.4** 浅層地下水のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度分布  
Distribution of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration in shallow groundwater



**Fig.5** 手取川流域における地表水δ<sup>18</sup>O分布 (土原ら, 2010)  
Distribution of δ<sup>18</sup>O in stream water of the Tedori River Basin



**Fig.6** 集水域の平均標高とδ<sup>18</sup>Oの関係  
Relation between δ<sup>18</sup>O in stream water and mean altitude of its catchment area

これは、同位体分別効果の一つである高度効果の影響による。2008年のデータ(土原ら, 2010)に2009年11月に採水したデータを追加し、平均標高とδ<sup>18</sup>O値の関係を求めた(Fig.6)。地表水のδ<sup>18</sup>Oは、-12.12~-8.51‰の範囲内に分布する。また、採水した地表水のδ<sup>18</sup>O値はその地点より上流側の水の合算値となるため、平均標高は採水地点より上流側の集水域の平均値とした。最小自乗法から求められた近似直線の傾きより、手取川流域の地表水の高度効果は-0.22‰/100mと推定される。日本の地表水を対象にした場合、δ<sup>18</sup>Oの高度効果は-0.25~-0.15‰/100mであり(林, 2005)、手取川流域の地表

水の高度効果もこれらの値と同程度といえる。手取川のδ<sup>18</sup>O平均値は-10.28‰(n=9, 2008年8月~2010年7月)であった。これは、手取川は後背流域の地表水を集水しているためであり、後述する扇状地内の降水よりも相対的に低い安定同位体比を示す。

**b 降水及び田面水の水素・酸素安定同位体比分布**

PU地点で採取した降水の酸素安定同位体比変化をFig.7に示す。日本では、夏季には太平洋からの湿潤な季節風や気団が卓越し、冬季には大陸からの乾燥した季節風・気団が卓越する。温度が高いほど水蒸気の凝縮する割合が小さく、相対的に重い同位体が降水中に濃縮され

るため、一般的に降水の同位体組成は夏に重く、冬に軽い値を示す(早稲田・中井, 1983)。手取川扇状地への降水も同様の傾向を示す。降水の $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ の降水量による加重平均はそれぞれ $-8.07\%$ 、 $-43.94\%$ であり、流域の高度効果を示す回帰線(Fig.6)と矛盾しない。LMWL(Local MWL)は $\delta\text{D}=8.05\delta^{18}\text{O}+19.52$ で表される。

かんがい用水は扇頂部で手取川から取水され、樹枝状に広がるかんがい水路により扇状地内の各水田へ配水される。このため、手取川の河川水とかんがい用水は同一であるが、かんがいされた用水は、水田での湛水中に蒸発の影響を受ける。Fig.8に2009年5、6、8月に採取した扇状地内の9ヶ所の田面水及び水田流入前のかんがい水の $\delta$ ダイアグラム( $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ )を示す。蒸発の影響を受けた田面水は、天水線から外れた、傾き4.21~4.58のLEL上に分布する。3時期を併せた場合のLELは、 $\delta\text{D}=4.71\delta^{18}\text{O}-15.84$ で表される。これは、平衡

同位体分別では無視できていた分子拡散速度の差に起因する水面からの蒸発時の動的同位体分別の影響(芳村ら, 2009)といえ、田面水は蒸発に伴う同位体濃縮が生じている。(5)式により推定される5、6、8月、期間平均の蒸発線の傾きは、それぞれ4.42、4.34、4.43、4.41であった。これより、湖沼と同様に動的同位体分別を考慮することで水田における蒸発の影響を概ね推定可能といえる。5、6、8月の田面水の $\delta^{18}\text{O}$ 平均値はそれぞれ $-4.32$ 、 $-6.86$ 、 $-9.28\%$ で、時期により異なる。これは、稲の生長度が低く、田面の被覆度が小さい5月ほど蒸発の影響が大きく、水稻により田面が被覆される8月は蒸発の影響が小さいためといえる(濱田ら, 2004)。

Fig.9にPU地点の水田における田面水の $\delta^{18}\text{O}$ 及び水深の日内変化(2010年6月3日)を示す。ここでは水口付近(Pa)、中間地点(Pb)、水尻付近(Pc)の田面水、水田流入前のかんがい水の1時間ごとの変化を示してい

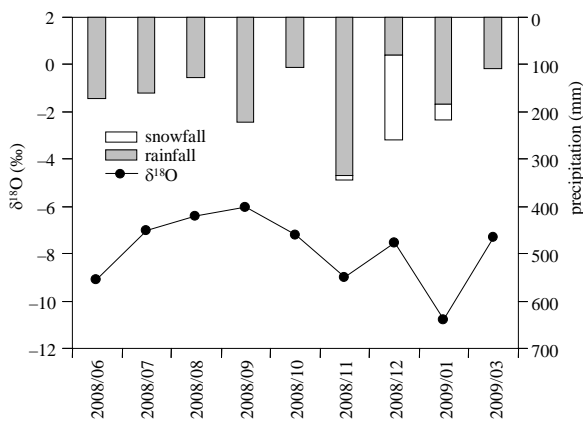


Fig.7 降水の $\delta^{18}\text{O}$ 変化  
Profile of  $\delta^{18}\text{O}$  in rainwater

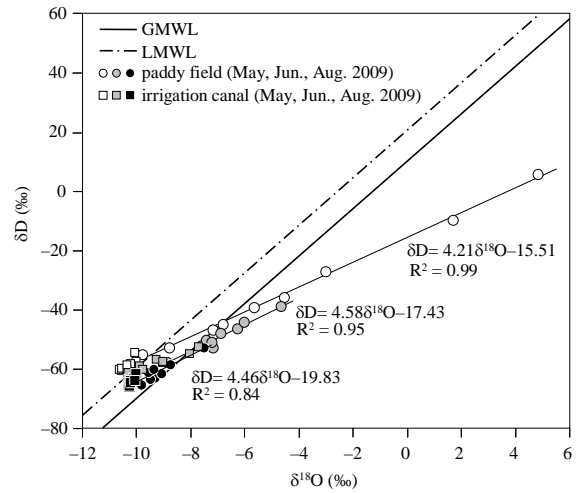


Fig.8 田面水及びかんがい水の $\delta$ ダイアグラム  
 $\delta$  diagram of ponded water and irrigation water

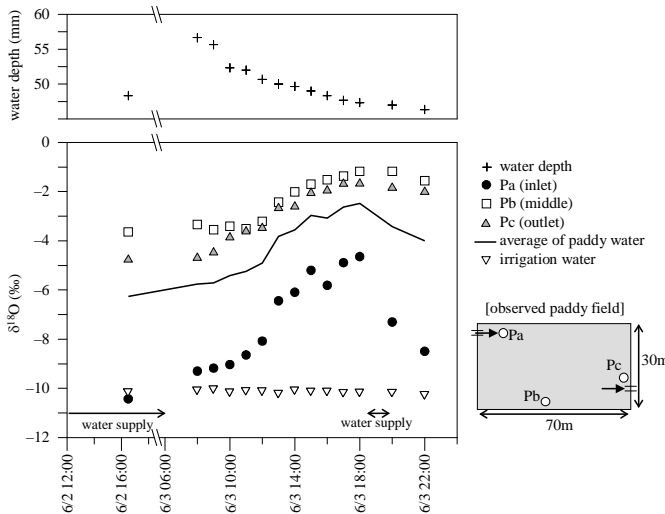


Fig.9 水田(PU地点)における $\delta^{18}\text{O}$ 及び水深の日内変化  
Daily fluctuation of  $\delta^{18}\text{O}$  in paddy water and water depth at PU

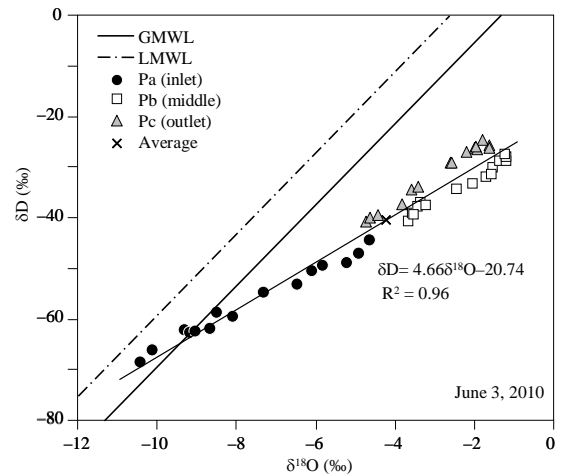


Fig.10 田面水の $\delta$ ダイアグラム(2010年6月3日)  
 $\delta$  diagram of ponded irrigation water in June 3, 2010

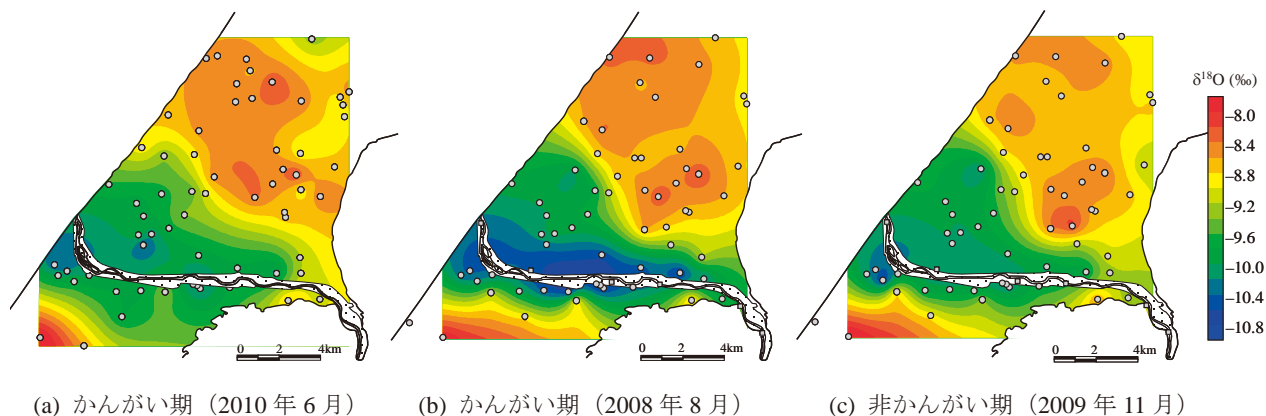


Fig.11 浅層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 分布  
Distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in shallow groundwater

る。前日の6月2日に水田内へかんがい用水が供給され、調査実施日は水口側の給水口は閉鎖していた。供給されたかんがい水( $\delta^{18}\text{O}$ :  $-10.19\%$ )は水田内に平均的には広がっておらず、水口付近のPaで $\delta^{18}\text{O}$ は低く、Pb、Pcは相対的に重い値を示した。Pa、Pb、Pcいずれの地点においても田面水の $\delta^{18}\text{O}$ は時間経過とともに線形的に上昇し、18時以降の $\delta^{18}\text{O}$ はほぼ横ばいとなる(Pb、Pc)。ただし、18~19時に一時的に給水口が開栓されたためPa地点はかんがい水の流入によりの $\delta^{18}\text{O}$ は低下した。田面水はLEL上に分布することから(Fig.10)、田面水の $\delta^{18}\text{O}$ の上昇は蒸発による同位体濃縮の結果といえる。また8~18時の減水深は $0.93\text{mm}/\text{hour}$ 、18~22時の減水深は $0.25\text{mm}/\text{hour}$ であった。夜間は日中にくらべて蒸発が極めて小さくなるため、 $\delta^{18}\text{O}$ の変化が小さくなったと考えられる。3地点の田面水の $\delta^{18}\text{O}$ 平均値は $-4.23\%$ であり、2009年5月28日の扇状地内の田面水の $\delta^{18}\text{O}$ 平均値である $-4.32\%$ に近い値を示した。

### c 地下水の酸素安定同位体比分布

手取川扇状地の浅層地下水のかんがい期(6月, 8月)、非かんがい期(11月)の $\delta^{18}\text{O}$ 分布をFig.11に示す。前項で示したように手取川の $\delta^{18}\text{O}$ 平均値は $-10.28\%$ であり、いずれの時期においても、手取川から扇状地内帯水層へ同位体的に軽い水である河川水の浸透が生じていることが示された。Fig.12は2009年6月及び2010年6月の浅層地下水の水位コンターを示す。かんがい期と非かんがい期で水位差は異なるが、水面形状は類似している。なお、スポット的な地下水位低下は揚水ポンプの稼動に起因する。扇頂部付近の手取川右岸側の地下水位コンターは河川に平行していることから、河川水の浸透は扇頂部から開始されると考えられるが、 $\delta^{18}\text{O}$ 分布から特に扇中部右岸側から扇端部にかけて河川水の浸透領域が拡大していくのがわかる。一方で、左岸側は右岸側に比して河川水の浸透領域は小さいといえる。扇状地北東部のzone4における浅層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ は、時期別の平

均値が $-8.71 \sim -8.60\%$ であり、手取川近傍のzone2の浅層地下水( $\delta^{18}\text{O}$ 平均値 $-10.11 \sim -9.84\%$ )よりも相対的に大きい。これより、扇状地北東部では河川水の浸透の影響は小さく、水田及び降水による涵養の影響が大きいと考えられる。また、扇状地右端を流下する犀川の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は $-9.60\%$ (2010年6月)であるが、北東部地下水へ軽い水の浸透は見られず、犀川から帯水層への河川の浸透の影響は小さいと考えられる。

PU地点で採水された浅層地下水(PU50)、深層地下水(PU150)の地下水位及び $\delta^{18}\text{O}$ 変化をFig.13に示す。地下水位は浅層地下水が常に高いが、水位変動は連動している。また、かんがい期に深層地下水との水位差が拡大し、非かんがい期に水位差は縮小する傾向にある。

浅層・深層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ の平均値は、それぞれ $-8.22\%$ 、 $-9.35\%$ であり、年間を通して約1%の差を有し、深層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ は、期間を通して浅層地下水よりも低い値を示す。また、 $\delta^{18}\text{O}$ の標準偏差は、浅層・深層地下水それぞれ $0.26\%$ 、 $0.11\%$ であり、浅層地下水は相対的に変動が大きく、深層地下水は小さい。浅層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ はかんがい期と冬期の降雨時に上昇する傾向が見られた。かんがい期は同位体濃縮の影響を受けた水田からの重い水の浸透が地下水面に到達するためと考えられる。また、2009年11月からの3ヶ月間の降水量は $864\text{mm}$ であり、地下水位は約5m上昇している。これより、2009年度の冬期においては、降雨期源の重い水が浅層地下水に到達し、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ を上昇させたと考えられる。また、上述した一斉観測時と同様に、浅層地下水の $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度は平均 $0.88\text{mg}/\text{L}$ であるのに対し、深層地下水から $\text{NO}_3^- - \text{N}$ は検出されなかった。

## 3 放射性同位体分布

### a トリチウム

古い地下水と新しい地下水の混合がないと仮定した場合、地下に浸透した水は新たにトリチウムが加わること

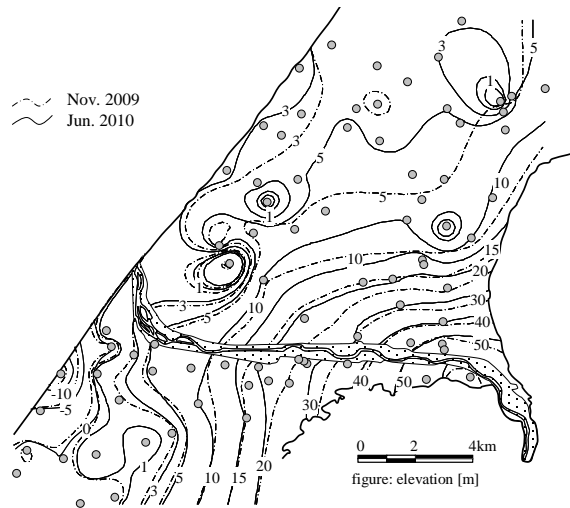


Fig.12 浅層地下水の地下水面分布 (2009年11月, 2010年6月)  
Shallow groundwater table in November 2009 and June 2010

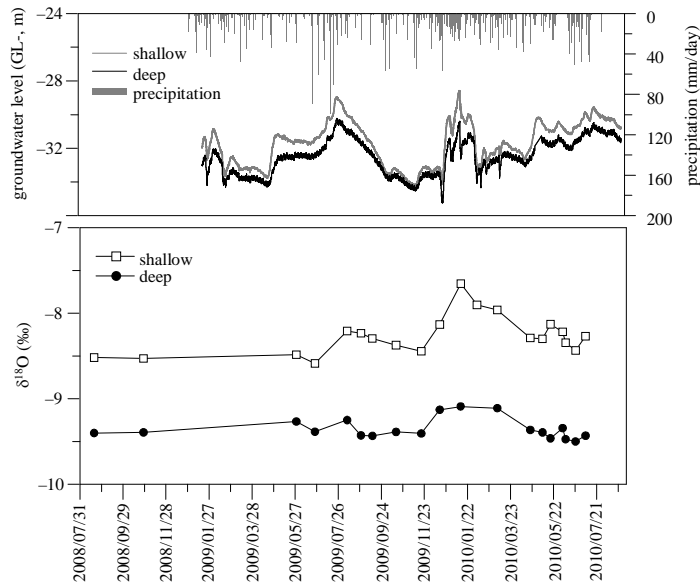


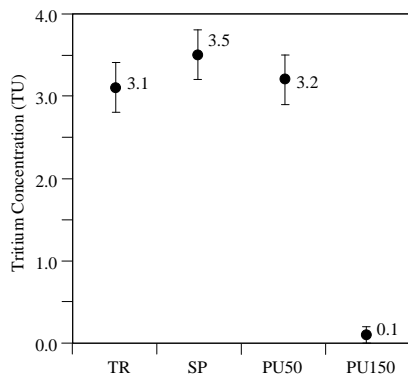
Fig.13 PU地点の浅層・深層地下水の地下水位及び $\delta^{18}\text{O}$ 変動  
Profile of groundwater level and  $\delta^{18}\text{O}$  of shallow and deep groundwater at PU

がなく、半減期に従い減衰するため、古い水ほどトリチウム濃度は小さい。この特性を利用し、地下水の年代や流速を推定する研究、涵養速度に関する研究が行われている(今泉ら, 2001)。Fig.14に手取川、扇端部湧水、PU地点の浅層地下水(PU50)・深層地下水(PU150)のトリチウム濃度を示す。手取川、扇端部湧水、PU50のトリチウム濃度は3.1~3.5TUと自然発生レベルに近い値を示しており、比較的新しい地下水と推測される。一方、PU150は0.1TUと極めて低い濃度を示した。2009年時点で0.1TUを示すトリチウムの崩壊曲線は、地表での原水爆実験以降の降水中のトリチウム濃度曲線と交差しないことから(Fig.15)、手取川扇状地の深層地下水

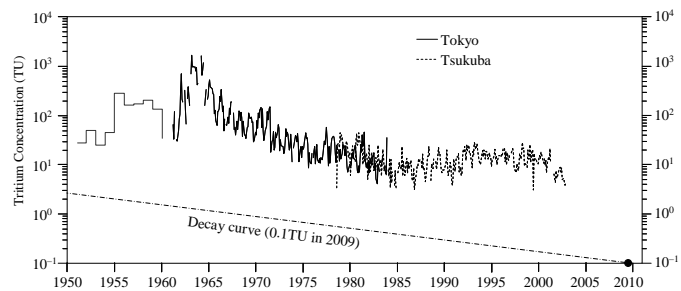
は、少なくとも1950年以前の降水に涵養された地下水であるといえる。

#### b $^{14}\text{C}$

Table 3に深層地下水の $^{14}\text{C}$ 濃度及び推定年代結果を示す。見かけの $^{14}\text{C}$ 濃度は $68.6 \pm 0.3\%$ であった。補正1では、炭酸塩からの溶解のみを考慮し、同位体分別を考慮しない( $\epsilon = 0$ )単純な $\delta^{13}\text{C}$ モデルを適用した。 $\epsilon$ は涵養時のpHに依存して変化するが、pHが7あるいはそれ以上の場合、 $\text{H}_2\text{CO}_3$ に比して $\text{HCO}_3^-$ のモル分率が上昇するため、年代推定結果に大きな差は生じない(Clark and Fritz, 1997)。またpHが6以下の場合、 $\text{H}_2\text{CO}_3$ のモル分率が上昇し $\epsilon$ は0に漸近する。補正2では、



**Fig.14** 手取川, 湧水, 浅層・深層地下水のトリチウム濃度  
Tritium concentration in the Tedoru River water, spring water,  
shallow and deep groundwater



**Fig.15** 降下中のトリチウム濃度と崩壊曲線  
Tritium profile in rainwater and decay curve of tritium

pH を 6～7 で変化させて  $\varepsilon$  を計算し, 年代推定を行った。また, 温度については深層地下水の年間平均水温である 14.1℃を仮定した。Table 3 が示すように, 深層地下水の推定年代は, 1000～3000 年オーダーと推定された。これらの結果はトリチウムを指標とした推定結果とも整合的である。

**Table 3**  $^{14}\text{C}$  による深層地下水の年代推定  
Age dating of deep groundwater using  $^{14}\text{C}$

$^{14}\text{C}$ (pMC)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	推定年代 (yBP)		
		補正なし	補正1	補正2
68.6	-18.0	3,030	1,058	1,664～3,973

## V 考察

### 1 浅層地下水の涵養源の分類

ゾーン別の浅層地下水, 手取川河川水, 降水, 田面水の  $\delta$  ダイアグラムを Fig.16 に示す。手取川扇状地の浅層地下水の涵養源は, 水質・安定同位体比分布から, 手取川からの河川浸透, 水田かんがい用水, 降水といえる。LMWL は  $\delta\text{D} = 8.05 \delta^{18}\text{O} + 19.52$  ( $R^2 = 0.67$ ), LEL は  $\delta\text{D} = 4.71 \delta^{18}\text{O} - 15.84$  ( $R^2 = 0.98$ ) で表される。ここでは, 複数の涵養源で構成される浅層地下水の混合線を GML (Groundwater Mixing Line) とする。かんがい期・非かんがい期を併せた 3 時期を対象とした場合, GML は  $\delta\text{D} = 6.31 \delta^{18}\text{O} + 2.33$  ( $R^2 = 0.90$ ) で表される。 $\delta$  ダイアグラムにおいて, 天水起源の水は傾き 8 の線上に分布する (Craig, 1961)。LMWL の傾きは 8.05 であるが, 浅層地下水は LMWL から逸れて分布する。これは, 湛水中の蒸発に伴い同位体的に濃縮された水田かんがい用水の涵養の影響といえる。GML の傾きは LMWL と LEL の間にあることから, 扇状地内の浅層地下水は, 天水起源と

水田涵養起源の水の混合により形成されるといえ, さらに浅層地下水は同位体比的に軽い手取川からの浸透水の混合の影響を受ける。手取川の浸透の影響は河川近傍の zone 2 の地下水で大きく, zone 3, 4 の地下水ではその影響は小さい。

$\delta$  ダイアグラムにおいて, 河川水, 降水, 水田からの涵養水の平均  $\delta$  値をそれぞれ端成分 EM1, EM2, EM3 (End-Member) とし, EMMA (End-Members Mixing Analysis) を行った。EMMA は複数の端成分で構成される地表水・地下水において各端成分の混合割合を推定するための手法として適用されている (例えば, Hooper et al., 1990; Ladouche and Weng, 2005)。異なる  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  を持つ水が帯水層中で混合した場合, 化学変化等により  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  は変質しないため, EM 同士の独立性が保たれている。Gehrels et al. (1998), 藪崎ら (2003) は, 深度別の土壌水の観測から, 表層付近の  $\delta$  値のパラつきは浸透過程において一定化する傾向を示している。これより, ここでは各要素の平均値を端成分として扱い, 手取川の  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  平均値 -10.28‰, -63.68‰ (2008 年 8 月～2010 年 7 月) を EM1, PU 地点で採取した降水の  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  平均値 -8.07‰, -43.94‰ (2008 年 6 月～2009 年 3 月) を EM2 とした。田面水の  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  平均値はそれぞれ -6.82‰, -47.93‰ (2009 年 5, 6, 8 月) であるが, 田面へかんがい水が供給された時点から地下への浸透は開始しており, 地下へ涵養されている水は田面水よりも軽い値を示すと考えられる。ここでは供給されたかんがい水が湛水中に, LEL 上で線形的に同位体濃縮を生じると仮定し (Figs.9, 10), 水田からの涵養水 EM3 は田面水と河川水の間値 (-8.55‰, -55.96‰) とした。ただし, zone 1 の地下水は Na-HCO<sub>3</sub> 型の水質組成を示すことから, 他の浅層地下水と異なる涵養特性を有すると判断し, 以下の検討からは除外した。また, 端成分から外れた地点の補正は, Liu et al. (2004) に従った。zone 2 の浅層地下水への手取川からの浸透による寄与割合は 76.8% と算定され, zone 2 の地下水は河川の水位

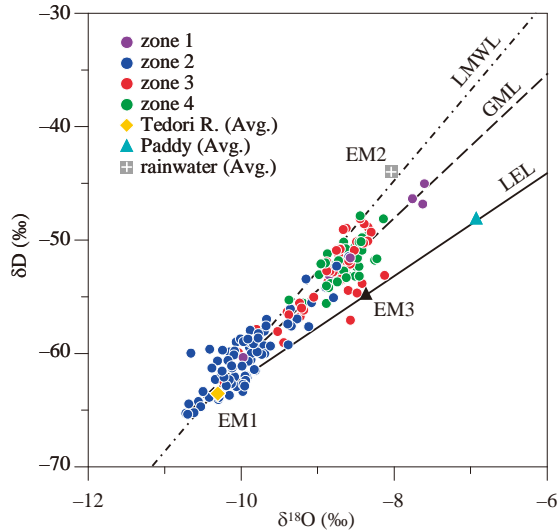


Fig.16 浅層地下水の $\delta$ ダイアグラム  
 $\delta$  diagram of shallow groundwater

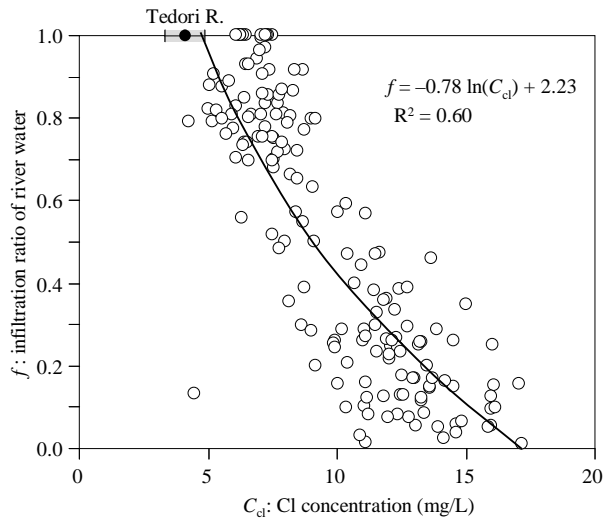


Fig.17 河川水浸透割合と浅層地下水 $\text{Cl}^-$ 濃度の関係  
 Relation between infiltration ratio of river water and  $\text{Cl}^-$  in shallow groundwater

変化の影響を受けやすいといえる。zone 3の地下水では河川浸透の寄与割合は26.3%に低下するが、手取川から最も離れたzone 4の地下水であっても、河川水の浸透の寄与は18%程度あることが示された。この結果は、扇頂部付近からzone 4へ向かって河川水の浸透が地下水形状から推測されること (Fig.12)、手取川の流量観測結果から扇頂部付近から手取川は失水河川の状態にあること (岩崎ら, 2010) と整合的である。推定された浅層地下水への河川水の寄与割合と保存性の高い $\text{Cl}^-$ 濃度との関係を Fig.17 に示す。両者は負の相関を持ち、河川水の浸透の寄与が大きくなると地下水中の $\text{Cl}^-$ 濃度は低下する関係を表している。得られた回帰曲線は、河川浸透の寄与割合が100%の場合、手取川の平均 $\text{Cl}^-$

濃度  $4.09\text{mg/L}$  ( $\sigma = 0.78$ ) に概略一致することが示され、EMMA で推定された涵養源別の寄与割合は概ね妥当な結果と考えられる。

以上、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  分布から手取川扇状地における浅層地下水の涵養源の推定を行うとともに、それぞれの涵養源からの寄与割合を推定した。ただし、zone 2の手取川近傍の地下水については、手取川の $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  平均値よりも低い値を示すものが含まれ、本報で設定したEM1では河川水の浸透割合を過大評価している可能性がある。今後はさらに同位体データを蓄積し、検証する必要がある。

## 2 浅層地下水と深層地下水の差異

PU 地点の浅層・深層地下水の定期観測結果である $\delta^{18}\text{O}$ の経年的な差から両層の地下水の交流は小さいまま流動しているといえる。この差異は、浅層地下水においては $\text{NO}_3^- - \text{N}$ が検出されるのに対し、深層地下水からは検出されないことも整合的である。また、トリチウム濃度から、浅層地下水は現代の水であるのに対し、深層地下水は60年以上前に涵養された地下水であると推定された。さらに $^{14}\text{C}$ 濃度から深層地下水の滞留時間は1,000～3,000年オーダーであると推定された。これらの結果は、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ から推測された結果と矛盾しない。ただし、 $^{14}\text{C}$ 濃度を指標とした年代推定においては、本研究で用いた $\delta^{13}\text{C}$ を指標とした補正法以外の手法 (アルカリ度補正, 化学物質収支補正等) との比較が必要である。また、得られた地下水の推定年代は他の同位体指標の結果と整合性を示したが、データ数が不足しているため、さらなるデータの蓄積と検証が必要といえる。

浅層地下水の水位は深層地下水に比して常に高位を維持するが、両層の地下水位は降水量にตอบสนองし連動して変化する。粘土と砂礫の互層から成るD-T層は層相が複雑で水平方向への連続性が乏しく (北陸農政局計画部, 1977)、加圧層となる粘土層は一様に分布していないといえる。このため、DG(f)層からD-T層へ水頭ポテンシャルが伝播し、両層の地下水位変化は連動していると考えられる。ただし、上述のように、両層の地下水の同位体組成の差異は明瞭であり、DG(f)層からD-T層への鉛直方向への浸透よりも、水平方向の流動が卓越し、浅層と深層では異なる流動をしているといえる。

以上より、手取川扇状地における浅層地下水と深層地下水は、交流が少ないまま異なる流動をしていることが示された。深層地下水は、滞留時間が浅層地下水に比して極めて長いことから、水田からの涵養の影響を受けおらず、扇頂部付近から降水、河川水により涵養されていると考えられる。さらに広域流動系の地下水の混合も考慮にいたした涵養源の推定は今後の検討課題である。また、深層地下水を過剰揚水した場合、地表面からの涵養を受ける浅層地下水とは異なり、本来の涵養源からの供

給が期待できず、浅層地下水からの引き込み(漏水)あるいは粘土層からの絞り出しによる涵養が生じる。その場合、浅層地下水の水位低下、地層の圧密収縮による地盤沈下を誘発する可能性があり、深層地下水の循環速度を考慮した適正な揚水管理が必要といえる。

## VI 結 言

手取川扇状地内の地表水・地下水の水質及び同位体分布特性を明らかにし、浅層地下水の涵養源の分類を行うとともに、浅層地下水と深層地下水の差異を示した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) かんがい期・非かんがい期いずれの時期においても、手取川から扇状地帯水層内へ河川水の浸透が生じていることが浅層地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 分布から示された。河川水の浸透領域は、特に扇中央部右岸側から扇端部にかけて拡大し、浸透した河川水は浅層地下水の $\text{NO}_3^-$ -N濃度を希釈する効果を有している。
- (2)  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 分布から、浅層地下水の混合線(GML)は天水線(LMWL)と蒸発線(LEL)の間に位置することから、浅層地下水は降水と蒸発の影響を受けた水田涵養水の混合により形成され、さらに同位体比的に軽い手取川からの浸透水の混合の影響を受けることが示された。河川水、降水、水田涵養水を端成分としてそれぞれの涵養源から浅層地下水への寄与割合を算定し、河川水の浸透は扇頂部付近から開始し、河川から最も離れた都市部に近いzone 4の地下水へも影響していることを明らかにした。
- (3) 浅層地下水と深層地下水の酸素安定同位体比は経年的に約1%の差を有していた。また浅層地下水からは硝酸態窒素が検出されるのに対し、深層地下水からは検出されなかった。さらに、放射性同位体から推定された滞留時間の差から、浅層と深層地下水は交流が少ないまま異なる流動をしていることが明らかとなった。滞留時間が浅層地下水に比して極めて長い深層地下水は、水田からの涵養の影響を受けていないと推測された。

## 参考文献

- 1) Althaus, R., Klump, S., Onnis, A., Kipfer, R., Purtschert, R., Stauffer, F., Kinzelbach, W. (2009): Noble gas tracers for characterisation of flow dynamics and origin of groundwater: A case study in Switzerland, *Journal of Hydrology*, **370**, 64-72.
- 2) Araguás - Araguás, L., Froehlich, K., Rozanski, K. (2000): Deuterium and oxygen - 18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture, *Hydrological Processes*, **14**(8), 1341-1355.
- 3) Clark, I.D., Fritz, P. (1997): Environmental isotopes in hydrogeology, Boca Raton, *CRC Press*. 328
- 4) Craig, H. (1961): Isotopic variation in meteoric waters, *Science*, **133**, 1702-1703.
- 5) Craig, H., Gordon, L.I. (1965): Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (Ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, Italy, 9-130.
- 6) Friedman, I., Smith, G. I., Gleason, J. D., Warden, A., Harris, J. (1992): Stable isotope composition of waters in southeastern California 1. Modern precipitation, *Journal of Geophysical Research*, **97**(D5), 5795-5812.
- 7) Gat, J.R. (1995): Stable isotopes of fresh and saline lakes. In: Lerman, A., Imboden, D.M., Gat, J.R. (Eds.), *Physics and Chemistry of Lakes*, Springer, Berlin, 139-165.
- 8) Gehrels, J.C., Peeters, J.E.M., De Vries, J.J., Dekkers, M. (1998): The mechanism of soil water movement as inferred from 18O stable isotope studies, *Hydrological Sciences Journal*, **43**(4), 579-594.
- 9) Geyh M.A. (2000): An overview of 14C analysis in the study of groundwater, *Radiocarbon*, **42**(1), 99-114.
- 10) Gibson, J.J. (2002): A new conceptual model for predicting isotopic enrichment in lakes in seasonal climates, *PAGES News* **10**, 10-11.
- 11) Gonfiantini, R. (1986): Environmental isotopes in lake studies. In: Fritz, P., Fontes, J.C. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, *The Terrestrial Environment*, **2**. Elsevier, New York, 113-168.
- 12) 濱田洋平, 藪崎志穂, 田瀬則雄, 谷山一郎 (2004): 田面水の水素・酸素安定同位体比とそれに及ぼす蒸発の影響, *日本水文科学会誌*, **34**(4), 209-216.
- 13) 林武司 (2005): 酸素・水素安定同位体比を用いた地下水調査, *地下水技術*, **47**(8), 27-38.
- 14) 北陸農政局計画部 (1977): 石川県の水理地質と地下水および付図, 北陸農政局計画部, 58
- 15) Hooper, R.P., Christophersen, N., Peters, N.E. (1990): Modeling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members-an application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U.S.A, *Journal of Hydrology*, **116**, 321-343.
- 16) IGES (2008): アジア太平洋の未来戦略—気候政策と持続可能な開発の融合を目指して—, IGES 白書, 217
- 17) 井川怜欧, 嶋田純, 佐伯憲一, 谷口真人 (2005): 静岡平野における地下水流動系, *地球科学*, **39**(3), 107-118.
- 18) 今泉眞之, 石田 聡, 土原健雄 (2002): 環境同位体を使った地下水涵養機能研究の現状—同位体水文学からみた地下水涵養機能—, 農業工学研究所



- 報告, 41, 1-17.
- 19) 石川県環境部水環境創造課 (2007): 平成 18 年度石川県地下水保全対策調査報告書, 石川県, 76
  - 20) 岩崎有美, 尾崎正志, 中村公人, 堀野治彦 (2010): 手取川扇状地における地下水位変化, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会要旨集, 246-247.
  - 21) 風早康平, 安原正也 (1994): 湧水の酸素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程, ハイドロロジー, 24(2), 107-119.
  - 22) Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I.A. (2007): Freshwater resources and their management. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 173-210.
  - 23) Ladouche, B., Weng, P. (2005): Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh: Role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the wetland, *Journal of Hydrology*, **314**, 22-42.
  - 24) Liu, F., Williams, M., Caine, N. (2004): Source waters and flowpaths in a seasonally snow-covered catchment, Colorado Front Range, USA, *Water Resources Research*, **40**, W09401, doi: 10.1029/2004WR003076
  - 25) Majoube, M. (1971): Fractionnement en oxygène<sup>18</sup> et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. *Journal de Chimie Physique et de Physico-chimie biologique*, **10**, 1423-1436.
  - 26) Mayr, C., Lücke, A., Stichler, W., Trimborn, P., Ercolano, B., Oliva, G., Ohlendorf, C., Soto, J., Fey, M., Habertzettl, T., Janssen, S., Schäbitz, F., Schleser, G.H., Wille, M., Zolitschka, B. (2007): Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ), *Journal of Hydrology*, **334**, 53-63.
  - 27) Okkonen, J., Jyrkama, M., Kløve, B. (2010): A conceptual approach for assessing the impact of climate change on groundwater and related surface waters in cold regions (Finland), *Hydrogeology Journal*, **18**(2), 429-439.
  - 28) 齊藤享治 (1988): 日本の扇状地, 古今書院, 280
  - 29) 瀬戸玲子 (1986): 日本における地形分類別土地利用, 地図, 24(4), 1-11.
  - 30) 嶋田純 (1998): 扇状地における地下水涵養と流出, 日本水文科学会誌, 28(2), 61-67.
  - 31) 土原健雄, 福田武真, 吉本周平, 石田 聡, 増本隆夫, 今泉眞之 (2009): 環境同位体からみた農業用水利用に伴う地表水-地下水交流特性, 応用水文, 21, 10-19.
  - 32) 土原健雄, 吉本周平, 石田 聡, 皆川裕樹, 増本隆夫, 今泉眞之 (2010): 環境同位体からみた沿岸扇状地における地下水涵養・流出特性, 応用水文, 22, 11-20.
  - 33) 芳村圭, 一柳錦平, 杉本敦子 (2009): 気象学における水安定同位対比の利用, 日本気象学会, 128
  - 34) 早稲田周, 中井信之 (1983): 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球化学, 17, 83-91.
  - 35) 渡辺影隆 (2002): 手取川流域の自然環境 III 手取川扇状地の地下水系と水管理計画, 地学教育, 55(4), 149-172.
  - 36) 藪崎志穂, 田瀬則夫, 木方展治, 結田康一 (2003): 茨城県つくば市の水田・畑地・林地における土壌水および地下水の酸素安定同位体比の特徴, 日本水文科学会誌, 33(3), 161-176.

# Classification of Recharge Sources of Groundwater in a Paddy Dominant Alluvial Fan Based on Geochemical and Isotopic Analyses

TSUCHIHARA Takeo, YOSHIMOTO Shuhei, ISHIDA Satoshi and IMAIZUMI Masayuki

## Summary

Geochemical and environmental isotopic aspects of groundwater in a paddy dominant alluvial fan of the Tedoru River in Ishikawa Prefecture, Japan were investigated during paddy irrigation and non-irrigation periods. The distribution of stable isotopic compositions of oxygen in shallow groundwater revealed that river-water dominated groundwater flows from the right bank of the river towards northwest, and the contribution of infiltrated river water decreases to the northeast in both irrigation and non-irrigation periods. The river infiltration has a significant effect on decreasing the nitrogen-nitrate concentration in the shallow groundwater along the Tedoru River through dilution.

The groundwater mixing line (GML), which is a regression line of stable isotopic compositions of oxygen and hydrogen of the shallow groundwater, lies between local meteoric water line (LMWL) and local evaporation line (LEL), determined by linear regression of observed rainwater and paddy water. It is thus deduced that the shallow groundwater is recharged by three sources: rainwater, paddy water and river water. The mixing analysis of three recharge sources suggested the contribution fraction of each source to the shallow groundwater, and indicates that the infiltration of river water can be of great importance in keeping self-reliance of the shallow groundwater and its influence is not limited only to areas around the river.

The differences of stable isotope compositions in shallow and deep groundwater clearly imply that both groundwater take different flow paths with little interaction between both aquifers. The age of the deep groundwater are estimated from tritium profile to be pre-1960s unlike young shallow groundwater. Further, age-dating method using  $^{14}\text{C}$  activity estimated that deep groundwater was recharged between about 1,000 and 3,000 years before the present. The estimated residence times also justify the difference of flow mechanism between in shallow and deep groundwater.

**Keywords** : alluvial fan, environmental isotope, paddy field, groundwater, recharge source, river infiltration

## ラドン吸収フィルムによる地下水ラドン濃度測定の適合性

吉本周平\*・土原健雄\*・石田 聡\*・今泉眞之\*\*

## 目 次

I 緒 言	35	5 フィルムの現地適用可能性の検討	39
II ラドン吸収フィルムの概要	36	V 結果および考察	39
III 調査地区の概要	36	1 フィルムの実用的な設置期間	39
IV 研究方法	36	2 フィルムのラドン分配率と現地適用可能性	40
1 従来法によるラドン濃度の測定	36	VI 結 言	42
2 フィルムのラドン吸収量の測定	38	参考文献	42
3 フィルム設置期間の検討	38	Summary	43
4 フィルム設置地点の選定	38		

## I 緒 言

地下水は、水質が良好で変化が少なく、井戸を掘るだけで取水が可能であるなどの利点を有し、日本では都市用水および農業用水の使用量の約13%を地下水が占めている(国土交通省, 2009)。また、平時だけでなく、渇水時の補助水源や災害時の緊急水源としても地下水は重要である。しかし、近年、肥料や農薬、有機溶媒などによる地下水質汚染が顕在化している。安全で持続的な地下水利用のためには、汚染物質の流動機構を明らかにした上で、適切な保全・管理を行う必要がある。

農薬や有機溶媒による地下水汚染の調査手法として、近年、ラドン( $^{222}\text{Rn}$ )を指標として利用できる可能性が指摘されている(土原ら, 2006)。ラドンは、半減期3.8日の放射性の希ガスで、ラジウム( $^{226}\text{Ra}$ )の $\alpha$ 崩壊によって生成される。地下水は帯水層中のラジウムの崩壊によってラドンが付加され、約3週間で放射平衡に達する。一方で、地表水にラドンは殆ど含まれておらず、ラドンは地下水の帯水層内での滞在時間の指標となる。このことから、ラドン濃度の測定によって、数日程度での地表水の地下水への到達時間などの地下水流動状況を把握し、帯水層での汚染物質の吸着・分解などの挙動を解明することが可能となる。また、ラドンは、水よりも有機溶媒に分配されやすいという特性から、帯水層中の

有機溶媒の汚染位置や汚染量の調査に用いることができる。

しかし、従来のラドン濃度測定法(濱田ら, 1997)は分析のために試料水が500mL必要であることから、水が僅少で採水が困難な地点におけるラドン濃度を測定することが困難であった。

このような問題の解決策として、斎藤ら(2003)は、ポリスチレンフィルム(以下、ラドン吸収フィルム)によるラドン測定法を提案している。この方法は、測定手順が簡便で、水量が少ない場合でも測定が可能であるなどの利点があり、岩盤の切れ目から滲出する湧水地点や、底部付近にのみ地下水を有する観測用ボーリング孔など、水量が僅少で従来法による測定が困難な現場への適用が期待される。斎藤ら(2003)は、密閉容器中にフィルムを設置した場合について、設置時間および水温とフィルムの水に対するラドン吸収量の比の関係を示している。また、斎藤(2005)は、水を満たし密封した地質試料中に設置したフィルムのラドン吸収量から帯水層が与える地下水ラドン濃度を推定した。しかし、実際に現地にフィルムを設置して地下水中のラドン濃度を測定した事例はまだなく、現地にフィルムを適用するための条件に関する検討はなされていない。

本研究では、湧水中および観測用井戸内にラドン吸収フィルムを設置し、従来法で測定したラドン濃度とフィルムのラドン吸収量との関係を調べ、フィルムによる地下水ラドン濃度測定が有効である条件を検討した。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金(若手研究B「ダブルトレーサー試験による農薬の不飽和帯水層内移行メカニズムの解明」, 課題番号19710021)の助成を受けたものである。本研究の実施において、湧水の

\* 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23年1月20日受領

キーワード: ラドン, 地下水, ポリスチレンフィルム, 液体シンチレーション測定, 簡易法

所有者にフィルム設置・採水を快く許可して戴いた。記して感謝の意を表す。

## II ラドン吸収フィルムの概要

ポリスチレンは、発泡スチロールなどの形で一般の生活に多く用いられている高分子材料である。ポリスチレンの分子構造には芳香環が含まれており、芳香族炭化水素であるトルエンとの類似性から、ラドンを吸収または吸着しやすい、トルエンなどの芳香族系シンチレータに溶解しやすい、さらに、その溶液は液体シンチレーション計測に適している、といった性質がある(斎藤, 1999)。

この性質を利用して、斎藤ら(2003)は、一定サイズ、一定質量に揃えたポリスチレンフィルム APDLS#1 (ここでは、ラドン吸収フィルム)をラドンの簡易測定法として開発・商品化した。フィルム一枚あたりの質量は1.00g, サイズは50mm × 65mm × 0.3mmの大きさである(斎藤ら, 2003)。このフィルムを地下水中に設置し、一定期間後に回収して、トルエンなどのシンチレータに溶解させると、フィルムが吸収したラドン量を液体シンチレーションカウンタで測定することができる。

一定濃度のラドンを有する地下水中に設置されたフィルムのラドン吸収量は、時間とともに増大し、やがて平衡状態に達する。水温が一定の条件下では、一定のラドン濃度  $C_w$  [Bq L<sup>-1</sup>] の試料水中に設置されたフィルムのラドン吸収量  $A_f$  [Bq kg<sup>-1</sup>] の経時変化は、次の微分方程式による単純なモデルで表すことができる(斎藤ら, 2003)。

$$dA_f / dt = k_1 C_w - k_2 A_f \quad (1)$$

ここで、地下水の密度は1 [kg L<sup>-1</sup>] とみなしており、 $t$  はフィルムの設置期間 [day],  $k_1$  および  $k_2$  は速度定数 [day<sup>-1</sup>] である。設置前のフィルムにラドンは含まれていない ( $t = 0$  のとき  $A_f = 0$ ) として、(1) 式を積分すると、次式に纏めることができる。

$$R = R_p \{1 - \exp(-k_2 t)\} \quad (2)$$

ここで、 $R_p = k_1 / k_2$  で、分配係数と呼ばれる(斎藤ら, 2003)。また、 $R$  はフィルムのラドン分配率(水に対するフィルムのラドン吸収量の比)であり、次式で定義する。

$$R = A_f / C_w \quad (3)$$

$R$  は設置期間が長いほど上昇し、十分な時間 ( $t \rightarrow \infty$ ) を経ると平衡状態となって一定値になる。この値は、分配係数  $R_p$  と等しい(斎藤ら, 2003)。

実用的には、ラドン吸収フィルムを用いて地下水のラドン濃度  $\hat{C}_w$  を推定する場合、 $\hat{C}_w$  は地下水中に設置したフィルムのラドン吸収量の測定値  $\hat{A}_f$  と設置期間に対応する分配率  $\hat{R}$  から

$$\hat{C}_w = \hat{A}_f / \hat{R} \quad (4)$$

として算出することができる。このため、設置期間と  $\hat{R}$

の関係を示すとともに、 $\hat{C}_w$  を推定するために信用できる  $\hat{R}$  を得るための条件を明らかにすることが必要である。

## III 調査地区の概要

本研究では、茨城県つくば市の湧水および観測用ボーリング孔を対象とした。これらの調査地点の位置と周辺地域の地質を Fig.1 に示す。調査地区であるつくば市の北端に位置する筑波山(標高877m)では、標高500m以上には白亜紀の斑縞岩類が露出し、中腹や山麓部では斑縞岩類に貫入している古第三紀の花崗岩類(花崗閃緑岩)や変成岩(ホルンフェルス)が基盤岩となっている(宮崎ら, 1996)。筑波山の南麓には斑縞岩類や花崗岩類の巨礫や砂などからなる斜面堆積物が広く分布している。

一方、つくば市の表層地質の大部分は関東ローム層の洪積台地からなり、これらの台地は河川によって開析され崖線を形成している(水尻ら, 2006)。関東ローム層の下位には主に常総粘土層が分布し、地下水面は通常地表面下10m以内の関東ローム層や常総粘土層中に分布している(宇野ら, 1988)。

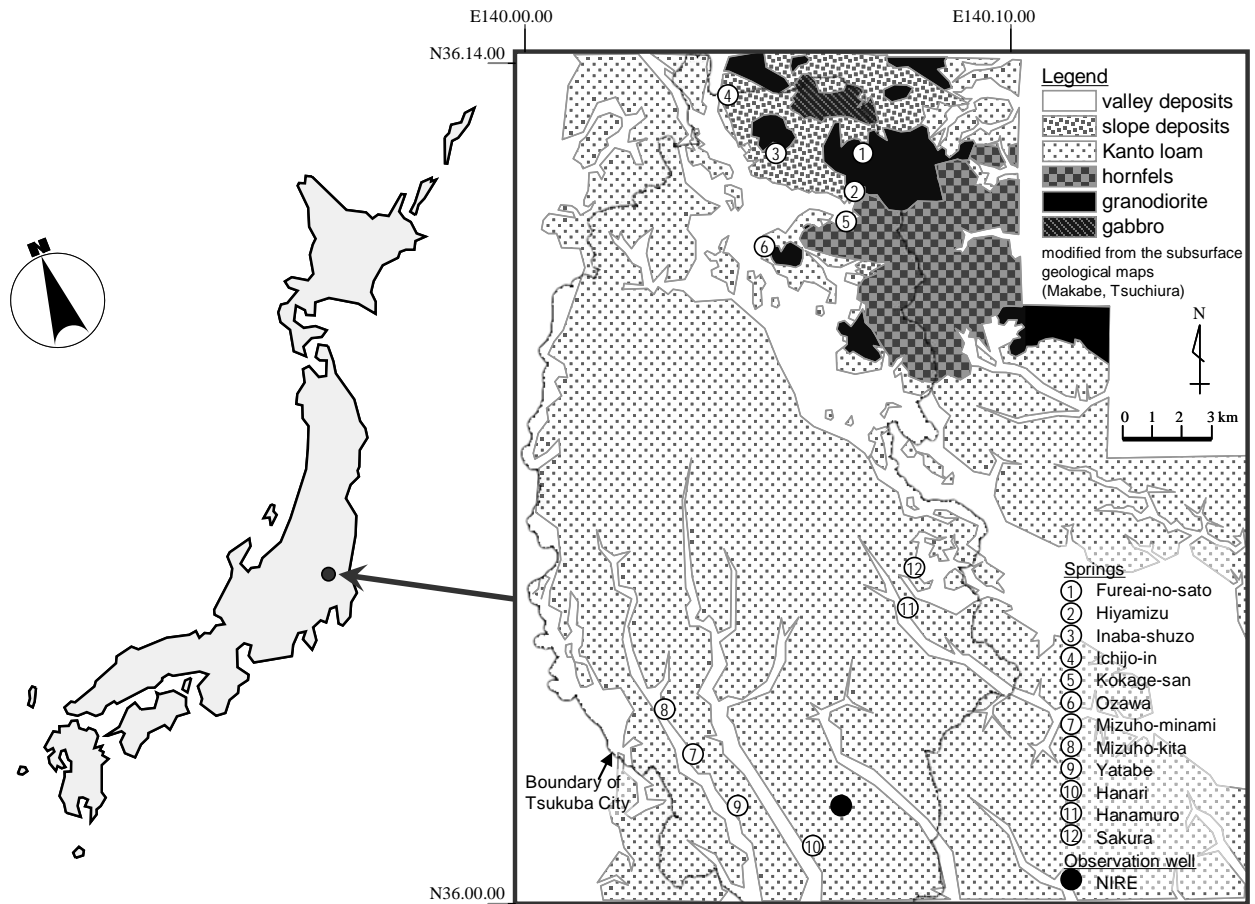
筑波山の周辺に分布する湧水の多くは、斑縞岩類や花崗岩類の巨岩や砂礫からなる斜面堆積物を帯水層とし、地形変換点など地表面と地下水面が交わる点から湧出していると考えられる(水尻ら, 2006)。これらのうち、花崗岩類は、一般にラドンの親核種であるラジウムを多く含んでいる。このため、花崗岩類を帯水層に含む湧水では、ラドン濃度が特に高くなる。一方、洪積台地に分布する湧水の多くは、台地周縁部の崖下に湧出している(水尻ら, 2006)。

洪積台地にある農村工学研究所の敷地内には、地下水観測のための井戸を設置している。井戸周囲の地質断面模式図を Fig.2 に示す。地質は上位から、表土、ローム、凝灰質シルト層、第四紀更新世の砂質土(石田ら, 2005b)、孔口は地表面から30cm上にある。測定時の地下水位は孔口から-7-9mの間で変動していた。なお、観測用井戸の保管材は、内径100mmの硬質塩化ビニル管(VP-100)である。

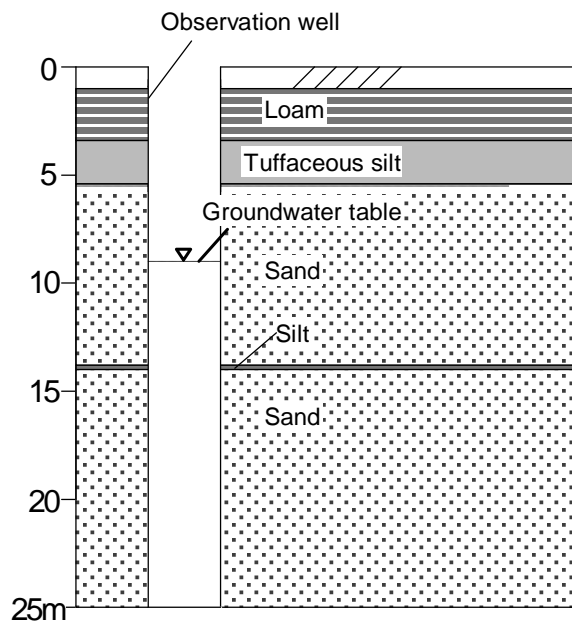
## IV 研究方法

### 1 従来法によるラドン濃度の測定

従来法によるラドン濃度は、濱田ら(1997)の方法に従った。シンチレータ(PPO 4.0g L<sup>-1</sup>とPOPOP 0.1g L<sup>-1</sup>)を溶解させたトルエン40mLを採取した地下水500mLに加えて攪拌、静置し、分離したトルエン20mLをガラスバイアルに回収して、液体シンチレーションカウンタ(パッカード社製2250CA)で測定した。測定時間は1試料50分で、検出限界は約0.037Bq L<sup>-1</sup>である。



**Fig. 1** 調査地区の表層地質（茨城県，1981，1983）と調査地点の位置  
Subsurface geology in the study area (modified from the subsurface geological map of Makabe and Tsuchiura) and the observation sites



**Fig. 2** 農村工学研究所内の観測用井戸の地質断面模式図（石田ら，2005b）  
Geological section around the borehole in the National Institute for Rural Engineering (NIRE)

## 2 フィルムのラドン吸収量の測定

ラドン吸収フィルムは、水に対して高いラドン分配率を有し、一定濃度のラドンを含む水中に設置すると時間とともにラドンを吸収してやがて平衡状態となる。このフィルムを回収して、上述のシンチレータに溶解させると、フィルムが吸収したラドン量を測定することができる。

本研究で使用するフィルムは、共立理化学研究所製 APDLS#1 である。湧水や井戸にフィルムを設置する際は、フィルムに錐で直径 2mm 程度の小穴を開鑿し、スナップ付きサルカンと釣り糸を用いて、フィルムが水面下に完全に浸るようにした (Fig.3)。フィルムのラドン吸収量は、一定期間設置した後に回収し、速やかに水分を拭き取り、シンチレータを溶解させたトルエン 20mL に溶かして、液体シンチレーションカウンタで測定した。測定時間は従来法と同様に 1 試料 50 分で、液体シンチレーションカウンタによる検出限界は約  $6\text{Bq kg}^{-1}$  (約  $0.006\text{Bq g}^{-1}$ ) である。

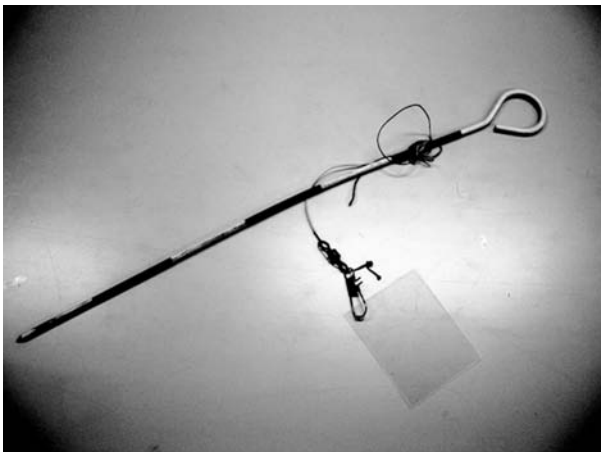


Fig. 3 湧水にフィルムを設置するための器具  
Picture of a setting instrument for the film

## 3 フィルム設置期間の検討

ラドン吸収フィルムのラドン吸収量から地下水のラドン濃度を推定する場合、最善なのは、平衡状態になるまでフィルムを設置し、式 (4) の分配率  $\dot{R}_i$  に分配係数  $R_p$  を当てはめて計算することである。しかし、完全に平衡状態になるまでには多大な時間が必要なため、実用的には、平衡状態とみなすことができる設置時間を決定する必要がある。

本研究では、農村工学研究所の観測用井戸 (Fig.1 の●, 以下、農工研井戸) の孔口からの深さ 14–15m (以下、深度 15m) にフィルムを設置し、設置期間を 1–9 日の間で変えながらフィルムのラドン吸収量を測定した。また、フィルム回収と同時に、採水した地下水試料のラドン濃度を従来法で測定し、それらの結果から設置時間  $t$  とラドン分配率  $\dot{R}_i$  の関係を求めた。なお、この測定は、

2006 年 8 月 3 日から 10 月 12 日までの間に実施された。後述のように、この期間のラドン濃度は  $8.3\text{--}10.1\text{Bq L}^{-1}$ 、平均は  $9.2\text{Bq L}^{-1}$  でほぼ一定と見なすことができる。また、この期間の水温は  $17.1\text{--}19.4^\circ\text{C}$ 、平均  $18.0^\circ\text{C}$  で、これもほぼ一定であった。

## 4 フィルム設置地点の選定

ラドン濃度の高低に拘わらずラドン吸収フィルムが適用可能であることを確認するために、フィルムの設置地点は、ラドン濃度の高い地点と低い地点からバランス良く選定する必要がある。このため、まず、地区内湧水 12 地点 (Fig.1 の①から⑫) におけるラドン濃度を従来法で測定した。これらの測定のための試料採取は、①から⑥については 2007 年 6 月 8 日に、⑧から⑩は 2008 年 1 月 9 日に、⑪と⑫は 2008 年 1 月 14 日にそれぞれ実施された。

湧水でのラドン濃度の測定結果を Table 1 に示す。筑波山周辺の湧水①から⑥で  $6.5\text{--}53.9\text{Bq L}^{-1}$  の比較的広い範囲のラドン濃度を示し、②ではラドン濃度が非常に高く  $53.9\text{Bq L}^{-1}$  である。これらのラドン濃度の違いは帯水層である斜面堆積物を構成する岩石の違いによるものと考えられ、特に②はラドンの親核種であるラジウムを多く含む花崗岩類の影響を強く受けていることが示唆される。一方、関東ローム分布地帯に位置する湧水⑦から⑫のラドン濃度は  $1.9\text{--}9.7\text{Bq L}^{-1}$  である。

本研究では、筑波山周辺からは最も高い濃度を示した湧水②とその近隣でフィルムの設置が可能であった湧水①を、関東ローム分布地帯からはフィルムの設置が容易であった湧水⑦と⑫ならびに農工研井戸の水面直下と深度 15m を、それぞれフィルム設置地点として選定した。

また、これらの湧水に加えて、農工研井戸の地下水水面下約 1m (孔口から 8–10m, 以下、水面直下) と深度 15m もフィルム設置地点として選定した。

Table 1 つくば市内の湧水のラドン濃度  
 $^{222}\text{Rn}$  concentration of springs in the study area

Springs	$^{222}\text{Rn}$ [ $\text{Bq L}^{-1}$ ]	Measurement
①Fureai-no-sato	12.6 ( $\pm 1.3\%$ )	} Jun. 8 <sup>th</sup> , 2007
②Hiyamizu	53.9 ( $\pm 0.6\%$ )	
③Inaba-shuzo	24.8 ( $\pm 0.9\%$ )	
④Ichijo-in	8.3 ( $\pm 1.6\%$ )	
⑤Kokage-san	13.1 ( $\pm 1.2\%$ )	
⑥Ozawa	6.5 ( $\pm 1.8\%$ )	
⑦Mizuho-minami	6.7 ( $\pm 1.9\%$ )	} Jan. 9 <sup>th</sup> , 2008
⑧Mizuho-kita	9.7 ( $\pm 1.5\%$ )	
⑨Yatabe	5.7 ( $\pm 2.0\%$ )	
⑩Hanari	1.9 ( $\pm 4.0\%$ )	
⑪Hanamuro	4.2 ( $\pm 2.4\%$ )	} Jan. 14 <sup>th</sup> , 2008
⑫Sakura	4.5 ( $\pm 2.2\%$ )	

※括弧内の百分率は計数誤差を表す

## 5 フィルムの現地適用可能性の検討

ラドン吸収フィルムによる地下水ラドン濃度測定の実地適用可能性を検討するために、上述によって選定された湧水①、②、⑦、⑫と農工研井戸の水面直下、深度15mにおいてフィルムの設置と回収を行い、フィルムのラドン吸収量と従来法によるラドン濃度を比較した。調査期間をTable 2に示す。フィルムは、水中に約1週間(6日以上8日未満)設置した後に回収し、20mLのシンチレータに溶解して持ち帰った後、ラドン吸収量 $\dot{A}_F$ を測定した。また、同時に従来法でラドン濃度 $\dot{C}_w$ を測定するとともに、電気伝導度(以下、EC)と水温(横河電機製SC82)を測定した。さらに、農工研井戸では、地表面からの地下水位を圧力式水位計(ウイジン製UIZ-WL2000)で1時間おきに自動観測した。日降水量はつくば市長峰の高層気象台のアメダスデータを参照した。

測定の結果から、約1週間設置したときのフィルムのラドン分配率 $\dot{R}_t$ を $\dot{A}_F/\dot{C}_w$ として計算し、 $\dot{R}_t$ の分布を調べた。また、 $\dot{C}_w$ や他の水質項目の時系列データから各地点における地下水ラドン濃度の変動を検討し、現地適用が可能な条件について検討した。

## V 結果および考察

### 1 フィルムの実用的な設置期間

農工研井戸の深度15mにおけるラドン吸収フィルムの設置期間 $t$ とのラドン分配率 $\dot{R}_t$ の関係をFig.4に示す。従来法で測定したラドン濃度の範囲は $8.3-10.1\text{Bq L}^{-1}$ 、平均は $9.2\text{Bq L}^{-1}$ であった。分配率 $\dot{R}_t$ は、設置後時間とともに上昇するが、 $t$ が4日を超えると $\dot{R}_t$ は30を超え、その後は30-36の間でほぼ横ばいになっている。なお、本実験におけるフィルムに吸着したラドン量の計数誤差は4.2-7.4%の範囲であった。

Fig.4の結果から、設置期間が5-9日の間であればフィルムのラドン分配率は大きく変わらないことが明らかになった。設置期間を約1週間(6日以上8日未満)とすれば、回収が1日程度前後しても分配率はあまり変わらないので実用的であると考えられる。一方、式(2)の指数関数モデルにこの結果を当てはめれば、1週間よりも短い設置期間のラドン分配率を求め、地下水中のラドン濃度を推定することが可能である。ただし、設置期間が短い場合は、フィルムがラドンを吸収している途中であるため、誤差が大きくなる可能性があるため注意が必要と思われる。

Table 2 各地点のEC、水温、ラドン濃度の平均および変動係数(CV)、ならびに測定の期間と回数  
Means and variation coefficients (CVs) of EC and  $^{222}\text{Rn}$  concentration, and periods and times of the measurement

Sites	Measurement		EC [ $\text{mS m}^{-1}$ ]		Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]		$^{222}\text{Rn}$ [ $\text{Bq L}^{-1}$ ]	
	Period	Time	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
①Fureai-no-sato	Aug. 20th, 2007, - Dec. 24th, 2007	18	11.4	6.70%	15.3	5.80%	14.9 ( $\pm 1.2\%$ )	8.80%
②Hiyamizu	Aug. 27th, 2007, - Dec. 24th, 2007	18	11.1	3.20%	14.8	9.90%	58.9 ( $\pm 0.6\%$ )	6.70%
⑦Mizuho-minami	Jan. 28th, 2008, - Feb. 25th, 2008	4	34.6	4.20%	9.9	27%	6.9 ( $\pm 1.9\%$ )	17%
⑫Sakura	Jan. 14th, 2008, - Feb. 25th, 2008	5	27.1	1.90%	9.5	40%	4.7 ( $\pm 2.3\%$ )	24%
●NIRE (IB <sup>†</sup> )	Jul. 19th, 2006, - Feb. 14th, 2008	89	11.7	16%	17	7.30%	7.7 ( $\pm 1.9\%$ )	36%
●NIRE (15m <sup>†</sup> )	Jul. 19th, 2006, - Feb. 14th, 2008	89	13.1	13%	17	5.70%	8.6 ( $\pm 1.7\%$ )	18%

† IB : 水面直下, 15m : 深度15m

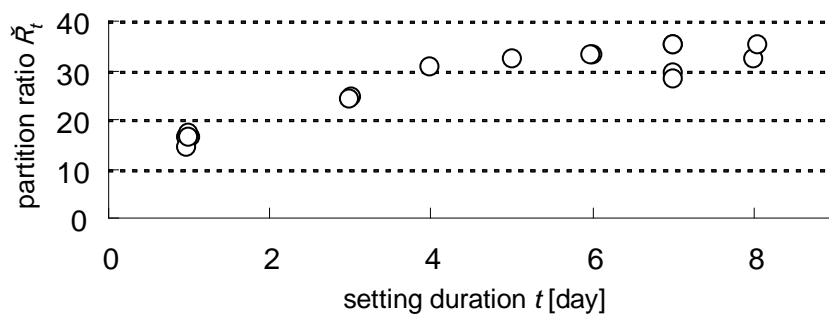


Fig.4 フィルムの設置期間 $t$ と分配率 $\dot{R}_t$ の関係  
Relationship between setting durations  $t$  and partition ratio of the film  $\dot{R}_t$

## 2 フィルムのラドン分配率と現地適用可能性

継続的に観測を実施した湧水①, ②, ⑦, ⑫における従来法でのラドン濃度と EC の変化を Fig.5 に, 農工研井戸におけるラドン濃度, EC, 地表面からの水位の変化, 日降雨量を Fig.6 にそれぞれ示す。また, ラドン濃度と EC, 水温の平均および変動係数を Table 2 に示す。湧水中のラドン濃度の変動は農工研井戸と比較して安定して変動係数も小さく, ①および②では特に変動が小さい。一方, 農工研井戸では大きな降雨イベント後に水位が上昇し, それに伴ってラドン濃度も低下して変動が大きくなる傾向があり, 特に水面直下でラドン濃度の変動が大きい。このような農工研井戸での地下水位およびラドン濃度の変動については, 降雨の浸透による希釈の影響が指摘されている(石田ら, 2005a)。なお, EC も, ラドン濃度と同様に, 農工研井戸の変動係数が大きく降雨後

に低下する傾向が見られるが, ラドン濃度ほどの顕著な変動は示さない。

湧水①, ②, ⑦, ⑫および農工研井戸の水面直下と深度 15 m において, ラドン吸収フィルムのラドン吸収量  $\dot{A}_F$  と従来法で測定したラドン濃度  $\dot{C}_W$  の関係を Fig.7 に示す。農工研井戸の水面直下および深度 15m では,  $\dot{A}_F$  と  $\dot{C}_W$  の関係がばらついている。従来法によるラドン濃度の変動が比較的大きい農工研井戸の結果を除外すれば,  $\dot{A}_F$  と  $\dot{C}_W$  との間に非常に高い相関関係 ( $R^2 = 0.99$ ) が認められ, この回帰曲線は  $\dot{C}_W = \dot{A}_F/26$  と求められる。また,  $\dot{C}_W$  と  $\dot{A}_F$  の測定結果から計算されるフィルムのラドン分配率  $\dot{R}_7$  の平均と変動係数を,  $\dot{A}_F$  と併せて Table 3 に示す。農工研井戸の水面直下および深度 15m の  $\dot{R}_7$  は, 湧水の  $\dot{R}_7$  と比較して, 変動係数, 平均ともに大きい。

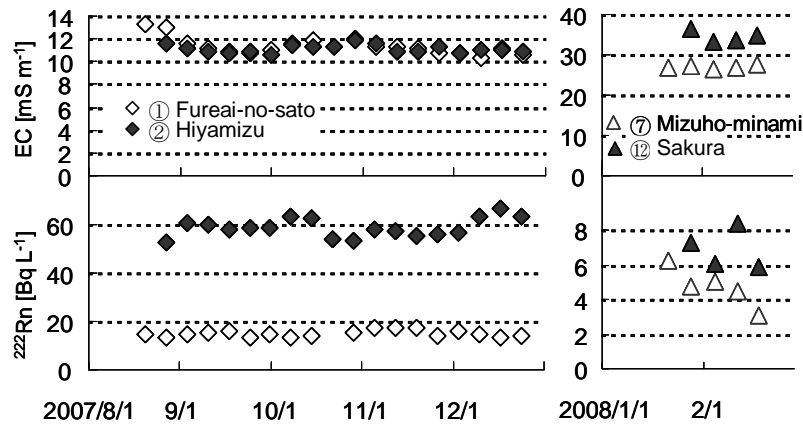


Fig.5 湧水地点における EC と従来法によるラドン濃度の変動  
EC and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations at the springs

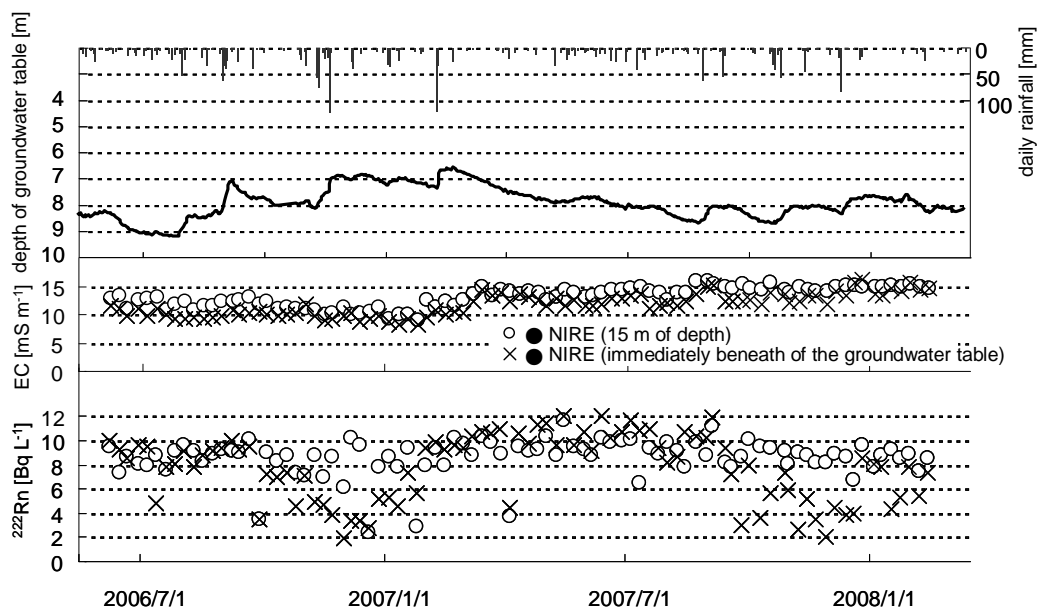


Fig.6 農工研井戸における地下水位, EC, 従来法によるラドン濃度, つくば市の降水量の変動  
EC,  $^{222}\text{Rn}$  concentrations, and groundwater level at the borehole in NIRE, and rainfall in Tsukuba City



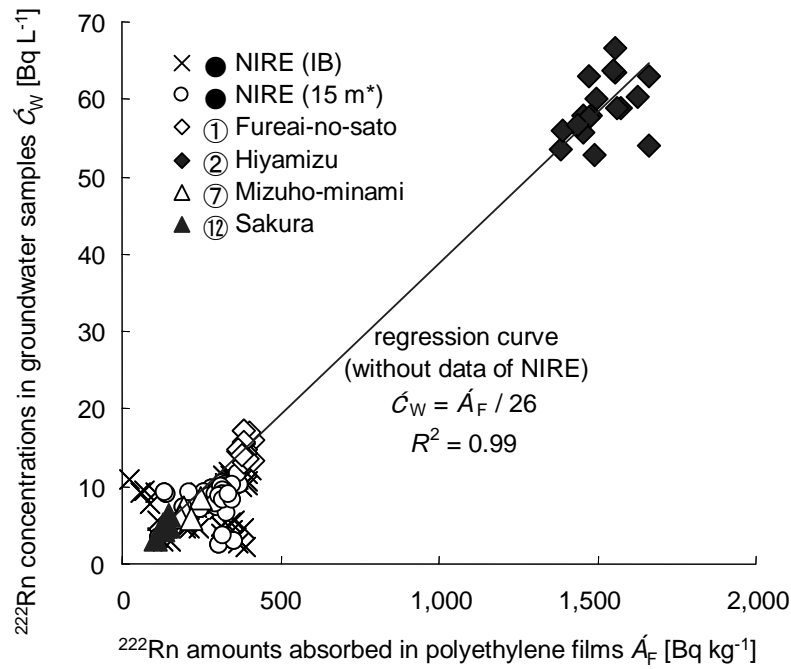


Fig.7 約1週間設置した場合のフィルムのラドン吸収量  $\hat{A}_F$  と従来法によるラドン濃度  $\hat{C}_W$  の関係  
Relationship between  $^{222}\text{Rn}$  amounts absorbed in the films  $\hat{A}_F$  and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in groundwater  $\hat{C}_W$

Table 3 約1週間設置した場合のフィルムのラドン吸収量  $\hat{A}_F$  と分配率  $\hat{R}_7$  の平均および変動係数  
Means and CVs of  $^{222}\text{Rn}$  amount absorbed in the films  $\hat{A}_F$  and partition ratio  $\hat{R}_7$

Sites	Time	$\hat{A}_F$ [Bq kg <sup>-1</sup> ].		$\hat{R}_7$ [no unit].	
		Mean	CV	Mean	CV
①Fureai-no-sato	18	390 (±3.7%)	3.30%	26	9.30%
②Hiyamizu	18	1500 (±1.7%)	5.50%	26	6.80%
⑦Mizuho-minami	4	210 (±5.4%)	13%	31	14%
⑫Sakura	5	130 (±7.7%)	12%	29	15%
●NIRE (IB <sup>†</sup> )	64*	290 (±5.2%)	32%	45	67%
●NIRE (15m <sup>†</sup> )	64*	300 (±4.6%)	16%	38	47%

\*設置期間が6日以上8日未満の範囲にあてはまらないデータは除外している

Fig.7に示されるように、湧水における  $\hat{A}_F$  と  $\hat{C}_W$  の測定結果は直線上に並び、その回帰曲線を(4)式にあてはめれば設置期間1週間( $t=7$ )の分配率  $\hat{R}_7$  は26である。本研究の湧水では、ラドン濃度の変動は小さく安定し(Fig.5)、 $\hat{R}_7$ の変動係数も小さい(Table 3)。このようなラドン濃度が安定している地点で従来法によるラドン濃度とフィルムのラドン吸収量を測定し、回帰曲線を作成して分配率を求めれば、(4)式によってフィルムのラドン吸収量から地下水ラドン濃度を算定することが可能である。一方、農工研井戸の水面直下および深度15mでは、ラドン濃度の変動が大きく(Fig.5)、 $\hat{R}_7$ の変動係数も47-67%で大きい(Table 3)。このように、ラドン濃度の変動が大きい地点の  $\hat{R}_7$  はばらつきが大きいので、回帰

直線を作成する際に除外するべきである。

フィルムによるラドン濃度推定法の誤差は、フィルムのラドン吸収量の計数誤差のみによるとみなせば、1.7-7.7%と評価できる(Table 3)。従来法での計数誤差は0.6-2.3%(Table 2)である。試料水を少量しか採取できない場合、従来法の測定を行うために  $n$  倍の希釈をすれば誤差率は  $\sqrt{n}$  倍となることから、おおよそ10倍以上の希釈が必要な場合、すなわち50mL以下の水量しか採取できない場合はフィルムによる測定法を用いることでより誤差の少ない測定が可能である。

フィルム内に一旦吸収されたラドン量は、周囲の地下水中のラドン濃度が急速に変化しても、緩やかに平衡状態に近付くため変動が小さい。このことから、フィルム

を用いることで設置期間の平均的なラドン濃度を測定できると考えられる。一時的な変動を調査する目的ならば従来法を、長期的な変動を調査する場合はフィルムを、というように使い分けることが可能である。例えば、かんがい期と非かんがい期の地下水ラドン濃度の違い（例えば、濱田・小前, 1996）など長期的な変化を調査する場合、従来法では傾向を調べるために何度も採水・分析する必要があるが、フィルムによる測定法を用いれば測定回数を軽減することができる。今後の研究によって、ラドン濃度変動に伴うフィルムのラドン吸収量の経時変化を明らかにし、フィルムによって測定されるラドン濃度が設置期間の平均的な濃度であることを確認するとともに、誤差や適用条件を示すことが必要である。

本研究で推定されたラドン吸収フィルムの分配率  $\bar{R}_t$  は、ばらつきの大きい農工研井戸の結果を除くと 26–31 の範囲である (Table 3)。これは、斎藤ら (2003) が示す 15℃ で 6 日および 8 日漬け置いた場合の分配率 45.5 および 48.4 と比べて小さい。この差異は、斎藤ら (2003) の実験は閉鎖系であるが本研究は現地の湧水で実施されたことの違いやシンチレータカクテルの違いなどによる可能性が考えられる。また、斎藤ら (2003) が示すようにフィルムのラドン分配率は水温に依存することから、水温が異なる地点に本手法を適用する場合は、調査対象とする地点の水温に対応する回帰曲線を作成して分配率を求める必要がある。

## VI 結 言

つくば市内の湧水および観測用井戸における地下水ラドン濃度を従来法によって測定するとともに、ラドン吸収フィルムをこれらの地点に設置してラドン吸収量を測定し、従来法による結果と比較から、フィルムによる地下水ラドン濃度測定の実用性を検討した。結果は以下のとおりである。

- ① ラドン吸収フィルムのラドン分配率は、設置時間が 4 日を超えるとほぼ横ばいになる。フィルムによるラドン濃度測定法を適用する上では、設置期間を 1 週間とすれば回収が 1 日程度前後しても分配率があまり変わらないので、設置期間を 1 週間 (6 日以上 8 日未満) とするのが実用的である。
- ② ラドン濃度が安定している地点において従来法によるラドン濃度とフィルムのラドン吸収量を測定し、回帰曲線を作成して分配率を求められることで、フィルムを用いた地下水ラドン濃度測定が可能である。
- ③ ラドン吸収フィルムによるラドン濃度測定法は、岩盤の切れ目から滲出する湧水地点や、底部付近のみ地下水を有する観測用ボーリング孔など、水量が少ない地点でも測定が可能である。フィルムのラドン吸収量と従来法の計数誤差の比較から、50mL 以下の水量しか採取できない場合は、フィルムによる

測定法を用いることでより誤差の少ない測定が可能である。

- ④ フィルムによって測定されるラドン濃度は、一時的な変動ではなく、設置期間の平均的な濃度を示している可能性が高い。今後の研究によって、フィルムによって測定されるラドン濃度が設置期間の平均的な濃度であることを確認するとともに、誤差や適用条件を明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 濱田浩正, 小前隆美 (1996): 土壌水の  $^{222}\text{Rn}$  濃度と飽和度の関係, *Radioisotopes*, 45(7), 413–418
- 2) 濱田浩正, 今泉眞之, 小前隆美 (1997): ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, 農業工学研究所報告, 36, 17–50
- 3) 茨城県 (1983): 1/50,000 土地分類基本調査 (表層地質図) 土浦
- 4) 茨城県 (1981): 1/50,000 土地分類基本調査 (表層地質図) 真壁
- 5) 石田 聡, 森 一司, 土原健雄, 今泉眞之 (2005a): 地下水人工かん養施設における段丘砂礫層のマクロポアを流れる卓越流の降下浸透速度, *応用地質*, 46(4), 207–219
- 6) 石田 聡, 土原健雄, 今泉眞之 (2005b): 不飽和帯の自動中性子水分検層技術の開発, 農業土木学会論文集, 73(3), 313–321
- 7) 国土交通省 (2009): 日本の水資源, 279
- 8) 宮崎一博, 笹田政克, 吉岡敏和 (1996): 真壁地域の地質, 103
- 9) 水尻正博, 藪崎志穂, 田瀬則雄, 辻村真貴 (2006): 茨城県つくば市における湧水の特徴, 筑波大学陸域環境センター報告, 7, 15–29
- 10) 斎藤正明 (1999): 核種を吸収した高分子材料を液体シンチレータに溶解する新ラドン測定技術, *Radioisotopes*, 48(4), 257–262
- 11) 斎藤正明, 奥村 浩, 岡内完治 (2003): ラドンの簡易測定法—ポリスチレンフィルムを用いる液体シンチレーション計数法, *Radioisotopes*, 52(10), 483–489
- 12) 斎藤正明: 地下水帯水層におけるラドン濃度の不均一性, *地下水技術*, 47(2), 1–6 (2005)
- 13) 土原健雄, 吉本周平, 石田 聡, 今泉眞之 (2006): ラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) を用いた地下水モニタリング技術の新たな展開, 農業土木学会誌, 74(11), 981–984
- 14) 宇野沢昭, 磯部一洋, 遠藤秀典, 田口雄作, 永井 茂, 石井武政, 相原輝雄, 岡 重文 (1988): 1/25,000 筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図説明書, 139

# Applicability of Polystyrene Film to Measurement of Radon Concentration in Groundwater

YOSHIMOTO Shuhei, TSUCHIHARA Takeo, ISHIDA Satoshi and IMAIZUMI Masayuki

## Summary

Application of polystyrene films is a new and simple way to measurement of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in groundwater at sites where sufficient sample water is not available to apply existing methods. In order to examine the applicability of the films, we set the films in groundwater at springs and wells in Tsukuba City, and measured absorbed amounts of  $^{222}\text{Rn}$  in the films along with  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in the groundwater by an existing method. Practicable duration of the film setting seems to be a week, because partition ratios of the films would remain roughly flat after 5 days from installation of the films. The measuring method for  $^{222}\text{Rn}$  concentrations using the films would be enabled by making a regression curve between  $^{222}\text{Rn}$  amounts absorbed in the films and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations measured by the existing method. At sites where groundwater sample of less than 50 mL is available, errors of measurement using the films are estimated smaller than those by the existing method. Measured  $^{222}\text{Rn}$  concentrations by the films seems to reflect not instantaneous concentrations but averaged concentrations in the setting durations, which should be confirmed by future studies.

**Keywords** : Radon, Groundwater, Polystyrene film, Liquid scintillation, Easy method



## 農業用開水路のLCC算定システムの構築と活用方策

本間新哉\*・森 丈久\*・西原正彦\*

## 目 次

I 緒 言	45	1 環境影響評価への取組み	53
II LCC算定システムの構成	46	2 施工単価に対応した面積当たり CO <sub>2</sub> 排出量の算定	54
1 LCC算定システムの構成と特徴	46	3 LCCO <sub>2</sub> の算定結果	54
2 システムへの入力と出力	47	4 LCCO <sub>2</sub> 算定における課題	55
III LCC算定の試行と結果	50	V 結 言	55
1 検討に用いたLCC算定条件例	50	参考文献	55
2 LCC算定結果	51	Summary	57
3 考察	52		
IV LCC算定システムの活用	53		

## I 緒 言

農業水利施設の施設劣化状態の診断から対策工事の実施までを一貫してできる「基幹水利施設ストックマネジメント事業」が平成19年度に創設され、また併せて、国が造成した施設の劣化状況の診断を全国的に実施する制度整備が行われた。さらに平成21年度からは「地域農業水利施設ストックマネジメント事業」により団体営事業等で造成された農業水利施設を対象とする事業が実施されるなどストックマネジメントは国・県・市町村といった多様なレベルで取り組みが進んでいる。そして農林水産省では、マニュアルの整備を進め、現在「農業水利施設の機能保全の手引き」（以下、「手引き」と記す）として、総論編、開水路編、パイプライン編、頭首工、頭首工（ゲート整備）編を整え、ストックマネジメント技術の体系化が進められている。ストックマネジメントの取組みの目的は、農業水利施設の適切な機能保全とライフサイクルコスト（LCC：施設の建設・維持管理等に係る全てのコスト）の低減を図ることにある。このため水利施設の将来状態の劣化予測を行い、またLCCを算定することは非常に重要な工程と位置づけられる。これまで橋梁分野においては、パソコン上で作動するLCC算定ソフトが作成されていたが、橋梁の構成要素が複雑であることなどから、農業水利施設への適用には課題が

あった。このような背景の下、筆者らは、施設の診断手法や劣化予測手法等の研究成果を踏まえ、今後のLCC研究や研究成果の社会還元に資するため、広く普及している計算ソフト（Excel 2003）上で作動する農業用水路を対象としたプロトタイプのLCC算定のためのシステム（以下、「LCC算定システム」と記す）を2009年に作成した（Excel 2010対応は開発中）。

手引きの総論編では、施設の建設に要する経費のみならず、供用期間中の維持保全コストや、廃棄にかかる経費に至るまでのすべての経費の総額をライフサイクルコスト（LCC）としている。一方、LCC算定システムは、既存の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」と記す）を対象として、施設の維持、補修・補強、更新に係る費用を算定するシステムで、初期建設費を含まない簡便なLCCともいえるが、本報告では、以下これをLCCとして取り扱う。なお、恒久的に使用する公共施設を対象として、更新費用を維持管理に取り込み、初期建設、損失のみが生じるリスクを考慮し、LCC = 初期建設費 + 維持管理費用 + リスク（既存施設の場合、初期建設の項については特に設ける必要はない）、として評価するという考え方の例がある（日本コンクリート工学協会、2006）。

システム作成後、より実用的なシステムの構築を目的として、現地の点検・診断データを基にLCC算定システムの検証を重ねた。更に、低炭素社会を目指す社会の動向に対応したストックマネジメントへの活用について検討を加えた。

本報告は、構築されたプロトタイプのLCC算定システムの改良を目的として、現時点でのシステム構築の考

\* 農村総合研究部地域資源保全管理研究チーム

平成23年1月18日受理

キーワード：農業用開水路（RC）、LCC、単一劣化予測モデル、マルコフ連鎖モデル、CO<sub>2</sub>排出量

え方や改善方向について検討するとともに、環境影響評価への活用方策について検討を行うものである。

## II LCC 算定システムの構成

### 1 LCC 算定システムの構成と特徴

LCC 算定システムは、農業用水路を対象としたものである。そして、現場での施設の点検・診断データ蓄積を基に、劣化予測グラフを作成し、適時に応じた補修・補強・更新費用の算定を行うとともに、年度事業予算に応じた施工時期の調整までの一連の作業が一つのパッケージとして構成されている。

LCC を算定する概略の流れは以下の様に示すことができる。

- ① 既存施設の状態の点検・診断調査を行い、データの蓄積を行う。
- ② 蓄積されたデータに基づき劣化予測を行う。
- ③ 劣化のレベルに応じた対応策の設定を行う。
- ④ 劣化予測と対応策を用い、社会的割引率を考慮した LCC 算定を行う。

なお、ストックマネジメントでは、複数のケースの LCC 算定結果について総合的に比較検討し、採用する工事計画を決定することとなる。

#### a LCC 算定システムが対象とする農業用水路の構成

LCC 算定システムの対象としている水路は、①水路壁面、②水路底版、③継目で構成される構造物で、最小構成単位としては1バレル（継目から継目まで）としている。このことにより、扱う対象施設の構成が単純になるという利点がある (Fig.1 ~ Fig.3)。複数の水路からなる1つの水路系を対象に LCC 算定の実施ができる。

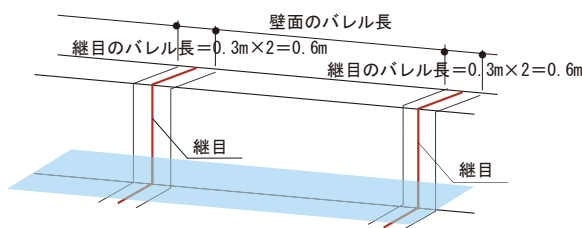


Fig. 1 壁面のバレルと継目  
Wall and Joint

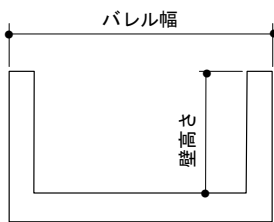


Fig. 2 水路幅と壁高さ  
Width of canal and wall height

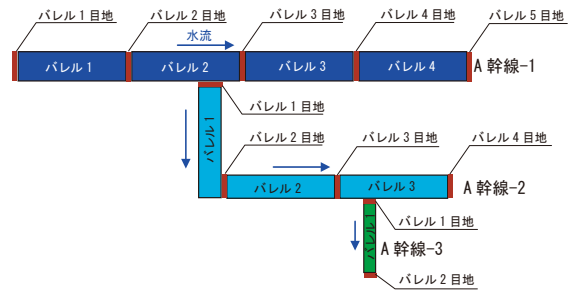


Fig. 3 水路番号とバレル番号の考え方の例  
Canal number and Barrel number

#### b LCC 算定システムの全体構成

LCC 算定システムは

- ① 「点検情報入力ファイル」：農業用水路のサイズ情報や点検・診断結果を蓄積するファイル
- ② 「劣化予測ファイル」：診断結果を基に将来の劣化予測グラフを作成するファイル
- ③ 「維持管理シナリオファイル」：健全度に応じた補修・補強・更新対策工法を設定するファイル
- ④ 「LCC 評価システムファイル」：①～③を統合的に管理して LCC を算定するファイル

の4つのファイルにより構成されている。4つのファイルを用いた LCC の算定の流れを Fig.4 に示す。

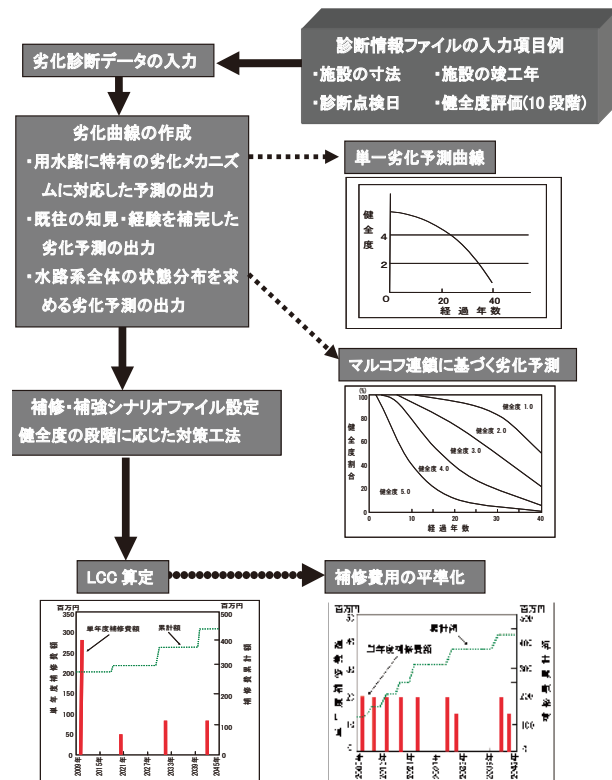


Fig. 4 LCC 算定システムの全体の流れ  
LCC calculation system flow

**Table 1** 点検診断情報の入力例  
Information of Check and Deterioration Estimation

バレル番号	バレル長(m)	バレル寸法		部 位	主たる劣化機構		完成年月日	健全度を判定した日	
		幅(m)	壁高さ(m)		健全度評価	劣化機構			
1	0.6	1.5	1	継目	右	4.5	継目劣化	1995/3/31	2008/11/13
					左	4.5	継目劣化	1995/3/31	2008/11/13
					底	4.5	継目劣化	1995/3/31	2008/11/13
	9.0	1.5	1	壁面	右	3.5	壁面摩耗	1995/3/31	2008/11/13
					左	3.5	壁面摩耗	1995/3/31	2008/11/13
					底	3.5	壁面摩耗	1995/3/31	2008/11/13

2 システムへの入力と出力

システムを構成する各ファイルのデータ入力項目および LCC 算定の条件等を以下に述べる。

a 点検情報入力ファイル

このファイルは、LCC を計算する農業用水路のサイズ情報や点検・診断情報を入力するファイルとなる。

水路網をなす農業用水路を、複数の水路から構成される 1 つの水路として区分し、Excel の一つのワークシートに、一つの水路名（水路番号）に対応した点検・診断情報を入力する。同一の水路系内に複数の水路がある場合は、複数のワークシートを使い入力する。ワークシート毎に水路名を設定して、情報を入力することにより一つの基本情報・点検情報ファイルを構成する。サイズ情報としては、バレル毎に、バレル番号、施設のサイズ（バレル長、高さ、幅）、部位区分（目地の左・右・底、壁面の左・右・底）を入力する。点検情報としては、主たる劣化機構（継目劣化や壁面劣化）、健全度評価結果（5.5, 5.0, 4.5・・・1.0 の 0.5 刻み）、工事完成年月日、健全度を判定した日（点検日）の項目がある（Table 1）。

主たる劣化機構に対する健全度評価は、健全度の調査結果を入力する項目で、統計的手法による劣化予測を用いた LCC を算定する場合に必要となる。健全度は、5.5, 5.0, 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 の 10 段階で判定し、健全度 5.5 は、完成時の健全度としている。健全度 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 は、コンクリート標準示方書 [維持管理編] (土木学会, 2000 年) で示されている劣化の進行過程である潜伏期, 進展期, 加速期前期, 加速期後期, 劣化期にある健全度を示すものであり、健全度 4.5, 3.5, 2.5, 1.5 は、劣化の進行過程の境を表す健全度で、例えば健全度が 4.0 と 3.0 の中間にあると判断された場合、3.5 と記入するものである。健全度評価では、北村ら (2008) が水路の診断に 10 段階の健全度評価を用い、劣化予測を行った例がある。

なお、主たる劣化機構には、例えば、ある施設が中性化と塩害の両方により劣化が進行していた場合におい

て、劣化の進行の関与が大きいと判断される劣化機構を選定することとした。

b 劣化予測ファイル

劣化予測のモデルは、大きく 2 つに分類される。一つは、中性化に代表されるコンクリート構造物の劣化機構について、既往の研究や知見から求められた経験式を活用する個別劣化現象モデル、もう一つは、既往の劣化機構では予測モデルの作成が困難な場合で（水路壁面の凹凸進行や継目の劣化等）、点検データを基に統計手法を用いて劣化予測を行う統計モデルである。統計モデルはさらに二つに分かれ、壁面等バレル毎の劣化に対応して個別の劣化予測を行うことができる単一劣化曲線モデルと、水路系全体の劣化の割合を基に劣化進行を予測するマルコフ連鎖モデルに分かれる（農業土木事業協会, 2007）。

個別劣化現象モデルとしてはコンクリートの代表的な劣化機構のうち、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリシリカ反応、ひび割れ（初期ひび割れ）について、コンクリート標準示方書 [維持管理編] (土木学会, 2001) 等の既往文献から求まる式や経験則に、水利施設の材料や部材厚等の設計条件（水セメント比や鉄筋のかぶり値等）、地域の気象条件（凍結融解サイクル等）の諸元、を入力することにより劣化予測式を作成する。

統計モデルについては、上記以外の劣化機構に対し、施設の完成からの経過年と劣化状態を評価した健全度評価結果を入力したファイルを用いて、単一劣化予測モデル（単一劣化曲線モデルを基にシステムのために設定した予測モデル）、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測状態を計算する。

単一劣化予測モデルの場合、点検結果（完成時または補修時から点検時までの経過年数と健全度）を用いて行う。具体的な単一劣化予測モデルの作成には、農林水産省で公表している「農業水利施設の機能保全の手引き」（総論編）で示されている、2 次関数による劣化曲線を準用した。そして、まず経過年（X 軸）と健全度評価（Y

軸)の点検結果データを用い、この関係を上に凸で切片5.5を通る二次放物線で曲線近似して求める。得られた二次曲線近似のY座標5.5, 4.5, 3.5, 2.5, 1.5の交点を直線で結び、この直線を劣化予測に用いるモデルとした(Fig.5)。

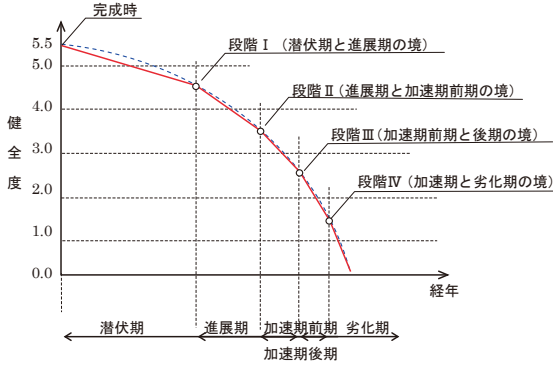


Fig. 5 単一劣化予測モデル  
Regression prediction model

マルコフ連鎖モデルは、各健全度の割合の経年変化を予測するモデルで、点検結果(完成時または補修時から点検時までの経過年数と健全度)を用いて劣化予測を行うこととなる。劣化予測ファイルでは、マルコフ連鎖(マルコフ過程)によるLCCを算定するための推移確率x

を点検結果から求めた。

推移確率xは、状態を健全度(5.5~1.0の10段階)とし、各状態から次の状態に推移する確率をx1~x9とすると、各健全度のt年後の割合は式(1)のように表すことができる(Fig.6)。

推移確率を求める場合、計算を簡単にするため推移確率x1 = x2 = ... = x9とする方法があるが、劣化予測ファイルではそれぞれの推移確率は劣化進行過程によって異なると考え、推移確率を以下の方法で個々に求めるものとした。

点検結果から健全度5.5のt1年後、t2年後、...の割合を求め、これに合致するx1を最小二乗法で求める。次に、点検結果から健全度5.0のt1年後、t2年後、...の割合を求め、x1を既知としてこれに合致するx2を最小二乗法で求める。同様に、順次x3~x9を求めることとした。推移確率は、データを基にマクロを用いて上記に示した手順で自動計算されるが、実測された健全度割合を参考にしつつ、推移確率を再設定することができる。

壁面摩耗を対象とし、マルコフ連鎖モデルを用いて算定された経過年別(10年, 20年, 30年, 40年経過)の健全度割合表示の例をFig.7(左:自動計算)に示す。LCC算定システムでは、実測された健全度割合(Fig.7(右:実測))を併せて表示する。実際の点検では、十分な量の観測データの収集が困難または、収集しても、観

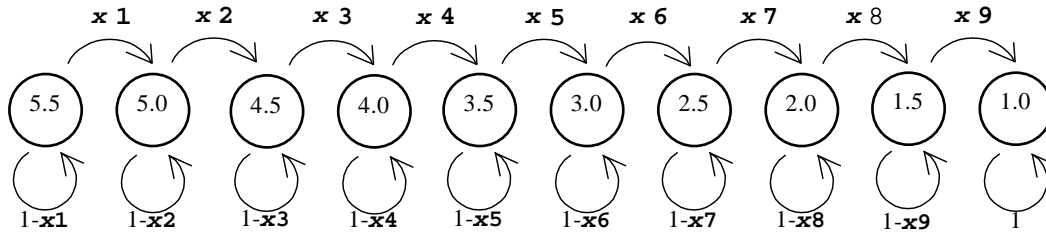


Fig. 6 健全度と推移確率  
Sound degree and transition probability

健全度の割合

$$\begin{pmatrix} P_{5.5} \\ P_{5.0} \\ P_{4.5} \\ P_{4.0} \\ P_{3.5} \\ P_{3.0} \\ P_{2.5} \\ P_{2.0} \\ P_{1.5} \\ P_{1.0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & 1-x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_2 & 1-x_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_3 & 1-x_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & 1-x_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_5 & 1-x_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_6 & 1-x_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_7 & 1-x_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_8 & 1-x_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_9 & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

x: 推移確率      t: 施設の経過年数



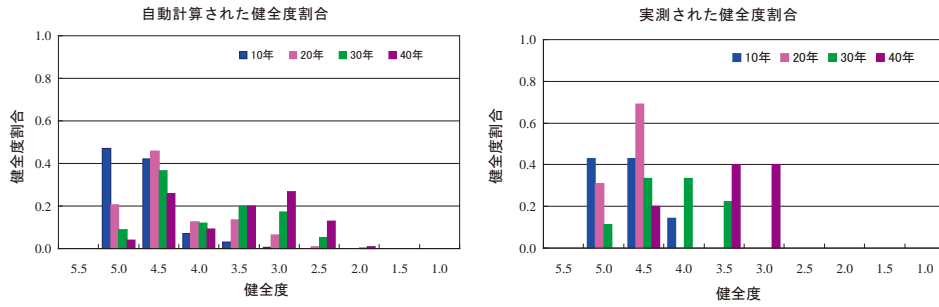


Fig.7 経過年別健全度割合 (左：自動計算, 右：実測)  
Sound degree ratio by elapse years (L: Computation, R: observation)

Table 2 維持管理シナリオ入力例  
Setting of measures construction

実施時期 (シナリオ名)		シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
対策を実施する健全度		4.5	3.5	2.5
加速期前期 (3.5 ≥ 健全度 > 2.5)	対策工法	壁面清掃 表面被覆	はつり除去 (10mm) 断面修復 (10mm) 表面被覆	はつり除去 (20mm) 断面修復 (20mm) 防錆 表面被覆
	補修数量	壁面100%	壁面100%	壁面100%
	補修費	補修費単価 × 壁面積	補修費単価 × 壁面積	補修費単価 × 壁面積
	回復レベル (健全度)	5	5	5
	補修費単価 (円/m <sup>2</sup> )	10,200	24,200	34,100

測されない健全度があるデータとなる場合が多い。LCC 算定システム使用者は、実測と自動計算された結果を見比べ、実測された健全度割合の特徴をよく示す推移確率を試行錯誤により設定し、劣化予測に用いるマルコフ連鎖モデルを定めることができる。

c 維持管理シナリオファイル

維持管理シナリオファイルは、農業用水路の LCC を算定する際の、維持管理方針 (対策実施の健全度) と対策工法 (対策工の種類等) を関係付けたファイルである (Table 2)。一番左の枠に対策を実施する健全度を設定し、その横枠に健全度に応じた対策工法、補修数量、補修後の回復レベル、補修費単価を設定する。補修費単価は、面積 (m<sup>2</sup>) 当たりを共通単位としている。シナリオは、自由に 100 のケースまで設定が可能となっている。対策を実施する健全度は、進展期 (4.5 ≥ 健全度 > 3.5)、加速期前期 (3.5 ≥ 健全度 > 2.5)、加速期後期 (2.5 ≥ 健全度 > 1.5)、劣化期 (1.5 ≥ 健全度) の 4 つの区分となっている。維持管理シナリオは、水路単位で設定が可能である。

このように健全度に応じた対策工法の組合せをシナリオとして複数設定することが可能で、また異なるシナリオの比較が一覧できる。

LCC 算定システムでの劣化予測は、当初に劣化予測ファイルで設定した劣化予測モデルを全てのシナリオで

使用する事としている。シナリオファイルで設定する対策工法の劣化進行が予測モデルと大きく異なる、あるいは耐用年数が明らかに小さいような場合等については、「回復レベル」の項目設定で対応が可能である。

「回復レベル」には、0.0 ~ 5.5 までの数値設定を入力する。補修・補強の場合は 5.0、更新の場合は 5.5 の設定を標準としている。ここで、回復レベル 0.0 とは、健全度が「対策を実施する健全度」に達した時、対策を実施するが、「健全度の回復を行わない」場合に使用することとしている。回復レベルの設定により補修・補強の想定される耐用年数の補正が可能と考える。なお、耐用年数 100 年が想定される対策工法についての補正対応は困難である。

d LCC 評価システムファイル

LCC 評価システムファイルでは、上記 a ~ c のファイルと共に、LCC 算定開始年、LCC の算定期間 (最大 100 年)、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測に必要な対策開始の健全度割合 (%), 社会的割引率 (%), 水路毎に対応する対策シナリオ名を入力することにより (Table 3), LCC 算定結果が表データとグラフで出力される。また、年度の実施予算に制約が生じた場合、LCC 算定結果を基に、目標年度予算、先送り許容年数、集約期間を入力することにより、対策工法の実施時期の調整 (平準化) を行うことを可能としている。平準化により

各年度の補修に係る予算配分が均等化され、現実的な補修計画を立案するための資料となる。なお、集約期間とは、補修工事の効率化を図るため、複数の期間に散らばっている補修等の対策を同一年度を実施するように設定するものであり、先送り許容年数とは、平準化を実施する場合に、対策を先送りして良いと考える先送りが許容できる年数をいう。

現在、公共事業における社会的割引率の適用は4%であるが、任意の社会的割引率を設定することができる。

単一劣化予測モデルの場合、補修の時期は、要素（壁面と継目の各バレル）が維持管理シナリオの対策を実施する健全度に達した時となる。

マルコフ連鎖モデルの場合、補修の時期は、水路毎の要素（壁面、継目）の健全度割合が設定値以上に達した時となる。また補修は、シナリオで設定した対策を実施する健全度以下の水路を対象として実施することを基本とするが、水路毎のシナリオ選定の際に、「健全度4.5以下の全ての要素」を含めて対策工法を実施するという選択が可能である。

### III LCC算定の試行と結果

LCC算定システムを用いて、5つの水路を一つの水路系とする水路網（総延長4,435 m、総バレル数545）を対象としたLCC算定を行った。

#### 1 検討に用いたLCC算定条件例

LCC算定の基本的な条件はII章で示した通りであるが、検討に用いたLCC算定の例について設定条件を以下に述べる。

##### a 共通事項

- ① 維持管理の考え方として、4つのシナリオを設定した（Table 4）。シナリオ1は軽微な補修による維持管理、シナリオ4は施設の更新に相当する。
- ② LCC算定期間は、LCC算定システムの最大算定期間である100年とした。
- ③ 社会的割引率を4%としてLCC算定を行った。

##### b 予測に使うモデルの主な特徴

LCC算定システムで用いる予測に使うモデルの主な特徴をTable 5に示した。

Table 3 LCC評価システムファイル入力項目  
Input item to LCC calculation system file

入力項目	入力作業
1. 基本情報・点検情報ファイルの選択	作成した情報ファイルを選択
2. 劣化予測ファイルの選択 ①単一劣化予測モデル ②マルコフ連鎖モデル	単一劣化またはマルコフ連鎖を選択した後、作成した予測ファイルを選択
3. 維持管理シナリオファイルの選択	作成したシナリオファイルを選択
4. LCCの算定 ①LCC開始年 ②LCC算定期間 ③マルコフ対策実施割合 ④社会的割引率 ⑤水路毎のシナリオファイル	LCC開始年を西暦で入力 LCC算定期間を年単位で入力 マルコフ対策の実施割合を%単位で入力 社会的割引率を%単位で入力 水路毎のシナリオファイルを選択
5. 補修費用の平準化計算 ①目標年度予算 ②先送り許容年数 ③集約期間（3～5年が目安）	目標年度予算を円単位で入力 許容年数を年単位で入力 集約期間を年単位で入力

Table 4 維持管理シナリオの区分  
Section of maintenance scenario

シナリオ区分	維持管理の考え方	管理レベル	回復レベル
シナリオ1	維持管理レベルを高く設定して、大がかりな補修・改修工事を行わないような水路の維持管理を実施	健全度4.5	健全度5.0
シナリオ2	水路躯体の軽微な劣化は許容し、所定の劣化段階に至った後に補修工事を実施	健全度3.5	健全度5.0
シナリオ3	水路の損傷を許容し、鉄筋の露出や目地からの漏水など、水路としての機能が保たれない状態になった段階で補修・補強を実施	健全度2.5	健全度5.0
シナリオ4	水路を更新することを前提に、水路機能が満足しなくなるまで使用	健全度1.5	健全度5.5

**Table 5** LCC 算定システムの予測に使うモデルの主な特徴  
Characteristics of predictive models

劣化予測モデル	マルコフ連鎖モデル
・ LCC 計算は、点検情報入力ファイルの主たる劣化機構に単一点検結果が記載された要素（パレル単位での壁面・継目）ごとに計算を行う。	・ LCC 計算は、点検情報入力ファイルに記載された一つの水路毎の継目、壁面、底版それぞれを一つの単位として計算を行う。
・ 補修の時期は、要素が維持管理シナリオの管理の対策を実施する健全度に達した時とする。	・ 補修の時期は、水路単位の目地、壁面、底版の健全度割合が設定値（%）以上に達した時とする。
・ 各水路の LCC は、水路を構成する要素の LCC の合計とし、水路系の LCC は、水路系を構成する水路の LCC の合計とする。	・ 補修の対象を、対策を実施する健全度以下の水路に限定、あるいは健全度 4.5 以下の全ての水路の 2 通りを選定できる。

**c 単一劣化予測モデルによる LCC 算定**

LCC 算定の試行における単一劣化予測モデルは、筆者らが収集した水路の壁面の点検結果事例から、劣化予測ファイルにて算定された式を用いた（式 (2)）。

この式では、初年度の健全度 5.5 から 55 年経過すると、おおむね健全度 1 に達する。また単一劣化予測モデルは、壁面摩耗、継目劣化それぞれに設定する事ができるが、ここでの検討では同じ式 (2) を用いた。

$$Y = -0.0014 \times X^2 + 5.5 \tag{2}$$

Y：健全度    X：供用年数

平準化は LCC 計算で得られた各年度に発生する補修費が目標年度予算に収まるようにピークカットを行い、各年度の予算を均等化し、現実的な補修計画を立案することを目的としている。このための基本的条件として、集約期間の設定や、先送り許容年数を設定している。集約期間内にある複数の水路を補修する場合、補修工事の効率化を図るために同一水路毎に補修等の対策を行うよう対策を集約する。集約期間内に補修等の対策が必要な複数水路が存在する場合、集約期間内での補修等の対策費の合計が高い水路を優先とする。なお、使用者は、自動平準化の結果を参考にして補修等の対策時期の変更が可能である。

**d マルコフ連鎖モデルによる LCC 算定**

マルコフ連鎖モデルにおいては、対策を実施する時期を各健全度割合が 30% となるときとした（農業水利施設の機能保全の手引き(2007)を参考にして設定）。また、推移確率 (x1 ~ x9) は、北村ら (2009) がマルコフモデルの検討で用いた推移確率  $x = 0.12$  を援用して計算を行った。

マルコフ連鎖モデルにおける平準化は、一つの水路毎の継目、壁面、底版それぞれを一つの単位として扱う点に注意が必要である。このため、マルコフ連鎖モデルでの平準化は、単一劣化予測モデルの様な平準結果とはならない。なお、マルコフ連鎖モデルによる LCC 算定での平準化は 1 水路を 1 つの要素として取り扱うため、平準化して検討する意味は低いと考える。

**2 LCC 算定結果**

シナリオ 2 を対象とした単一劣化予測モデルによる LCC の算定と平準化の算定結果を Fig.8, 4 つのシナリオの LCC 算定結果を Fig.9 に示す。マルコフ連鎖モデルによる LCC の算定と平準化の算定結果を Fig.10, 4 つのシナリオの LCC 算定結果を Fig.11 に示す。

単一劣化予測モデルを用いた LCC 算定結果の 100 年経過時点で大きい順に並べると、シナリオ 4, シナリオ 2, シナリオ 3, シナリオ 1 という順になり、この結果からは施設更新による維持管理の LCC が一番大きいものとなった。それ以外のシナリオに若干の差が見られるもののほぼ同じ値を示す結果となり、シナリオ間の大きな差は見られなかった。表データのチェックにおいても、大きなデータミスは見つかっていないため、順調にシステムが動作したと考えられた。

マルコフ連鎖モデルを用いた LCC 算定結果の 100 年経過時点で大きい順に並べると、シナリオ 4, シナリオ 1, シナリオ 2, シナリオ 3, という順になり、この結果からは施設更新による維持管理の LCC が一番大きいものとなった。

算定に用いる劣化予測モデルが異なる点や、算出単位が異なることから、算出結果に違いが出るのは当然であるが、今回の計算結果の累積補修費額を比較すると、概ね近い結果が算定されたと判断される。単一劣化予測モデルは水路パレル単位での補修計画検討に活用が望まれ、マルコフ連鎖モデルは、水路系全体を対象とした補修計画検討での活用が望まれる。これらの特徴を使い分けることが適切な補修計画立案につながるものと考えられる。

一定の検討期間に要する費用の合計を LCC として検討する場合、例えば検討期間が 10 年、40 年、100 年の場合で、シナリオ別の LCC の大小関係が異なる事がある。手引きの総論編では、検討の対象期間を 40 年としているが、この場合においても、検討期間終了時点の施設の残存価値を控除するなどの操作を行い比較することとされている。LCC 算定システムでは、長期に使用する農業用水路を対象とするという考え方、また、LCC の特徴である理解のしやすさという観点から、標準耐用年数（水路 40 年）の 2 倍より長い期間として 100 年ま

でのLCC算定を行い、その期間内で比較することを想定した。基幹的な水利施設の補修・補強の場合、地方行政財務担当部局では、施設が全面更新された場合と比較が容易にできる算定期間(2サイクル程度)での説明を求められる場合もある。このため、LCC算定システムを用いる検討では40年以上の60年から80年程度の算定期間を基準に比較検討を行うことが適当と考える。また、行政で示されている残存価値控除計算機能はないが、40年より長い期間(最大80年)のLCC比較を行うことで、残存価値控除に準じた評価が行えると考える。この場合具体的な検討期間の設定は、算出されたLCC結果を基に、担当者が判断すべきものと考えている。

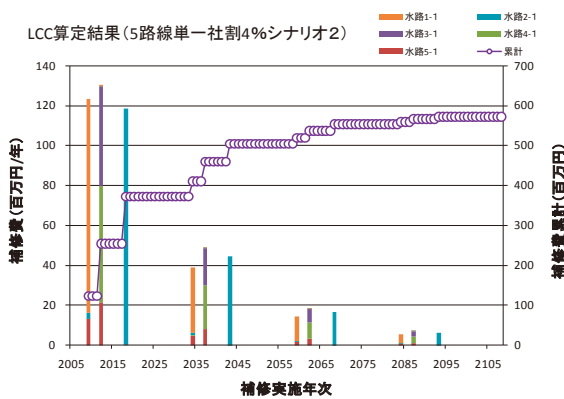


Fig. 8 単一劣化予測モデルを用いたLCC算定結果と平準化例(5路線)  
Result of LCC with Regression prediction model and Estimate adjustment (5 canals)

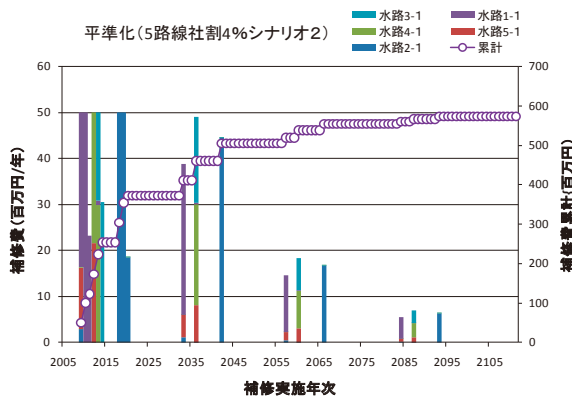


Fig. 9 単一劣化予測モデルを用いたシナリオ別LCC(5路線)  
LCC with Regression prediction model by Maintenance scenario (5 canals)

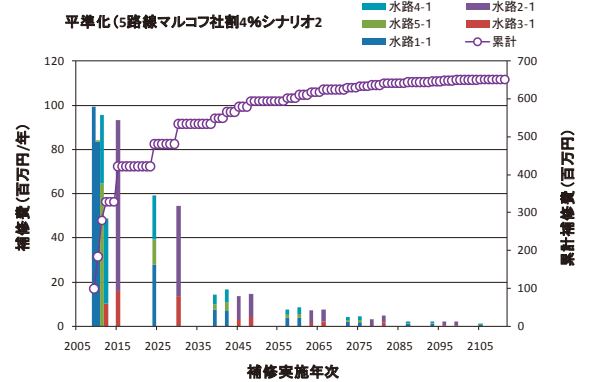
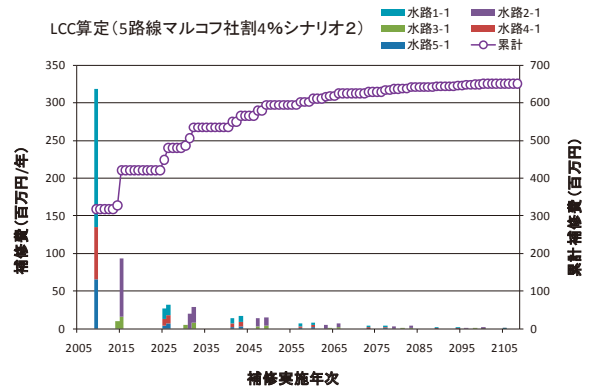


Fig. 10 マルコフ連鎖モデルを用いたLCC算定と平準化(5路線)  
Result of LCC with Markoff chain model and Estimate adjustment (5 canals)

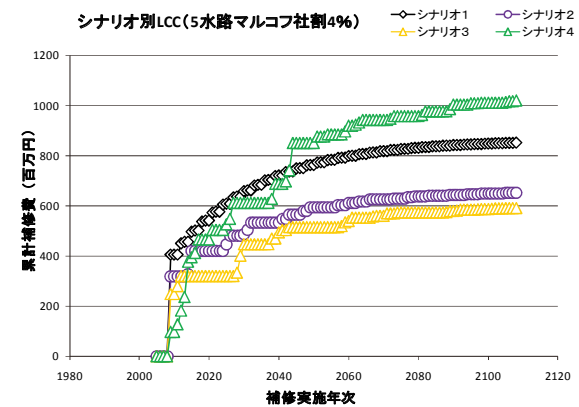


Fig. 11 マルコフ連鎖モデルによるシナリオ別LCC結果(5路線)  
LCC with Markoff chain model by Maintenance scenario (5 canals)

### 3 考察

単一劣化予測モデルを用いた、LCC算定においては、LCC算定、平準化ともに想定通りの結果が得られた。一方、補修後の劣化予測には、補修前と同じ予測式を用いている。軽微な補修と強固な補強とは、耐用年数が異なると考えられる。これについては、維持管理シナリオファイルの回復レベルの設定によりある程度の対応

は可能と考えている。しかし、この LCC 算定システムでは対策後の劣化予測モデルを個別に設定していない。このため、LCC 算定の精度向上を図るためには、初期の劣化進行、補修後の対策工法の劣化進行に対応した LCC 算定システムの構築を図ることが求められる。

また、現時点では、単一劣化予測モデルとして、原点 5.5 を通過する上に凸の 2 次曲線を取り入れているが、劣化機構によっては、直線的近似を用いた方がより近似的に表される場合（北村ら，2006）や、あるいはそれ以外の高次で近似される劣化進行過程も必要な場合がある。更に、現場においては、統計的手法による予測分析には十分なデータが収集されない場合もある。このため、劣化予測ファイルを更に数種類の予測手法に対応したファイルに改善していく必要がある。

平準化については、単一劣化予測モデルを用いた LCC 算定の場合では有効であることが確認された。しかしながら、現場では、様々なケースに対応した平準化計算が必要とされる。本 LCC 算定システムで提示した算定方法は、その第一歩と考えており、今後様々な平準化ケースに対応したシステム構築を図ることが必要となる。

#### IV LCC 算定システムの活用

##### 1 環境影響評価への取組み

LCC の低減を目指したストックマネジメントは、主として経済的視点からのアプローチとなるが、近年の環境問題への取り組みの高まりとともに、土木事業の環境影響評価への意識も高まっている。千葉ら（2010）は、農業農村整備の温室効果ガスについて評価を行っている。また、平成 22 年 3 月に閣議決定された「食料・農業・農村基本計画」においては、低炭素型の産業構造への転換等が謳われており、温室効果ガス排出削減の目標達成に貢献することが掲げられている。このような環境問題の流れの中、低炭素社会を目指す社会の動向に対応した

ストックマネジメントのあり方について考える必要がある。土木分野においては、ライフサイクルにおける二酸化炭素の排出量の算定、すなわち生涯二酸化炭素放出量（LCCO<sub>2</sub>：Life Cycle CO<sub>2</sub>）による評価が一つの環境指標として挙げられている。

建物の環境影響評価としては、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）がある。LCA とはひとつの製品等が、その原料採取から製造、最終的廃棄に至るまでのライフサイクルの全ての段階において発生している環境への様々な負荷をそのライフサイクル全体にわたり評価する手法であり、評価のため、算出される指標として、LCCO<sub>2</sub>、LCW（ライフサイクル廃棄物最終処分量）、LCR（ライフサイクル資源投入量）が示されている。（グリーン庁舎基準及び同解説 平成 17 年版，2005）（以下「庁舎基準」と記す）庁舎基準では、LCCO<sub>2</sub> の算出として、①新営、修繕、改修、撤去・廃棄、②設計管理、③運用エネルギー、④維持管理の段階に大きく分類し、それぞれに係る CO<sub>2</sub> 排出量を算定することとしている。特に LCCO<sub>2</sub> は低炭素社会に向けた環境影響を評価する指標として着目されるものと考えられる。

LCC 算定システムを用いて CO<sub>2</sub> 排出量を指標とした環境影響評価を試みたが、LCC 算定システムが既存の施設の補修・補強等費用算定を対象としたものであるため、システム設計上、修繕、改修、撤去・廃棄を対象とした CO<sub>2</sub> 排出量を LCCO<sub>2</sub> として取り扱い評価を行うこととした。具体的には、構築された LCC 算定システムにおける、維持管理シナリオファイルの単価設定部分（円/m<sup>2</sup>）を単位 CO<sub>2</sub> 排出量（kg/m<sup>2</sup>）に組み換えることにより、LCCO<sub>2</sub> 算定を行う手法を検討することとした。

土木資材や使用燃料ごとの CO<sub>2</sub> 排出量の直接の設定は、実際には容易でないため、産業連関表を用いた種々の環境分析用産業連関表（データベース）が、慶應義塾大学、日本建築学会、(独)建築研究所、電力中央研究所、(独)国立環境研究所等から公表されている（日本建築学

Table 6 財・サービス需要 1 単位当たり CO<sub>2</sub> 排出量

CO<sub>2</sub> emission per unit

(kg-CO<sub>2</sub>/100万円 (2000年生産者消費価格))

区 分	部門名	生産過程	消費過程	合 計
	可塑剤	9,641	0	9,641
	熱硬化性樹脂	9,335	0	9,335
	熱可塑性樹脂	7,034	0	7,034
	その他の合成樹脂	11,791	0	11,791
燃 料	ガソリン	3,273	26,579	29,852
	セメント	114,300	0	114,300
	熱間圧延鋼材	32,612	0	32,612
公共事業費	農林関係公共事業	3,671	0	3,671
処理費	廃棄物処理 (産業)	10,153	0	10,153

会, 2006)。本報告では、生産過程とともに消費過程の排出原単位が示されている慶應義塾大学のデータベース(中野ら, 2008)を用いてLCCO<sub>2</sub>の計算を行った。対策工法の面積当たりのCO<sub>2</sub>排出量算定に用いた単位CO<sub>2</sub>排出量をTable 6に示す。

## 2 施工単価に対応した面積当たりCO<sub>2</sub>排出量の算定

施工単位面積当たりのCO<sub>2</sub>排出量算定には、施工単価表を基に、ガソリン等の燃料や、補修・補強に使用する資材を対象として、これに該当する項目に対しCO<sub>2</sub>排出量の計算を行った。計算手順は、施工単価の基本単位となる単価表を基に、CO<sub>2</sub>排出量算定のガソリン等の対象項目を選定する。次に産業連関表に対応した対象項目の生産者価格(2000年)を選定する。本報告においては、生産者価格は、南斉ら(2000)の作成した、環境負荷原単位と品目別国内生産額との対応表の単価(円/単位)を用いた。具体的には、工事施工単価表の数量(単位:kg等表示)に該当する生産者価格(単位:円/t等表示)を掛け対象金額(単位:百万円)を算定した。この値に単位CO<sub>2</sub>(kg-CO<sub>2</sub>/百万円)を掛けて、対象項目ごとのCO<sub>2</sub>(kg)排出量を算定した。施工単価(円/m<sup>2</sup>)は、基準となる施工量(例えば、30m<sup>2</sup>/日)を求めて、その合計を面積当たりに割り戻すことで単位面積当たりの施工単価を求めた。

本来すべての単価を産業連関表の対象年次と同じ2000年の生産者価格表示に統一することが望ましいが、対策工法すべての構成単価を2000年の生産者価格で構成する事は難しい。本報告では、単価構成上、生産者価格に依り難い場合は、工事施工単価項目で算出された金額に対し、単位CO<sub>2</sub>(kg-CO<sub>2</sub>/百万円)を掛けてCO<sub>2</sub>排出量を算定した。単価構成(歩掛)は、LCC算定システムの検討で作成したものを使用した。

## 3 LCCO<sub>2</sub>の算定結果

CO<sub>2</sub>排出量は社会的割引率の影響を受けない。このため、本報告ではLCC算定およびLCCO<sub>2</sub>の算定に当たっては、社会的割引率を0として、検討を行った。劣化予測には単一劣化予測モデルを用い、算定期間はLCC算定と同じ100年間とした。シナリオ区分は、Table 4と同じものである。

5つの路線のLCC(シナリオ2)(Fig.12)とLCCO<sub>2</sub>(シナリオ2)(Fig.13)の算定結果を比較すると、単位は異なるが同じ形を示す。これは、CO<sub>2</sub>排出量が、産業連関表を基に作成されたものであり、かつCO<sub>2</sub>排出量算定は、金額にCO<sub>2</sub>排出量換算係数をかけて算定したためと考えられる。LCC算定システムにおいては同一シナリオの場合、補修費用とCO<sub>2</sub>排出量のグラフの形状は同じ傾向を示す。このため一つのシナリオのみを対象としたLCCO<sub>2</sub>算定結果については、環境影響評価指標としての意味を持たないことが懸念された。

一方、シナリオ別のLCC算定とLCCO<sub>2</sub>算定を比較すると、シナリオの有利な順位が異なることがわかる(Fig.14, Fig.15)。特にシナリオ1とシナリオ4の相対的な順位関係(累計額・量)が異なっている。このことは、LCCO<sub>2</sub>が対策工法の選択により、LCCと異なる順位を表すことを示している。すなわち、環境影響評価指標としてLCC算定システムで算出された、LCCO<sub>2</sub>が環境影響評価指標として検討が可能なことを示唆するものであると考える。

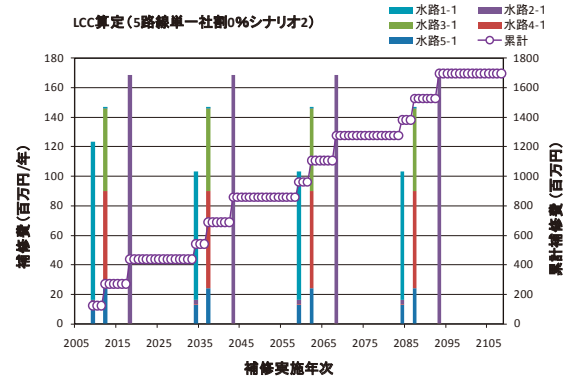


Fig. 12 LCC算定結果(5路線)  
Result of LCC (5 canals)

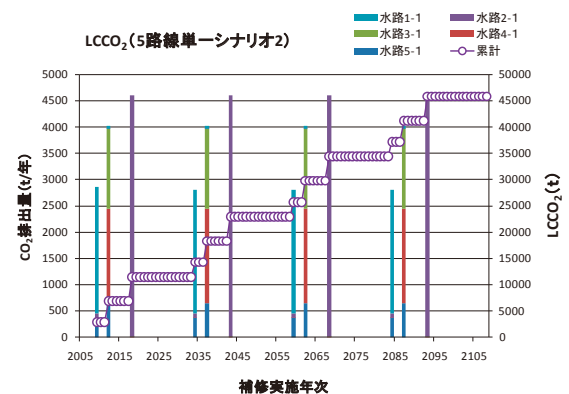


Fig. 13 LCCO<sub>2</sub>算定結果(5路線)  
Result of LCCO<sub>2</sub> (5 canals)

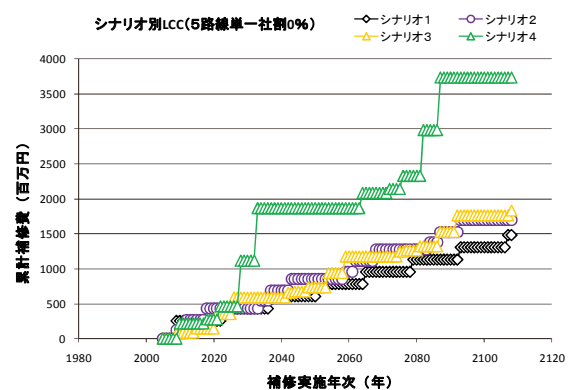


Fig. 14 5路線を対象としたシナリオ別LCC算定結果  
Result of LCC Maintenance scenario (5 canals)

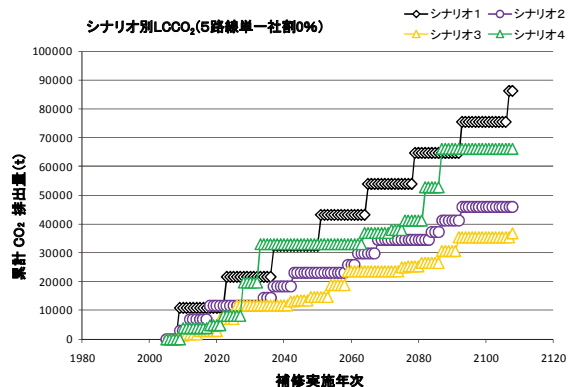


Fig. 15 5路線を対象としたシナリオ別 LCCO<sub>2</sub> 算定結果  
Result of LCCO<sub>2</sub> Maintenance scenario (5 canals)

#### 4 LCCO<sub>2</sub> 算定における課題

LCC 算定システムを用い LCCO<sub>2</sub> 算定が可能なが示された。これにより LCC 算定における異なる対策工法シナリオに対する CO<sub>2</sub> 排出量の比較が可能となった。かなり簡略化された形ではあるが、環境影響評価の一つの指標である CO<sub>2</sub> 排出量比較の目安を得ることが可能となったと考える。しかし、いくつかの課題も明らかになった。その一つは、CO<sub>2</sub> 排出原単位の LCA データベースの選定である。LCA データベースは、いくつか公表されているが、工事単価構成項目に対応した CO<sub>2</sub> 排出量項目をより多く設定されているデータベースを用いることが望ましい。しかしながら、細かい項目の排出原単位が公表されることは、産業連関表の性質から今後も期待されない。品目別単価内訳が、より細かく設定してあるのでこれを使用していくことが、当面の現実的対応となると考える。二つ目は、対策工法の単価構成の作成である。農業農村整備事業の場合、工事単価作成は、公表されている「農林水産省土地改良工事積算基準」により積算されることとなるが、補修・補強工事の工法は、日々新工法の開発と既存工法の改良が進められているため、標準的な歩掛のみでは、対応が困難なことが多い。標準歩掛では、例えば「コンクリートはつり」において空気圧縮機の運転については、諸雑費(%)で計上され CO<sub>2</sub> 排出量算定に必要な燃料消費量が計上できない場合もある。工法によっては施工業者が CO<sub>2</sub> 排出量算定に利用可能な積算資料を公表している場合もあるが、一部の工法に限られており、一般化されているとは言い難い。一方、平成 21 年 3 月には経済産業省によりカーボンフットプリント制度(商品の原材料調達から廃棄・リサイクルまでで排出される温室効果ガスを CO<sub>2</sub> に換算し商品に表示する制度)の基本ルールが示された。カーボンフットプリント制度の普及が進み、材料ごとの CO<sub>2</sub> 排出量が明らかになることにより、補修・補強工事毎の CO<sub>2</sub> 排出量の算定が容易になることが期待される。この場合、LCC 算定システムは、容易に LCCO<sub>2</sub> 算定の手法として

活用されると考える。

## V 結 言

本報告では、既存の現場打ち鉄筋コンクリート製農業用開水路を対象とした LCC 算定システムについて、システムの構築の考え方を整理するとともに、今後の改善方向について取りまとめを行った。更に LCC 算定システムの環境評価への利用可能性について検討を行った。

LCC 算定システムは、例えば、劣化予測グラフの作成については、点検・診断結果を入力すれば、単一劣化曲線やマルコフ連鎖モデルに対応した劣化予測グラフを自動で作成する。また、複数の健全度に応じた対策工法の組み合わせに対して、容易に LCC の試算を繰り返して行うことができることから、予算上有利な対策工法の組合せを見出すことが容易となる。これら作業を通じて劣化予測が LCC 算定結果へ及ぼす影響度の理解を深めることと併せ、予測に必要な診断情報・健全度評価基準とは何か、或いはどのような診断情報がより有効かつ効率的であるのかについて理解を深めることができる。また、このソフトウェアは、一般に普及している表計算ソフト(Excel 2003)を用いていることから、不慣れなキー操作を学ぶ煩わしさはなく直ちに使用することができる。LCC 算定の流れおよび LCC の低減に資する考え方の理解を容易にするものとする。更に、施設補修工事で排出される CO<sub>2</sub> 量を把握するためのツールになりうることを示唆された。一方、それぞれの対策工法に対応した劣化予測モデルがないことや、優先水路を指定したい等の現場の要請状況に対応した標準化機能が整備されていない点等への対応が課題としてあげられる。このため、今後、1次・2次・3次式や指数関数等で表される劣化予測モデルの設定や、対策工法毎の複数の劣化パターンに対応するシステムを構築するとともに、標準化機能の拡充を図る必要があると考える。

LCC 算定システムの課題を改善することにより、ストックマネジメントに更なる貢献をするシステムの構築が可能と考える。

## 参考文献

- 1) 千葉住彦(2010)：農業農村整備の温室効果ガスに係る LCA について、平成 21 年度農村工学研究所研究会農村計画研究会、3-22
- 2) 土木学会(2001)：2001 年制定コンクリート標準示方書(維持管理編)、81-156
- 3) 環境省(参照 2010.11.24)：平成 21 年 12 月 21 日気候変動枠組条約第 15 回締約国会議(COP15/CMP5、デンマーク・コペンハーゲン)の結果、(オンライン)、入手先<<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html>
- 4) 経済産業省(参照 2010.12.13)カーボンフットプ

- リント制度の基本的ルールが決定 (CO<sub>2</sub> 排出量の算定・表示方法の等のルールの策定), (オンライン) 入手先 <http://www.meti.go.jp/press/20090303004/20090303004.html>
- 5) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤敬 (2008): 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, 123-134
  - 6) 北村浩二・本間新哉・加藤敬 (2009): マルコフ連鎖モデルによる農業用水路の壁面摩耗の劣化予測, 農業農村工学会誌, 77(7), 19-23
  - 7) LCA 実務入門編集委員会 (1998): LCA 実務入門, 9-12
  - 8) 見手蔵幸雄, 古崎康哲, 石川宗孝 (2002): ゼロエミッション型農業集落排水施設への更新と LCA 手法, 農土誌, 70(12), 7-10
  - 9) 南斉規介・森口祐一 (2006): 環境負荷原単位と品目別国内生産額との対応表 (2000) (参照 2010.12.06)
  - 10) 日本建築学会 (2006): 建物の LCA 指針 (温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール), 13
  - 11) 農林水産省 (参照 2010.11.24): 食料・農業・農村基本計画 (平成 22 年 3 月 30 日閣議決定), (オンライン), 入手先 [http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k\\_aratana/index.html](http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/index.html), 34-35
  - 12) (社) 農業土木事業協会 (2007): 農業水利施設の機能保全の手引き
  - 13) (社) 農業農村整備情報総合センター: 平成 22 年度農林水産省土地改良工事積算基準 (土木工事), 651
  - 14) (社) 日本コンクリート工学協会 (2006): コンクリート構造物のアセットマネジメントに関するシンポジウム
  - 15) (社) 公共建築協会 (2005): グリーン庁舎基準及び同解説 (官庁施設の環境保全性に関する基準及び同解説) 平成 17 年版



# Construction and Practical Use of the LCC Calculation System of Irrigation Open Channel

HONMA Shinya, MORI Takehisa and NISHIHARA Masahiko

## Summary

This report shows the architectural thought of the LCC calculation system and future improvement. In addition, the report shows use possibility to the environmental estimation of the LCC calculation system. This LCC calculation system calculates timely repair expense about existing agriculture open channel made by reinforced concrete. This system carries out LCC calculation with measures method corresponding to the degree of a deterioration prediction and the deterioration. For example, the LCC calculation system automatically makes a deterioration prediction graph using a single deterioration prediction model and Markoff chain model from check information. Moreover, LCC calculation system can set plural measures method of construction scenarios. Therefore, a comparison of LCC of the different measures method of construction becomes easy. Furthermore, LCC calculation system was shown to be applicable to simple CO<sub>2</sub> emission calculation. From these, it may be said that this system is a simple tool performing LCC calculation and CO<sub>2</sub> emission calculation.

On the other hand, the problems of the LCC calculation system are as follows.

1. There is not the deterioration prediction model corresponding to each countermeasures method of construction. Therefore, it is necessary to prepare the deterioration prediction model corresponding to plural deterioration patterns.
2. There is not a budget adjustment function corresponding to various situations. Thus, it is necessary to plan the improvement of the budget adjustment function.

**Keywords** : irrigation open channel, LCC, regression prediction model, Markoff chain model, CO<sub>2</sub> emission



## 農村地域資源が有する環境音の評価手法の開発

— 地域資源保全のための音質と感情・行動誘因評価の定量化に関する研究 —

山本徳司\*・栗田英治\*

## 目次

I 緒言	59	5 感情誘因の実験方法	63
II 感情・行動誘因を捉える意義	60	6 行動誘因の実験方法	63
III 環境音の音質評価方法	61	V 感情・行動誘因因子と音質の関係	63
1 音質評価について	61	1 音質評価結果	63
2 音質評価の指標	61	2 感情誘因実験の結果と考察	64
IV 感情・行動誘因実験の方法	61	3 行動誘因実験の結果と考察	65
1 対象環境音の概要	61	4 音質による落ち着き特性評価手法の考案	67
2 計測方法	62	VI 結言	68
3 音質評価の分析	62	参考文献	68
4 対象音の選定と被験者	62	Summary	69

## I 緒言

平成22年3月に閣議決定された「新たな食料・農業・農村基本計画」においては、農村の振興施策として、農村が有する多面的機能を将来に渡って十分に発揮していくため、「国と地方の適切な役割分担の下、農業・農村の6次産業化により農村経済の活性化を進めつつ、これらの地域が抱える不利な農業生産条件を補正し、生活条件の整備を含めた集落機能の維持と生態系や景観を含む農村環境の保全等を支援していくことが必要である。」と記載されている。特に、中山間地域等の農村振興において、グリーンツーリズム、都市農村の交流促進は重要な課題であり、交流ターゲットの拡大、交流人口の促進、第6次産業との連携において、農村の景観資源や生物資源等、教育・保健休養に関わる機能の質の向上は重要な要件となる。これまでの景観施策では、平成16年に「景観法」が制定され、各地で景観保全・形成が進められ、農林水産省においても、同年の「美の里づくりガイドライン」に引き続き、平成18年には「農業農村整備事業における景観配慮の手引き」、平成22年には景観配慮の初の技術書となる「農村における景観配慮の技術マニュアル」をとりまとめ、景観保全・形成を支援している。

その一方で、耕作放棄地の拡大による農地の荒廃や生産システムの近代化による景観の大きな変化、生物多様性の低下等の問題により、五感としての景観の質も低下しつつある。

景観資源や生物資源等の環境に関わる地域資源を活かした地域活性化を推進していくためには、農村景観の保全・形成は重要な課題となる。しかし、現在の景観法による各地での農村景観保全・形成の施策の大半は、土地利用、建築物の形状・色彩、工作物の意匠の規制・措置等、視覚要素への配慮が中心となっており、聴覚要素としての音量や音質の配慮、聴覚要素と視覚要素との適正な関係、音質とその配置の課題となるサウンドスケープとしての配慮は触れられておらず、嗅覚や触覚等の五感全体の適正な保全としての景観配慮についても言及されていない。

人は農村景観を視覚要素だけではなく、匂い、音、温度、湿度等の五感を総合して評価し、空間としての心地よさを得ている。そのため、現在の視覚要素のみを重視した景観保全・形成は五感を満足させる施策とはなっておらず、生活の質の側面からも不十分である。特に、聴覚は視覚と同様、人体に大きな影響を及ぼし、農村生活においては、多種の虫の音、鳥の声等、都市生活とは明らかに異なる環境音が、景観の評価に影響を与えていることから、聴覚要素に配慮した景観保全・形成のためにも、聴覚要素の評価の導入は重要となる。

そこで本研究では、音を聴取した時の人の感情・行動誘因を捉えることで、環境音を評価する方法を提案し、

\* 農村環境部景観整備研究室

平成23年1月18日受理

キーワード: 景観, 音質, 環境音, SD法, 地域資源, ラウドネス, シャープネス

景観における聴覚要素配慮のための指標の策定を行う。感情については、環境音の刺激に対する様々な感情の発現を読み取り、行動については、アフォーダンス理論を考慮し、環境音の刺激に対する仮想行動を捉える。感情・行動の両面からの誘因を捉えることで、人の感覚を考慮した環境音の評価ができるようになる。

本研究によって開発された環境音の評価手法は、地域資源保全の効果の評価に利用できるだけでなく、農業水利施設や農業用施設の環境性能の向上に資する技術として活用できる。

## II 感情・行動誘因を捉える意義

環境音の心理生理評価に関する研究は、日本音響学会、サウンドスケープ協会、騒音制御工学会、日本建築学会等における古くからの課題である。国際的な音響心理学の権威である難波氏らはすでに1960年代より様々な音響心理に関する研究を進め、1970年代までに多くの成果を発表している。ここでは、1990年代以降、上記学会等に発表されたいくつかの研究をレビューすることで、環境音の心理生理評価の将来的課題について探る。

1990年代前半では、都市地域における交通騒音等が住民に与えるストレスについての研究が多く発表されている。兜らの「感覚と公害騒音とストレス」の研究はその一つで、騒音苦情発生率が騒音ストレスを反映していると考え、東京都心部や周辺小都市について調査・検討したものである。また、楳塚らは、「実際の都市交通騒音と脳波活動」において、騒音レベルに対する心理アンケートによって評価するのではなく、脳波、血圧、呼吸といった人の生理反応の評価を行っている。小田らも「現代的音楽聴取が脳波ならびに循環機能に及ぼす影響」で、音楽聴取時の脳波、血圧、心拍数、呼吸などに及ぼす影響を調べ、心拍数と呼吸数が興奮的音楽聴取時において増加傾向を示すことを明らかにしている。1990年代前半の主たる研究は、環境音の快適性評価とストレスや身体への直接的な影響の定量化問題が中心となっている。すでにこの時代に生理反応として脳波を評価指標として利用する方法が取られているが、対象が騒音である点、心理生理への負の影響評価の研究が多いことが特徴である。しかし、アメニティーサウンドの観点からの評価研究が行われていない訳ではない。1993年、佐々木は「音環境に関わるアメニティーの考え方」において、アメニティーが音量で決まるものではなく、その場にいる個人、集団の心の安静、楽しさ、快適の度合いから評価することが重要であると説明し、音を物理量で捉えるのではなく、感性の問題として取り扱うことの重要性を指摘している点は興味深い。

環境音の評価研究は、音響の物理性評価の研究と音に対する心理的特性の評価の研究に分かれる。前者は、音圧や周波数、ゆらぎ等の物理特性の指標策定に関する研

究であり、後者は、騒音に対する心理事象をSD法や心理アンケートにより読み解く研究である。2000年代では、環境音の心理的特性に関する論文が多く見受けられる。SD法を用いた心理的評価方法に関する研究では、細田らの「環境音の視・聴覚情報の効果に関する研究」、谷畑らの「街の空間構成と環境認知に関する研究」等がある。谷畑らは、環境音の有無が町のイメージに及ぼす影響を明らかにしている。環境音がある場合とない場合の印象を抽出するため、動画と環境音の両方を提示する場合と、動画のみ提示する場合の条件においてSD法を行っている。その結果、町の環境音は「にぎわい」に関する印象を高める反面、「落ち着いた」心地よい印象を下げる傾向があることを明らかにしている。また、視覚的な情報に左右されやすい印象には音の影響が表出しないことも明らかにし、さらに、視覚・聴覚要素の印象が同じ場合はその印象が強調される共鳴現象を確認している。感情の取り扱いについては、「落ち着いた」「にぎわい」など限定的ではあるが、視聴覚の複合刺激に対する評価を行っている点は重要である。

音聴取時の生理反応に関する研究は、近年になり急激に進んでいる。脳内酸素を計測し、評価している研究としては、亀井ら(2007)の「打楽器音楽の感性評価における近赤外分光法による酸素化ヘモグロビン変化の定性的モデル」の論文がある。亀井らの研究では、近赤外分光法(NIRS)を活用し、打楽器音楽の感性評価における酸素化ヘモグロビン(oxyHb)変化の定性的モデルと心理計測で得られた感性評価との関係性を明らかにしようとした。定性的なモデルの構築に留まっているが、打楽器音楽の聴取時に抱く感性と脳活動状態との間には固有の関係が存在することを明らかにしており、有意義な研究成果と見る。近赤外分光法による計測機器が1990年代後半になってようやく脳神経分野を中心に利用され始めたことを考えると、音響心理学分野ではかなり早くから使われ始めたと言える。また、宮崎は総合的な生理反応を分析している。「森林セラピーの生理的効果の科学的解明」において、自然由来の小川のせせらぎの聴取は、血圧が優位に低下し、左前頭部の脳活動も優位に低下して生体がリラックスすることを明らかにした。

環境音の評価研究は、騒音を対象とした快適性の評価問題から始まり、視聴覚の複合刺激問題、現在では自然音のリラゼーション効果や適正な音環境デザインなどの研究に発展している。ところが、これまでの環境音の生理心理評価研究の対象地域は、都市域が中心で、農村地域については自然音に限られている。また、心理生理反応の指標と音質評価との関係性については十分に研究が進んでおらず、どのような音質からどんな感情が生まれてくるかについて、明らかになっていない。そこで本研究では、農村地域での環境音のデザインについて基礎的知見を得ることとしたい。これらの研究より得られた知見は、農業用水路の景観としての環境性能の確保にも

活用できるものとする。

### III 環境音の音質評価方法

#### 1 音質評価について

音質評価とは心理音響技術を使用し、音を人による感じ方に合わせて定量的に解析する技術のことを言う。従来の物理量に基づく機械的な評価に対し、人の感覚に基づくこの音質評価技術は、生活環境に人間性を加味していく評価方法となる。

心理音響評価量は、人間の耳の構造や聴覚神経の働きを調べ、多くの人間に聴感実験を行った結果から導き出されたものである。聴感実験とは実際に人間が音を聞き、どのように感じたか、その反応を調べることである。しかし人間は、その人の年齢や経験、実験時の体調や、温度・湿度など周囲の環境によって少しずつ音に対する反応が異なる（音の伝播条件も周辺の建物の配置や規模、素材によって変化する）。そこで多くの被験者に対して試験を行い、それらを統計処理することで心理音響評価量が求められてきた。これら音質評価の基盤となっている心理音響技術は、工学、医学、心理学などの広い分野を駆使した技術である。心理音響評価のパラメータは数多くあり、対象とする音によって使い分けたり組合せたりして使いこなす技術が必要である。特に心理学に関係する点では、人の嗜好や社会環境により感性に違いが出るなど、課題が残されている。

心理音響技術に基づく音質評価は、当初自動車の車室内音を評価するために用いられたものである。なかでも音の大きさの評価量であるラウドネスは、ドイツの E.Zwicker によってラウドネス指標として形成され、ISO（国際標準規格）で規格化されている。1998年には家電機器業界で騒音の表示に関する基準が定められ、騒音の表示には騒音レベルの他にラウドネスを用いるように記されている。

#### 2 音質評価の指標

心理音響評価量には、ラウドネス、シャープネス、ラフネス等がある。そのうち、本研究では、ラウドネス、シャープネスの2つの指標を使う。ラフネスの計算方法はまだ提案段階で、規格化されていないこと、「粗さ」と心理的効果との関係性が不明確であること、代表となる2指標での簡易的な評価法を得なかったことを考慮して、今回はラフネスの指標は採用しなかった。

##### a ラウドネス

ラウドネス (Loudness) は、音質評価を表す諸量の内、音の大きさを表す。聴覚感覚についてみると、物理的な測定量である音圧レベルに最も強く依存しており、騒音の評価量として一般的に使用されている騒音レベル (A特性音圧レベル A-weighted Sound Pressure Level) は聴覚を模倣するため 40dB の純音ラウドネス特性 (等感曲線

ISO R226) を近似した周波数の重みづけを施された音圧レベルとして考え出された。しかし同じ音の大きさで2つの純音 (正弦波で表される音) を聞いた場合、周波数が離れていると2倍の大きさとして聞こえるが、接近した周波数の音の場合は2倍の大きさでなくそれより小さい音として聞こえる。いわゆるマスキング効果により、聞こえ方は異なる。騒音レベルは純音のラウドネス曲線の重みづけをして求めた量を表しているため、通常の騒音のように色々な周波数を含んだ音の場合には、人が感じる音の大きさと一致しない。そこで、より聴感にあった音の大きさを求めるため、マスキング効果 (小さい音が大きい音で聞こえなくなる現象) を考慮した方法としてラウドネスと言う指標が考えだされ、定常騒音に関するラウドネスの算出方法として ISO 532 で規格化された。

単位は sone で、音圧レベル 40dB の音の大きさを 1sone とし、正常の聴力を持つ人が、1sone の n 倍の大きさと判断される音の大きさを n sone とする。

筆者は、景観評価の観点から見た場合に、ラウドネスを「大きさ」と表現すると物理量の意味が強いので、「うるささ」と呼ぶのが妥当ではないかと考えている。

##### b シャープネス (音の鋭さ)

シャープネス (sharpness) は、音質評価を表す諸量の内、音の鋭さ・甲高さを表し、広域を強調したラウドネスと普通のラウドネスとの比として算出される。一般的にラウドネスは迫力感を表すのに対して、シャープネスは無機感・金属感 (かたい、耳障りな、甲高い) との関係が高いとされる。純音の場合は、周波数を比較することで音の高さを比較できるが、広い範囲に周波数成分があると簡単に比較できない。そこで、シャープネスを計算してどちらが甲高いかを表す。計算方法は、ラウドネススペクトルの面積の重心を求め、重心から下側に向かって垂線を下ろし、周波数の原点 (0Hz, 0Bark) から垂線を下ろした点までの距離を求める。この距離が長いほどシャープネスは大きくなる。実際には、聴感と合致させるための補正として重み係数を使用する。ラウドネスに対し、周波数 (臨界帯域: critical-band rate) 毎に重み係数をかけ、その後にラウドネススペクトルの重心を求めるとシャープネス値 (acum) が得られる。

### IV 感情・行動誘因実験の方法

#### 1 対象環境音の概要

対象とする環境音は、山村地域、中山間地域、都市近郊地域、都市地域の4地域から12音を選定した。農業地域の経済地帯区分による分割と言うよりは、空間的な構造に違いのある対象から選定した。

山村地域は、民家が少なく、日常生活音が入りにくい溪流沿いや林地を設定し、溪流 (群馬県水上市-溪流木の根沢)、散策林地 (新潟県十日町市-ブナ林美人林) を選定した。中山間地域は、生活音が多少ある里山や田

畑を設定し、棚田（新潟県十日町市－兎口集落棚田・静岡県菊川市－倉沢集落棚田）、小河川（新潟県十日町市－浦田集落小河川）、茶園（静岡県菊川市－牧ノ原台地茶園）、親水水路（群馬県甘楽町－雄川用水水路）を選定した。都市近郊地域は、日常の生活音が多く聞こえる市街地を設定し、市街地（茨城県笠間市－太田集落市街地）、農村部丘陵地（茨城県笠間市－太田集落丘陵地）、水利施設（群馬県高崎市－長野堰用水円筒分土工）を選定した。都市地域では、日常の生活音が多く聞こえる商業地（東京都港区－東京駅丸の内口・東京都新宿区－新宿駅南口）を選定した。

本論文では、空間全体の音源の集合体を「音環境」と呼ぶ。これはサウンドスケープそのものを言う。それに対して、「環境音」とは、音環境の中から部分的に切り出された音を指し示すこととした。よって、「環境音」は特定の音源に近い概念の音であるが、一つの音源を対象とはしていない。本研究において評価対象とした音は環境音であり、空間全体の音環境としてのサウンドスケープではない。音空間の代表的な音となる特定の水の音や虫の音などが特徴的かつ統合的に聞こえる場所の音である。Table 1 に評価対象となる環境音に収録された音の種類をまとめた。

## 2 計測方法

小野測器の精密積分型騒音計（LA-5570）を用い、選定した環境音を計測した。

騒音計測の指針となる JIS Z 8731（環境騒音についての基本的測定方法）では、定常音を計測するため10分間×5回計測と規定されている。本研究においても同様の計測方法により環境音を計測した。

基準時間帯は、日常生活で一般的な音が計測できる日中9:00～15:00に行った。曜日、当日の特別な事情（流水音なら水量、季節、気温、天候による生物音の違い）によって採取される環境音は異なるが、本研究では、空間の代表的な音を捉え、評価することが目的ではなく、

環境音の心理評価のための対象音を捉えることが目的であるため、対象に突発音やノイズ等の非定常音が入らないように配慮した。測定場所や測定高さ等の条件は、騒音計測 JIS Z 8731 に基づいて行った。

## 3 音質評価の分析

音質評価を行うに当たっては、計測した10分間の音の中から等価騒音の中央値を示す回を取り出し、ノイズ除去のため、計測初めから1分毎に3分間ずつ（0～3分、1～4分、2～5分、3～6分、4～7分、5～8分、6～9分、7～10分）に分解し、この単位毎に音質解析し、ラウドネス、シャープネスを算出する。そして、10分間を通して8つの音質評価のデータから、最も平均的で、安定しているラウドネス値、シャープネス値が得られた時間分のデータを心理実験に用いることとする。音質解析に当たっては、小野測器の WS-5160 音質評価ソフトウェアを使用した。

## 4 対象音の選定と被験者

音質評価から算出したラウドネス値、シャープネス値を参考に、様々な音質の環境音が満遍なく含まれるように、対象音を A、B の2グループに分けた。これは、12の環境音全てを対象に被験者に評価してもらおうと、評価が長時間となる上、多数の音を聴かせることによる聴覚ストレスが発生するためである。評価対象音は、解析で使った3分データの内、中央の2分を編集し、6音連続で聴かせた。

A グループ：「溪流木の根沢、太田集落市街地、牧ノ原台地茶園、兎口集落棚田、新宿駅南口、雄川用水水路」

B グループ：「長野堰用水円筒分土工、太田集落丘陵地、ブナ林美人林、倉沢集落棚田、東京駅丸の内口、浦田集落小河川」

音質解析は3分間で行っているが、SD法の因子抽出のための試験を繰り返した結果、2分間で評価できると

Table 1 地域別環境音の概要  
List of target environmental sounds

地 域	所 在 地	計 測 日 時	発 生 源
溪流木の根沢	群馬県水上市	2008/7/16	水量多い。鳥・蟬の鳴き声、飛行機
ブナ林美人林	新潟県十日町市	2008/7/17	松之山の観光ブナ林。鳥（キツツキ）、蟬、飛行機、自動車、人
兎口集落棚田	新潟県十日町市	2008/7/17	鳥、蟬、水、蜂、偶に自動車
浦田集落小河川	新潟県十日町市	2008/7/17	水量普通。鳥、蟬、水、蜂、自動車
倉沢集落棚田	静岡県菊川市	2008/8/6	蟬、鳥、自動車
牧ノ原台地茶園	静岡県菊川市	2008/8/6	蟬、鳥、自動車、プロペラ
太田集落市街地	茨城県笠間市	2008/8/14	蟬、人、飛行機、電車、自動車
太田集落丘陵地	茨城県笠間市	2008/8/19	蟬、鳥、人、自動車、飛行機
雄川用水水路	群馬県甘楽町	2009/7/18	小雨、水量普通。鳥（スズメ）、自動車、水
長野堰用水円筒分土工	群馬県高崎市	2008/7/17	長野用水円筒分水堰。自転車、バイク、人、鳥、ヘリコプター
東京駅丸の内口	東京都港区	2008/9/6	自動車、人、工事
新宿駅南口	東京都新宿区	2008/9/6	人、自動車、電車、ビジョン

判断できたことと、実験時間を出来る限り短縮して、被験者の聴覚ストレスを軽減することを目的として、2分間を設定した。

被験者は、環境音を聴取した時の反応をできる限り明確にするため、慣れによる反応や年代のバラつきが出ないことを考慮し、日常的に農村の環境音に接した経験が全くない東京在住の大学生計18名とした。

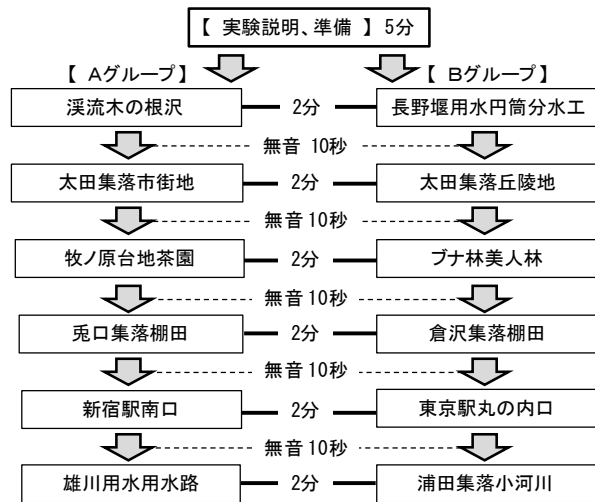


Fig.1 感情行動因子評価実験の流れ

Flow of evaluation experiment of feelings and actions cause

### 5 感情誘因の実験方法

SD法による因子抽出実験では、感情・情緒的意味誘引に関する項目として、「楽しい」「親しむ」「やすらぐ」「快適な」「危険な」等に関する形容詞尺度を多数準備した。そこで、試験を繰り返し、相関が高いものどうしは1つにまとめるとともに、どちらでもない判断とな

る不適当な尺度は削除した。そして最終的に、「爽やかな-鬱陶しい」「陽気な-陰気な」「落ち着かない-落ち着く」「イライラする-和む」「親しみのある-親しみのない」「悲しい-楽しい」「安全な-危険な」「怒りたくなる-優しくなる」の8つの尺度に絞り込んだ。評価尺度は、「非常にある」「かなりある」「ややある」「ややない」「かなりない」「非常にない」の6段階とした。

### 6 行動誘因の実験方法

行動を誘因する因子についても、SD法を用い、感情誘因と同様の実験を行う。行動誘因に関係する項目についても、試験を行い、環境音を聴取した時に、仮想行動を誘因する動詞を準備した。最終的に、「注意深く聞きたくなる」「走ったり、歩いたりしたくなる」「'ぼうっと'したくなる」「近づきたくなる」「眠りたくなる」「手で触れたい」「その場で休みたくなる」の7個に絞り込んだ。評価尺度は、感情よりも想起されにくいので、「非常にある」「ややある」「ややない」「非常にない」の4段階とした。

Fig.1 に感情・行動誘因実験の流れを示す。

## V 感情・行動誘因因子と音質の関係

### 1 音質評価結果

Table 2 に12地域の環境音を音質解析し、等価騒音レベル(A特性)、ラウドネス、シャープネスの平均値を整理した。

ラウドネス値が大きい環境音は、長野堰用水円筒分土工、溪流木の根沢、東京駅丸の内口などであり、シャープネス値の大きい環境音はブナ林美人林、兎口集落棚田、倉沢集落棚田であった。

Table 2 景域音の音質  
Sound quality of soundscape

地域	山間		中山間			
地名						
Loud [sone]	26.70	3.40	2.30	10.80	10.20	4.90
Sharp [acum]	1.26	2.97	2.02	1.27	2.35	1.61
Laeq [dB]	70.50	52.20	53.90	57.40	63.30	47.70
地域	都市近郊			都市		
地名						
Loud [sone]	11.30	5.10	19.80	30.70	17.70	26.30
Sharp [acum]	2.49	1.69	1.37	1.30	0.84	0.98
Laeq [dB]	67.30	48.20	66.60	72.30	64.10	70.70

環境音により、ラウドネス値、シャープネス値は様々であるが、平均値で見ると、山間、中山間地域の環境音は、都市地域、都市近郊地域の環境音に比べて、ラウドネス値は小さく、シャープネス値は高い傾向にあった。但し、地域は便宜的に分けているがこの地域分類が環境音の特性と対応しているということではない。

A 特性騒音レベルとラウドネス値は相関があると言われるが、x軸に等価騒音レベル(A特性)、y軸にラウドネス平均値をプロットすると、Fig.2のように明らかな相関が認められた。しかし、等価騒音レベルが同じように65dB程度である親水水路の雄川用水用水路と農村部丘陵地の太田集落市街地では、ラウドネス値では約10sone程度異なっている。

つまり、等価騒音レベルでは同じ値を示すが、親水水路は農村部丘陵地より「うるさく」聞こえていると読み取れる。

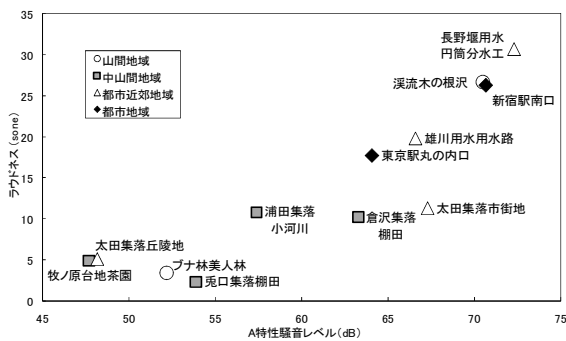


Fig.2 騒音レベル (A 特性) とラウドネス値の関係  
Relation between noise sound level (A characteristic) and sound quality of Loudness

2 感情誘因実験の結果と考察

a 感情因子抽出

SD法の結果を因子分析し、Table 3, Table 4に因子負荷量、固有値を示す。主因子法を用い、おおよその因子の解釈ができたので、無回転とする。感情誘因に関する項目からは「落ち着く」と「うきたつ」と表現できる2つの因子が抽出された。

第一因子は、「さわやかな-鬱陶しい」「落ち着かない-落ち着く」「イライラする-和む」「親しみのある-親しみのない」「安全な-危険な」「怒りたくなる-優しくなる」という項目が抽出され、爽やかで、落ち着きがあって、親しめるという意味を統合すると、「落ち着く」と総称できる。心が落ち着く「沈静」に当たる因子と言えり。

第二因子は、「陽気な-鬱陶しい」「悲しい-楽しい」という項目が抽出され、陽気で、楽しいという意味を統合して、「うきたつ」と総称できる。こちらは、「沈静」の反対で、「興奮」に当たる因子と言えり。

この第二因子以降の固有値は1以下となり、累積寄与率も第二因子までで約95%となっている。したがって、

この第二因子までが感情評価の基本軸といえる。

Table 3 感情項目の因子負荷量  
Factor loadings of feeling items

感情形容詞対	落ち着く	うきたつ
鬱陶しい-爽やかな	-0.945	0.158
陽気な-陰気な	-0.191	0.956
落ち着く-落ち着かない	0.974	-0.203
和む-イライラする	0.958	-0.283
親しみのない-親しみのある	-0.671	0.542
悲しい-楽しい	0.258	-0.918
安全な-危険な	-0.906	0.386
優しくなる-怒りたくなる	0.938	-0.255

Table 4 感情項目の因子分析における固有値、寄与率、累積寄与率

Eigen value, contribution rates and the total contribution rates of the factor analysis on feeling items

No.	固有値	寄与率	累積寄与率
1	6.157	0.770	0.770
2	1.401	0.175	0.945
3	0.235	0.029	0.974

b 感情因子発現の相違

Fig.3は、12地域の環境音の感情因子「落ち着く」「うきたつ」における因子得点を散布図にして整理したものである。第一因子「落ち着く」の因子得点が高い環境音は牧ノ原台地茶園、兎口集落棚田であり、因子得点が高い環境音は溪流木の根沢、新宿駅南口、長野堰用水円筒分水工、東京駅丸の内口であった。第二因子「うきたつ」の因子得点が高い環境音は太田集落市街地、新宿駅南口、太田集落丘陵地であり、因子得点が高い環境音は溪流木の根沢、長野堰用水円筒分水工、東京駅丸の内口であった。

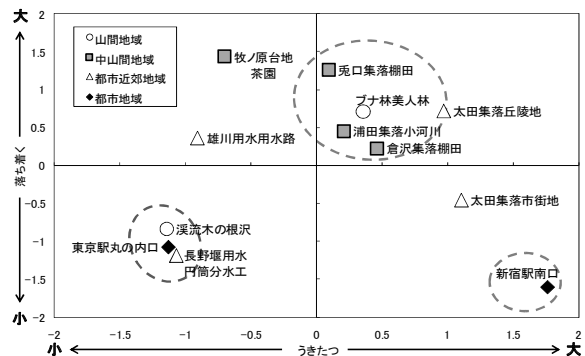


Fig.3 感情因子得点散布図  
Scatter diagram of feeling factor score

この結果、12の環境音を3つのグループに分けることができた。ブナ林美人林、牧ノ原台地茶園、浦田集落小河川、太田集落丘陵地、兎口集落棚田は、「落ち着く」が高くなっており、中山間地域を中心とした農村の音が



多く存在していた。溪流木の根沢、長野堰用水円筒分水工、東京駅丸の内口は、「うきたたない」「落ち着かない」が卓越していた。しかし、新宿駅南口は、東京駅丸の内口とは異なり、「落ち着かない」は同じ評価であるが、「うきたつ」と評価されている。新宿駅南口の環境音は、その音源の大半が人の声であるため、「落ち着かない」が、心躍る「うきたつ」音になっていたと考えられる。

以上のことより、第一因子が高い音は、中山間地域の農村の音が多い。低くなると都市の音が多くなる。また、第二因子の「うきたつ」は音色の影響を強く受けやすく、地域にとらわれない。

c 感情因子と音質評価指標との関係

Fig.4 は、x 軸に「落ち着く」の評価値、y 軸にラウドネス値をプロットしたものである。「落ち着く」とラウドネス値との相関係数は 0.7 と比較的高かった。

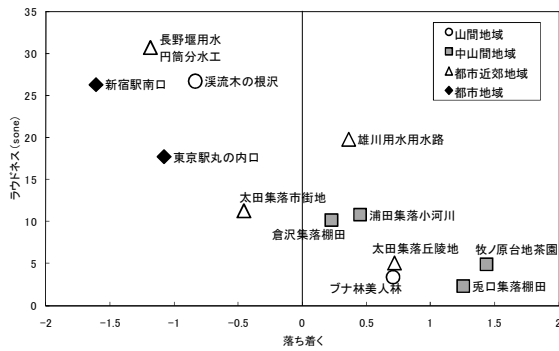


Fig.4 「落ち着く」とラウドネス値の関係  
Relation between feeling factor "Quietness" and sound quality of Loudness

「落ち着く」は、ラウドネス値が低くなる程、評価が高くなり、ほぼ 15sone 以下になるとプラス側に評価される。また、「落ち着く」とシャープネス値の関係を示したものが Fig.5 であるが、1.5 ~ 2.0acum 付近で評価が反転している。シャープネス値が 1.5 ~ 2.0acum の時に「落ち着く」の評価は最も高くなっているが、シャープ

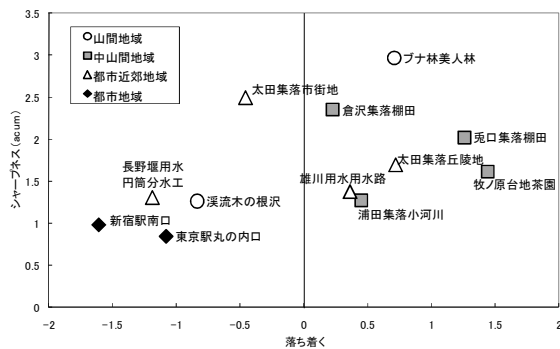


Fig.5 「落ち着く」とシャープネス値の関係  
Relation between feeling factor "Quietness" and sound quality of Sharpness

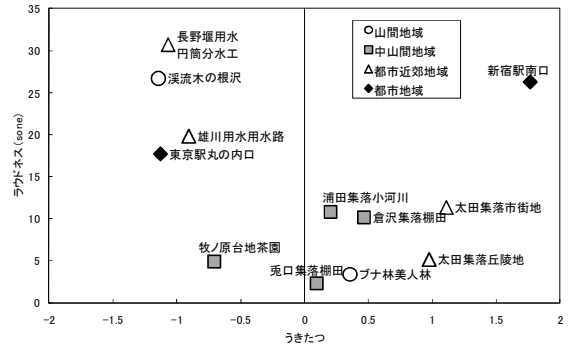


Fig.6 「うきたつ」とラウドネス値の関係  
Relation between feeling factor "Excitement" and sound quality of Loudness

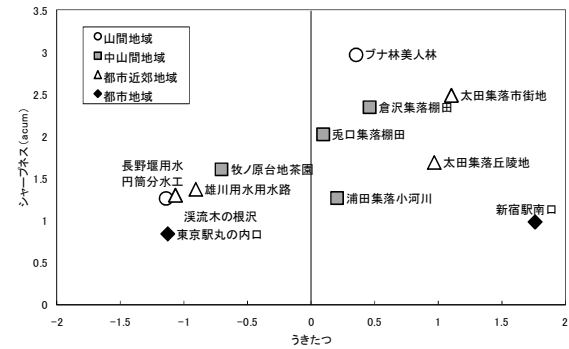


Fig.7 「うきたつ」とシャープネス値の関係  
Relation between feeling factor "Excitement" and sound quality of Sharpness

ネス値は高ければ落ち着きの評価が上がるのではなく、適正な範囲があることが明らかになった。「落ち着く」とシャープネスの相関係数は低かった。

Fig.6 は x 軸に「うきたつ」の評価値、y 軸にラウドネス値をプロットしたものである。「うきたつ」の評価が低いとラウドネス値は高く、「うきたつ」の評価が上がるにつれラウドネス値は下がり、評価が 0 で、ほぼ中間的评价となる。そこからは、ラウドネス値が上がるにつれ「うきたつ」の評価は上がる。新宿駅南口のラウドネス値 25sone を除けば、15sone 以下になると「うきたつ」の評価が高くなる。「うきたつ」とシャープネス値の関係は Fig.7 である。この場合も、新宿駅南口を除けば、シャープネス値が 1.5 ~ 2.0 acum 程度までは、正の相関が認められるが、「落ち着く」の因子ほど明確な傾向は確認できない。

「うきたつ」の評価は、ラウドネス、シャープネスの音質指標だけでは評価できない音となっている。この 2 指標だけで、感情因子を捉えることには無理があるのかもしれない。

3 行動誘因実験の結果と考察

a 行動因子抽出

感情誘因実験と同様に SD 法の結果を因子分析し、因子を抽出した。Table 5, Table 6 に因子負加量をまとめ

た。主因子法を用いた無回転の結果であり、バリマックス回転を施したが、十分な解釈はできなかつた。固有値を考慮すると、統計的な意味を有するのは第二因子までではあるが、「走ったり、歩いたりしたくなる」は-0.763の因子負荷量を持ち、第一、第二因子とは明らかに異なる意味が抽出されている。この行動は、後述するアフォーダンス理論での「基礎定位システム」とも呼応すると考えられることから、少し無理矢理であるが解釈をし、行動因子の抽出は3つとした。

**Table 5** 行動項目の因子負荷量  
Factor loadings of action items

行動動詞	休息行動	接触行動	静止行動
注意深く聞きたくなる	0.752	-0.509	0.342
走ったり、歩いたりしたくなる	-0.261	0.095	-0.763
'ぼうっと'したくなる	0.768	-0.525	0.342
近づきたくなる	0.371	-0.920	0.052
眠りたくなる	0.887	-0.368	0.300
触れたいくなる	0.405	-0.858	0.247
その場で休みたくなる	0.700	-0.506	0.482

**Table 6** 行動項目の因子分析における固有値、寄与率、累積寄与率

Eigen value, contribution rates and the total contribution rates of the factor analysis on action items

No.	固有値	寄与率	累積寄与率
1	5.598	0.800	0.800
2	0.881	0.126	0.926
3	0.401	0.057	0.983

第一因子は、「注意深く聞きたくなる」「'ぼうっと'したくなる」「眠りたくなる」「その場で休みたくなる」という項目を含んでおり、休息を誘引する因子と解釈でき、「休息行動」と総称した。

第二因子は、「近づきたくなる」「触れたいくなる」という項目を含んでおり、接触を誘引する因子と解釈でき、「接触行動」と総称した。

第三因子は「走ったり、歩いたりしたくなる」という項目のみであり、動くか止まるかを誘引する因子と解釈でき、「静止行動」と総称した。

また、固有値は第二因子目で1以下となっているが、累積寄与率約95%までを取り、3因子を行動評価の軸として捉えた。

アフォーダンス理論では、いくつかの重要な行為システム群があるとされている。エドワード・S・リードは、基礎定位システム、知覚システム群、移動システム、欲求システム、操作システム、相違行為システム群、遊びシステムに分解している。システムを簡単に紹介すると以下のようなになる。

基礎定位システム：身体の一部を静止させておくこと  
知覚システム群：見る、聞く、嗅ぐ、味わう、触れる等の特別な探索的活動

移動システム：ある場所からある場所への移動

欲求システム：生命を維持するために、呼吸、摂食、体温調節などを通じて環境との恒常的な関係を持っており、その機能を担っている

操作システム：基本は手を使った行為

相違行為システム群：他の動物（人）との相互行為

遊びシステム：知覚や純粋な行為に基づくものではない行為

そして、本研究で示した行動誘因の3因子（接触行動、静止行動、休息行動）では、接触行動は「知覚システム群」、静止行動は「基礎定位システム」と「移動システム」、休息行動は「欲求システム」に位置づけられる。操作システムや遊びシステムについても行動誘因として今後捉えるべき行為ではあるが、本研究では、身体だけを対象とした行動誘因だけを対象とした。

#### b 行動誘因の多様性

12の環境音の因子得点を **Table 7** にまとめた。この表では各環境音の因子得点が+1以上の場合は「○」、-2以下の場合は「×」として整理した。第一因子の「休息行動」が高い環境音は「牧ノ原台地茶園」「太田集落丘陵地」「ブナ林美人林」「倉沢集落棚田」であり、低い環境音は「溪流木の根沢」「太田集落市街地」「新宿駅南口」「東京駅丸の内口」であった。第二因子「接触行動」が高い環境音は「太田集落市街地」「浦田集落小河川」であり、低い環境音は「長野堰用水円筒分水工」「東京駅丸の内口」であった。第三因子の「静止行動」が高い環境音は「兎口集落棚田」であり、低い環境音は「新宿駅南口」「太田集落丘陵地」「倉沢集落棚田」であった。環境音によって誘引される行動が異なっていることがわかった。以下に、行動因子の特徴を示した。

**Table 7** 環境音別の行動因子得点  
Action factor score of environmental sounds

環境音	行動(行動想起)	休息行動	接触行動	静止行動		
溪流木の根沢	-1.216	×	-0.225	-	0.059	-
ブナ林美人林	1.004	○	-0.053	-	0.855	-
兎口集落棚田	0.401	-	0.489	-	1.564	○
浦田集落小河川	-0.322	-	1.854	○	-0.015	-
倉沢集落棚田	1.833	○	-0.248	-	-1.831	×
牧ノ原台地茶園	1.117	○	-0.428	-	0.858	-
太田集落市街地	-1.225	×	1.222	○	0.025	-
太田集落丘陵地	1.165	○	0.236	-	-1.029	×
雄川用水用水路	-0.490	-	0.298	-	0.985	-
長野堰用水円筒分水工	-0.283	-	-1.213	×	-0.656	-
東京駅丸の内口	-0.888	-	-1.978	×	0.491	-
東京駅南口	-1.098	×	0.045	-	-1.306	×

音観察結果から筆者が定性的に評価するところでは、「休息行動」を誘引する環境音は、やすらぎ感が強く、開放感があり、静かな自然の音を中心であると考えられる。この行動は、無機質な音では想起されにくいと思われる。「接触行動」を誘引する環境音は、生物の鳴き声に適度な生活音がある安心感、親しみ感が強い音と考えられ、「静止行動」を誘引する環境音については、車両や人の動きが伴う音は、動きを誘因する傾向があるようだ。

c 行動因子と音質評価指標との関係

第一因子「休息行動」の評価値をx軸に、ラウドネス値をy軸に取り、プロットしたものがFig.8である。ラウドネス15soneを境に、「休息行動」の評価が変わる。同様に、「休息行動」とシャープネス値との関係はFig.9に示されるが、休息行動の評価はほぼ1.5acumよりシャープネス値が高い場合は休息行動を誘引し、それよりシャープネス値が低いと休息行動は誘引されない傾向がある。太田集落市街地が例外値となっていることや、全体的にデータがばらつくのは、やはり、行動についての因子分析が十分分解できていない結果であろう。また、「接触行動」「静止行動」とラウドネスとシャープネスには関係性は見られなかった。

4 音質による落ち着き特性評価手法の考案

以上の結果を踏まえると、音質によって、環境音の心理特性の1つである「落ち着く」を評価できると考えた。説明変数 $x_1$ をラウドネス値、 $x_2$ をシャープネス値、目的変数 $y$ を感情の第一因子「落ち着く」として、重回帰分析を行ったところ、次の式が重相関係数0.805が得られた。

重回帰直線  $y = 1.603 - 0.094x_1 - 0.162x_2$   
 $y$ : 「落ち着く」の評価値  
 $x_1$ : ラウドネス値 ( $0 < x_1 < 35$ )  
 $x_2$ : シャープネス値 ( $0 < x_2 < 3.5$ )

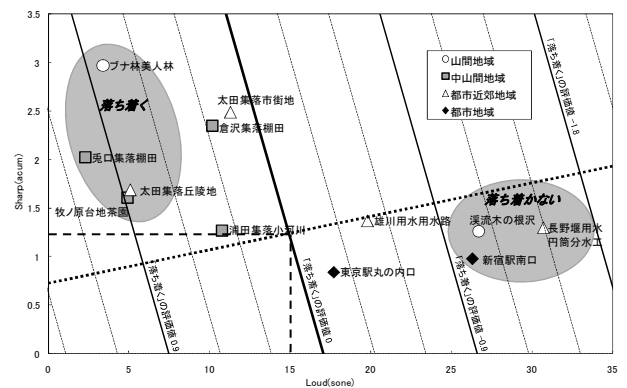


Fig.10 「落ち着く」の特性図  
Diagrams of "Quietness" characteristic

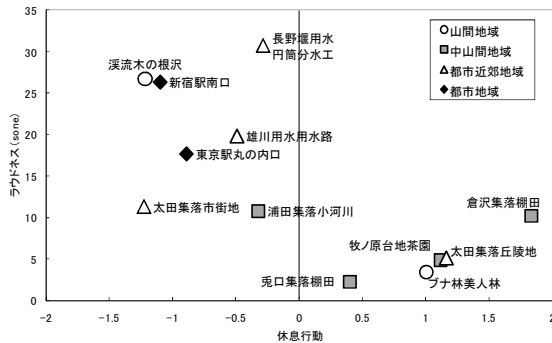


Fig.8 休息行動とラウドネス値の関係  
Relation between action factor "Rest action" and sound quality of Loudness

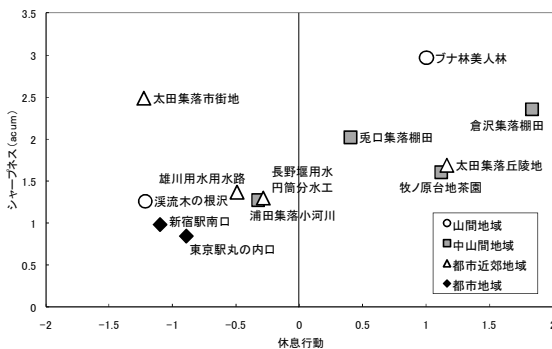


Fig.9 休息行動とシャープネス値の関係  
Relation between action factor "Rest action" and sound quality of Sharpness

この重回帰直線を用いて等評価線を作成したところ、Fig.10となった。「落ち着く」の評価値0の傾斜線より右側は評価が低く、左側は評価が高い。この結果より、「落ち着く」の評価が高い環境音は、中山間地域の農村の音であり、評価が低い音は都市や都市近郊の環境音であることがわかる。「落ち着く」の評価が最も高い環境音は中山間地域の「兎口集落棚田」であり、そのときの音質は、ラウドネス2.3sone、シャープネス2.0acum程度となっていた。次いで、「牧ノ原台地茶園」、「太田集落丘陵地」と続いている。「ブナ林美人林」はシャープネスが非常に高いため、順位は4番目だが、「落ち着く」の評価値では、先の2音とほぼ同程度といえる。「落ち着く」の評価値が最も低い環境音は「長野堰用水円筒分水工」であり、ラウドネス30sone、シャープネス1.3acumであった。次いで「溪流木の根沢」、「新宿駅南口」あたりの評価が低い。

今回対象とした環境音のデータ以外に、様々な地域で様々な環境音を採取したところ、ほとんどの場合、Fig.10の「落ち着く」の評価値0の傾斜線と、それと交差する右下がりの波線で囲まれる右下と左上にデータは集まり、それ以外の環境音は本計測手法の範囲では計測されなかった。そこで、重複を避け、同年度に採取した環境音だけを対象に分析したのが今回の調査である。そ

のことを踏まえて、環境音の目的変数 $y$ 「落ち着く」の正負が逆転する代表的地点をおおよそ選択すると、交差する点のラウドネス 15sone, シャープネス 1.2acum 付近である。農村地域の音環境設計において、落ち着きのある環境音としては、ラウドネスほぼ 15sone 以下, シャープネスほぼ 1.5 ~ 2.0acum 程度に入ることが重要である。但し、ラウドネス値, シャープネス値が共に高い, または共に低い音は, 対象とした 12 地域の環境音にはなかったが, このような環境音が存在するかもしれないかは, もう少しサンプル数を増やす必要がある。

## VI 結 言

本研究では、農村景観における聴覚的な適正デザイン、水利施設等の農村地域資源が有する景観としての環境性能の適正化を図るため、環境音の評価手法の確立を目的とし、心理評価指標として SD 法を用い、環境音聴取時の感情・行動誘因を捉えるとともに、心理評価に対する音質評価を比較した。

その結果、環境音は、感情誘因の因子としては、「落ち着く」「うきまつ」の2つの因子、行動誘因の因子としては「接触行動」「静止行動」の2因子と、参考として「休息行動」を入れた全3因子から構成されていることが明らかになるとともに、これらをラウドネスとシャープネスの音質評価指標によって表すことができた。

また、2つの音質指標と感情誘因因子の1つである「落ち着く」特性の関係を式で表現することを考案した。これにより、ラウドネス、シャープネスを設定するだけで、環境音の「落ち着く」、情緒的沈静の効果を評価することができ、これらの評価手法を利用すれば、農業水利施設や集落内にある多様な地域資源が有する環境音の聴覚的景観性能の設計指針となる可能性が見えてきた。

ラウドネスとシャープネスは、「落ち着く」の評価に関するおおよその指標値となるが、まだこの2指標だけでは表現できていない感情・行動誘因因子もあると考えられる。今回は、情緒的沈静の評価指標としてはある程度使えるものとなったが、音から受ける感動や楽しさ等の興奮の評価指標については十分分析できなかった。今

後、サンプル数を増やすとともに、音質の指標についても、他の指標や工夫が必要となると考える。

## 参考文献

- 1) 細田誉二・加藤雅裕・津田宏之 (2003) : 環境音の視・聴覚情報の効果に関する研究, 関東学院大学 建築設備工学研究所報, 27, 71-77
- 2) 石山武 (1993) : 道路交通騒音に関する住民反応の分析～第2報 被害感に影響を及ぼす要因について～, 自動車技術会学術講演前刷集
- 3) 兜真徳 (1991) : 特集 感覚と公害 騒音とストレス, かんきょう (東京), 16(5), 6-9
- 4) 亀井且有 (2007) : 打楽器音楽の感性評価における近赤外分光法による酸素化ヘモグロビン変化の定性的モデル, 立命館大学アート・リサーチ, 7, 61-69
- 5) 榎塚忠穂 (1994) : 実際の都市交通騒音と脳波活動, 日本人間工学会, 30 (特別号), 258-259
- 6) 宮崎良文 (2006) : 森林セラピーの生理的効果の科学的解明, 森林技術
- 7) 農林水産省 (2010) : 新たな食料・農業・農村基本計画
- 8) 小田聡ら (1992) : 現代音楽聴取が脳波ならびに循環機能に及ぼす影響, *Neurosciences*, 18, 83-86
- 9) Reed, E. S. (細田直哉訳) (2000) : アフォーダンスの心理学, 新曜社
- 10) 佐々木実 (1993) : 音環境に関わるアメニティーの考え方, 騒音制御, 17(4), 169-172
- 11) Schafer, R. M. (鳥越けい子ら訳) (2006) : 世界の調律, 平凡社
- 12) 谷畑義則・久保田純美・平本一雄・末繁雄一 (2006) : 環境音とまちの印象の関係についての分析～街の空間構成と環境認知に関する研究その4, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 133-134
- 13) 鳥越けい子 (1997) : サウンドスケープ [その思想と実践], 鹿島出版会

# Development of Evaluation Method of Environmental Sound that is One of Regional Resources

– Research on quantity evaluation of relation between Feelings and Sound quality of Environmental sound for Regional resources management. –

YAMAMOTO Tokuji and KURITA Hideharu

## Summary

An aural design in the farm village landscape is examined. Feelings and actions cause when listening to an environmental sound by using the semantic differential method to establish the evaluation approach of an environmental sound are caught.

As a result, it was clarified to an environmental sound to be composed of three action factors of “Contact action”, “Geostationary action”, and “Rest action” and two Feeling factors of “Quietness” and “Excitement”. Moreover, the relation between the evaluation of the factor and sound quality of Loudness and Sharpness was able to be clarified.

It proposed to express the relation between “Quietness” that was one of the factors of feelings and sound quality by the expression. As a result, a quiet effect of an environmental sound can be evaluated only by setting the Loudness and Sharpness. If these evaluation approaches are used, it becomes the indicator of the design of an aural performance of an environmental sound in the waterway and the village.

**Keywords** : landscape, sound quality, environmental sound, semantic differential method, regional resources, loudness, sharpness



# 住民参加型地域づくり支援のための コミュニケーション GIS の開発

— 農村地域資源の簡易型総合評価手法の提案とその実行支援システム —

重岡徹\*・栗田英治\*・進藤圭二\*\*・友松貴志\*\*・山本徳司\*・石田憲治\*\*\*

## 目 次

I 緒 言	71	V 利用事例	91
II システムの概要	72	1 地区概要と計画策定の目的	91
1 システムの要件	72	2 コミュニケーション GIS の利用	92
2 機能評価の方法と考え方	73	3 将来へ向けて	93
III 研究開発方法	73	VI 結 言	94
IV システム開発の特徴	75	参考文献	94
1 GIS データベースの構築	75	Summary	95
2 インターフェースデザインと実装	77		

## I 緒 言

近年の農村振興施策にかかる事業・制度においては、農地・水・環境保全向上対策、中山間地域等直接支払制度、地域水田農業ビジョンの策定等、住民参加によって地域が独自に地域振興と環境管理の計画を策定していく過程が求められている。また、国・都道府県規模の総合計画や環境基本計画から、市町村での農業振興計画、田園環境整備マスタープラン、集落規模の営農計画まで、これらの計画策定においては、住民と技術者が農村地域資源の位置・量・質の把握を十分に行い、その有効利用や質的保全についてこれまで以上に意思疎通を図る計画策定支援のシステムが求められている。

さらに、平成18年度には、「農業・農村整備事業における景観配慮の手引き」、平成19年度には、「農業農村整備事業における生態系配慮の技術指針」も出され、景観・環境へ配慮した適正な計画・設計が求められている。

しかし、農村地域資源の定量的把握から総合的な機能の診断、計画策定に至るプロセスを、計画策定者と地域住民とが、協働によって推進しようとする、農村地域資源の分類と収集、そのデータベース化、機能の評価指

標の策定と診断、計画策定のための検討手法等の困難な作業過程を伴う。また、総合的な機能の診断技術も、複雑な分析を伴うものがあり、研究的側面で、GISによって分析結果を出力できるものであっても、実際の計画者である住民が利用できるGISとはなっていないため、地域資源が有する様々な機能の定量的評価を踏まえた計画にはならない。

また、最近の計画策定においては、資源循環型社会形成、生物多様性保全、地球温暖化問題等の広域的で多様な要件を踏まえたマクロな視点での検討が必要な場合が多く、従来の計画範囲を超える広域の環境や生物の資源データ等の農村地域資源データの収集と整理が必要となる。

これらの背景と問題点から、地域資源GISと景観画像シミュレーション等を組み合わせた支援システムや地域景域デザインを計画策定者と地域住民との協働によって作成するための住民参加に資する地域づくり支援システムが求められている。

本システムの目的は、住民参加において住民みんなが有する情報をわかりやすく重ね合わせて評価することにある。そのことを「総合的」と定義づけることにする。科学的根拠が提示される事項は、それに則った科学的な解析がされることが望ましいが、ここで言う、「総合的」とは、必ずしも、科学的根拠に基づいた数量的な総合化ではなく、計画策定における資源情報の整理支援を指す。

このシステムによって、これまで整備された、あるいは整備予定である農地基盤情報の有効かつ効率的な利用の促進を図ることにつながると考えられる。

\* 農村環境部景域整備研究室

\*\* 株式会社イマジックデザイン

\*\*\* 農村計画部

平成23年1月18日受理

キーワード：住民参加，地域づくり，ワークショップ，GIS，地域資源

そこで、本報では、農村地域資源の空間的で総合的な評価を効率的かつ効果的に行うとともに、計画の策定段階において、計画策定者や住民らによる双方向のコミュニケーションを促進させ、地域資源管理に対する円滑な理解と合意を図るための住民参加型農村計画策定支援のためのコミュニケーションGIS（以下、システムと呼ぶ）の開発について報告する。

開発に当たっては、

- (1) 多様な地域資源データの入力容易にできること
- (2) 資源が有する多様な機能の総合的な診断が簡易にできること
- (3) 地域住民が理解しやすい出力形式になっていること

の3つの視点を導入することによって、住民参加の地域計画づくりワークショップ等において得られた住民情報と基盤となる農村地域資源情報・センサス情報とのGISでの統合化を行う。それにより、計画策定者が様々な目的に合わせた農村地域振興計画を、地域住民へわかりやすく説明できるとともに、住民との協働作業が容易に行えるようにする。

## II システムの概要

### 1. システムの要件

#### a 簡易な評価関数による機能評価

地域資源データベースを構築することによって、機能評価指標により空間分析を行い、機能の総合的な診断がGIS上で出力されることが基本要件となる。

例えば、土砂崩壊防止機能は、傾斜、土層深、植生、農地形態等の地域資源データにより評価される。このように、これまでの研究成果により、物理的な条件と機能との因果関係が解明されているものは、関係する地域資源データを元に評価を行う。しかし、教育機能等は、学校、公民館、公園からの距離と植生、文化資源や生態系の質等の地域資源データによって評価されるであろうが、未だ、地域資源と機能との空間的な関係性が研究成果によって十分に解明されていないものである。このように物理的な条件と機能との関係が明確でないものや、資源そのものの物理的データよりも住民の環境認知によって評価される指標の方が空間を表現するデータとして重要な場合は、認知データを地域資源データとして直接利用する。出力される機能は、機能性、利便性、安全性、健康性、文化性等の様々な機能に分かれるが、これを固定して評価するものではなく、地域の状況に応じて様々な機能を評価していけるようにする必要がある。

地域資源データの様々な指標とパラメータを設定し、これに評価関数を与えて、多様な機能の総合的な診断をすることができるようなシステムを構築する場合、本来、機能評価関数は、資源データ位置の評価だけではなく、資源間の水平方向の関係性、時間的変化についても取り

扱う必要がある。しかし、住民参加による環境評価に資する簡易型のシステムとすべきであることから、非線形を含む複雑な関数は設定せず、四則演算のみを用い、距離効果も線形関数のみで表現することとする。

本システムの最大の目標は、住民参加のワークショップ現場で簡単に使えることである。よって、即座に機能評価の理解ができないような専門的な評価アルゴリズムは、住民参加にとっては必要ないと判断した。よって、本システムの機能評価のアルゴリズムは、地域資源データの位置とその資源が有する機能についての感覚的な評価をいくつか線形に重ね合わせる程度のシステムとしている。

#### b 住民と技術者による機能評価の重み付け

ある一定の面的な広がりを持った水田のような地域資源があった場合に、この水田が有する生産機能と教育機能を同時に見て、この水田のうち、どの部分の生産機能が卓越し、どの部分の教育機能の発現可能性が高いのか、また、どの部分が、共通の重みで機能を持っているかを総合的に評価するのが総合診断である。この機能の総合化が何を意味するかは、計画者のアイデアの創出につながる。上記の例をそのまま使えば、教育機能が生産機能を凌駕している場所は、稲刈りや田植え等の農業体験の場に利用するのがふさわしい地点と考えることができる。排水条件や土壌の肥沃性等の生産機能はそれほど高い評価とならないが、教育機能としての学校からのアクセスが良い場所で、生物との接触頻度の高い場所である地点はどこかを、単純ではあるが、即座に探すことができると、総合的な活性化計画に利用できる。もちろん、生産機能が高く教育機能が高い場所もあれば、その逆もあるだろうが、どの機能を選択するかは住民と技術者の協働による計画策定過程において決定していけばよい。

よって、システムの要件としては、単純な和ではなく、地域環境形成の意向の重み付けを可能にしなければならない。

また、本システムは、専門家とのワークショップなどを通じて行うことによって、より効果的に運用できるものであり、十分に機能評価に関する知識がない住民だけが運用した場合に、誤った診断となる場合がある。この点については留意しなければならないが、基本的には診断に自由度があることが重要である。

#### c ビジュアルライゼーションの活用

評価画像は平面図ではなく、鳥瞰的に見えること、また、より現実的な環境のイメージを構築するため、アニメーション表示できるようにすることが必要である。計画者は、多様な機能の診断を試しながら、地域特性を遊び感覚で探っていくことができる。住民参加で計画を行う場合、最も重要な点は、解析結果の信頼性よりも、住民が持つ地域環境に対する理解が、感覚的に行えるシステムである。このシステムは、真の解を求めるためのものではなく、どちらかという、地域をよく認識している者



にとっては「確認」、知らない者にとっては「気づき」となることを目標としたものである。よって、環境のイメージを可視化することは設計のための重要な要素となる。

## 2. 機能評価の方法と考え方

### a 機能体系の組み方

機能の重み付けは、「実践・農村計画のシステム・テクノロジー」（相川，1987）にある便益価値分析法の目的体系の組み立ての方法を応用する。本システムを活用する計画者は、まず、この便益価値分析法によって、機能の体系を作成することが必要となる。本報では、機能体系のデフォルト値を用意しない。よって、決してデフォルトにこだわる必要はなく、地域毎に、目的毎に体系が組めるようなシステムとする。

### b 機能評価の重み付け

1) 総合機能は機能の重み付けによって評価される。重み付けは本システムを利用する者が設定できる。機能の重み付けの数値の合計は 100 とする設定方法が理解されやすいが、100 に調整するのが困難な場合もあるため、総合機能の下に即単一機能が設定される場合はできる限りそういう構造とすべきであるが、機能がまたいくつかの機能によって構成されている場合は、機能の下に子の機能を設定することができるようにし、2段階程度で資源データから直接評価できる単一機能が設定できることが望ましい。単一機能とは、これ以上分解できない機能のことを言う。プログラムとしては、機能どうしのおおよその重みを自由に設定することができるようにして、計算時に割合で換算することができるようにする。

2) 単一機能は関係する資源データの重み付けによって評価される。重み付けは本システムを利用する者が設定できる。また、機能によっては、単一機能がそのまま総合機能として評価される場合もある。その場合は、総合機能に直接、資源データを設定し、重み付けの数値を入れることができる。資源データとは単一機能と関係性を持つ物的・質的データを指す。

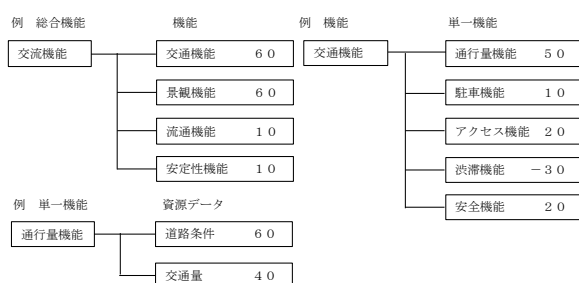


Fig.1 機能評価の重み付け  
Weighting of function evaluation

### c 重み付けの数値の入力

重み付けの数値は、資源データと機能との関係性が明

確であれば、それを当てはめることが望ましい。また、専門家や計画者が、これまでの経験から、この程度の重みになるというデフォルト値を入力しておくこともできる。しかし、本システムは、あくまでも地域住民等が主体となって計画を策定するものであるから、関係性が不明確な場面から、何回かのワークショップを経て、自分たちで、関係性を考えながら重みを設定していくことがより重要である。そこで、計画の内容によって重みを変えることができるようにしておく必要があり、そのための入力が機能設定フェーズで実施できるようにする。

### d 機能の総合評価の考え方

#### 1) 機能評点の考え方

機能評点とは、地域資源が有する機能の程度を評価するための値を指す。資源データごとに、評点の値、カテゴリの段数と範囲、評価の影響距離等は自由に設定できるようにする。

#### 2) 総合評点の考え方

総合評価は、メッシュ単位で行うこととする。メッシュの大きさは、評価対象によって変化するため、自由に換えられるように設計するが、基準は、「統計に用いる標準地域メッシュ及び標準地域メッシュ・コード（昭和 48 年 7 月 12 日行政管理庁告示第 143 号）」に基づき、一辺約 80km 長となる第 1 次地域区画から一辺長約 15 m 長となる第 9 次地域メッシュ（便宜的に第 3 次地域メッシュの経度差 45" を 2 分の 1 × 6 回で経度差 0.7" まで分割）まで準備する。資源データは連続型であるが、評価においては連続型を離散化した後、全メッシュの総合評点を加算方式で計算した結果を最高評点から 0 までに段階的に振り分ける。振り分け方は、プログラム開発において記述する。

#### 3) 総合評点の表現方法

単一機能、総合機能、資源データ毎に色分けができるようにする。また、3次元表示の GIS 上に 3D 棒グラフとして評点が表現されるようにする。また、計算結果が複雑になる可能性もあるため、地図上のどの地点がどの程度評価されているのかが、一目でわかるような色分けもできるようにする。

機能の総合評価システムを構築するに当たっては、石田（1995）、和田・岡崎（1980）、辻（1981）、柳澤ら（2002）が研究を重ねてきた土地利用調整や土地利用計画などの土地分級の方法論や、島ら（2006）、久保田ら（2000）、森本ら（2005）の多面的機能評価法等を援用するが、本システムがそれらと大きく違う点は、科学的根拠の析出に特化せず、ビジュアル思考支援に特化している点である。

## III 研究開発方法

これまで、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は、農林水産省官民連携新技術開発

での、株式会社イマジックデザインとの共同研究において、サーバ&クライアント型の農地基盤地理情報システム(VIMS)を開発してきたが、本研究においては、さらに、これらの共同研究において蓄積されたビジュアライゼーションの技術を深化させ、これまでにない表現性を高めた簡易型の空間評価システムとする。

なお、VIMSについては、平成20年度農村工学研究所研究成果情報に「水土里情報の個別情報端末利用に対応した3次元GIS(VIMS)」と題して詳細が記載されているとともに、すでに市販されているので、そちらを参照いただきたい。

当該システムで提供されるアプリケーションは、市販のGISを使って作成することは十分にできるため、GISの機能としての新しさはほとんど無いが、住民参加支援が容易にできるシステムとしては、入力・出力ともに簡易なシステムとなっており、誰でもが比較的短期に技能を習得でき、かつ基本的な重ね合わせ評価については必

要十分な機能を備えている点で画期的である。

本システムは、次に示す4つのモジュールからなり、それぞれのモジュールを統合したシステムとして開発する。

- 1) 農地・道路・水路等の土地・施設基盤データや農林業センサスデータ、住民参加によるアンケートデータ等の多様な資源データを入力して、農村の多様な資源の総合的診断の基礎となる地域資源データベースを構築するモジュール
- 2) 機能と資源データの構成及び機能評価範囲等、評価の対象となる農村の多様な資源の総合的診断を設定するモジュール。
- 3) 資源データと単一機能の関連付けや機能評点を設定、総合的な診断を行うモジュール
- 4) 総合的な機能診断を地域住民にも理解しやすい出力形式で表示するモジュール

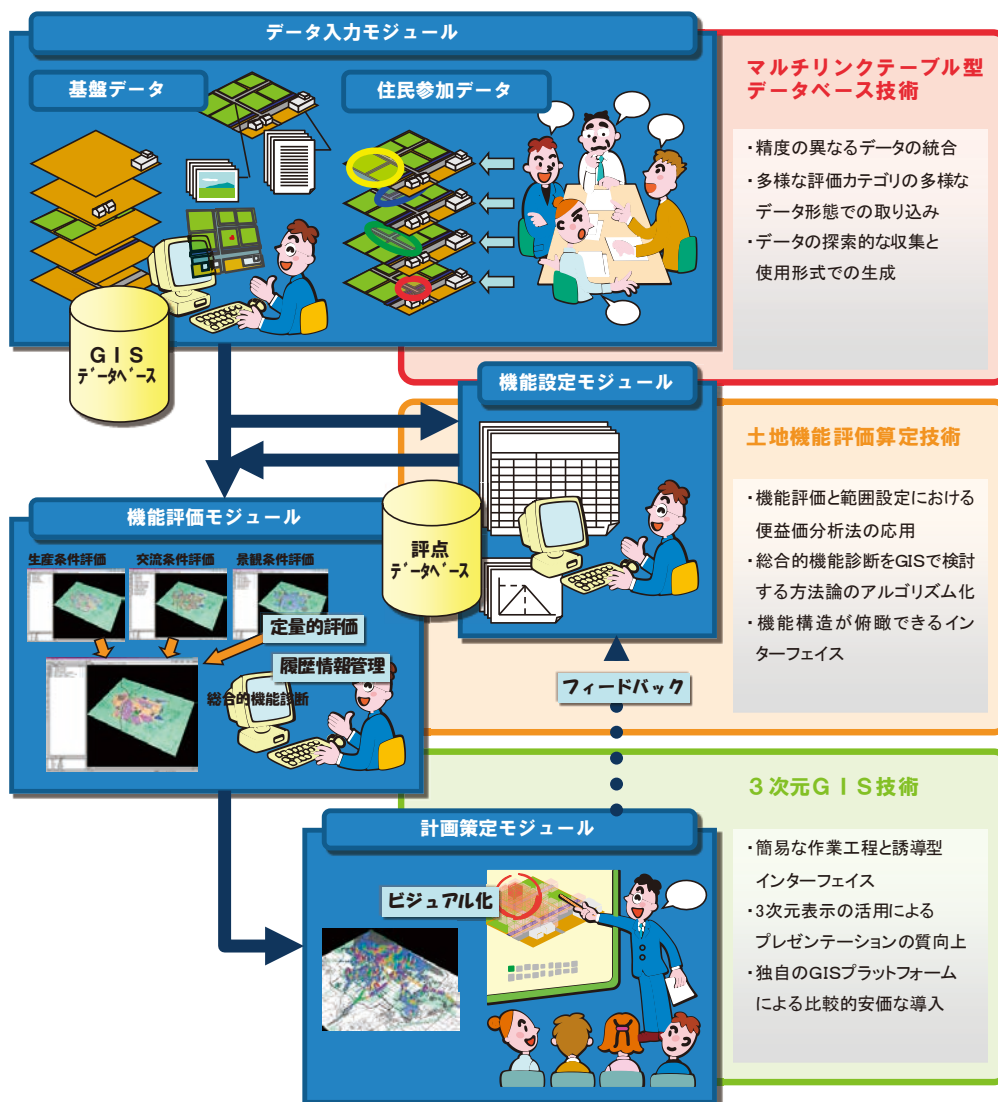


Fig.2 システムを構成するモジュール  
System Configuration Module

## IV システム開発の特徴

農村が有する多様な地域資源の総合的診断システムとして、複雑な構成の多種多様なデータを容易な操作で分析するために、従来の GIS が基本的に持つバッファ機能のうち、必要な機能だけを特化したシンプルなインターフェース、試行錯誤を前提とした処理の高速化等、実用に耐えるソフトウェアとすることを重視し開発を行った。

### 1 GIS データベースの構築

GIS データベースは、VIMS で採用している Microsoft SQL Server 2005 (以下 SQLServer) 上に構築し、全てのデータをデータベースで管理共有する機構とした。特長は、図形などのジオメトリ情報と属性などのメタ情報の関係を、リンクテーブルを介してリレーションを結んでいる点である。以下にデータベースの構造と構築した内容について述べる。

#### a データベース構造の概要

どのテーブルにも共通した仕様として、uniqueidentifier 型で 128bit GUID を主キーで持つフィールドがあること、datetime 型の [Modified] フィールドで更新日時を持つこととしている。分散されたサーバからデータを集約するような場合も考慮して、主キーに 128bit GUID を用いて ID のコンフリクトが起きない仕組みにしている。

#### b 位置情報テーブル

図形情報は「位置情報テーブル」で一元的に管理する。図形の種類は、点 (POINT)、線 (POLYLINE)、面 (POLYGON) があり、それぞれの頂点や色・線幅などの情報を持っており、XML 化した一連の文字列に変換し

て [Shape] フィールド 1 つに格納する。取り出すときは、文字列を図形情報に復元する。

次に、各種の属性を扱うテーブルは、属性の数だけ個別にテーブルを作成する。この際に、[ID] フィールドを uniqueidentifier 型で GUID を主キーとして持つことと、[Modified] フィールドを datetime 型に持つことだけは共通で、後はそれぞれの属性情報に必要な型を規定することになる。

#### c リンクテーブル

リレーションを司る「リンクテーブル」は、TABLENAME1、ID1 と TABLENAME2、ID2 を持ち、リンクする 2 つのテーブルのテーブル名と ID を入れる。リレーションの組み方は、一般的には、ある表 (A) の中にリレーション相手の表 (B) のキーを直接含んでしまうという方法が取られるが、この方法だと、主従関係が固定化されるため、表 (A) から表 (B) はすぐに解っても、表 (B) から表 (A) はすぐには解らない。表 (B) にも表 (A) のキーを含めば解決するが、今度は表 (A) と表 (B) は 1 対 1 の関係で固定化されてしまう。しかし現実には、物事の関係性は複雑で、1 対多でなければ記述できないことの方が多い上に、双方向に引くことができなければならない。また、地域資源データとしての属性は、過去に想定されなかったものが後に新たに加わる場合もあり、表 (A) と表 (B) の関係だけでなく、表 (C) や (D) が後から追加される場合があるが、表の中に相手の表の ID を持つておくという方式だと、テーブル構造を後から変更しなければならず柔軟性に欠ける。こうしたジレンマを一挙に解決するため、リレーションに関する部分として別のテーブル (リンクテーブル) を構築する。

Fig.3 は 4 つのテーブルの内 1 つの位置情報テーブル

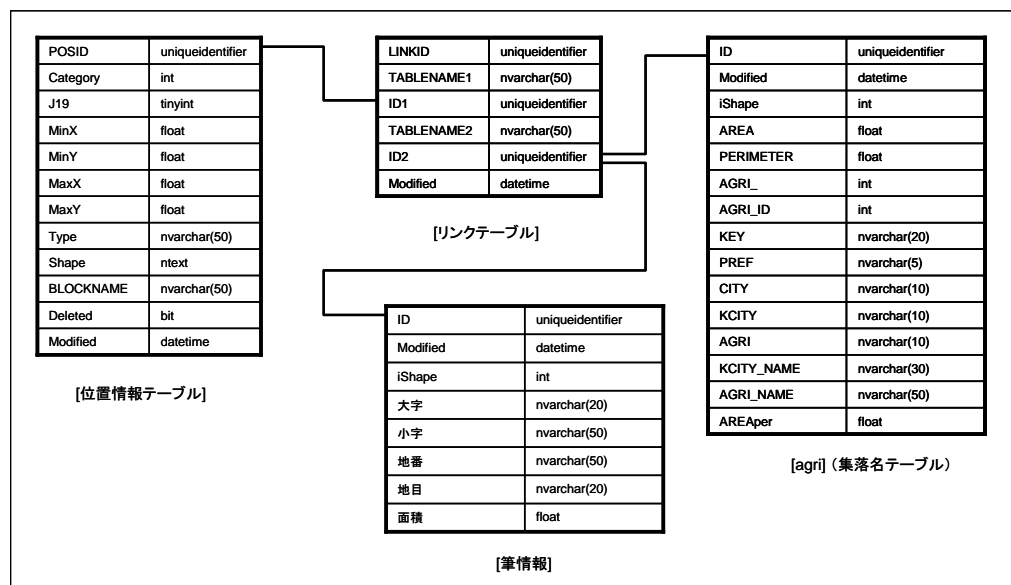


Fig.3 リンクテーブルによるリレーション  
Relation by linked tables

と2つの属性テーブル(集落名テーブル「agri」と筆情報テーブル)が、「リンクテーブル」を介してリレーションが結ばれていることを表す。

線で結ばれるリレーションは、実際には筆情報のIDがどちらにも入り、それがキーとなっていることを示している。この例のように、テーブルのIDと別のテーブルのIDがリンクテーブル上に記録され、リレーションを構築していく。この単純な仕組みによって、「一対多」の関係記述が容易に行え、検索は双方向で可能となる。

d 統計データの取り扱い

農林業センサス等の統計データの場合、集落を表す図形データと集落名などの属性データ、農家調査・土地・人口・世帯員・家畜・機械などの統計値データに分かれている。Shape形式(ESRI)で図形と属性を取り出せるようになっているフォーマットを、図形を[位置情報テーブル]に、集落名などは「agri」テーブルに格納し、双方の関係を「リンクテーブル」に格納する。統計値データがMicrosoft Access mdb形式の場合は、そのままSQL Serverにインポートができる仕組みとした。

モデル実証例として、農林業センサス(2000年)を読み込んだ。Fig.4は茨城県の市町村界、集落界の1つを選択状態にしたところであるが、このように位置情報

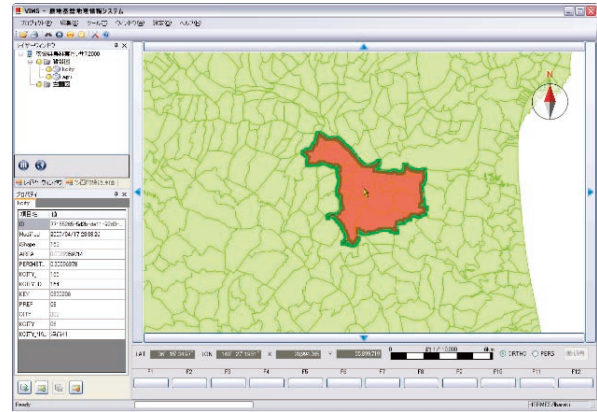


Fig.4 市町村界・集落界の図形(位置情報)

Shapes of boundary of municipalities and agricultural settlements (location)

テーブルに構築したデータが図形として表示されていることが分かる。Fig.5は位置情報(図形)と農林業センサスデータのテーブル間とのリレーションを示している。このようにリレーションが複雑になってしまうものの、クエリを実行して統計値と集落界の図形を結合した結果を得ることができる。

市区町村名称	旧市区町村名称	農業集落名称	経営耕地面積計	POSID	Shape
水戸市	水戸市	霞町北三の丸	1350	d8201f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	水戸市	根本町一区	1640	64201f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	水戸市	根本町二, 三区	2960	fe1f1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	舟渡, 庄司, 台畑	3120	391e1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	後原東, 後原西	2760	191e1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	南横町, 北横町	2250	fb1d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	宮本前, 宮本後	2290	bb1d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	田向, 仲畑	2720	761d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	外の内前, 外の内後	3000	881d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	柳内西	2760	5b1d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	水戸内西, 柳内中	2640	be1c1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	柳内東, 水戸内東	3030	561d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	沢尻	2560	461d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	阿川, 泉	2130	cf1c1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	合滝の上, 根本	2850	c91c1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...
水戸市	国田村	南原	650	011d1f69-412e-de11-92d3-00acc1d42e3b	<POLYGON Layer="1", FACECOLOR="0x4c00ff80", LINECOLOR...

Fig.5 地物と統計データのテーブルリレーションの例  
Examples of table relation between statistical dates and features

## 2 インターフェースデザインと実装

### a アプリケーションウィンドウの構成

本システムは地域資源の機能という地理情報の複雑な分析を、いかに簡単に素早く行うことができるか、また、分かりやすいアウトプットを実現するかを主眼に置いて開発した。そのため、一般の地理情報システムと比較して、農村計画策定支援システムとして初心者にとってすぐに利用できない機能は搭載せず、アプリケーションのユーザーインターフェースを可能な限りシンプルなものにして、目的に特化した操作性の向上を追求した。

もちろん、利用深度によって、ユーザの追加機能の要望がでることは間違いないが、それは、後々プラグイン等によって対応することとする。また、本システムは、農村地域資源データベースを搭載する GIS である VIMS がそのまま利用されるので、インターフェースデザインについては、VIMS と共通部分についても説明する。VIMS の詳細な説明は操作説明書を参考にしてもらいたい。



Fig.6 アプリケーションウィンドウの構成  
Configuration of the application window

アプリケーションのウィンドウは、メニューバー、ツールバー、マップウィンドウ、座標縮尺表示・投影切替パネル、コマンド・ファンクションパネル、プロパティウィンドウ、レイヤーウィンドウ、総合的機能診断ウィンドウで構成した。

メニューバーとツールバーは、一般的なアプリケーションと同様、ウィンドウ上部に配置した。マップウィンドウは、アプリケーションの主要な部分を占める。レイヤーウィンドウ、プロパティウィンドウ、総合的機能診断ウィンドウは、個々のデータの入力や編集、設定を担う重要な部品であるが、操作の状態によっては必要な場合と必要でなくなる場合があるため、ドッキング機構を利用して、ユーザが自由に配置したり、表示を切り替えることを可能とした。レイヤーウィンドウと総合的

機能診断ウィンドウはタブによって同じ場所が切り替わる。

以下、各種機能のうち、主要なものについて説明する。

### b 各種機能

#### 1) メニューバー

メニューバーは、Fig.7 に示したとおりである。このシステムはクライアント/サーバであるから、ファイルのメニューは無く、サーバで管理するプロジェクトを基本としているため「プロジェクト (P)」となっている。

#### 2) マップウィンドウ

主に地図が表示される 3 次元描画ウィンドウで、描画のみならずマウス入力やキー入力を受け付ける。3 次元描画の処理は、GIS エンジンのコアプログラムとなる空間表現システムである SIV (Spatial Information Visualizer: イマジックデザイン株式会社オリジナル) エンジンが行い、最終的に OpenGL で画像化する。右上に方位磁針を模したインジケータを配置しており、方角を表示するだけでなく、マウスによって視線方向を変えることが可能となっている。また、画面の四隅にはスクロール用のボタンも配置した。

#### 3) 座標縮尺表示・投影切替パネル

マウスの指している位置を緯度経度にしたものと国土 19 座標系の平面直角座標系にしたものを同時に表示、さらに画面で表示している縮尺をバースケールでも表示する。また、2 種類の投影方法を切り替えることができ、「ORTHO (オルソ: 平行投影法)」と「PERS (パースペクティブ: 透視投影法)」を選ぶことができる。本システムは、内部では完全に 3 次元で管理しているが、通常の地図として使用するときは高さを意識しないオルソモードを使用する。一方、俯瞰するように斜めから見る場合は、パースペクティブモードにすると、遠くのは小さく見え近くのは大きく見えるようになる。俯瞰する角度は、「俯瞰」ボタンをクリックすると現れるスライダーコントロールを使って、90° ~ 0° を任意に設定することが可能である。(Fig.8)

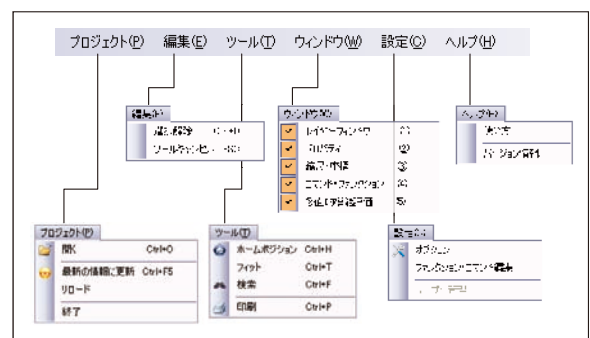


Fig.7 メニューバー  
Menu bar

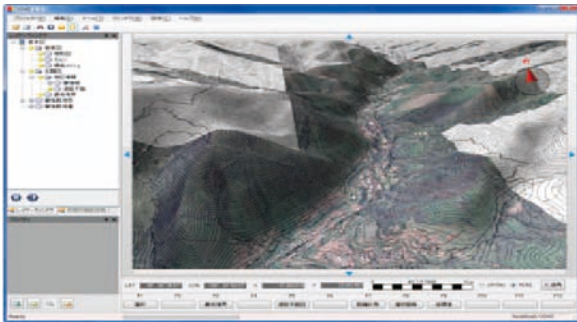


Fig.8 俯角の設定とパースペクティブ表示  
Setting depression angle and perspective view

#### 4) コマンド・ファンクションパネル

マップウィンドウを通してユーザが行うマウス操作をどう処理するかは、その時のコマンドモードに応じて処理される。

一般的に GIS で作図する場合は、レイヤーや塗り色、線種・線幅などを予め規定したルールに則っていなければならない煩雑さと、他人と共同作業して入力する必要があるときはルールを厳守させなければならないこと、入力後にチェックすることが困難なことなどが挙げられる。そこで、本システムでは、そうした作図などのルールもひとまとめに管理することができるようにした。

Fig.9 は、右側のペインでコマンドとレイヤー、塗り色、線種、線幅などを設定してルールを作成、中央のペインに作成したルールが蓄積される。蓄積されるのはサーバに蓄積されるので、一度作成すれば別のプロジェクトでもそのルールを再利用可能となっている。左側のペインはキーボードのファンクションキー F1～F9 に作成したルールを割り当てるもので、ユーザは割り当てられた F1～F9 のキーを押すだけで、ルールが適用されたコマンドが実行される。この設定はプロジェクトとして管理されることになり、同じプロジェクトを共有している作業員全員に同じ設定になるようになっていく。

#### 5) プロパティウインドウ

プロパティウインドウは、地物に関係づけられた属性を表示、編集する。本システムでは、1つの地物に対して複数の属性を持つことが可能であるので、表示、編集する属性の数だけタブが表示され、ユーザはタブを切り替えて属性を閲覧できる。属性を表示しているグリッドは、左に項目名、右に属性値が表示される。属性値は直接文字列を入力、編集が可能である。プロパティウインドウの下に並んでいるボタンは、左から、リフレッシュ、属性追加、データコミット、属性削除を行う。

#### 6) レイヤーウインドウ

使用するマップの状態がツリー状に表示される。ユーザは、各マップの表示・非表示の切り替えやマップのプロパティを呼び出して設定を行うことができる。ツリー

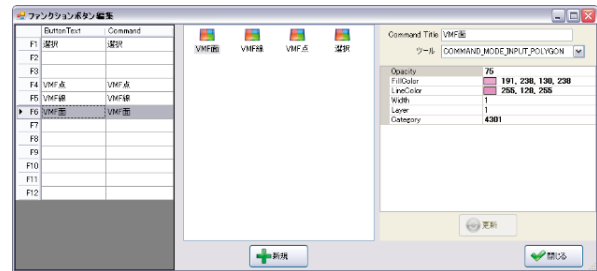


Fig.9 ファンクションボタン編集  
Editing function buttons



Fig.10 プロパティウインドウ  
Properties window

の一番上のルートノードは、プロジェクト名を表している。ルートノードの下に、プロジェクトで使用するマップカテゴリが並ぶことになるが、マップカテゴリを整理するためのフォルダノードを持つこともできる。

Fig.12 はルートノードのプロパティの表示である。ここで、プロジェクト名とプロジェクトにアクセスできるメンバーを設定できる。また、プロジェクトを開いたときの初期視点位置をホームポジションとして登録することができる。

Fig.13 はマップノードのプロパティを表示している。マップはカテゴリ毎に管理される。

マップカテゴリはカテゴリ番号という数値によって規定される。カテゴリ名はツリーに表示される名称で、フォルダ名はキャッシュファイルを保管するフォルダの名称である。表示縮尺は、地図を拡大・縮小したりして縮尺が変わるのに連動して、マップが表示・非表示するための設定である。チェックボックスでは、選択可能にチェックを入れると、マップカテゴリのオブジェクトが選択対象となる。標高メッシュにチェックを入れると、高さ推定のための交差計算の対象となる。メッシュ上のラスタにチェックを入れると、標高メッシュオブジェクトへのテクスチャマッピングを行う。メッシュ上のベクタにチェックを入れると、ベクトルデータの頂点座標 1 つ 1 つについて、標高メッシュオブジェクトへ交差計算を行って高さ推定を行う。インポートボタンをクリックすると、既存のデータを本システムに変換してインポートする機能呼び出す。

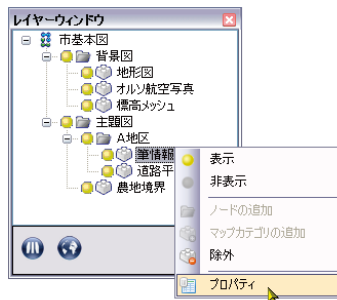


Fig.11 レイヤーウインドウ  
Layer window



Fig.12 プロジェクトプロパティ  
Project properties



Fig.13 マッププロパティ  
Map properties

### c 総合的機能診断ウィンドウについて

総合的機能診断ウィンドウは、多様な地域資源の機能の設定と評価の実行を担う。数段階の階層構造で表現された機能の構成と、その機能に関与する様々な土地、施設等の資源データとの関連付け、機能と機能の重み付け数値の編集、機能評価範囲の設定を行って、構成された機能の評価の実行を行う。

このウィンドウは、本システムの中心となる機能であるため、以下詳細に述べる。

従来の GIS に搭載される分析機能では、当然ながら総合的機能診断に特化していないため、同じアウトプットを得ようとしても多大な設定作業が必要となり、また設定の変更も容易ではない。それに比較して、本システムにおける総合的機能診断ウィンドウは、農村地域の機能と機能に関与する資源データを容易に設定、変更、分析が可能なインターフェースを目指して構築した。

総合的な機能は、任意の数段階の階層構造で表現されるため、これを表示する機能ビューはツリービューが最適である。ツリービューとすることによって、評価に使用する機能の構成全体が俯瞰できるように考慮した。

ツリービューは、多様な機能の総合診断を定義する「総合的機能診断」ノード（ルートノード）と、単一の機能を定義する「機能評価」ノード、評価対象の単一機能に関連付けられる資源データを格納する「資源データ」ノードの3種類のノードから構成され、自由にノードの追加、削除を行うことができる。

また、ツリービューのノードには、頻繁に確認または切り替えたいパラメータである有効/無効、表示/非表示、および表示モード（「資源データ」ノードを除く）を示すアイコンを合わせて表示している。

#### 1) 「総合的機能診断」ノードとプロパティ

「総合的機能診断」ノードは、総合的機能診断の設定におけるルートノードとなり、機能診断全体の設定を定義する。よって、総合機能は一プロジェクトで一つだけ設定できる。ノード上で右クリックして表示されるコン

テキストメニューから「プロパティ」を選択して表示されるダイアログボックスで、評価メッシュのサイズ(ピッチ)及び範囲、評価結果を表示する柱状グラフの高さ及び基準面標高、評価結果表示色段階数とその色、不透明度を設定できる。また、次に述べる「機能評価」ノードと共通のパラメータとして、この総合的機能診断の名称と、下位評価各々の重み付け数値および積み重ね表示モードの場合の色を設定することができる。なお、評価メッシュ範囲については、現在のメインビューで表示されている範囲を評価範囲とするボタンを追加した。

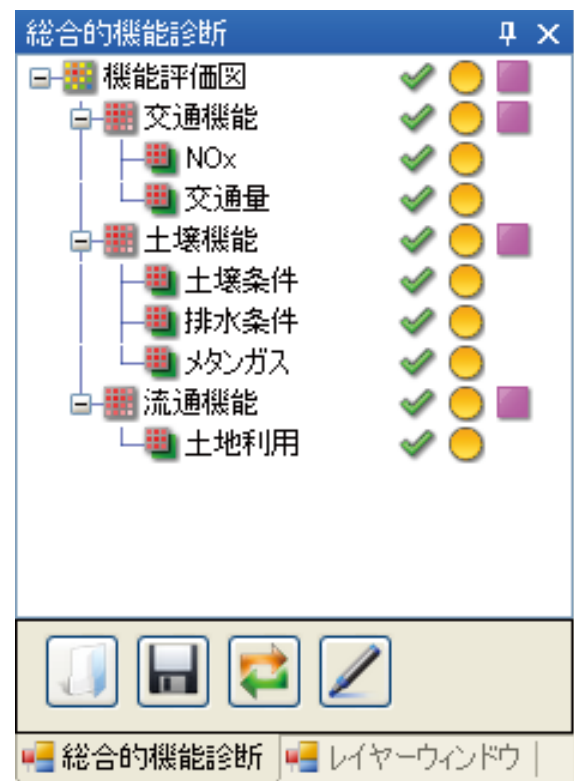


Fig.14 総合的機能診断ウィンドウ (例)  
Comprehensive functional diagnostic window



Fig.15 「総合的機能診断」ノードとプロパティ  
“Comprehensive functional diagnostic” nodes and properties

## 2) 「機能評価」ノードとプロパティ

「機能評価」ノードは、下位の機能評価をまとめ、重み付けした評価を算出するノードである。「総合的機能診断」ノードに直接単一機能評価を設定することもできるが、「機能評価」ノードの子ノードを数段に渡って設定することができる。最終的には「資源データ」ノードを子に持つ単一機能の「機能評価」ノードを設定する。数段の評価ノードを設定することは可能ではあるが、基本的には、Ⅱ章で示したように、2段程度で単一機能が設定できるようにすることが望ましい。ノード上で右クリックして表示されるコンテキストメニューから「プロパティ」を選択して表示されるダイアログボックスで、この機能評価の名称と、下位評価各々の重み付け数値および積み重ね表示モードの場合の色を設定することができる。

## 3) 「資源データ」ノードとプロパティ

「資源データ」ノードは、評価対象の単一機能に関連付けられるデータを格納するノードであり、「総合的機能診断」ノードまたは「機能評価」ノードの子ノードとなり、子ノードを持たない葉ノードである。ノード上で右クリックして表示されるコンテキストメニューから「プロパティ」を選択して表示されるダイアログボックスで、この資源データの名称、評価対象データとの関連付けを定義するクエリ文、機能範囲を定義するパラメータ、評点表の設定を行うことができる。

評点表は、左側にあるグリッドビューに評点と入力値(属性データ値)を直接入力して作成することができる。

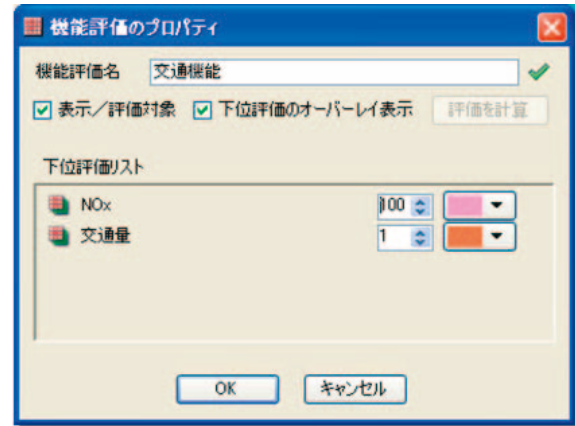


Fig.16 「機能評価」ノードとプロパティ  
“Functional evaluation” nodes and properties

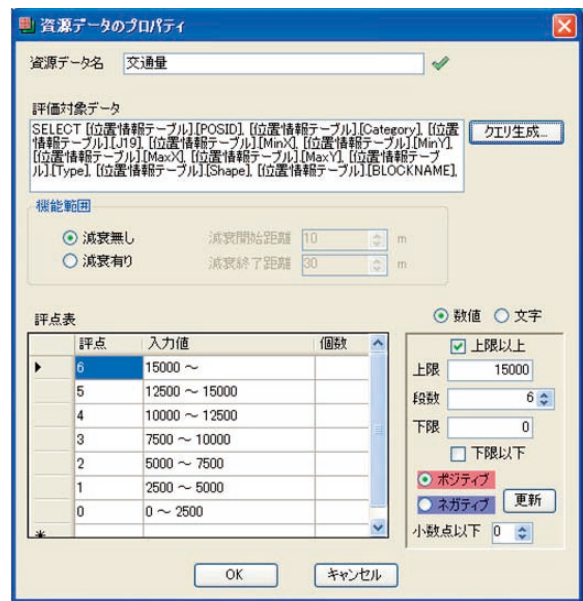


Fig.17 「資源データ」ノードと資源データのプロパティ  
“Resource data” node and resource data properties

数値の場合は、入力値の範囲を「～」を使用して指定する。しかし、右側のパネルにて、入力値が数値の場合は、上限下限と段数、ポジティブ(通常の入力値が大きいほど高評点のもの)かネガティブ(入力値が小さいほど高評点のもの)か等を決定して「更新」ボタンを押す。また入力値が文字の場合は「自動割当」ボタンを押すだけで、自動的に評点表を作成することができるようにして、作業の軽減を図った。自動的に作成された評点表は、手動で部分的に修正することができるようにして、各種のデータに対応することとしている。

「資源データ」の評価対象データとの関連付けを定義するクエリ文は、「クエリ生成」ボタンによって対話形式で生成することができるようにして、複雑になりがちなデータの関連付けを明確に行うことができるようにした。クエリ生成は4つのタブから構成される。まず「属性テーブル」タブで、データベース上にある属性テーブ



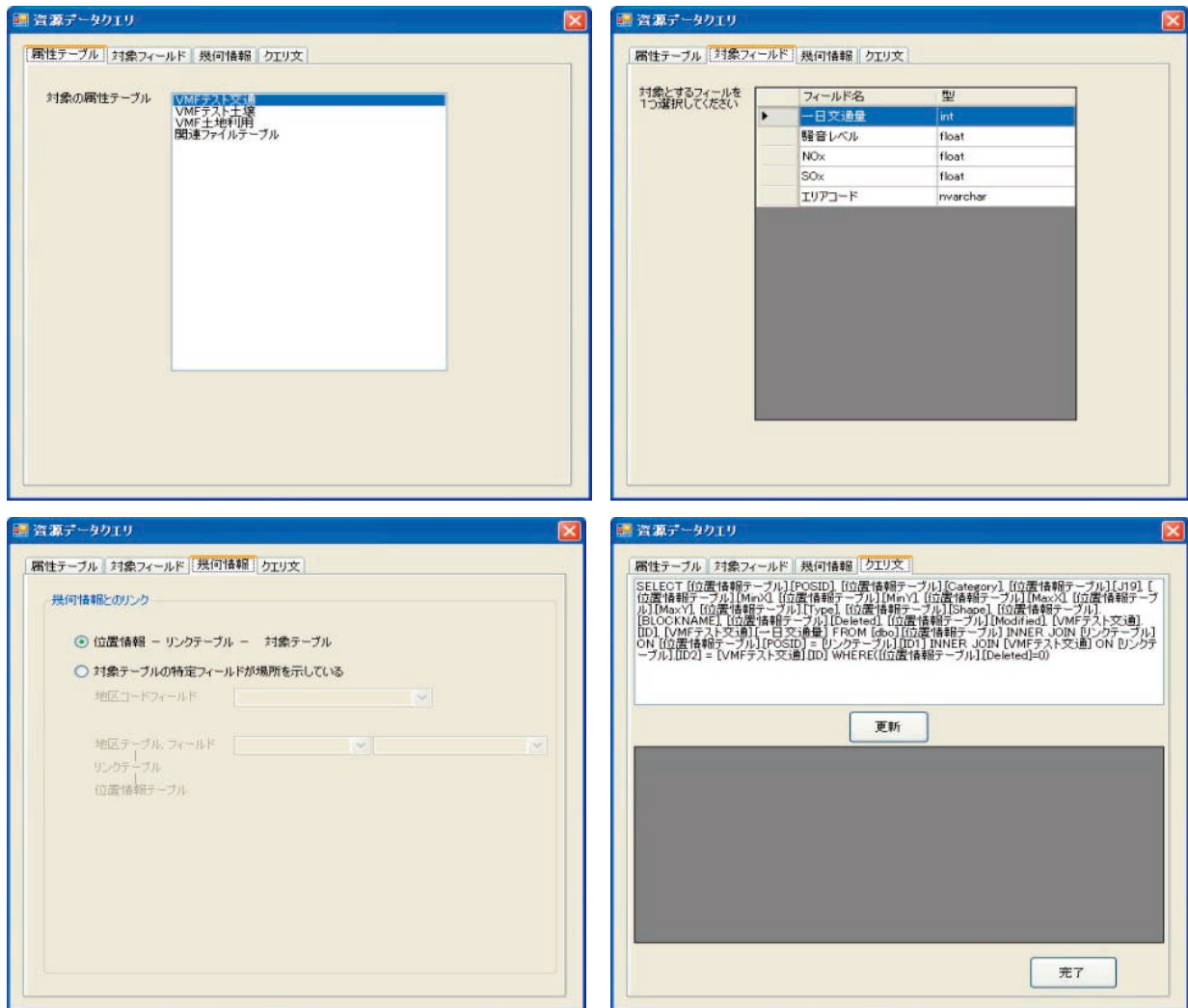


Fig.18 資源データクエリ生成  
Resource data query generation

ルがリストされるので、そのうち1つを対象とするテーブルとして選択する。次に「対象フィールド」タブで、「属性テーブル」タブで選択されているテーブルにあるフィールドが表示されるので、そのうち1つを対象とするフィールドとして選択する。そして「幾何情報」タブで、幾何情報とのリンク方法を選択する。データベース内で本システム特有のリンク方法(位置情報-リンクテーブル-対象テーブル)で直接幾何情報とのリンクがなされている場合と、農林業センサスのデータのように、対象テーブルの特定フィールドが地区コード等の場所を示し、地区コードと幾何情報とのリンクが別になされている場合がある。後者の場合は、さらに地区コードを示すフィールド、地区テーブル等を設定する。最後に「クエリ」タブで、前3つのタブで設定され生成されたクエリ文が表示されるので、これを確認し、「完了」ボタンで決定する。

#### 4) ツリービューの操作

ツリービューのノード上で右クリックして表示されるコンテキストメニューから、各ノードの追加、削除、複

製、名称変更、検索、外部定義ファイルからの読み込み及び保存、プロパティの編集を行うことができる。またノードをドラッグすることで任意のノードの下に移動したり、Ctrl キー併用のドラッグで任意のノードの下に複製することも可能として、容易に機能の構成編集ができる。階層構造と各々のノードのパラメータをファイル保存することによって、履歴管理に利用することも可能である。

ツリービューの右側に3列で表示されているアイコンは、各ノードの有効/無効、表示/非表示、および表示モード(「資源データ」ノードを除く)を示す。頻繁に確認または切り替えたいパラメータをアイコンで示し、プロパティウィンドウを開かずに切り替えを可能とすることにより、計画検討時またはプレゼンテーション時の操作の軽減を図った。無効としたノードは評価計算に考慮されなくなるので、ある機能評価において、その下位評価の一部を無視した評価を算出することができる。非表示にしたノードは、評価結果としては表示されなくなるが、重ね合わせにおいてはその重み付け数値が加味さ

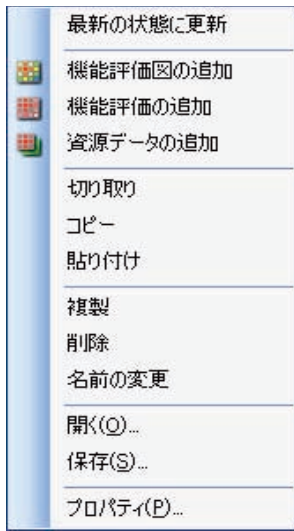


Fig.19 機能ビューのコンテキストメニュー  
Functional view context menu

Table 1 ツリービューの付属アイコン  
Attached icon of tree view

	アイコン	説明
有効/無効		有効
		無効
		有効設定だが上位評価の設定により無効
表示/非表示		表示
		非表示
		表示設定だが上位評価の設定により非表示
表示モード		積み重ね表示モード
		グラデーション表示モード
		積み重ね表示設定だが上位評価の設定によりグラデーション表示

れるので、結果としてはその機能評価が全ての場所で0点である場合と同義となる。表示モードは、重ね合わせ総合評価をグラデーション色で表すか、下位評価を色分けして積み重ねて表すかを切り替えることが出来、全体の評価を見たいか、その構成を見たいかで切り替えることを想定した。

これらツリービューのノードの操作と設定によって、農村の多様な資源が有する機能の設定が行われる。各ノードを設定する毎に、その設定で即座に評価計算が再実行される。計算が終了した時点で、その評価結果は自動的にメインビューに表示される。余分な操作が必要となることはなく、設定を変更しても迅速に評価結果が得られるように考慮した。

#### d 評点データベースの構築・開発

評点データベースは、「資源データ」に設定された評点表の内容を構造化して保存することを目的としている。本システムで扱う機能は重層化されたツリー構造となるため、機能の数だけ評点表があり、通常の表形式のデータベースのテーブルでは対応が難しいことがわかる。また、評点表はユーザが自由に追加、削除などの設定をする必要もある上、数値の統計値を評点という数値に対応させるだけでなく、文字列の統計値をも対応させる必要があることから、非常に柔軟な構造でなければならない。

一方、統計値などのデータは不変であるが、評点に関してはパラメータとしての側面があり、ユーザがその設定を変えることが頻繁にある。そのため、評点データベースをサーバで画一的に管理・共有してしまうと、パラメータを編集したことが他のメンバーに波及してしまうことがかえって面倒となる。これらのことから、構造化した評点データベースをXMLファイルで運用するよう設計

し、機能評価図から機能評価ノード、資源データのツリーの全体と各評点表を評点データベースとしてXML化する。

#### e 評価アルゴリズムの開発と実装

##### 1) 単一機能評価

農村の総合的機能診断の要素となる資源データから単一機能の評価を行うアルゴリズムについて、以下に述べる。

単一機能評価の計算に関わる要素は、以下の3つである。1つめは評価の対象となる資源データであり、これはその属性値と幾何データからなる。属性値は数値または文字列であり、幾何データは座標値を含んだ点、線、面、メッシュのいずれかの形状データである。2つめは資源データの属性値を資源データ自身の評点に換算するための評点表である。3つめの要素は資源データが周囲に影響を及ぼす影響範囲を決定する距離パラメータである。機能評価の影響パターンである機能評価範囲については、可能な限り統一したアルゴリズムに集約する合理性や計画者の設定負荷の低減を考慮し、距離パラメータで決定できるアルゴリズムを採用した。

単一機能の評価のアルゴリズムを決定するために考慮した前提を以下に述べる。ここで扱う資源データは単一のカテゴリに属するデータである。すなわち、ある位置に存在する資源と別の位置に存在する資源の影響が重なることによって発生する相乗効果や相殺効果は、これを考慮しなくてよいと考える。このとき複数の資源データの影響が及ぶ地点では、影響の最も大きいものが採用されることとした。また一方、この評価計算手法が、資源データの幾何形状(点、線、面、メッシュ)に左右されない統一されたアルゴリズムとした。

2) 資源データと資源評点の算出

① 評点

評点表は、単一機能の評価を行う資源データ 1 つ 1 つにそれぞれ設定される。評点の段階数は、計画者が自由に設定できるものとする。ただし、その段階数がいずれであろうとも、プログラムの内部においては 0.0 ~ 1.0 に正規化して扱い、評価計算を単純化した。

資源の属性データ値が、実態を線形の数値で表される場合や対数で表される場合、または文字列で表される場合などが考えられるため、単純に生の属性データ値と資源評点が付比例するわけではなく、属性データ値がどのような意味を持つかは、属性データ値の範囲と評点を関連付けるテーブル、すなわち評点表によって計画者が定義する。ある 1 つの資源データであっても、それが関連付けられる評価機能が違えば、違った評点表を持つこととなる。また、資源データが存在する地点の評価が低く、

遠のくに従って評価が高くなるもの（以下、「ネガティブ要素」とする）の場合は、元の生の属性データの大小と評点の大小が逆転するが、そういった資源データの設定にも対応可能とした。

下に機能評点表の例を示す。

② メッシュ評価

・ 評価計算の考え方

評価を行いたい範囲内の任意の地点における単一機能の評価は、以下の流れで計算される。まず算出された個々の資源データの評点 (gres) がある。この評点は 0.0 ~ 1.0 である。評価を行いたい地点からその資源データまでの距離 (d) を計算し、その距離によって評点を減衰させたもの ( $g1 = gres \times f(d)$ ) が求まる。これを資源データの数だけ繰り返すが、そのうち最大の数値をその地点の評点とする ( $g = \max(g1, g2, g3, \dots, gn)$ )。評点は 0.0

Table.2 機能評点表の例 (それぞれ 5 段階とした場合)  
Examples of functional score table (Five-grade evaluation)

線形数値データの場合			ネガティブ要素の数値データの場合		
表示上の評点	生データ	計算時の評点	表示上の評点	生データ	計算時の評点
4	400.0 ~	1.00	0	200.0 ~	0.00
3	300.0 ~ 400.0	0.75	1	150.0 ~ 200.0	0.25
2	200.0 ~ 300.0	0.50	2	100.0 ~ 150.0	0.50
1	100.0 ~ 200.0	0.25	3	50.0 ~ 100.0	0.75
0	~ 100.0	0.00	4	~ 50.0	1.00

対数値データの場合			文字列データの場合		
表示上の評点	生データ	計算時の評点	表示上の評点	生データ	計算時の評点
4	100.0 ~	1.00	4	田	1.00
3	10.0 ~ 100.0	0.75	3	畑	0.75
2	1.0 ~ 10.0	0.50	2	果樹園	0.50
1	0.1 ~ 1.0	0.25	1	牧草地	0.25
0	~ 0.1	0.00	0	その他	0.00

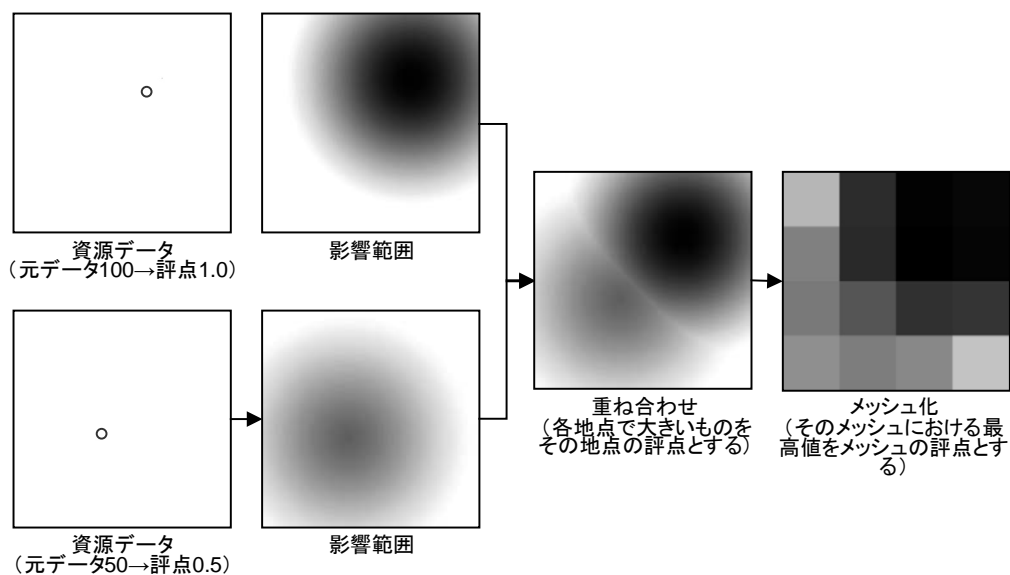


Fig.20 評価計算の考え方 (資源データが点の場合。他の形状でも同様)  
Concept of evaluation calculation

～1.0となる。ただし「ネガティブ要素」の場合は、評点は距離によって減衰ではなく1.0に向かって増幅する ( $g1 = 1.0 - (1.0 - gres) \times f(d)$ )。またその地点の評点は、資源データの数だけ繰り返されたもののうち最小の数値となる ( $g = \min(g1, g2, g3, \dots, gn)$ )。この場合も評点は0.0～1.0となる。

これによって単一機能の評価は決定するが、総合的機能診断の計算での利用や、計画者がこの評価結果を実際に扱う場面を考慮すると、メッシュ化する必要性が高いと判断した。メッシュ化については、そのメッシュに含まれる各地点の評点の最高値(「ネガティブ要素」の場合は最低値)をそのメッシュの評点とする。メッシュ評

点は0.0～1.0となる。最高値の採用は、資源データの幾何形状による差異を抑えられること、メッシュ評点の意味がメッシュの代表点の評価ではなくメッシュ範囲全体の評価と考えられること、メッシュピッチによる評価のずれをなくすることができることによるものである。

・機能評価範囲(距離による影響の減衰)

本項と次項では、「ネガティブ要素」でない通常の資源データについて述べる。「ネガティブ要素」の場合は、減衰を増幅に、評点の大小の比較を逆として考える。

機能評価範囲は距離による評点の減衰で表される。個々の資源データの評点は、そこから離れるに従って減衰させる。機能評価範囲は2つの距離で設定するものとした。距離1はその資源評点をそのまま保つ距離とし、距離2は距離1から評点が0.0まで減衰する距離とした。評点は距離1から距離2の間で直線的に変化する。距離による減衰とメッシュ評点の関係を次図に示す。

メッシュの評価はそのメッシュに含まれる各地点の評点の最高値を評点とするので、メッシュの評価に使用する距離は、そのメッシュと資源データの幾何的な最小距離となる。本プログラムでは、資源データが影響を及ぼすメッシュを抽出し、資源データとそのメッシュとの最小距離を計算してメッシュに評点を与え、その評点を与えられたメッシュを、資源データのメッシュ化データとして配列に追加する。計算は資源データの幾何形状で分けられる。フローを次の3つの図に示す。

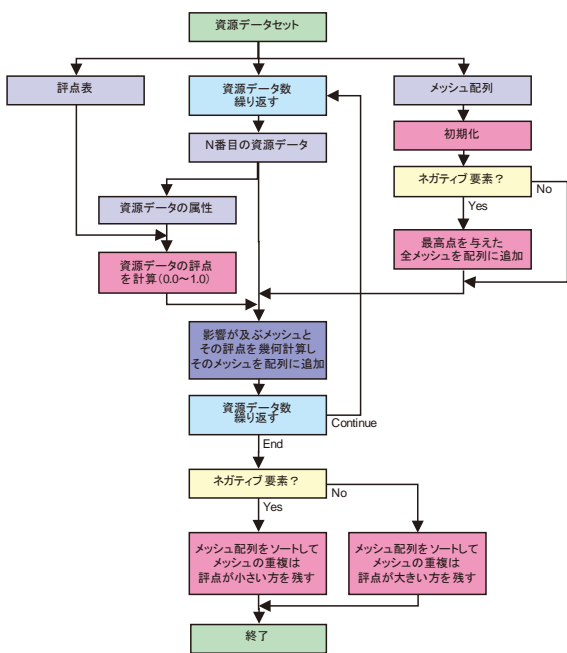


Fig.21 評価計算フロー  
Flow chart of evaluation calculation

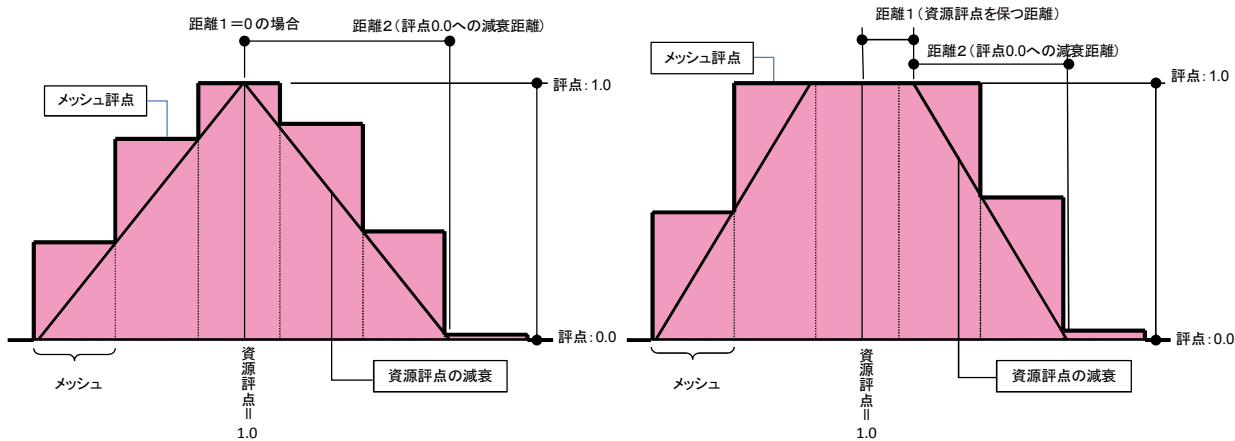


Fig.22 資源評点の距離による減衰とメッシュ評点(断面グラフ)  
Distance attenuation of resource grade scores and mesh grade scores (Cross section graph)

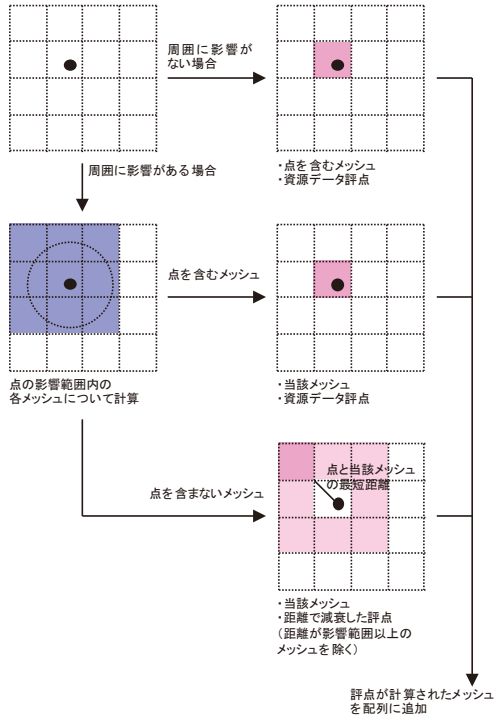


Fig.23 資源データの評価メッシュ化 (点データの場合)  
Converting from resource data to evaluation mesh (Point data)

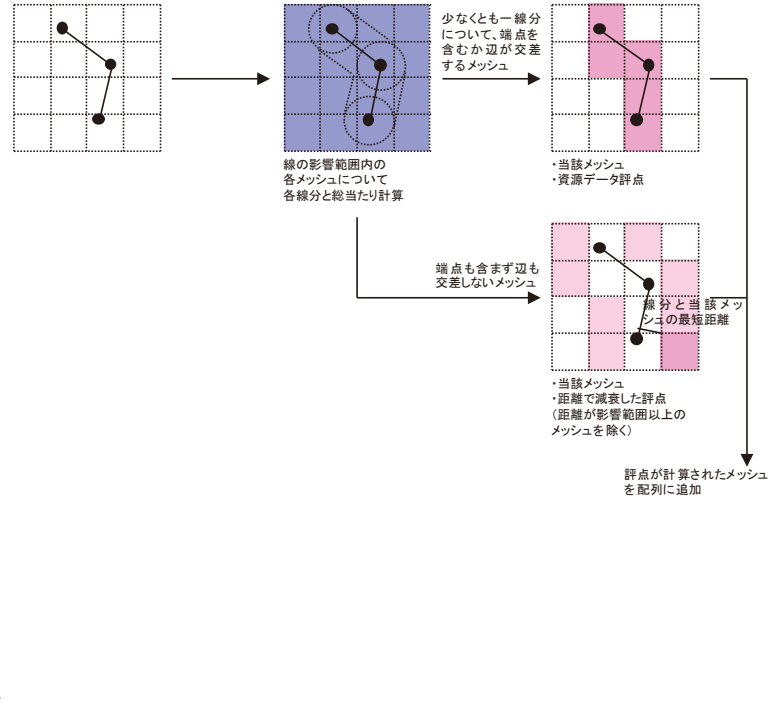


Fig.24 資源データの評価メッシュ化 (線データの場合)  
Converting from resource data to evaluation mesh (Line data)

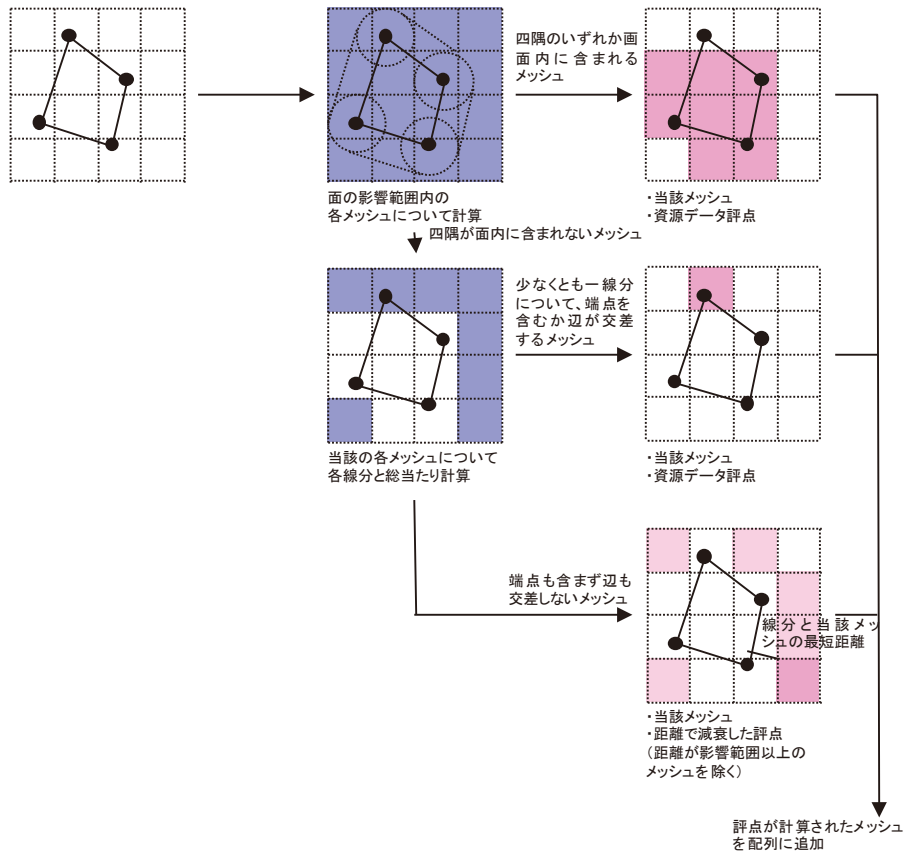


Fig.25 資源データの評価メッシュ化 (面データの場合)  
Converting from resource data to evaluation mesh (Polygon data)

資源データがメッシュデータの場合は、1つのメッシュを面として考えればよい。

メッシュ評点の距離による算出を数式にすると、以下のようになる。

$$g_1 = g_{res} \times f(d)$$

$g_1$  : 1つの資源データのメッシュ評点,

$g_{res}$  : 資源データ評点

$$f(d) = 1.0 - (d - d_{start}) \div d_{end}$$

$d_{start}$  : 距離1,  $d_{end}$  : 距離2,

$d$  : 資源データとメッシュとの距離

ただし、「ネガティブ要素」の場合は,

$$g_1 = 1.0 - (1.0 - g_{res}) \times f(d)$$

$g_1$  : 1つの資源データのメッシュ評点,

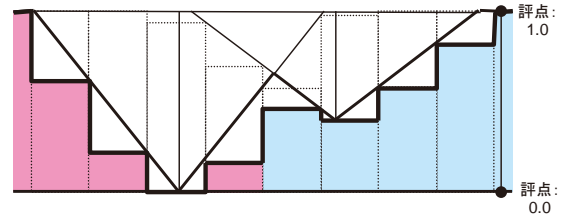
$g_{res}$  : 資源データ評点

・複数の資源データの影響

メッシュに対する評価を資源データ数分繰り返すが、1つのメッシュに複数の資源データが影響を及ぼす場合は、その距離によって減衰した評点のうちの最大値をそのメッシュの評点として採用する。この場合、資源データのメッシュ化データ配列に同一メッシュの要素が重複しているので、最大値以外の評点を持つ配列の要素を削除することによって、最終評点を持ったメッシュ配列が得られる。**Fig.26**に示す。

・複数機能評価の重み付け総合評価

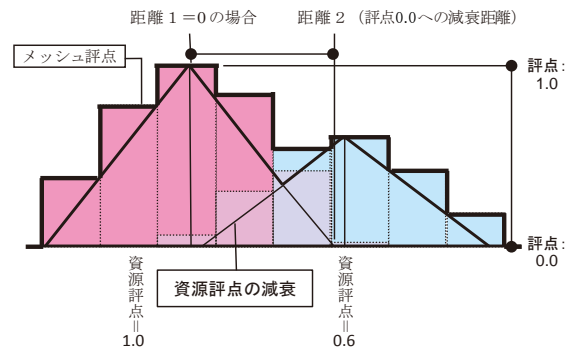
これまで算出した複数の機能評価を総合して、上位機能の評価を計算する。各機能評価の同一メッシュの評点について、設定した重み付け数値を乗算して積算した合計を重み付け数値の合計で除算することで、そのメッシュの総合評点とする。結果はここでも0.0~1.0となる。重み付け総合評価の例を**Fig.29**に示す。



$$g = \max(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n)$$

$g$  : メッシュ評点,  $g_n$  : 1つの資源データのメッシュ評点

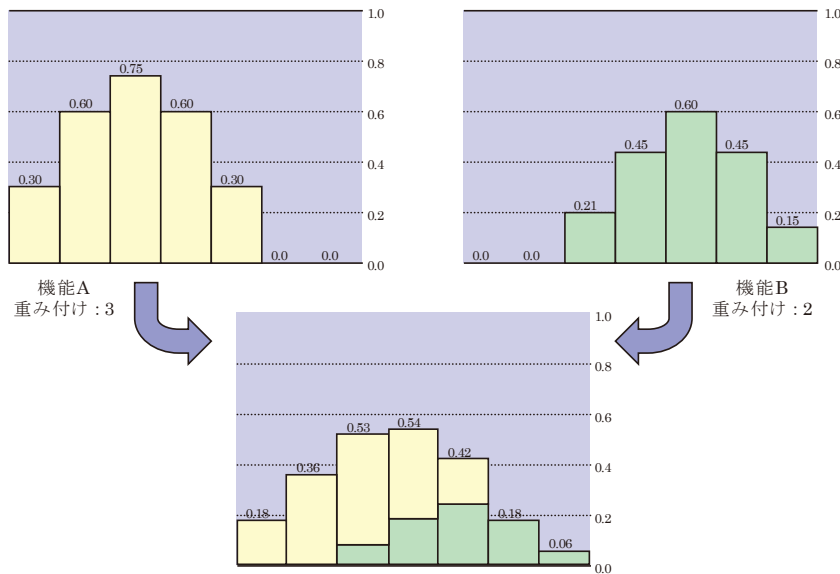
**Fig.26** 複数の資源データとメッシュ評価 (断面グラフ)  
Multiple resource data and mesh grade score (Cross section graph)



$$g = \min(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n)$$

$g$  : メッシュ評点,  $g_n$  : 1つの資源データのメッシュ評点

**Fig.27** ネガティブな要素のメッシュ評点 (断面グラフ)  
Mesh grade score of negative elements (Cross section graph)



$$g_{TOTAL} = (g_1 \times w_1 + g_2 \times w_2 + \dots + g_n \times w_n) \div (w_1 + w_2 + \dots + w_n)$$

$g_{TOTAL}$  : メッシュ総合評点,  $g_n$  : 下位機能メッシュ評点,  $w_n$  : 下位機能重み付け数値

**Fig.28** 複数機能評価の重み付け (断面グラフ)  
Weighting of multi-function evaluation (Cross section graph)

・ 単一機能の評価から複数機能の重み付け総合評価までの例

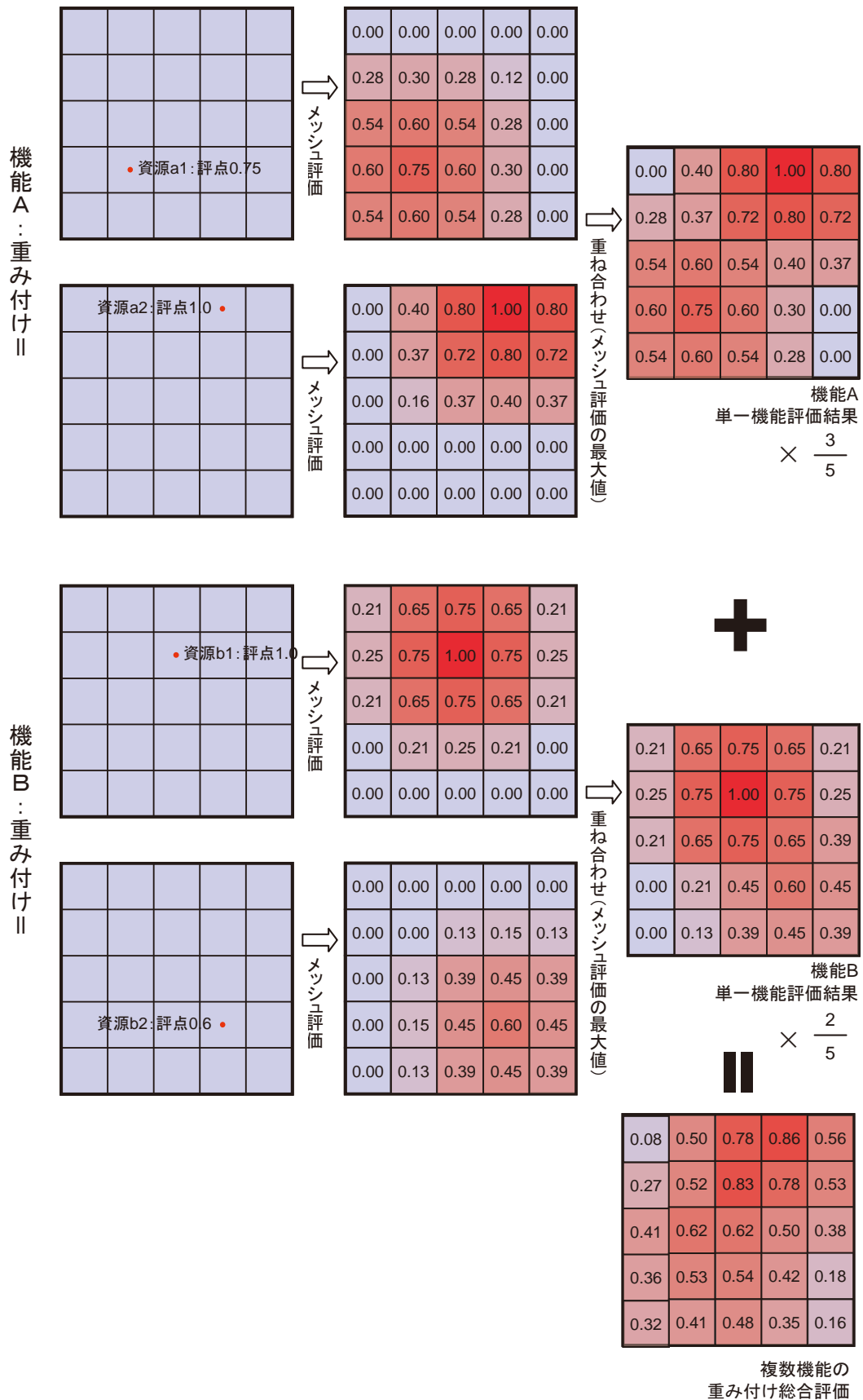


Fig.29 メッシュ評価, 重み付け総合評価例  
Examples of mesh evaluation and weighted comprehensive evaluation

### ・評価結果の描画アルゴリズム

メッシュ評価の結果を柱状の立体として描画するため、評点から6面で構成される直方体の頂点座標を計算し、その計算結果を描画エンジン側にデータを渡す。

描画エンジン側では、この柱状表現のために、単色で柱を立てる、2色のグラデーションで柱を立てる、柱を立ててテクスチャを貼るための3つの機能を搭載した。

描画アルゴリズムに当たっては、膨大なポリゴンを高速に処理するための工夫としてOpenGLのDrawArray系の処理を利用して一気に描画するようにしている。

(Fig.30)

### f システムの統合

前項までで説明した、GISデータベース、評点データベース、評価アルゴリズム、評価結果の描画、インターフェースの各項目を統合して、農村計画支援システムとして、本システムは成り立つ。Fig.31にデータと処理の流れを示す。

ここでは、以下、テスト用に作成したデータをもとに、評価基準を設定して、評価結果を得るまでの流れを例示する。

#### 1) 資源データの作成

資源データとしては、農林業センサス等の統計データや市町村界・集落界等の既存の図形データをインポートして使用することができる。また、本システム上で点・線・面の図形を作図して、それに属性データを与えることで、独自のデータとして使用することも可能である。

図形データは、作図モードにして、マップウィンドウ上をクリックしていくことで作図する。その資源データ値である属性は、図形データを選択すると、プロパティウィンドウに図形データのプロパティが表示されるので、プロパティのリストに値を入力して、データベースに保存する。この例では、道路データとしての線データ(POLYLINE要素)を作図し、属性データとして一日交通量、騒音レベル、NOx、SOxの値を与え、さらに別に、

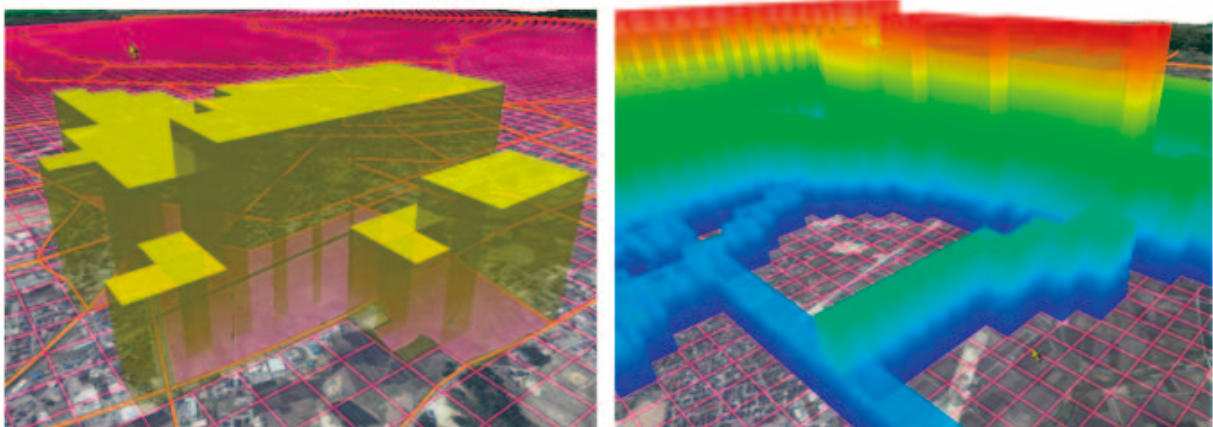


Fig.30 評価結果の描画アルゴリズム  
Drawing algorithm of evaluation results

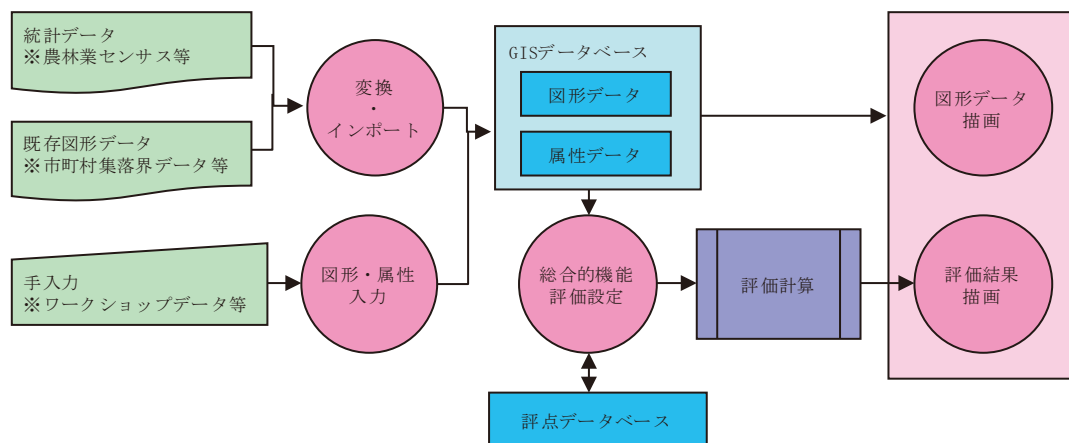


Fig.31 データと処理の流れ  
Dates and flow of processing



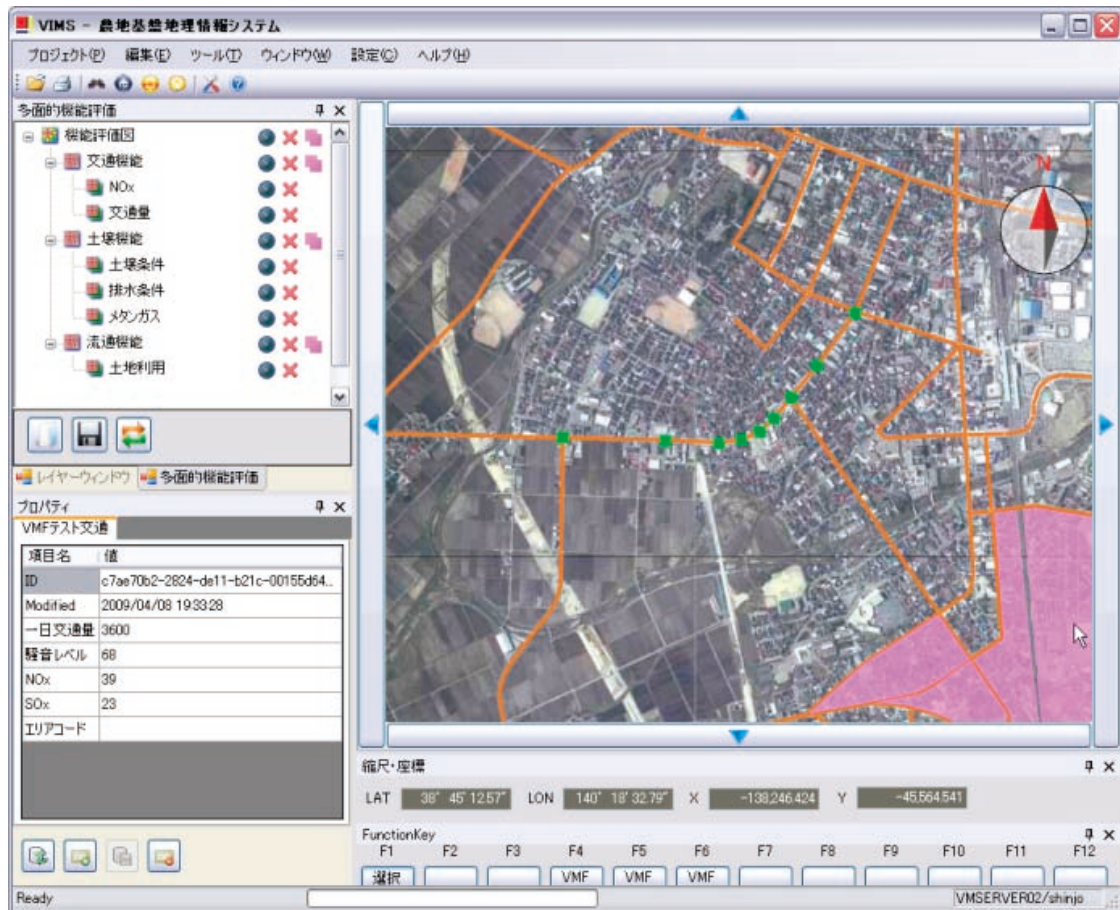


Fig.32 図形データの作図とプロパティ  
Drawing of shape data and properties

土地のデータとしての面データ（POLYGON 要素）を作図し、市街化レベル、人口密度、夜間人口の値を与え、また別の面データに、試験データとして、土壌条件、地形条件、標高区分、排水整備、メタン濃度の値を与えた。(Fig.32)

## 2) 機能評価の構成

総合的機能診断を行うためには、総合的機能診断ウィンドウ上で、「総合的機能診断」ノードの下に重層的に「機能評価」ノードを追加していく。追加された機能評価は、選択されていた要素の下位の階層に属し、評点評価の際、上位要素の部分要素となる。これによって機能を定義していく。Fig.33 の例では、交通機能、土壌機能、流通機能の3つの機能を作成した。さらに、ツリー構造の最下層に、資源データノードを追加する。追加された資源データは、選択されていた要素の下位の階層に属し、評点評価の際、上位要素の部分要素となる。資源データは、後で GIS データベースと関連付けられる。ここでは、交通機能の関与条件として NOx と交通量を、土壌機能の関与条件として土壌条件、排水条件、メタンガスを、流通機能の関与条件として土地利用を設定した。



Fig.33 機能評価構成  
Configuration of function evolution

3) 機能と関与する資源データの設定

総合的機能診断の各階層で、それぞれ評価への関与条件を設定する。設定内容は、機能評価図、機能評価、資源データのそれぞれで異なる。総合的機能診断では、評価メッシュの設定や評価結果の柱状グラフの表示方法の設定を行う。今回のテストでは、100m ピッチでおよそ20km 四方範囲の評価として設定した。総合的機能診断と機能評価は、下位に属する機能要素の評価重み付けを数値で設定する。階層構造の中で最下層の項目となる資源データは、評価対象となる要素の指定、ならびにその要素の評点計算条件を設定する。例として、土壌機能を評価する関与条件とした「土壌条件」は資源データに当たり、このノードについては、GIS データベース上の属性データ「土壌条件」を参照し、その値によって6段階の評価をし、さらに周囲への影響(機能範囲)を設定した。

もちろん、土壌条件を資源ノードとせず、さらに、単一機能に分解し、その下に「資源データ」を設定することもできる。(Fig.34)

4) 機能評価の結果表示

この設定を行うことによって、リアルタイムに評価が計算され、マップウィンドウに柱状グラフとして評価結果が表示される。評価が高いほど柱状図の高さが高くなる。表示高さは総合的機能診断の設定による。ツリービューに表示されているアイコンによって、一部の機能を有効/無効にする場合、表示/非表示にする場合、柱状図の配色を変更する場合はもちろん、機能評価のプロパティ内の重み付けの数値を変更する場合も、設定を変更すると自動的にかつリアルタイムに評価結果に反映される。



Fig.34 資源データの設定  
Setting resource dates

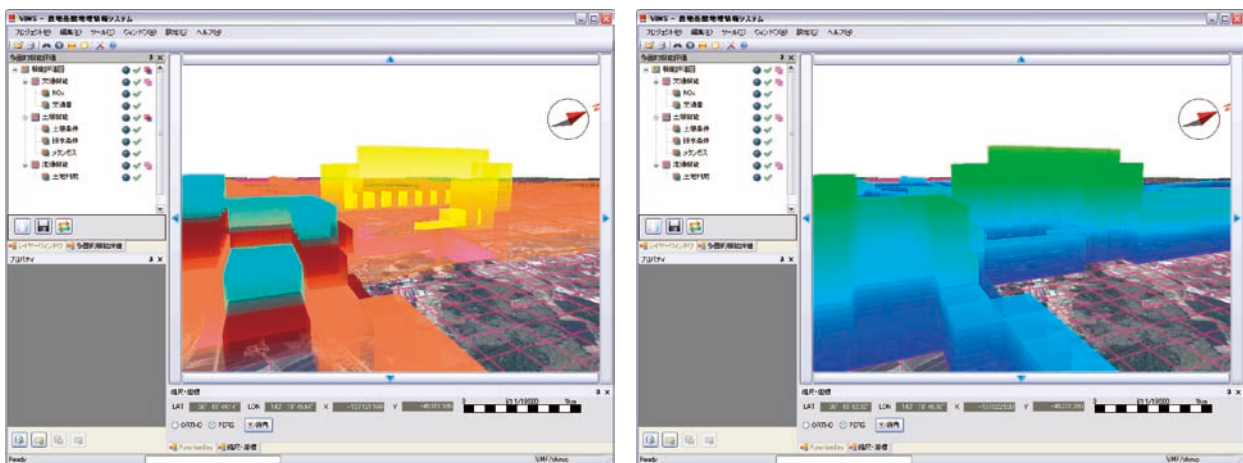


Fig.35 柱状グラフの表示例  
Example of histogram

Fig.35 は柱状グラフの配色変更例である。左図は総合的機能診断と土壌機能について下位の機能評価ごとの色分けで表示した。右図は全ての総合評価の評点によって色分けした表示である。以上、画面全体の流れを、Fig.36 から Fig.39 に示す。

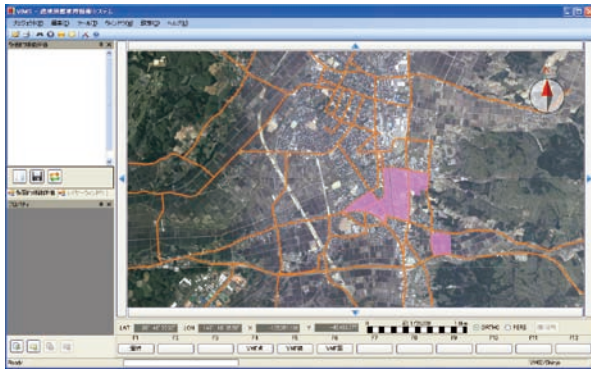


Fig.36 評価対象データ  
Evaluated data

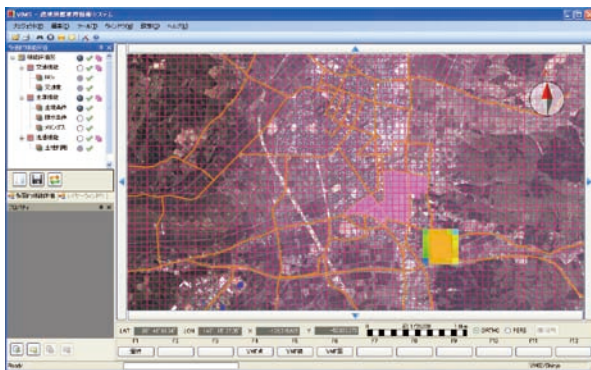


Fig.37 単一機能評価結果  
Result of single function evaluation

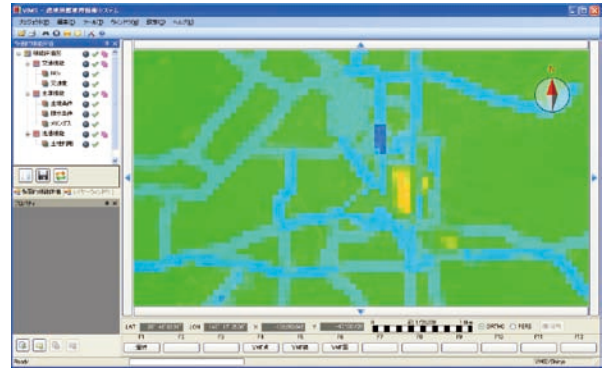


Fig.38 機能評価の重ね合わせによる総合的機能診断結果  
Results of comprehensive functional diagnostic by overlay of function evaluation

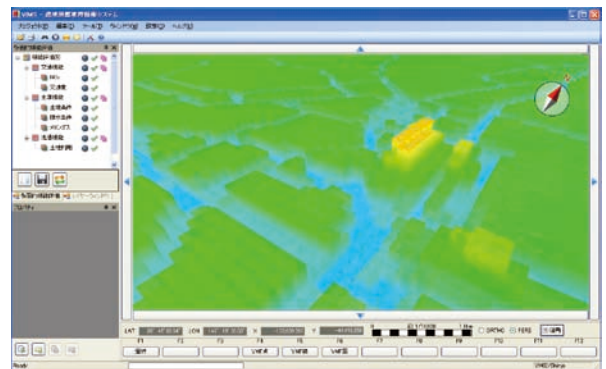


Fig.39 同 3 次元表示  
Three-dimensional display

## V 利用事例

### 1 地区概要と計画策定の目的

山梨県甲府市帯那地区は、甲府市の北部に位置し、甲府中心部より車で 15 分程度の中山間地域である。戸数は約 300 戸、人口約 670 名、農家数約 90 戸である。農業は、稲作が中心ではあるが、高品質野菜づくりも盛んに行われている。多くの歴史、文化、生物資源を有して

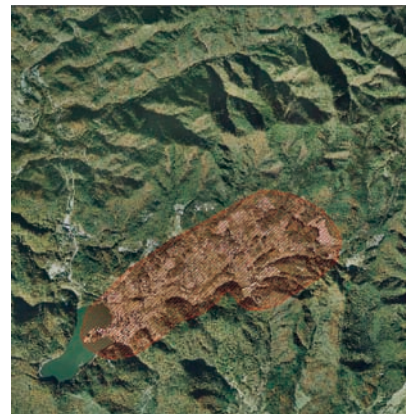
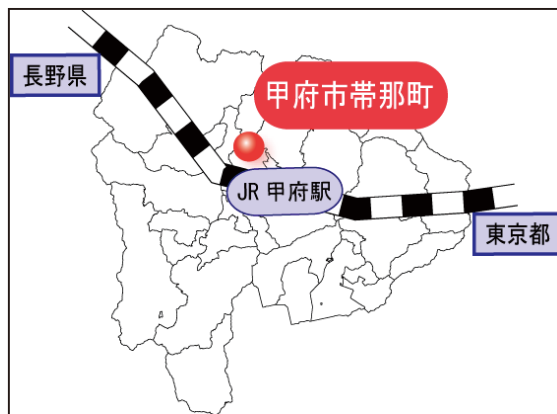


Fig.40 コミュニケーション GIS 利用地区の位置  
Location of the area where applied communication GIS

おり、都市近郊としての地の利を活かせば多様な都市農村交流へ繋げられる地域である。また以前より菜の花鑑賞会、じゃがいも収穫祭などのイベントを実施しており、啓発活動を続けながら地域活性化を進めている。(Fig.40)

そこで、本地区では、22年度より3年間の予定で、住民参加により、コミュニケーションGISを活用した集落活性化ビジョンの策定を始めている。現在、農産物直売所、景観・文化を核にした体験農業などの都市農村交流を展開していくことを検討中であるが、集落空間の具体的な利用方法については未定であり、十分な話し合いの中で、より地域らしさが生きた計画を進めたいという要望があることから、山梨県と山梨県土地改良事業団体連合会が協働作業に加わり、ビジョン策定の支援を行うこととした。

なお、本報告では、コミュニケーションGISの開発内容を示すことが目的であるため、コミュニケーションGISがワークショップでどのように利用されたのかについては、簡単に紹介することとし、ワークショップそのものの意義、構成とその効果については、別に報告することとする。

## 2 コミュニケーションGISの利用

### a 地域資源と住民認知データの収集

計画づくりの手順は、資源調査として、住民への聞き取りと郷土史・自治体が有する総合計画、田園環境マスタープランなどの基本資料から得られたデータを整理する。また農地、道路、水路、河川、施設、公園、社会教育、学校教育、景観・文化施設等の様々な資源をGIS上に物理量として整理する。ワークショップにおいては、単に資源の存在の有無だけでなく、各個人に対して地域環境に関する調査を行い、生活環境、農業環境、危険な場所、残しておきたい場所、誇りたい場所などの、住民自身の想いについてもデータを収集し、これらを整理する。

### b 地図アンケートワークショップ

地域資源データの収集は、集落環境点検等のワークショップ手法を応用して、現地を歩きながら収集する方法が一般的である。しかし、時間的な制約がある場合や、すでに、住民の意識下に、様々な資源情報が十分インプットされている場合は、想起マップ法を応用して、机上で地図図面の色塗りを行い、データを整理する場合がある。本地区では、すでに、これまでも地域活性化に係る話し合いを進めており、地域環境に関するデータは十分あると考えられたので、机上での地図アンケートを採用した。ワークショップ会場において、地域づくりに関する全47の質問を「農業環境」「生活環境」「文化・歴史」「自然・生き物」等の地域課題毎の地図7枚(Fig.41は、その内「農業環境」に関する地図アンケート例)に振り分け、地域づくりの中心メンバーであり、ワークショップ当日集まった17人に配布し、それぞれの住民が地域に対してどんなところにどんなイメージを持っているのかを個々で記入してもらい、他の人との地域環境の認識の違いを感じてもらおう。

### c 地域資源分析WS

#### 1) 地域資源データの抽出

地域資源データを入力したものがFig.42である。左は客観情報である農地、道路、水路、施設等の分布、右は地図アンケートワークショップによって得られた「美しいと思う場所」や「季節感を強く感じる場所」、「生き物が生息する場所」などの主観情報を表現した分布である。これらの表示により、実質的な資源の位置と存在量や種類とその位置関係が明確になる。本ワークショップにおいても、まずは、現況の状態とアンケート内容の確認を行った。3次元で表示されることで、地域資源の位置関係が明らかとなり、情報の共有理解は進んだ。

#### 2) 地域資源評価

ワークショップでは、最終的には、活性化の様々な施策を実現するための地域資源の有効利用の可能性を地図

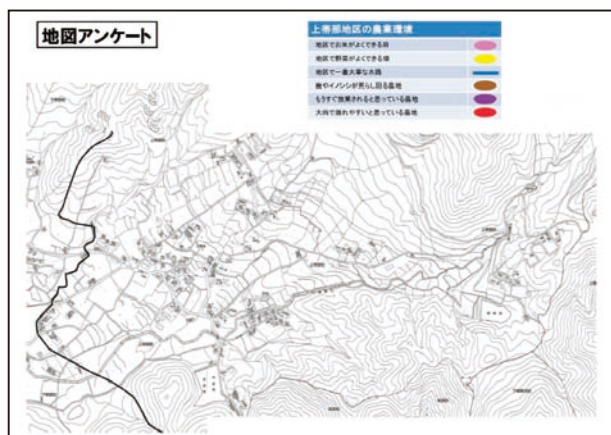


Fig.41 地図アンケートとワークショップの様子  
Aspects of map questionnaire and workshop

から探り、ゾーニングや施設整備等の計画地点を特定していくことと、施策の円滑な運営のための組織の役割分担と協力体制が確立されることが求められる。但し、それらは最終的な段階での成果であり、初年度は、まずは、土地基盤の現状の上に、自分たちの主観的な意識がどのように入り込んでいるかを評価し、確認することである。

よって、はじめから、細かく活性化の施策を設定せず、農業のさらなる進展において課題となる場所はどこか、道路の利用状況として重要地点はどこか、景観や文化などを PR するのに効果的な場所はどこか等を、データの単純な重ね合わせ評価によって見いだすこととした。

**Fig.43** は、うまいお米や野菜がよく採れる場所の客観情報を評価したものである。棒グラフが高くなっているところが、評価の高いところである。基盤情報として耕作放棄地のデータを示しているが、すでに、生産条件として評価の高い地区の近くまで耕作放棄が進んでいることが読み取れる。**Fig.44** は、交通量が多くて、美しい景観を有するところの重ね合わせである。意味は住民が考えていくところであるが、景観の見せ場として使えるのではないだろうかという予測をしていた。**Fig.45** は文化や歴史に関する資源が集中しているところである。神社や寺、道祖神などが評価される。影響範囲の設定によっ

て棒グラフの形は変わるということについて、住民に確認してもらえた。また、この結果で棒グラフの高いところと、**Fig.44** の景観ポイントの評価の高いところがずれていることから、今後、景観と文化の両面を活かすためには、これらの資源をつなげるどのようなソフト施策が必要なのかを考える契機となった。

### 3 将来へ向けて

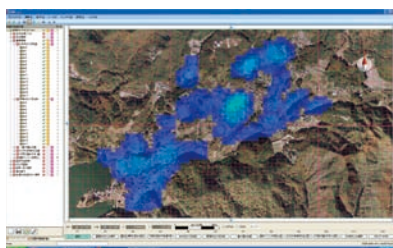
土地資源評価は、住民の方々から幅広く、多様な考え方の評価情報を収集する事で、ワークショップによる住民検討の内容が深まり、考案される土地資源評価の信頼度も高まる。そのため地域の子供から大人まで一体となり、その土地特有の土地資源を見つめ直し、共通認識を持つことが重要である。

まだ、1回目なので、結論につながる成果は出ていないが、本システムを利用することで、地域の土地情報を総合的に評価できる土台はできあがったと考えている。

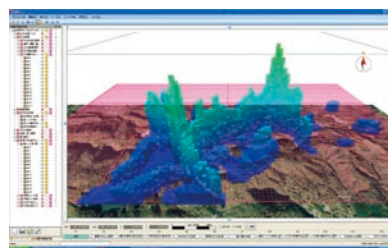
地域づくりは、地域住民が積極的な参加意識を持つか否かにより実効性が左右される。そのためワークショップを通じ、地域づくりに対する話し合いの場を設け、地域づくりの核となる組織を作り、持続的に活動していく地域となることが望まれる。今後、本システムを利用し、



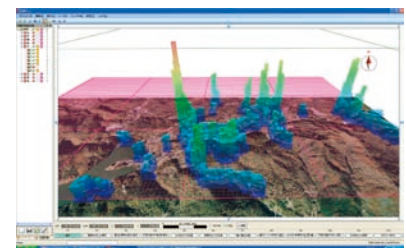
**Fig.42** 地域資源データ  
Regional resource data



**Fig.43** 生産条件の良好な場所  
Area with good production conditions



**Fig.44** 交通量が多くかつ景観条件の良好な場所  
Area with heavy traffic conditions and good scenery



**Fig.45** 文化・歴史的な重要地点  
Important cultural and historical sites

地域資源と地域住民の意向をオーバーレイさせ、共有的な空間を有効活用できるよう携わっていく。

## VI 結 言

本報告では、I章において、地域住民参加によって農村振興計画や土地利用計画、環境計画等の計画策定等を実施する場合の農村空間が有する機能の総合的な評価の必要性和その考え方について整理した。それを受け、II章においては、この考え方を具現化するためには、これまでの分析型のGISではなくコミュニケーション型のGISの開発が必要であることについて言及した。

コミュニケーションGISとして有効なシステムとするためには、①多様な地域資源データの入力容易にできること、②資源が有する多様な機能の総合的な診断が簡易にできること、③地域住民が理解しやすい出力形式になっていることの3つの視点を導入し、住民参加の地域計画づくりワークショップ等において得られた住民情報と基盤となる農村地域資源情報・センサス情報とのGISでの統合化を行うことにより、計画策定者が様々な目的に合わせた農村地域振興計画を、地域住民へわかりやすく説明できるとともに、住民との協働作業が容易に行えるようにすることが重要である。

そこで、III章、IV章においては、コミュニケーションGISの開発における搭載機能の考え方と特徴を操作機能別に整理し、多様な地域資源データの入力方法として、地物と多属性データをマルチリンクテーブルによって繋ぐデータベースの新方式を開発するとともに、資源が有する多様な機能の総合的な診断を簡易に行えるように、機能評価モジュールと機能設定モジュールの簡易な操作性について紹介した。さらにフルタイム3次元表示、メッシュ評価等の機能を付加し、地域住民が理解しやすい出力形式も実現した。住民にわかりやすい出力形式となっているか否かについては、今後のいくつかの実施例の結果を待たなければならないが、その一端として、V章においては、本システムを具体的に山梨県甲府市帯那地区において、山梨県土地改良事業団体連合会の協力を得て活用した事例について紹介し、本システムの有効性と可能性について述べた。

本システムは、これから発展する未開拓のシステムではあるが、多様な機能の総合化、住民意識の定量化と理解の促進などの様々な課題に対応するための有効な技術であることに違いないと筆者らは認識している。今後、様々な利用事例については、折に触れて紹介していく予定である。

なお、本報告におけるシステム利用事例においては、平成21年度より、山梨県土地改良事業団体連合会の戸澤氏、新奥氏、竹川氏、橋田氏らの多くの皆さん、並び

にこのワークショップの主催者である帯那地区推進協議会の各委員会のメンバーと会長の末木氏に運営とデータ収集においてご協力いただくとともに、より良いシステムの機能充実のための御指導をいただきました。ここにお礼を述べさせていただきます。

## 参考文献

- 1) 相川哲夫(1987):実践・農村計画のシステム・テクノロジー, 農林統計協会
- 2) 黄漢喆・富田正彦・中山幹康(1993):4地目筆地分級概念と性格~集落土地利用計画の合理的策定のための4地目型筆地分級手法の開発(1)~, 農村計画学会, 12(1), 18-32
- 3) 樋口昭則(1997):農業における多目標計画法, 農林水産省農業研究センター総合農業研究叢書, 30号
- 4) 石田憲治(1995):農業農村におけるGISの現状と利用の可能性, 農土誌, 63(8), 829-834
- 5) 石田憲治・西口猛・北村貞太郎(1983):数量化理論第3類を応用した用地分級~土地利用計画調整のための土地分級に関する研究(1)~, 農業土木学会論文集, 106, 19-25
- 6) 久保田富次郎・石田憲治・島武男(2000):GISを用いた地域用水利用の地理的分析, 農土誌, 68(12), 1267-1272
- 7) 森本健弘・村山祐司・山下亜紀郎・藤田和史・渡邊敬逸(2005):耕作放棄と自然・社会環境の相互関係~GISと農業集落カードを結びつけて~, 地理情報システム学会講演論文集, 14, 319-324
- 8) 農研機構農村工学研究所(2009):平成20年度 農地・水資源部研究会「農業情報を利用した地域資源の管理を考える」, 農地・水資源部
- 9) 島武男・小川茂男・吉迫宏・中達雄(2006):水理システムの利水機能と多面的機能の連携的評価法, 農村計画学会, 25 論文特集号抜刷, 509-514
- 10) 辻雅男(1981):農業地区区分の方法に関する一試論~経済的土地分級の適用, 農業および園芸, 56(5), 3-12
- 11) 和田照男・岡崎耿一(1980):農業的地区分級~土地分級と土地利用計画(3)~, 農村計画学会, 20, 22-27
- 12) 柳澤孝裕・中野芳輔・東奈穂子・真玉明子(2002):数量化Ⅲ類を用いた土地分級評価と農地利用の方向性~GIS(地理情報システム)を活用した福岡県黒木町黒木・豊岡地区における検討~, 農業土木学会論文集, 70(3), 345-356

# Development of ‘Communication GIS’ for Settle on Rural Planning by Residents Participation

SHIGEOKA Tetsushi, KURITA Hideharu, SHINDOU Keiji, TOMOMATSU Takashi,  
YAMAMOTO Tokuji and ISHIDA Kenji

## Summary

Recently, the process of settling on the plan of regional promotion and environmental management by the residents participation is requested in rural promotion measure. The system is requested on the site though the system that evaluated the regional resource overall was combined with the landscape image simulation system. The rural planning GIS is made by the cooperation of labor of the engineer and the local residents by using this system. The purpose of this system to overlap plainly and to evaluate information that everyone has in the residents participation. This system can attempt the promotion of an effective, efficient use of farmland basic information. It introduces ‘Communication GIS’ for the resident participation type rural planning decision support to do a spatial overall judgment of regional resource efficiently and effectively in this report.

**Keywords** : residents participation, rural planning, workshop, GIS, regional resource





## 環境配慮手法による農業排水路の底生動物相の違い

森 淳\*・渡部恵司\*・竹村武士\*・小出水規行\*・朴明洙\*\*

## 目 次

I 緒言	97	2 生態型と整備手法	104
II 調査方法	98	3 配慮手法と物質フロー	104
III 結果	99	4 現況保全区間の評価	105
1 環境配慮手法からみた底生動物相	99	5 底生動物による総合的な評価	105
2 生活型と摂食機能群	102	V 結言	106
IV 考察	103	参考文献	106
1 配慮手法から見た底生動物相の特徴	103	Summary	107

## I 緒 言

農業農村整備事業の実施現場では、環境配慮保全に向けた活動自体は定着してきたが、何を根拠として配慮に関する計画・設計を行うべきなのか、あるいは何を目安として配慮施設の効果を評価すべきなのか、理解は浸透していない。そもそも水路の生物多様性をどのように定量的に評価すべきか、研究サイドも説明し切れていない。

具体的には、農業農村整備事業では保全対象種を選定したうえで環境配慮が実施されていることが多い。他の公共事業でも採用されているこの手法は、農業農村整備事業においては生態系配慮の経験が不足している技術者や受益農家にわかりやすいというメリットがある。しかし事業担当者や農家は、保全対象種を指標とすることが、彼らが生息していることをもって、生息条件が保全され、当該種が生きる生態系が守られているサインとみなすという前提に基づいているということを十分理解していない。そればかりか保全対象種の保全自体が目的化していることすら散見される。

モニタリングが—労力や同定能力の問題もあるが—ほとんどの場合、保全対象種の生息状況の調査のみとなっていることも課題である。整備後の生態系や生息環境条件の多様性がどのように保全されているのか、そして経験と仮定にもとづいて選定された保全対象種が、果たして現場の生態系において適切に生態系を代表しているのかという、保全対象種と生態系・食物連鎖との個々の関

係は確かめられていない。

農業水路に関する事業では、保全対象種として魚類が選定されることが多い。これは技術者や農家にもわかりやすく、従って普及しデータの蓄積もある。しかし魚類だけを保全対象種とすることに課題がある。すなわち、魚は陸上動物に比べれば移動能力が劣るものの、移動分散範囲は1km程度のオーダーに及ぶから、「そこにいたこと(採捕されたこと)」だけで生息環境としての評価が、はたして可能なのかという点である。つまり採捕結果はスナップショットにすぎず、実際の生態系を過大評価しているかもしれないのである。事実「田んぼの生きもの調査」では、コンクリート三面張り水路の方が二面張り水路や土水路より多くの種が採捕されることも珍しくない。もちろん魚類の生息空間として前者は後者に劣っており、魚類はそこで生活史を展開しているわけではなく、たまたまそこに遊泳していただけに過ぎない。魚類のみの採捕調査では、生息情報を過大に評価する危険がある。

このように、魚だけを保全対象種とした場合、その生息の有無だけで配慮対策の効果を把握することは、生態系を評価する上で必ずしも十分ではないと考える。すなわち、魚類の生息の有無だけでは、魚の生息情報を過大評価すると同時に、やや小さい空間スケールにおける水路生態系の多様性の評価を見逃している恐れがある。

谷田(1998)は、河川に生息する底生動物について、河川環境における種の多様性と生態系の多様性の、二つの多様性を支えるには下部構造としての生息場所の多様性が重要であるとしたうえで、生息場所の多様性が棲み場所の分割利用などを通じて種の多様性を生み出し種数の増加は種間の生態関係を多様化させるとしている。さらに、底生動物は地点や区間の河川環境の総合判定に適しており、底生動物の生息場所の保全を考えることで魚

\*農村環境部生態工学研究室, \*\*韓国農漁村研究院

平成23年1月7日受理

キーワード：水田生態系，農業農村整備事業，底生動物，農業用排水路，生活型，摂食機能群，多様性指数

類レベルの場も保全されると述べている。

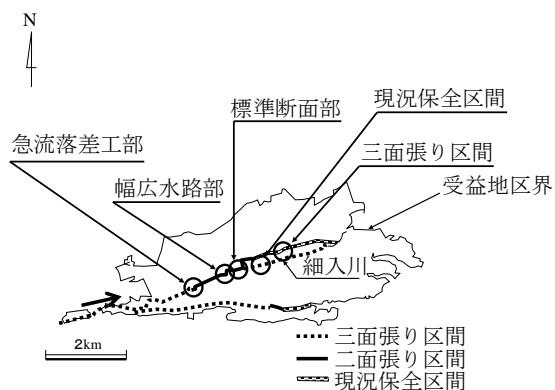
底生動物の生息に必要な環境条件は多種多様であるから、その多様性や種構成は底質などの微生息場所条件や地形条件などと関係が深い。種構成を分析する場合は底生動物の生活要求に応じた摂食機能群や生活型などの生態型の類型が有効である(竹門, 2005)。ここで摂食機能群とは水生動物の餌のとり方からグループ分けをしたもの、生活型とは泥の中に住んでいる(掘潜型)、巣を作って生活している(造網型)など、生活の方法でグループ分けしたものである。生態系配慮対策で用いられている手法・工法の違いは、底生動物の生息場所の環境条件に違いをもたらしていると推察されるから、それぞれの手法等の違いにより底生動物の種や相に差異が生じている可能性がある。配慮手法による底生動物相の違いは、環境評価に重要な情報をもたらすと思われる。

農業水路の生息場所の多様性を底生動物によって評価する研究はきわめて少ない。わずかに日下部・角道(2002)が農業用水路において底生動物の多様性指数と水路環境の関係を調べた例があるものの、農業農村整備事業によって整備された水路において、整備手法の違いという視点から底生動物の生態型と生息場所の多様性を解析した事例は見あたらない。

本稿では、同一事業により異なる環境配慮手法を用いて整備されたいさわ南部地区の幹線排水路(原川)において、配慮手法と底生動物の関係を解析したうえで、底生動物を生息場所の多様性の指標生物とする可能性について考察する。

## II 調査方法

整備水準の異なる区間が含まれる同一水路系内に複数存在する水路系として岩手県奥州市胆沢区の国営いさわ南部地区を選んだ。本地区は1,073haの水田および普通畑の区画整理(圃場整備)を実施する農地再編整備事業である。水生昆虫を中心とする水生動物は季節により出



注: 矢印は流下方向

Fig.1 調査地点位置図  
Location of investigation point



Fig.2 現況保全区間  
Conservation zone



Fig.3 二面張り区間 (標準断面部)  
Wall lining zone (Typical cross-section)



Fig.4 二面張り区間 (幅広水路部)  
Wall lining zone (Widening section)

現種が異なるが、本研究は2008年8月に採取した結果に基づいており、春(特に早春)、秋を含めた調査を今後行う予定である。

同地区の原川幹線排水路(延長2.4km)および原川のバイパス水路である細入川(延長1.9km)のうち2000年から2002年にかけて改修された区間と現況保全区間で採取した。



Fig.5 二面張り区間（急流落差工部）  
Wall lining zone (Rapid flow section)



Fig.6 三面張り区間  
Concrete lining zone

原川は現況保全された区間（現況保全区間）、水路壁面を積ブロック等の工法でコンクリートとし、二面張りで施工された区間（同様に「二面張り区間」とする）及び三面張りの区間（三面張り区間）に大別される。

水路の構造等を流況、底生動物相の調査結果と併せて表1に示す。現況保全区間は落葉広葉樹を主とする河畔林に覆われ、日射はほとんど遮られていた。流れは平瀬の区間が多く、ところどころに早瀬とトコ場がみられ、一部に淵が形成されていた。流路は蛇行していない。水路勾配は不明であるが、現況地形の勾配から1/500～1/700程度と推定される。二面張り区間では、さらに標準断面部、水路幅を拡張した幅広水路部、落差工の代わりに急勾配にした急流落差工部の3区間で調査した。標準断面部の流れはすべて平瀬だった。幅広水路は、上流から供給された土砂が堆積しているため水面幅が狭くなっていた。流れは平瀬が主であるが一部早瀬やトコ場もみられた。急流落差工は幅広水路よりも流れが速く、早瀬が多くみられた。幅広水路と同様に水路底に土砂が堆積し流れが狭くなっていた。両区間とも水際域は、工事で造成された水路壁ではなく堆積したシルトである。堆積物には陸上植物が生育していた。三面張り区間はフ

リュームを用いており、水路底はシルト質が薄く堆積している。

各調査区間等にて20mの調査区間に5mごとに、水路幅に応じて1m程度の等間隔になるように1～3点調査地点を設けた。このうち現況保全区間については目視したところ環境要因が非常に複雑だったことから、特徴的な地点でも採取した（12地点）。この結果、調査地点の合計は51地点となった。

それぞれの調査地点の流速、水深等の環境要素を計測したほか、25cm×25cmのコドラート付サーバーネット（目合：0.5mm）を用いて、各地点1回、水路の底質ごと採取した。三面張り区間を除き、調査地点には直径20cm程度の石が含まれることがあり、この場合は別途ブラシでこそぎ落として実験室に持ち帰り、底生動物を分離・同定した。

### III 結 果

#### 1 環境配慮手法からみた底生動物相

主な環境要因の概要をTable 1に示す。一元配置の分散分析の結果、いずれの項目も調査区間等間に有意差があった（ $p < 0.01$ ）。

流速は三面張り区間が最も大きく、一方で標準偏差は最も小さかった。三面張り区間は水深もばらつきが小さく（平均±標準偏差：10.4 ± 0.51cm）、水域環境はかなり均質的だった。平均水深はいずれの区間も10～20cmだったが、現況保全区間の標準偏差は三面張り区間の10倍以上に達した。

底生動物相の概要をTable 2に示す。三面張り区間は個体数が多く、またばらつきが大きかった。二面張り区間（3調査区部）の平均種数は、いずれも現況保全区間と三面張り区間と比べて多く、幅広水路部と急流落差工部で種数のばらつきが大きかった。

採取した底生動物のタクサ数は33種、個体数は11,486匹だった。調査区間等全体で個体数が200個体を越えたタクサ数は10で、多い順にコカゲロウ属（*Baetis* spp.）、コガタシマトビケラ属（*Cheumatopsych* spp.）、ユスリカ類（Chironomidae）、ミミズ類（Oligochaeta）、マダラカゲロウ類（Ephemerelellidae）、ニンギョウトビケラ類（Goeridae）、ヒラタカゲロウ類（Heptageniidae）、ヒメカゲロウ類（Caenidae）、ガガンボ類（Tipulidae）、ヒゲナガカワトビケラ（*Stenopsyche marmorata*）だった。以下、これらを「主な出現種」という。

主な出現種をもとに全51調査地点をクラスター分析したところ、以下の5つ、実質的には4つのグループに分けられた（ウォード法、）。

グループ1：主に現況保全区間と急流落差工

グループ2：主に幅広水路

グループ3：主に標準断面部と三面張り区間

（グループ4：現況保全区間の1調査地点のみ）

## グループ5：三面張り区間

平均総個体数は三面張り区間が最も多く、最も少なかった現況保全区間の8倍以上に達した。標準断面部、三面張り区間で変動係数は小さかったが、現況保全区間の変動係数は大きかった。

平均種数は標準断面部が16.0種で最も多く、次いで同じ二面張り区間である急流落差工部、幅広水路部の順

だった。現況保全区間、三面張り区間で少なかった。変動係数は標準断面部で特に小さかった。出現種数は標準断面部が22種と最も多く、三面張り区間(14種)でも少なかった。

各区間で出現したタクサを多い順に3種示すと、現況保全区間はシマトビケラ類、タニガワカゲロウ類、ガガンボ類、標準断面部はシマトビケラ類、マガラカゲロウ

**Table 1** 水路構造および環境要因の概要  
Summary of canal structure and environment element

調査区間等名	水路構造						環境要因			
	水路底			水路壁		水路勾配	流速		水深	
	材質・形状	底面幅	水面幅	構造	勾配		平均±標準偏差 (m/s)	変動係数	平均±標準偏差 (cm)	変動係数
現況保全区間	シルト～人頭大の石、落葉の堆積もみられる	約15m	約4～5m	(掘込み)	約1:1	不明	0.15±0.14	0.94	10.3±6.0	0.58
二面張り区間							0.26±0.20	0.78	15.4±5.4	0.35
標準断面部	人頭大の石混じりのシルトまたは砂、石は	4.0m	4.0m	積ブロック	1:0.8	1/620	0.20±0.08	0.38	20.0±5.7	0.29
幅広水路部	人頭大の石混じりのシルトまたは砂礫、標準断面部より礫の割合が多い	5.5～7.5m	約2～3m	積ブロック	1:1.5	1/620	0.21±0.15	0.72	13.9±4.7	0.34
急流落差工部	人頭大の石混じりのシルトまたは砂礫、幅広水路より粒径が大きい	3.5m	約1～2m	積ブロック	1:0.5	1/19.7	0.36±0.28	0.78	15.1±5.9	0.39
三面張り区間	コンクリート	2.1m	2.1m	コンクリート	直壁	1/380	0.48±0.05	0.10	10.4±0.51	0.05
平均または全体の値							0.30±0.20	0.66	13.1±5.3	0.41

**Table 2** 底生動物相の概要  
Summary of benthic animals

調査区間等名	底生動物相										
	平均総個体数		種数		出現種数	生活型数*		摂食機能群数		ShannonのH'の平均	
	平均±標準偏差 (匹/箇所)	変動係数	平均±標準偏差	変動係数		平均±標準偏差	変動係数	平均±標準偏差	変動係数	平均±標準偏差	変動係数
現況保全区間	77.4±133.3	1.7	7.0±2.0	0.3	18	3.1±0.8	0.2	4.6±0.9	0.2	2.17±0.67	0.31
二面張り区間	209.9±157.5	0.8	13.0±4.5	0.4	29	4.9±0.9	0.2	4.6±0.8	0.2	2.67±0.67	0.25
標準断面部	298.4±60.0	0.2	16.0±1.0	0.1	22	5.2±0.4	0.1	5.0±0.0	0.0	3.21±0.47	0.15
幅広水路部	198.9±134.5	0.7	11.8±3.8	0.3	25	4.4±1.0	0.2	4.5±0.7	0.1	2.45±0.88	0.36
急流落差工部	175.6±178.8	1.0	12.7±3.0	0.2	19	5.3±0.3	0.1	4.6±1.2	0.3	2.69±0.90	0.33
三面張り区間	342.1±104.1	0.3	5.3±1.0	0.2	14	3.7±0.5	0.1	3.3±0.6	0.2	1.06±0.18	0.17
平均または全体の値	225.2±157.5	0.7	9.6±4.5	0.5	33	4.2±1.0	0.2	4.1±1.0	0.2	2.11±0.90	0.43

\* 底生動物の生活型は、造網型、固着型、葡萄型、携巢型、遊泳型および掘潜型に分類される。

注1：平均総個体数は各区間において実施したコドラート調査の平均を指す。

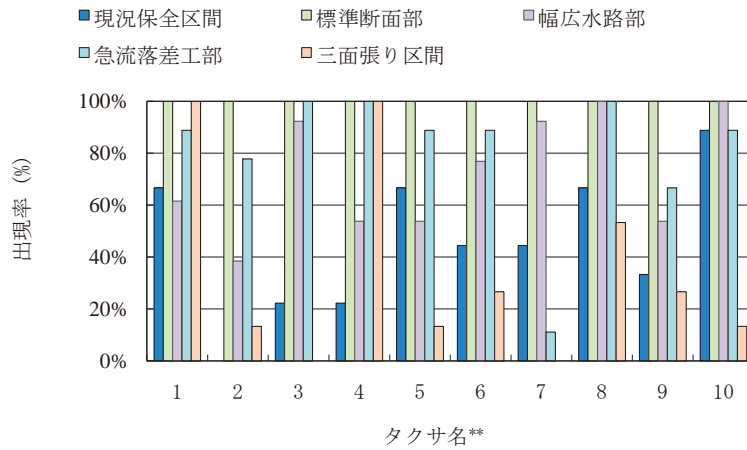
2：コドラート調査は各地点1回行った。

類, ミミズ類, 幅広水路はマダラカゲロウ類, ユスリカ類, シマトビケラ類, 急流落差工部はシマトビケラ類, ガガンボ類, コカゲロウ類, 三面張り区間はコカゲロウ類, シマトビケラ類, マダラカゲロウ類となった。

平均生活型数は急流落差工 (6.2) で最も多く, 最も少ないのは現況保全区間 (4.7) だった。平均摂食機能群数は幅広水路が最も多く (5.0), 三面張り (3.3) が最

も少なかった。Shannon の多様性指数は標準断面部で最も大きく (3.21), 三面張りで最も小さかった (1.06)。

調査区間等におけるタクサの出現率をみると (Fig.7), コガタシマトビケラ類はいずれの調査区間等でも 60% 以上出現した。同じ造網型のヒゲナガカワトビケラは現況保全区間で出現しなかった。ニンギョウトビケラ類は現況保全区間であまり出現しない。ヒラタカゲロウ類は



\*\*タクサ名は以下の通り。1.コガタシマトビケラ, 2.ヒゲナガカワトビケラ, 3.ニンギョウトビケラ, 4.コカゲロウケラ, 5.ヒラタカゲロウ, 6.マダラカゲロウ, 7.ヒメカゲロウ, 8.ユスリカ, 9.ガガンボ, 10.ミミズ

Fig.7 各底生動物の出現率  
Appearance ratio of benthic animals

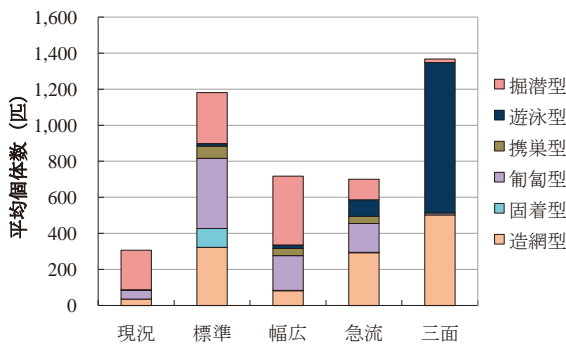


Fig.8 生活型別の平均個体数 (調査区間別)  
Average individual number (Life style)

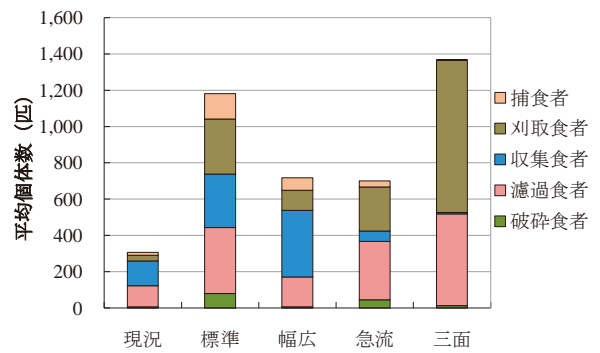


Fig.9 摂食機能群別の平均個体数 (調査区間等別)  
Average individual number (Feeding group)

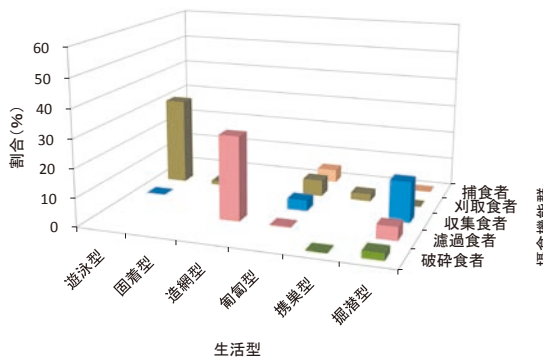


Fig.10 全体の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Entirety)

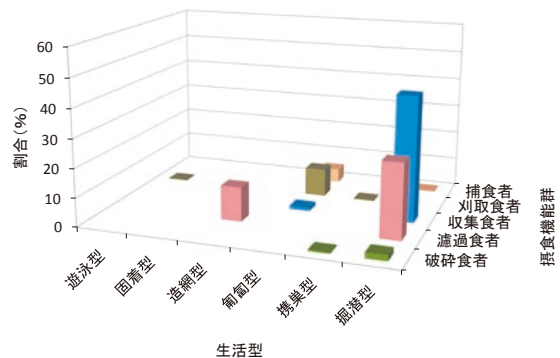


Fig.11 現況保全区間の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Conservation zone)

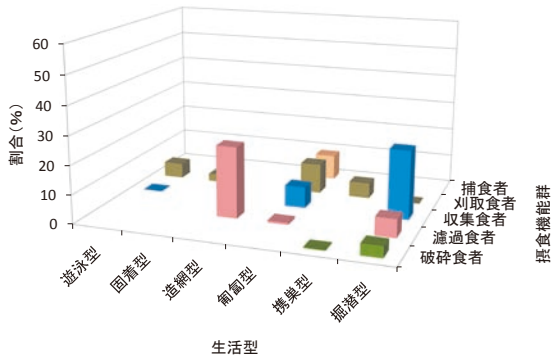


Fig.12 二面張り区間の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Wall lining zone)

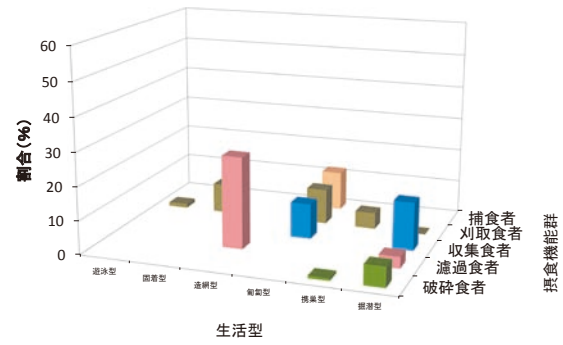


Fig.13 標準断面部の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Typical cross-section)

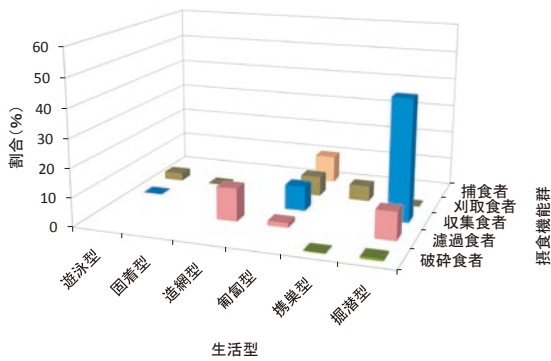


Fig.14 幅広水路部の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Widening section)

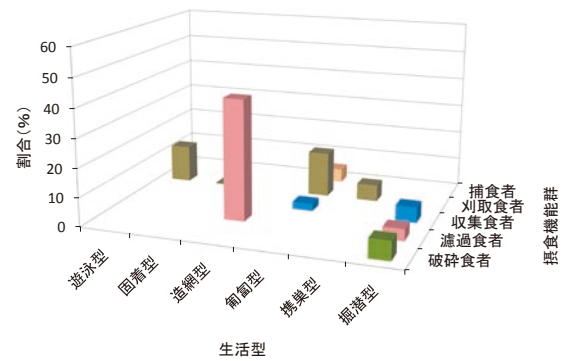


Fig.15 急流落差工部の生活型と摂食機能  
Life style and feeding group (Rapid flow section)

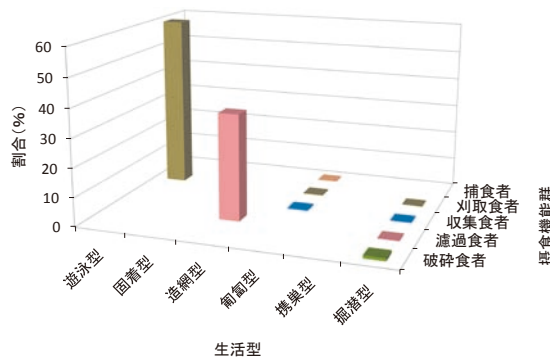


Fig.16 三面張り区間の生活型と摂食機能群  
Life style and feeding group (Concrete lining zone)

三面張り以外で50%以上出現した。コカゲロウ属は現況保全区間で少なかった。マダラカゲロウ類は主に二面張り区間で出現した。ユスリカ類はいずれの区間でも50%以上出現した。ガガンボ類は二面張り区間で50%以上出現した。ミミズ類は三面張り区間で少なかった。コガタシマトビケラ類の個体数と流速の間には-0.59 ( $p < 0.05$ )の有意な負の相関があった。これは石に巣を作って生活しているコガタシマトビケラは極端に流速が大きな環境を選好しないことを示唆する。また他のタクサについては流速との有意な相関はみられず、底質や水深など他の環境要因の影響を受けており、ミクロな環境要因を指標していると思われる。

## 2 生活型と摂食機能群

各調査区間等で出現した底生動物の生活型割合をFig.8に示す。現況保全区間は掘潜型が多い。これは落葉の堆積物の中に大量のミミズ類が含まれていたためである。現況保全区間の生活型は固着型と遊泳型が少なかった。

二面張り区間の各区部間の大きな偏りは見られなかったが、幅広水路部で掘潜型、急流落差工部で造網型が多かった。二面張り区間はおおむね多様な生活型が出現していることがわかる。

三面張り区間ではコカゲロウ類とコガタシマトビケラ類の個体数割合が多いことから遊泳型と造網型で占めら

れている。遊泳型に属するコカゲロウ類は遊泳能力が高く、三面張り水路でも採捕されることが多い。

**Fig.9**に調査区間等別の摂食機能群の割合を示す。摂食機能群は竹門(2005)を参考にしたが、2種類の摂食機能群に分類されるタクサについては、生息密度を2等分しそれぞれの摂食機能群に計上した(Hawkins et al., 1982, 布川・井上, 1999)。三面張り区間では刈取食者(コカゲロウ)と濾過食者(コガタシマトビケラ)以外の摂食機能群の出現個体数が非常に少なかった。摂食機能群ごとに出現傾向を分析したが、たとえば同じ濾過食者であるコガタシマトビケラ類とヒゲナガカワトビケラの出現傾向が異なるなど、共通的な特徴は見られなかった。

さらに、各区間等別の、生活型と摂食機能群で分類した出現数割合を**Fig.10**～**Fig.16**に示す。

調査地区全体で多かった造網型-濾過食はシマトビケラ、遊泳型-刈取食はコカゲロウである(**Fig.10**)。現況保全区間では掘潜型の収集食者、濾過食者が多い(**Fig.11**)。二面張り区間全体での生活型-摂食機能群は**Fig.12**のように造網型・匍匐型・掘潜型、濾過食者・収集食者・刈取食者に分散した。二面張り区間の標準断面では造網型、匍匐型、掘潜型に分散したが掘潜型では濾過食者が少なかった(**Fig.13**)。幅広部では掘潜型-収集食者(ミミズ類)が多かった(**Fig.14**)。

急流落差部で造網型-濾過食者が多かったのはシマトビケラとヒゲナガカワトビケラが卓越したためである(**Fig.15**)。三面張りではコカゲロウ(遊泳型-刈取食者)とコガタシマトビケラ(造網型-濾過食型)に極端に優占したためこの2つのタイプが特に多い結果となった(**Fig.16**)。

## IV 考 察

### 1 配慮手法から見た底生動物相の特徴

クラスター分析の結果、整備手法と底生動物相は深い関係があり、固有性を持つことが明らかになった。

まず、環境配慮手法として採用されることが多い二面張りについて底生動物相と環境配慮手法の関係について考察する。本地区では二面張り区間のいずれの調査区部も、現況保全区間および三面張り区間と比べて平均種数、平均生活型、Shannonの多様性指数が高かった。現況保全水路は改修水路と比較して日照など多くの環境要因が異なるため単純に比較することは出来ないが、魚類の生息個体数が多いことから考えれば、底生動物の個体数が少ないことをもって生息場所としての質をネガティブに評価することは不適当である。このことは改めて論じることにする。一方、三面張り水路と比べて二面張り水路は底生動物の豊かさを保全する上で有効であり、生息場所の多様性が形成されていることが示された。

このうち幅広部、急流落差工部は幅広水路の流速、水深、底質などの水域環境条件が多様であり、加えて急落

差工部は小規模ながら早瀬や淵も形成されている。調査地点数の多寡があるため単純比較はできないが、標準断面部、幅広水路部および急流落差工部を合わせた二面張り区間全体の出現種数は29となり、調査区部等全体の出現種数33のほとんどが二面張り区間で生息していたことになる。

生活型および摂食機能群は、幅広水路部で掘潜型-収集食型が(**Fig.14**)、急流落差工部で造網型-濾過食型が優先していたが(**Fig.15**)、二面張り水路全体で見るとそれぞれの特徴が相殺され、特に突出した生活型、摂食機能群はなくなった(**Fig.12**)。標準断面区だけでなく幅広水路部や急流落差工部を設けたことにより、瀬と淵を含む多様な水域環境が復元され、このことが底生動物相の多様性となって現れたと考えた。多様な断面を造成した場合、ある空間スケールで捉えるとそれぞれの断面に固有な底生動物相が統合されて底生動物相は多様になる。このことを生息場所の多様性とみなすことができるだろう。

幅広水路部および急流落差工部に比較して環境要因が単純な標準断面部において底生動物相が豊かだったことは、調査前の予測とは異なる結果だった。標準断面部の石にはヒゲナガカワトビケラやニンギョウトビケラ類、ヒラタカゲロウ類が付着しており、付着基質および餌場としての役割を果たしていた。また石がマイクロハビタットレベルにおける流速を緩和・多様化し匍匐型の生息に適した環境を作り出すことも、多様な底生動物が生息している要因と考えられる。標準断面部において底生動物が豊かだったことは、水生生物の生息には石の役割が大きいとする日下部・角道(2002)の報告と一致する。後述するように本研究では標準断面区間で水生動物が比較的豊かであると評価されるが、上流から石が供給される本地区固有の事象かも知れない。

また、農業農村整備事業で造成される二面張り水路の底面の施工は、現況基盤の整形にとどめ、敷材を搬入しないことが多い。粒径の小さな土粒子のみ供給される地区では、変化が少ない標準断面二面張り工法を多用することは均質な環境が創出される可能性がある。

三面張り区間は、特定の種(コガタシマトビケラ属とコカゲロウ属)の優占度が非常に高い、特異な底生動物相を呈していた。この区間は、捕食者の底生動物がほとんど生息しておらず、平均種数も少なかったように、多くの底生動物の生息に好ましくないため被食(今回魚類は調査対象としなかったが、魚が生息しにくい環境であるため捕食圧は小さいだろう)や種間競争による個体数の減少量は少ないだろう。このため両種は個体数を非常に増加させたと考えられる。金澤・三宅(2006)はコンクリート基質上には土のような自然基質とは異なる底生動物群集が成立していたことを報告している。これに似た現象が農業用の三面張り水路でも起きている。三面張り区間の多様性指数が小さい原因は、この種組成の著し

い偏りである。種間の相互作用が低調な三面張り水路はカタストロフィックシフト(復帰できない生態系の劣化・不健全化)に陥っていると考えられる。

三面張り水路に生息する生物群集は歪であるが、三面張り区間を造成することが避けられない事業地区が少なからず存在するという現実がある。また、コンクリートの表面の形状、劣化・遷移の状態により水生動物のミクロなハビタットが形成されている箇所もみられる。表面・形状を工夫することにより、三面張りとは異なる区間においても一定の生息環境を用意できる可能性はあると考える。

さらに、水路改修により魚の餌となる底生動物が少なくなると考えられることから、異常発生した底生動物の生態的評価、たとえば三面張り区間から流下した底生動物が下流に生息する魚類等の餌資源としての機能を明らかにする研究も無意味ではないだろう。

2 生態型と整備手法

津田(1962)は、河川の瀬では造網型、固着型、匍匐型が多く、淵では匍匐型、携巢型、遊泳型、掘潜型が多いとしており、竹門(1997)によれば固着型、造網型、滑行型は浮き石が多い浸食卓越環境に、掘潜型は砂泥の多い堆積卓越環境に多い。このように底生動物の生息は瀬・淵という河川構造と深い関係がある。

二面張りの標準断面部、幅広水路部および急流落差工部は瀬に多い底生動物、淵に多い底生動物ともみられ、生息環境が多様であることを裏付けている。一方三面張り区間はほとんど瀬に多い底生動物、しかも単一種によってほとんど占められており、均質な環境であることが示された。

Fig.9 ~ Fig.14 に示したように、異なる断面に生息する底生動物は異なる生活型、摂食機能群を示す。そして前述のように複数の断面が用意されたことにより、二面張り区間全体の底生動物の生活型・摂食機能群が多様化したと考えられる。このことから、底生動物の種数のほか、生活型と摂食機能群の多様性を考慮して生息場所の多様性を評価出来るだろう。ただし、後述するように一つの、あるいは少数の指標では生態系の特性を把握することは妥当ではない。また、摂食機能群が流域の上流、下流で異なる点、さらには生物地理的な分布の偏在する可能性にも留意しなければならない。

農業水路における底生動物の豊かさが上位消費者に与える影響を明らかにすることにより、底生動物の生活型および摂食機能群を用いた水域生態系全体の多様性評価が可能と考えられる。

3 配慮手法と物質フロー

現況保全区間は藻類を餌とする刈取食者の割合が少なく、陸起源有機物とのつながりが強い従属栄養的な生態系であることが明らかになった。本区間は河畔林に覆われ、溪流に似た景観を呈している。一般的に流域上流に位置する溪流の食物連鎖は従属栄養的であり、底生動物はリター(落葉落枝)を直接餌とする破碎食者が生息している。一方、現況保全区間にもリターが大量に存在しているにもかかわらず濾過食者、収集食者が多かった。このことは、分解されて粒径が小さくなった有機物が上流から流下することにより、収集食者や濾過食者が生活できるエネルギーが供給され、種間競争に影響を与えている可能性がある。一方で、他区間では確認されなかった破碎食者のカクツツトビケラ類(Lepidostomatidae),

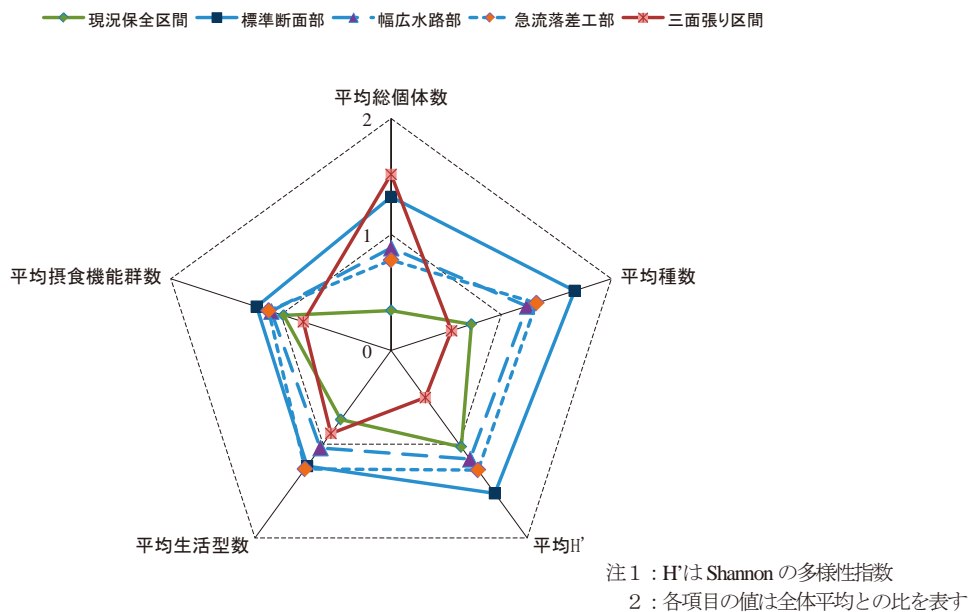


Fig.17 各区間の底生動物相の豊かさ  
Abundance of benthic animal fauna (each section)



マルツツトビケラ (*Micrasema* spp.) がみられ、溪流に似た固有の食物連鎖も存在することが明らかになった。

分解が進んだ有機物が地区全体の底生動物に大きな影響を与えていることは、極端に優占したコカゲロウを除けば、収集食者、濾過食者が多かったことで明らかである。流域の状況から考えれば、陸起源有機物の起源はイネと斜面林の樹木であると考えられる。

ところで、物質フローを化学的に解析する手法として安定同位体比法がある。たとえば底生動物が  $C_3$  植物由来の有機物を餌としていれば動物体の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}C$ ) の  $\delta$  値は  $-27\%$ 前後の低い値を示す。これに対して底生動物が水域内で生産された藻類を餌としていれば様々な値を示す。コガタシマトビケラの炭素安定同位体比は栃木県江川・五千石地区、いさわ南部とも  $-27\%$  となり、陸起源有機物を餌としていることが、一方ユスリカとコカゲロウは地区ごとに固有性を示し水域内で生産された有機物を餌としていることが明らかにされている (森ら, 2010)。

多様な摂食機能群の底生動物の生息は、陸起源有機物を含めた物質フローの複雑化・多様化を促し、動物界に複数ルートで物質とエネルギーが供給されていることを示している。

#### 4 現況保全区間の評価

現況保全区間は景観的にみても生物にとって好ましい生息場所であり、このことは従来の魚類調査でも裏付けられている。しかし本研究では、二面張り区間のいずれの調査区間等より種数、多様性指数とも下回るなど、むしろ人工的に造成された二面張り水路の方が、少なくとも底生動物にとっては好ましい環境であると解釈し得る結果となった。

また、流れの状況や河畔林が排水路を覆うことなど溪流に似た環境であるにもかかわらず、底生動物相の瀬・淵の選好性からみると淵型の底生動物が多く出現したことは、実態と乖離する。本節ではこれらの点について考察する。

まず、底生動物が二面張り区間より必ずしも豊かでなかった点については、採捕された底生動物が現況保全区間の底生動物相を代表していたかという問題があるだろう。本区間は変化に富んだ区間であるため特異な地点、たとえばエグレなどを採捕地点として追加した。この生息密度の偏在性は、採捕された底生動物の平均個体数の変動係数が最も大きかったことから裏付けられる。特異点を追加して採捕したにもかかわらず、サンプルが底生動物を代表するには十分でなかった可能性がある。またこれらの特異点の中にはリターやこれが分解されてきた有機物が堆積しており、掘潜型のユスリカ類とミミズ類が極端に大量に採取された地点もあり、これら淵型の底生動物が結果を増幅した可能性もある。

溪流は内部生産量が少なく底生動物自体の生物量は少

ないことが多い。しかし現況保全区間は、溪流同様に内部生産は少ないものの、収集食者や濾過食者が多く生息していることから、前述のように上流から流入する分解された有機物が多いと推察され、底生動物の餌資源量が生息の制限要因になるとは考えにくい。

一方調査結果が示すとおり、現況保全区間にはそもそも底生動物が少なく、生活型や摂食機能群も複雑ではなかった可能性もある。底生動物の豊かさを確保にとって必要な生息場所の多様性は、魚類の生息の必要条件ではなく十分条件という仮説も成立し得る。すなわち、魚類が依存する生態系内の空間スケールと底生動物のそれは異なるから、魚類の生息にはやや大きな空間スケールとしての水路系全体で生息場所の多様性が保たれていればよく、複雑な底生動物相が持続するにはより小さな空間のなかに多様な小さなモザイクが用意されている必要があるという考えである。仮にそうだとすると、底生動物をモニタリングに加える場合、魚類に必要な生息場所の多様性の把握が困難であるなかにあつては、生態系保全からみればより安全側になるから、底生動物をモニタリングする必要性が減るわけではない。

いずれにしてもこれらを立証するにはサンプルが現況保全区間の底生動物相を代表しているかを確かめる必要があるが、これにはサンプル量と同定レベルという二つの大きな問題がある。現況保全区間は他の区間に比べて横断方向、縦断方向ともに環境要因が複雑であり、仮に横断方向で連続的に採取すれば、隣り合う区間でも採取される底生動物に差異が生じる場合もあると思われる。本研究では縦断方向に 5m 間隔で採取断面を設定したが、間隔を狭めれば異なる結果となる可能性もあろう。

また、本研究ではほとんど科や属レベルで同定し、ミミズ類は綱である。属間でも生息場所の選好性が異なることも考えられる。またユスリカ類のように複数の摂食機能群にまたがるものもある。しかしながら、すべてのサンプルを同定することは不可能である。今後採取密度と、同定しやすい属に絞り同定レベルが分析結果に及ぼす影響の有無を確認する必要があると考える。

#### 5 底生動物による総合的な評価

これまで論じたように、水路における整備の評価—特にマイクロな環境の評価—には、底生動物を用いることが可能であり、緒言で述べたようなかなり大きな空間スケールの生息場所の多様性に依存するという魚類の指標種としての特性を補うことになるだろう。

では、具体的にどの指標を用いればよいのだろうか。たとえば、種数は重要な評価指標ではあるがこれだけでは十分ではない。仮に同じ種数が出現した場合でも、類似する環境に生息する類似種が多かった場合と、様々な環境が用意され、それに依存して生息している底生動物が同じ種数となった場合とでは、生態系の多様性に関する意味が異なる。多様性指数も同様の理由によりこれだ

けで十分評価できる指標とはいえない。

生物間の食う-食われるの関係を種とした相互作用が安定し世代交代が安定的に行われている状態を健全な生態系とするならば、三面張り区間で出現したような、特定の種が優占し捕食者が乏しい生態系は不健全な状態といえる。個体数も重要な指標であるが、不健全な生態系でも評価が高くなるというジレンマがある。

本稿では底生動物相の豊かさを個体数、種数、多様性指数、生活型数、摂食機能群数を統合的にとらえるために、これら指標の全体平均との比をレーダーチャートで示した (Fig.17)。三面張り区間は二面張り水路区間の各部より不均衡さが目立つことがわかる。現況保全区間は平均個体数でかなり下回るが、比較的バランスが取れている。

生息場所の多様性について、共通的な目標値を示すことは困難であろう。なぜなら個々の生態系や生物群集には固有性があり、生態系配慮に必要な共通解・具体的な必要条件は存在しないからだ。現段階では生息場所の多様性を底生動物により評価する手法は各地区の相対的なものになる。これをどのように拡張し共通性を与えるか、今後の研究課題である。

また、本研究では水生昆虫を中心とする水生動物の生息場所の多様性をテーマにして論じてきた。これが上位消費者である魚類の生態にどのような影響を与えるのかを明らかにしなければならない。

本研究の対象とした三面張り区間は、攪乱に強い特定種のみ生息する、生物が住みにくい環境であったが、他地区には土砂が堆積して植物群落が形成され本地区に比べて多くの底生動物が生息している事例も珍しくない。三面張り水路に生息物が生活するためには、遷移の進みややすさと、水路内の土砂の堆積・植物群落の存在を地元農家がどの程度受け入れるかが、水路が持つ潜在的復元力の要因であろう。さらに三面張り水路は、均質的な水路設計をするのではなく、二面張り区間に標準断面部の他に幅広水路部や急流落差工部を設けたように、拡幅部などの比較的生物の住みやすい区間を設置したうえでネットワーク化することにより、二面張り工法に比べれば生態系保全効果は劣るかもしれないが、従来の均質的整備と比べれば生息環境の多様性を保全することができると考える。

## V 結 言

整備手法が異なる区間が同一水路系に存在するいさわ南部地区の原川排水路における底生動物相を解析した結果、底生動物相は整備手法と深い関係があることが明らかになった。このことから底生動物を用いた整備後の生態系への影響を評価する手法開発の可能性が示された。

生息場所の多様性が確保されている二面張り水路で

は、底生動物の生活型や摂食機能群が三面張り水路に比べて多様になった。二面張り区間の標準断面部で底生動物が豊かだったのは本地区で石が供給されるためと考えた。また、複数の断面が施工されたことにより、二面張り区間全体の底生動物の生活型・摂食機能群が多様化した。

底生動物を用いて水路環境を評価するには、種数、多様性指数、生活型など複数の指標を総合的に用いることを提案した。

魚類と底生動物が必要とする、空間スケールを含めた生息場所の多様性の特性を考慮したうえで、底生動物を含めていかに水田生態系を評価するか、また環境が複雑な農業水路におけるサンプリング手法と同定精度が解析に与える影響を明らかにすることが今後の課題である。

なお、原川排水路における水生動物の採捕にあたっては、農村環境部環境評価研究室の松森堅治氏、嶺田拓也氏、廣瀬裕一氏に多大な協力を頂いた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Hawkins, C. P., Murphy, M. L., and Anderson, N. H. (1982): Effects of Canopy, Substrate Composition, and Gradient on the Structure of Macroinvertebrate Communities in Cascade Range Streams of Oregon. *Ecology*: 63, 6, 1840-1856.
- 2) 金澤康史・三宅洋 (2006) コンクリート基質—自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較. *応用生態工学* 9: 141-150
- 3) 日下部貴規, 角道弘文 (2002): 多様な生物種の生息に配慮した農業用水路の改修計画, *農業土木学会誌*, 70(12), pp.1095-1098
- 4) 布川雅典, 井上幹生 (1999): 北海道北部の小河川における河畔植生と底生昆虫群集との対応様式, *陸水学雑誌*, 600, 385-397.
- 5) 竹門康弘 (1997): 溪流における水生昆虫の棲み場所保全, *砂防学雑誌*, 50, 52-60.
- 6) 竹門康弘 (2005): 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価, *日本生態学会誌*, 55, 189-197.
- 7) 谷田一三 (1998): 河川の底生動物群集-水生昆虫を中心に, 水辺環境の保全-生物群集の視点から, 江崎保男・田中哲夫著, 朝倉書店, 195-216.
- 8) 津田松苗 (1962): 水生昆虫学, 図鑑の北隆館, 239-240.
- 9) 森 淳・渡部恵司・竹村武士・小出水規行・朴明流 (2010): 環境配慮型水路の整備工法とベントス相, 平成22年度農業農村工学会大会講演会

## Difference of Benthos Fauna in Paddy Drainages on Environment-Conscious Method

MORI Atsushi, WATABE Keiji, TAKEMURA Takeshi, KOIZUMI Noriyuki and PARK Myoung Soo

### Summary

We analyzed benthos fauna in a paddy drainage that had been conserved or improved with environment-conscious methods, Conserved section, Wall lining section: only walls of drainage were concrete lined, and Concrete lining section: bottom and walls were concrete lined. Average population and total number of species in Conserved section was less than in Wall lining section. And a proportion of the species that depended on the terrestrial organic carbon was high. In Wall lining section, average number of species, total number of species, diversity index, average number of life type and average number of feeding groups exceeded the other section. Stones seemed to have much to contribute to make the benthic animals abundant even in typical cross-section that had simple configuration. In Concrete lining section, even though total population was the most, the indexes of species diversity was below Wall lining section. The reason for the imbalance was explosive breeding of some species that adjust to the unusual circumstances in Concrete lining section. We recognized that there were the difference of life type and feed groups among some environment-conscious methods.

**Keywords** : paddy field ecosystem, agricultural infrastructure improvement and rural development, benthic animals, drainage canal, life-type, functional feeding groups, diversity index



## 中干しが灌漑地区の取水パターンへ及ぼす影響の事例分析

堀川直紀\*・吉田武郎\*・増本隆夫\*\*,\*\*

## 目 次

I 緒 言	109	4 灌漑地区の取水量	112
II 中干しの現状	109	IV 灌漑地区の取水パターンの分析	112
1 中干しとは	109	1 対象地区の概要と分析方法	112
2 中干しの進展とその阻害要因	109	2 分析結果	112
3 中干しをめぐる最近の動向	110	3 取水パターンの比較	116
III 用水計画における中干し	111	V 結 言	117
1 計画基準における中干しの取り扱い	111	参考文献	117
2 用水計画への中干しの反映	111	Summary	119
3 中干し期の水収支に関する研究	111		

## I 緒 言

「中干し」は灌漑期間中の一時期水田を非湛水状態にする水田灌漑方法である。日本ではこれは古くから行われてきたが、特に戦後急速に普及した。中干しは主に栽培上の理由、すなわち安定した収量を確保するために行われる。一方、中干しの期間はその前後の期間と比較すると取水量が減少するため、水資源管理の観点からは節水技術としても位置付けられる。今後は、環境問題や地球温暖化等の稲作をとりまく状況を背景として、中干しには環境保全等の新たな役割が求められていくと考えられる。中干し期の水収支については、期間中の消費水量（蒸発散量と浸透量の和）等、まだ明らかになっていない要素が多い。また、中干しが灌漑地区全体の取水量やそれに補給するダムの補給量に対してどの程度の影響を及ぼすかは明確にされてこなかった。

本報告では、現在の中干しの状況及び用水計画における位置付けを分析し、大規模灌漑地区7箇所を対象としてマクロ的に中干しと灌漑地区取水量の関係の事例分析を行う。

## II 中干しの現状

## 1 中干しとは

農業土木標準用語事典（農業土木学会，2003）によると、中干しについて「稲の栄養生長期間中、最高分けつ期を過ぎて分けつ停止期に近づいたところに、落水して水田を干し、一時期畑状態にすること。土壤に酸素を供給し、還元状態で起こる様々な根の障害を防止、根の活力を増進させると同時に窒素の過効を押さえる。暖地、排水不良地で特に有効。（土用干し）」と記載されている。また、土壤に亀裂を入れることによる土壤の透水改良及び物理的に以後の分けつの発生を抑えることなども中干しの意義とされている。

中干しを開始する時期は、それぞれの圃場において莖数などから有効分けつが終了し無効分けつが始まる時期とすることが普及指導センター等により推奨されているが、その目安となる時期は田植え後約一ヶ月である。田植え時期が移動すれば中干しの時期も移動することになる。分けつが終了すると幼穂形成が始まり出穂にいたるが、出穂の1ヶ月前が中干し終了時期の目安である。

普及指導センター等が推奨する中干しの期間は一週間程度である地域が多いが、暖地では20日を越える強い中干しや有効分けつ期に始める早期中干しの実施も見られる（水管理研究会，1972）。一方で北海道では数日に留めることが指導されている。この様に推奨される中干し期間は地域によって異なる。

## 2 中干しの進展とその阻害要因

中干しがわが国でいつの時代に導入されたかは明らか

\* 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

平成23年1月24日受理

キーワード：水田灌漑，中干し，取水量，貯水池，水管理

ではないが、永田(1964)は中干しの記述がある江戸時代の農書をいくつか示している。このことから遅くとも江戸時代には中干しが一部で実施されていたといえる。永田(1964)は「水稻及陸稲耕種要綱(農林省農務局, 1933)」に記載されている灌漑方法を検討し、22県で中干し(原文では土用干し)が実施されていることを示した。但し、戦前にはその普及は用水の豊富な一部の地方に限られていた(田中, 1970)。全国18か所を対象として1940年から1975年頃までその時期に用いられた稲作技術が調査されている(日本農業研究所・農水省, 1970及び農水省, 1979)。地区の一部にせよ中干しを実施している地区数は5地区(1940年), 10地区(1955年), 12地区(1965年), 12地区(1975年)と次第に増加している。昭和41年産作物統計(農林省, 1967)には中干し実施面積の全国調査が掲載されている。実施水田面積の耕作水田面積に対する割合の全国平均は59%である。地域別では北海道が2%とほとんど行われていない一方、東北56%, 北陸68%, 関東51%, 東山65%, 東海69%, 近畿65%, 中国68%, 四国67%, 九州75%と、北海道以外では半数以上の水田耕作面積で中干しが実施されていた。豊田ら(1984)は栽培技術としての中干しは、特殊な気象災害防止の場合と特に水不足に悩む場合を除いて一般に定着しているとしており、現在では北海道でも中干しが推奨されている。この様の中干しは戦前から実施されていたが、特に戦後になって急速に全国的に普及した。

中干しが急速に普及した理由はいくつか考えられる。米作日本一表彰事業が昭和24年から実施されたが、1位入賞者はいずれも中干しを実施している。これにより、それまで関心の薄かった水田の灌漑法が多収技術として浮かび上がり、中干しが普及することとなったと鈴木(2003)は指摘している。また、水田土壌の透水性と稲作収量に関する研究(稲作における土壌と水に関する研究)が昭和31~35年に実施された。鈴木(2003)はこの研究の結果、「水のかけひきの合理的な方法が案出され、広く農家に普及した」としている。この時期に中干しは安定した水稻の収量を実現する上で有効な技術であると認識され、それを支える具体的な方法が示された。

一方、山際(1984)は昭和20年代前半に農業2.4Dの利用拡大と共に広まったとしており、池橋(2005)は、「中干しという技術は、用水が自由に使い、化学肥料が使えるようになった現代の技術である」とした。渡邊ら(1986)は「非湛水・間断灌漑の拡大を可能ならしめた重要な条件として、水田の基盤整備の進展がある」と指摘している。用排分離等を目的とする水田の基盤整備は中干しを実際に普及させた主要な条件の一つと言える。

昭和41年産作物統計には中干しを実施しない理由が都道府県別に記載されている。ほとんど実施していない北海道を除く都府県における理由とその回答割合は、水掛かり不良田(31%), 排水不良田(22%), 不必要(13%),

水利慣行(10%), 漏水田(7%), 労力事情(6%), その他(11%)である。水掛かり不良田, 排水不良田, 漏水田と回答した割合を合計すると60%となり、これらを確保する基盤整備事業の進展が中干しの普及において重要であることが裏付けされている。なお、不安定な取水は現在でも中干しの実施の阻害要因となっており、北村ら(2001), 村上(2005), 吉田ら(2010)は水源が不安定な棚田等では中干しが実施されていないことを報告している。

### 3 中干しをめぐる最近の動向

中干しの機能は上述したとおりであるが、高温障害対策や環境への配慮等について新たな役割を求められるようになってきた。

近年、登熟期の高温による米の品質低下が問題となってきている。友正・山下(2009)は高温障害対策を検討したが、予防的対策の一つとして中干しを示した。中干しの実施による生長の抑制はイネの高温に対する耐性を強める。農林水産省が実施した平成13年産水稻作における高温障害対策の調査では、調査対象9県のうち6県で中干しの徹底や期間延長が推奨されていた(農林水産省, 2002)。

また、最近では農業用水の持つ多面的機能にも関心が高まっている。中干しにより一時的に水路に流れる流量や水田における湛水の消滅は生態系や環境に対して影響を与えることがある。コウノトリとの共生を図っている兵庫県豊岡盆地では、餌である水棲生物の保護のために中干しを通常より3週間程度遅らせる「中干延期稲作」が実施されている(松島, 2010)。福岡県の筑後川流域にある多目的ダムでは中干し期に灌漑のための利水放流を実施しないことにより、ダム下流の河川流量が減少している。また、同時に水田からの排水も少なくなるため広い範囲で下流河川の流量が低下する。これを改善するために別の水源が手当てされ代替の放流が試みられている(水資源機構, 2005)。

一方で、中干しの持つ特性を積極的に環境改善に活かす動きも見られる。新潟県では中干期の用水取水の低下の時期にそれに相当する量が浄化用水として使われていた(環境省, 2007)。地球温暖化問題において水田は土壌が還元状態にあり、湿地等と同様に温室効果ガスであるメタンガスの供給源の一つとされている。中干しによるメタンガス発生量削減効果については1990年代半ばから指摘されるようになり、齋藤ら(2004)は常時湛水と比較して中干し期間が長くなるにつれて、メタンガス発生量が減少することを示した。これにより、将来メタンガス発生緩和策として積極的な中干し期間の延長が提案されることが予想される。

### Ⅲ 用水計画における中干し

#### 1 計画基準における中干しの取り扱い

1954年に初めて制定された土地改良事業計画設計基準（農林省農地局，1954）の「水田用水量の決定」の項には中干しについての技術的な言及がなく，測定水田台帳の記載例に使われている程度である。灌漑期間は，代かき，活着期，分けつ期，穂ばらみ期，出穂期，落水期の6期に分割されており，中干しまたは中干しの前後は分類されていない。

その後，策定された計画基準案（農林水産省構造改善局，1978）において必要水量の期別変化の把握は，活着期，中干し前後，中干し以降の減少過程が重要であるとされた。また，標準的期別必要水量パターンが示されており，中干し後～出穂期までの必要水量を1としたときに，田植え期ではほぼ1前後をとること，中干し期及び落水期に向けそれぞれ通減することとされている。また，普通期にピーク取水が現れる時期は一般的には中干し後の再灌水時に来ることが多いと認識されるようになってきた。

改訂された計画基準（農林水産省構造改善局，1993）において「中干し」の用語はFig.1に示す箇所を用いられており，その後大きな変更は加えられていない。

#### 3.3.4.4 ほ場単位用水量 [解説] 3. 普通期ほ場単位用水量

「普通期ほ場単位用水量を用水計画で期別に算定する場合の蒸発散浸透量は，栽培ステージから，活着期又は初期かん水期，中干し期，中干し後（中干しをなければこれら2期を分けつ期1期にする），出穂期以降の，または，全体を1～2期程度とするなど，1～4期に分けることが，事業計画における計算上は合理的といえる。」

「一般に，ピーク蒸発散浸透量は中干し後にくることが多い。」

「以下のような場合に栽培管理用水量が必要となるが，地区の状況に応じて，必要な時期を定める。①中干し後の再灌水あるいは間断かんがい時のかん水」  
「浸透量は，中干しの前後で大きく異なる。」

Fig.1 計画基準における中干しの取り扱い  
Articles related to mid-summer drainage in the manual

以上の様に，現在の計画基準においては，①中干し後に湛水深を回復させるための用水量が必要であること，②中干し後は蒸発散浸透量も増大すること，③中干し期の蒸発散浸透量は他の時期に比べ少ないこと，が示されている。

#### 2 用水計画への中干しの反映

中干しが計画基準もしくは計画基準案で言及されるようになる以前においては灌漑地区において策定される用水計画には中干しによって生じる取水量の低下やその後に生じる取水量のピーク等は考慮されていなかったと推定される。岩崎（1989），志村（1982）は灌漑地区における計画時取水量と現況用水使用実態量が異なることが水管理における問題を引き起こしており，その一つが中干しの普及による中干し後の「大水需要期」の形成であると指摘した。この様に実際の水管理においてはこの需要の取り扱いが一つの課題となっている。

中干しの用水計画における位置づけを示した計画基準案が作成された1978年以降に開始され既に完工した国営農業水利事業を対象として，それぞれの用水計画における中干しの取り扱いを事業誌によって調査した。検討した灌漑地区は14か所である。すべての地区で湛水灌漑を用水計画における水田の灌漑方法としている。また，用水計画において検討された作期が記載されていたのは3地区であったがいずれも中干し期もしくは中干し後という作期は用いられていなかった。

この様に比較的最近計画された灌漑地区においても中干しは用水計画に積極的に取り上げられていない。中干し期による需要量の増減が用水計画に取り上げられにくい理由の一つとしては，湛水していないため減水深等の算定方法が困難であるとともにその中干しを考慮した用水計画事例が少ないことが考えられる。

#### 3 中干し期の水収支に関する研究

既往の研究を概観すると，中干しの進展とともに昭和30年代からは稲作に関する透水の効果についての研究（農林省，1962），昭和40年代以降には圃場排水の観点から研究が行われ，昭和50年前後に入って用水量に関する研究が見られるようになった。

計画設計基準における純用水量の構成要素は，栽培管理用水量，有効雨量，蒸発散量及び浸透量である。豊田ら（1984），渡邊ら（1984，1988a）は中干し期間中に降雨の影響を含まない水田圃場からの表面流出量を計測し，これを栽培管理用水量とした。渡邊ら（1988b）は中干し期を含む生育期間毎の有効雨量を観測し，それぞれの期間で有効雨量率を求めた。その一方で中干し期間中の蒸発散量，浸透量に関する調査はこれまでほとんど行われていない。

中干し直後には再び湛水を維持するための水量が水田圃場に導入されるが，この水量を中干し後に直接計測した例は豊田ら（1984）の例に限られ決して多くはない。また，最近では中干し後に湛水を前提としない間断灌漑が増加している。間断灌漑において再灌水に必要な水量の検討例は知られていない。

中干し後に減水深が増加することについては多くの報告がある。古木ら（1970），佐々木（1975），足立（1979）

は透水性の回復の観点から中干しの前後の減水深を観測し、おおむね中干しにより減水深は増加することを示した。谷口ら(2006)は減水深が中干し直後に大きくなり、その後落ち着くことを示した。

以上は圃場もしくは圃区農区単位の水収支の検討であるが、ある程度の面積を持った灌漑地区における中干し期及びその前後の用水量の検討例は少ない。中干し期は短く、中干し後の間断灌漑と区別が付きにくいこと等がその原因と考えられる。吉井(1984)は滋賀県の灌漑地区で用水量を3期に分けると中期の用水量が少ない原因として中干しの実施を示唆した。三沢ら(1980)は新潟県の3地区の取水量(100ha~300ha)をイネの生育段階に分けて観測し、中干し期に相当する無効分けつ期の日平均取水量が前後の生育段階と比較して少ないことを報告している。

4 灌漑地区の取水量

中干しは水田圃場で実施される灌漑方法であるが、水需給の厳しい灌漑地区においては、その取水は圃場の水需要に応じて実施されることから、中干し実施時期には灌漑地区取水量は一般に低下する。この期間に水の供給を停止して水路の点検やポンプ灌漑地区における揚水機場の停止が行われる地区がある。また、取水量の節水を目的として管理主体が積極的に中干しの実施を推奨する

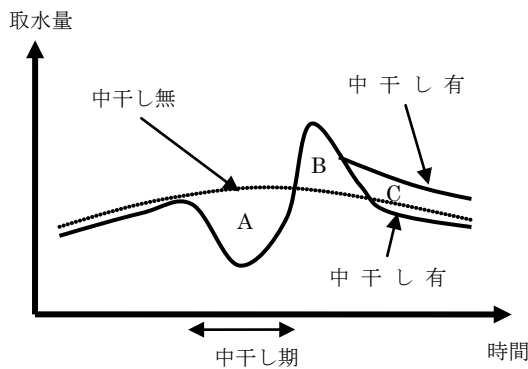


Fig.2 中干しによる取水パターンの変化の概念図  
Effects of mid-summer drainage on irrigation water

地区もある。中干しの実施による灌漑地区の取水パターンの変化の概念図を Fig.2 に示す。中干し時期に取水量が減少(A)する一方、中干し直後には再湛水のために取水量が増加(B)する可能性がある。それ以降においては減水深が増加しない場合(1)と増加する場合(2)の2通りが考えられるが、後者の場合は中干しを実施しない場合と比較してさらに取水量が増加(C)する可能性がある。節水技術としての中干しの評価のためには、この取水パターンの変化とその変化量を明らかにする必要がある。

IV 灌漑地区の取水パターンの分析

1 対象地区の概要と分析方法

大規模灌漑地区における中干し期及びその前後の水管理特性を明らかにするために、全国7地区の事例検討を行った。対象地区の位置を Fig.3 に、概要を Table 1 に示す。地区の選定においては、①大規模灌漑地区(灌漑面積が1,000ha以上)である、②水田灌漑が主体である、③長期間(10年以上)の取水量データが利用可能である、④節水を行ったことがあることを条件とした。利用した資料は、多目的ダムの管理年報(水資源開発公団・水資源機構, 1991-2006)及び農業用ダムの管理年報(農林水産省構造改善局・農村振興局, 1989-2005)である。以下では、灌漑地区を水源条件から農業用ダム掛かり、河川掛かり、多目的ダム掛かりの3つに分類してそれぞれ検討する。

2 分析結果

a 農業用ダム掛かり灌漑地区

A地区は東北地方にあり、受益面積が約9,000haの水田を主体とする灌漑地区である。農業水利事業により水源としてダム及びダムから取水する幹線用水路が建設された。貯水は直接取水されるほか、利水放流により下流に設置された頭首工に供給される。検討期間は資料入手した15ヶ年(1988年~2003年、但し1998年を除く)であり、この検討期間におけるダムからの半旬平均した日取水量を後述する相対取水量で Fig.4 に示す。

Table 1 対象地区の概要  
General features of surveyed irrigation schemes

	A地区	B地区	C地区	D地区	E地区	F地区	G地区
受益面積 (ha)	9,000	15,000	11,000	18,000	3,000	30,000	6,000
主な水源	農業用ダム	河川	河川	多目的ダム	多目的ダム	多目的ダム ため池	多目的ダム 地下水
主な土地利用	水田	水田	水田	水田	水田	水田	水田
位置	東北	関東	関東	中部	中部	中国四国	九州



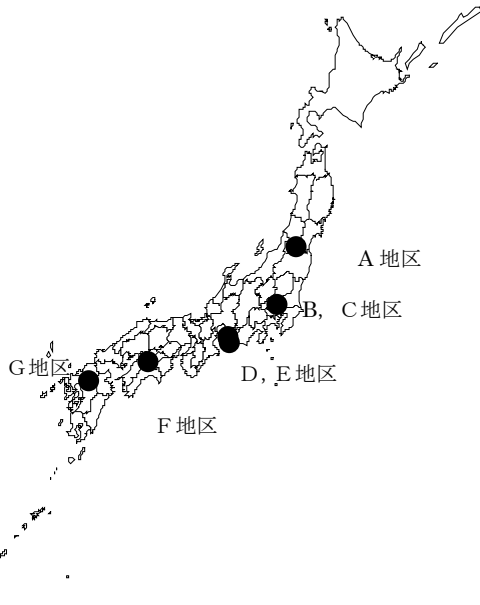


Fig.3 対象地区の位置  
Location of surveyed irrigation schemes

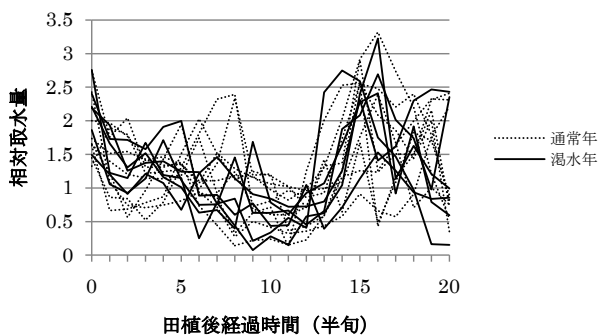


Fig.4 半旬平均日取水量 (A 地区：15年間)  
Water release for irrigation water use at the "A" irrigation scheme

Fig.4 の田植後の半旬数は、田植盛期（田植済みの面積が全面積の 50%に達する日）を含む半旬から数えた値である。田植盛期の値は灌漑地区が所在する県の平年値を用いた。作物統計（農林水産省大臣官房，2010）によると A 灌漑地区が所在する県の田植盛期の平年値は 5 月第 4 半旬であるので、ここでは経過半旬の値は、5 月第 4 半旬を第 0 半旬、5 月第 5 半旬を第 1 半旬、5 月第 6 半旬を第 2 半旬（以降省略）とした。半旬平均日取水量は普通期平均日取水量を 1 とした時の相対値として示す。すなわち、

相対取水量 = 半旬平均日取水量 / 普通期平均取水量である。ここで、普通期平均日取水量は検討期間 15 ケ年の普通期（田植後経過時間が 3 ~ 17 半旬）の日取水量の平均とした。

この灌漑地区では対象期間のうち、1990 年、1994 年、1999 年 ~ 2003 年に渇水調整が実施された。渇水調整が

実施された年を渇水年、それ以外の年を通常年として、渇水年は半旬平均取水量を実線で、通常年の値を点線で示した。各半旬における半旬平均日取水量を渇水年と通常年それぞれの期間で平均した値を全期間（検討対象期間）で平均した値と併せて Fig.5 に示す。以下、ここで算出された一連の取水量を取水パターンと呼ぶ。降雨や気温等の気象要素は年により変動し、これに影響を受け取水量も変動する。渇水年と通常年で平均した取水量は平均的な気象条件下における取水パターンを表しているとなして検討を行う。

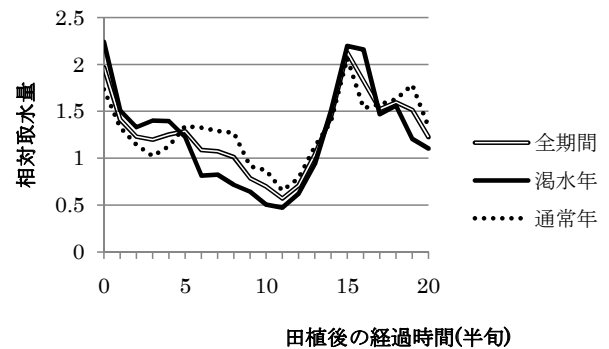


Fig.5 取水パターン (A 地区)  
Averaged irrigation water at the "A" irrigation scheme

通常年では第 9 半旬から第 13 半旬までの 5 半旬にわたって取水量が低下しており、これは中干し期における需要低下を反映していると見ることができる。一方、渇水年においては取水量低下は第 6 半旬から第 13 半旬の 8 半旬にわたって生じている。取水量低下の終了時は渇水年と通常年にかかわらず同じであるが、渇水年の取水量低下の開始時は通常年に比べて 3 半旬早い。本地区の聞き取り調査によると灌漑地区の管理主体は渇水時には中干しの時期にあわせて取水制限を実施する。一般に、稲作において圃場への供給水量が低下する時、その収量低下への影響は分けつ期は幼穂形成期や出穂期前期よりも小さい（農林水産省経済局統計情報部，1982）。これは、利用可能な水量のストックがある場合、被害を回避もしくは最小に抑えるためには、ダムの貯水量を分けつ期より水不足が収量に与える影響が深刻である時期に配分することが望ましいことを意味する。A 地区で実施されている渇水年の中干し時期における取水量低下の期間の拡大は、貯水量の効果的な利用を可能としている。このことから、この地区では中干しは節水技術としても位置づけられていると考えられる。なお、中干し期間の最低取水量は渇水年と通常年では大きく変わらないことから、中干し強度の増大ではなく期間の拡大により取水量を削減していると考えられる。

中干しの実施や中干し期間の拡大による影響をその期間の取水量と中干しをしない年の取水量と比較して評価

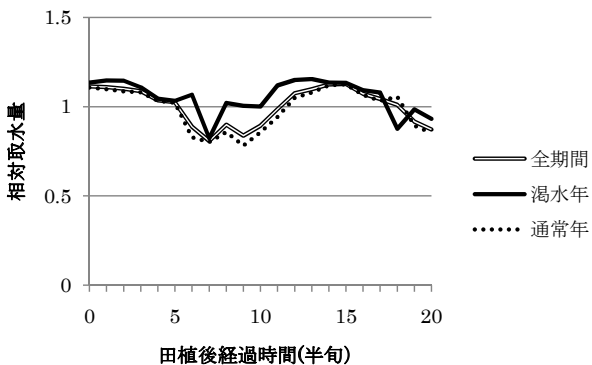
する。中干しを全く行わなかった時の取水量を正確に推定することは難しいが、ここでは中干しを実施しない時は第5半旬（渇水年における中干し開始直前の半旬）の取水量がそれ以降も継続すると仮定する。実際の半旬平均取水量がこの値を下回った時にその差を積算すると、その値は通常年で普通期平均日取水量の6.8日分、渇水年で同じく14.7日分、全期間で同じく9.7日分に相当する。水源であるダム夏季における有効貯水量は普通期平均日取水量の約72日分に相当するので、中干しの実施による取水低下量、言い換えれば取水節水量は通常年で有効貯水量の約1割、渇水年で2割に相当する。

第14半旬以降は渇水年、通常年ともその取水量平均は増加し、第15半旬に田植期に次ぐピークが生じている。この時期の取水量の一部は中干し後の再灌水に用いられていると考えられる。利水安全度を高める貯水池運用においてはその量の推定は重要であるが、これは地区全体の取水量の情報だけでは不十分である。中干しの前後の期間を含む水田圃場の水収支の解明が必要である。

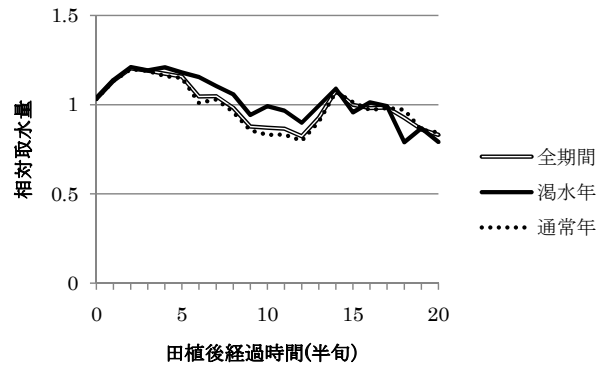
**b 河川掛かり灌漑地区**

B地区及びC地区は関東地方の同一河川から取水する灌漑地区である。受益面積は前者が約15,000ha、後者が11,000haである。いずれも、江戸時代に主要な水路が開削され、数度の施設改良が行われている。元来、貯水池を持たない河川自流取水地区であるが、上流における多目的ダムの建設により、不特定利水放流量の一部を取水する構造となっている。1990年から2005年までのデータを用いて作成した渇水年、通常年及び全期間の取水パターンをFig.6 (B地区) 及びFig.7 (C地区) に示す。両地区では夏季に取水制限が実施された1990年、1994年、1996年、2001年を渇水年とした。

通常年の日取水量の平均値はB地区では前後の時期に比べ第6半旬から第11半旬の間に減少し、C地区では第8半旬から第13半旬の間に減少している。これは中干しの実施に伴う取水量の減少に相当すると考えられる。この期間における渇水年と通常年の日取水量の平均値を比



**Fig.6** 取水パターン (B地区)  
Averaged irrigation water at the "B" irrigation scheme



**Fig.7** 取水パターン (C地区)  
Averaged irrigation water at C irrigation scheme

較するとB地区、C地区とも前者が後者を上回っている。この原因としては渇水年の高温少雨による需要量の増加も考えられるが、一方で渇水年には灌漑地区において中干しの実施が控えられている可能性も示している。

中干しを実施すると中干し後の減水深の増加や中干し直後の再灌水に対応する取水量の確保が必要であると用水計画で示唆されている。これらの取水量が確保できる見通しがなければ中干しは実行できないと考えられる。B地区およびC地区が所在する水系では、数年に1度の頻度で流域内の多目的ダムの貯水量の減少による取水制限が実施された実態がある。この両地区では独自の判断で運用できる貯水池を持たないため、取水制限が一律に中干し終了後の時期に課せられると必要な量を取水できない可能性がある。B地区における聞き取り調査では、管理主体は渇水が予想されるときには中干しの緩和もしくは中止を受益者である農家に要請していることが分かっている。不安定な水源は中干し実施の阻害要因であり、現在でも中山間の棚田水田での中干しを制約していることをII章で示したが、多目的ダムの建設によりある程度河川流量が確保されている河川から取水する大規模灌漑地区においても、不安定な水源による中干しの回避が生じていることが分かる。

なお、中干しの中止や抑制が行われる年は中干しを実施する通常年と比較すると、中干しを実施する時期の取水量が増加する。流域に不特定利水容量を持つ多目的ダムがある場合には、取水量が増加すると、河川流量など他の要素が同一と仮定した場合、ダムからは正常流量を確保するための放流が例年に比べて増加する。両地区では渇水年に中干しを抑制する傾向があることから、流域におけるダムからの放流量は渇水年には渇水現象による増加に中干し抑制によって生じる増加が加わると推定される。一方でA地区の農業用ダムでは渇水年には中干し期間の放流量を減少させて貯留を確保している。不特定利水容量を持つ多目的ダムにおいても、この時期に同じ方法を用いて貯留を確保する可能性はあると考えられる。すなわち、多目的ダム管理者が再灌水における水の

確保を条件に流域の水田灌漑の水利用者に中干しの実施を実現できると放流量を小さな被害で削減できる。但し、これを実施するには関係利水者に中干しの実施により取水量の節水効果を説明する必要がある。

中干し実施による取水量の減少量は、A地区での検討と同様に中干しを実施しないときはそれ以前の取水量が継続すると仮定して算出すると、通常年の平均でB地区で5.2日分、C地区で4.7日分の普通期平均日取水量に相当する。また、この量はこの両灌漑地区の取水地点の上流に位置する多目的ダム群の総不特定利水容量の約13%に相当する。なお、両地区はダムから直接取水するA地区と異なり、多目的ダム群の放流を下流で取水する。取水量の一部はダムからの放流量ではなく流域からの取水量である。このため、取水量の減少量はダムからの放流量とは一致しないが、それを考慮しても中干しの影響は無視し得ない量であると考えられる。

### c 多目的ダム掛かり灌漑地区

D地区は受益面積約18,000ha、E地区は受益面積約3,000haの中部地方に所在する灌漑地区である。両地区は同一河川から取水するが、それぞれ異なる多目的ダムの特定利水を受けている。1990年から2005年までデータを用いて作成した渇水年、通常年及び全期間の取水パターンを、Fig.8 (D地区)及びFig.9 (E地区)に示す。なお、両地区の検討においては10日以上取水制限が実施された1993年、1994年、1996年、2000年、2001年、2002年、2005年を渇水年とした。

取水量パターンに見る2地区の特徴の第1は、普通期において取水量が低下する期間が長いことである。D地区では第3半旬から取水量が低下し始めて第6～9半旬で最低となり、第14半旬にもとの取水量水準に戻る。11半旬において取水量が前後の期間に比べて少ない。E地区は第2半旬から明瞭に取水量が低下し始め、10半旬の間、取水量が前後の時期に比べて少ない。通常中干しは無効分けつ期に実施される。地区内においては生育ステージの差を考慮しても無効分けつ期のみがこの取水量低下期間に相当するとは考えられないため、取水量低下期間に

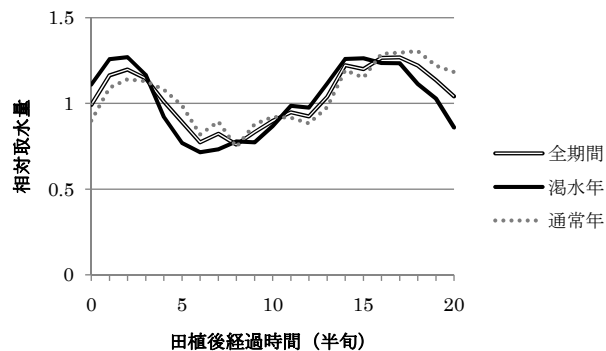


Fig.8 取水パターン (D地区)

Averaged irrigation water at the "D" irrigation scheme

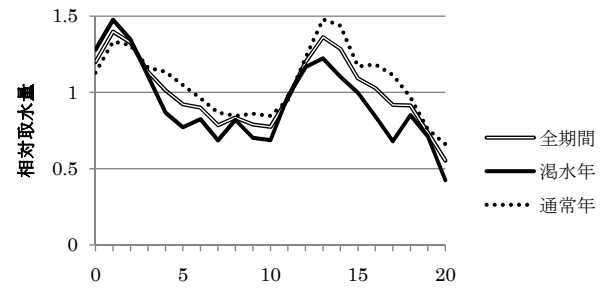


Fig.9 取水パターン (E地区)

Averaged irrigation water at the "E" irrigation scheme

は有効分けつ期及び活着期も含まれていると考えられる。

第2の特徴は渇水年と通常年で取水パターンが大きく相違しないことである。2地区で渇水年の中干し期取水量が通常年より若干少ないなどの細かい違いは見られるが、中干し開始時期が早まったり、中干しに制約がかかる等の渇水に伴う大きな変更は見られない。

両地区が取水する河川では2年に1回以上の頻度で取水制限が実施される等、比較的水需給が厳しい河川である。このため、通常年においても厳密な意味での中干しだけでなく、ある程度取水を制限していると考えられる。なお、E地区では平成3年度から「中干し節水」と名付けられた計画的な取り組みが行われている。渇水の有無にかかわらず、早期中干し節水と後期中干し節水がそれぞれ5日間、Fig.9における第3及び第11半旬の前後に実施されている。この様な栽培管理と矛盾しない節水行動が継続的な取水量の削減に結びついている。取水量減少期の総量をそれぞれ算出すると、D地区で12.8日分、E地区で24.4日分の普通期平均日取水量に相当する。

F地区は中国四国地方にある受益面積約30,000haの灌漑地区であり、多目的ダムの特定利水放流を受けている。1990年から2005年までのデータを用いて作成した取水パターンをFig.10に示す。

F地区は補助水源でもあり貯留施設でもある多数のため池を地区内に持つ地区である。聞き取り調査によると渇水年を除くと中干しは実施している。しかし、その影

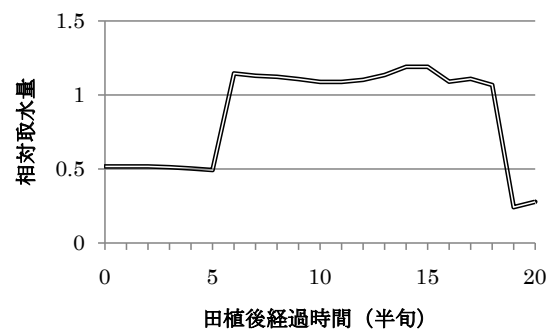


Fig.10 取水パターン (F地区)

Averaged irrigation water at the "F" irrigation scheme

響は普通期の取水量の低下からは見られない。受益地点が広く取水地点から離れていること、受益地内に中間貯留可能な施設が多いことから中干しの需要変動が取水量へ影響していないと推定される。

また、G地区は九州にある受益面積約6,000haの灌漑地区であり、多目的ダムの特定期間を受けている。1990年から2005年のデータを用いて作成した渇水年、通常年及び全期間の取水パターンをFig.11に示す。渇水年

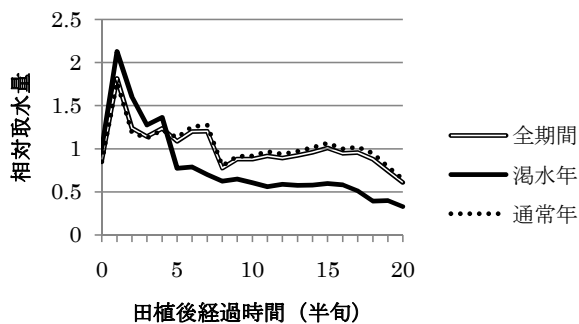


Fig.11 取水パターン (G地区)

Averaged irrigation water at the "G" irrigation scheme

は取水制限が実施された1994年と2000年とした。

通常年では第8半旬にその前の半旬と比較して取水量が急に減少しており、この時期は中干しの開始にほぼ一致する。渇水年では取水量が減少する時期は第5半旬と早まっており、これは渇水年には実質的に中干し開始が前倒しされ、用水節水が実施されていると考えられる。

なお、G地区が水源とする多目的ダムは、その貯水運用方法として原則としてそれぞれの利水者に貯水量を割り当てる通帳方式を採用している。この方式では貯水池への流入量はあらかじめ決められた率で各利水者の貯水量に配分され、利水者に対する放流量は当該利水者の貯水量から差し引かれる。この方式で運用されている多目的ダムは、各利水者からは実質的に単独の利水ダムの様に運用できる。利水者が水管理の徹底などにより放流量をある期間削減した場合、それによって放流されずに貯水池に貯留された水量は、一般の多目的ダムではその一部が当該利水者の将来の利用可能量を増加させるのに対し、通帳方式を採用している多目的ダムでは原則として全量が将来の利用可能量となる。このことから、この方式では利水者の節水の動機付けが高くなる。なお、この地区には多数の地下水利用の揚水機場が設置されており、水不足の時期にはこれらが運転される。渇水年において普通期後半の取水量が少ない理由の一つはこれらの機場の運転である。

G地区の取水量パターンに見られる他の顕著な特徴は、通常年であっても普通期後半に明確な取水のピークが生じていないことである。これについては他地区と比較して次節で検討する。以上の様に、この地区では中干

し後に取水量が元の水準に戻らないため、中干しによる節水量は求められない。但し、渇水年における取水量低下の前倒しによる節水量を通常年の差と見なして求めると7日分の普通期平均日取水量に相当する。

### 3 取水パターンの比較

上述した7地区の取水パターンについての検討をまとめると次のとおりである。

- ①中干し期にはその前後に比べて取水量が低下する。その量は普通期平均日取水量の5日分～24分に相当した。
- ②ダム(貯水池)掛かりの灌漑地区であるA地区、G地区において、渇水年の中干し期取水量は通常年の値に比べて少ない。この減少量は取水量が低下する時期の前倒しによってもたらされている。
- ③河川掛かり灌漑地区であるB地区、C地区では渇水年には中干しが抑制される。これは、中干し後の不安定取水への対応によるものと考えられる。
- ④中干しの実施の有無による取水量の変化の貯水量に対する割合は、A地区で1割～2割、B,C地区では1割強と推定された。

中干しは圃場において実施される灌漑方法である。それを反映した灌漑地区全体の取水量の変動は灌漑期間の総取水量や灌漑地区の水源である貯水量に対して無視し得るものではない。一方、中干しの実施は、事前に予測ができない降雨の有効化等と比較するとそれを計画することが可能であるので、水源管理のための節水技術として有用である。

中干しを節水技術として考えるときには、全期間における水収支、言い換えれば中干し後の需要変動を明確にしておかなければならない。4地区(A地区、C地区、D地区、G地区)の半旬平均取水量の対象期間における各半旬の平均値をまとめてFig.12に示す。これは平均的な取水パターンと考えることができる。

中村(1981)は関東地方における灌漑地区をその取水パターンから5つに分類し、施設と取水可能量と分類の関係を考察した。この分類では4地区はいずれも標準型に該当する。標準型は中干し期に取水量が低下し、その前後にピークがくる取水パターンを持つ。しかし、同じ標準型であってもこの4地区はそれぞれ取水パターンの特徴が異なる。

東北地方にあるA地区では取水低下前の水量より低下終了後の水量の方が高い。中部地方にあるD地区では両方の水量がほぼ同じである。関東地方にあるC地区では低下終了後の水量の方が低下前に比べて低くなり、九州地方にあるG地区では普通期後半には明瞭なピークが見られない。この違いの原因の一つとして中干し後の水田圃場の水管理方法の違いが可能性としてあげられる。

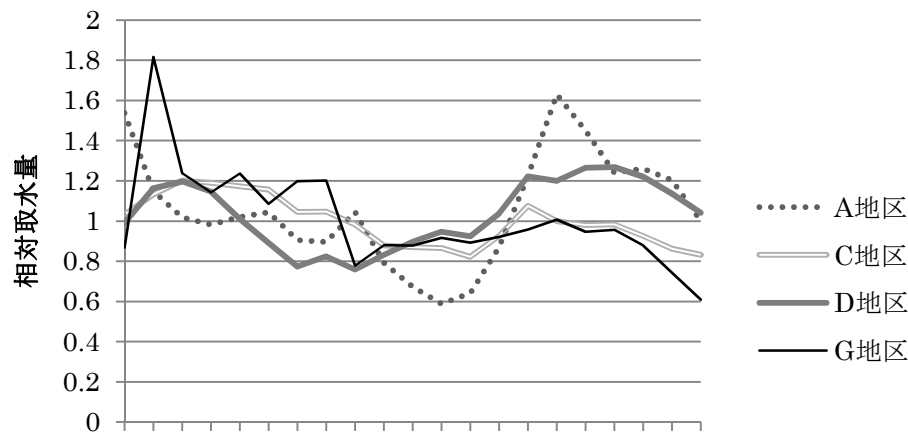


Fig.12 取水パターンの比較 (4地区)  
Comparison of irrigation water withdrawals of 4 irrigation schemes

取水パターンが大きく異なるA地区とG地区では、それぞれの県で普及指導センターもしくはJA等により推奨されている中干し後の水管理はいずれも間断灌漑(間断灌水)である。長ら(1984)によると、九州地方で1980年代において既に広く中干し後の間断灌漑が広まっている。G地区においても間断灌漑は約20年前から継続して実施されている(国土交通省)。現在では中干し後の間断灌漑は全国的に広まっている。但し、A地区がある県においては、通常的气象条件下では間断灌漑が勧められているが、冷害もしくはフェーン現象が予想されるときには湛水すべきことが示されている。この圃場の水管理方法の違いと取水パターンの違いの関係を明らかにするためには、実際に用いられている水管理の詳細な解明が今後必要である。

また、中干し後の減水深増加や最湛水のための栽培管理用水量の発生は、基本的に中干し後の湛水灌漑を前提としている。間断灌漑は管理方法によって湛水灌漑より用水需要を抑えることができる。また、常時湛水させないことから中干し後に再度湛水させるための用水需要も必ずしも発生しないと考えられる。中干し後の水需要の検討のためには間断灌漑や湛水灌漑等の灌漑方法の違いを考慮することが必要である。

## V 結 言

水田灌漑方法には湛水灌漑、間断灌漑、掛け流し灌漑、節水灌漑など様々な方法がある。本報告では中干しが灌漑地区の取水に与える影響に着目して以下の分析を行った。

- ①灌漑方法としての中干しの進展の状況を検討し、将来は高温障害や環境への配慮など、中干しに求められる機能が増えていくと推測した。
- ②用水計画における中干しの位置づけを整理して、実際の地区の用水計画への反映の遅れを指摘した。その理

由の一つとして中干し期間の水収支、中干し後の水需要の変化について未解明の部分が多いことを示した。

- ③中干しが取水パターンに与える影響を明らかにするために全国7箇所の大規模灌漑地区を選定して事例検討を行い、中干し期にはその前後に比べて地区の取水量が低下するが、その量は事例検討地区で普通期平均日取水量の5日分～24日分に相当することがわかった。
- ④事例検討からダム(貯水池)掛かりの灌漑地区では、渇水年には中干し開始時期の前倒しにより取水が抑制されるが、河川掛かり灌漑地区で不安定取水のため中干しが抑制され、取水量が増加することが示唆された。
- ⑤中干しの実施による取水量の減少量の有効貯水量に対する割合は1割～2割となる複数の事例があり、中干しは流域及び地区の水資源管理を行う上で無視できない効果がある。

## 参考文献

- 1) 足立忠司(1979)：田畑輪換と還元田用水量、土壌の物理性、39、30-34
- 2) 長智男・黒田正治・星野孝文(1984)：暖地における水田水管理の特性、農土誌、52(11)、17-22
- 3) 古木敏也・多田敦・林幹直・上村道子(1970)：ホ場整備に伴う透水条件の変化について、農土試報告、8、129-160
- 4) 池橋宏(2005)：稲作の起源、講談社
- 5) 岩崎和巳(1989)：水管理計画、改訂5版農業土木ハンドブック、112-113
- 6) 環境省水・大気環境局水環境課(2007)：「環境用水の導入」事例集-魅力ある身近な水環境づくりにむけて、41-45
- 7) 北村邦彦・喜多威知郎・一恩英二・桶敏(2001)：棚田地区における圃場整備後の田面およびため池

- の水管理, 農土論集, 216, 93-99
- 8) 松島興治郎 (2010): コウノトリの野生復帰 ~ 豊岡の挑戦~, Civil Engineering Consultant, 249, 24-27
  - 9) 三沢真一・鈴木光剛・豊田勝 (1980): パイプライン水田の利水特性について, 新潟大学農学部研究報告, 32, 93-103
  - 10) 水管理研究会編 (1972): 水田の水管理と圃場整備, 地球出版
  - 11) 水資源開発公団・水資源開発機構 (1991-2006): 水資源開発施設等管理年報, 水資源協会
  - 12) 水資源機構 (2005): 平成16年度業務実績報告書, 138
  - 13) 村上利之 (2005): 長野県千曲市姨捨棚田における水収支, 陸水学雑誌, 66, 51-57
  - 14) 永田恵十郎 (1964): 稲作灌漑の農法的性格, 水利科学, 8(1) 113-132
  - 15) 中村良太 (1981): 水田用水元入れ水量の期別変化形の実態-用水系の非定常的管理操作の構造分析 (1), 農土誌, 49(7), 577-582
  - 16) 日本農業研究所・農林水産省農林水産技術会議事務局 (1970): 戦後農業技術発達史第2巻水田作地域編, 日本農業研究所
  - 17) 農業土木学会編 (2003): 改訂5版農業土木標準用語事典, 農業土木学会
  - 18) 農林水産省 (2002): 平成13年産水稲作における高温の影響について, [http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g\\_kiko\\_hendo/h13\\_eikyo/index.html](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_kiko_hendo/h13_eikyo/index.html)
  - 19) 農林水産省大臣官房統計情報部 (2010): 平成20年度産作物統計 (普通作物・飼料作物・工芸農作物)
  - 20) 農林水産省経済局統計情報部 (1982): 農作物被害調査必携-夏作減収推定尺度
  - 21) 農林水産省構造改善局 (1978): 土地改良事業計画設計基準第2部計画第1編用水 (案), 農業土木学会
  - 22) 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)」
  - 23) 農林水産省構造改善局・農林水産省農村振興局 (1989-2005): ダム管理年報 (内地・沖縄)
  - 24) 農林水産省農林水産技術会議事務局 (1979): 戦後農業技術発達史第1巻水田作編, 農林水産技術情報協会
  - 25) 農林省農地局 (1954): 土地改良事業計画設計基準第2部計画第1篇カンガイ
  - 26) 農林省農務局編 (1933): 水稲及陸稲耕種要綱, 大日本農会
  - 27) 農林省農林経済局統計調査部 (1967): 昭和41年度産作物統計 No.9, 農林統計協会
  - 28) 農林省農林水産技術会議事務局編 (1962): 稲作における土壌と水に関する研究
  - 29) 齋藤隆・中山秀貴・横井直人 (2004): 中干し期間の長期落水処理によるメタン発生低減, 東北農業研究成果情報, 300-301
  - 30) 佐々木信夫・千葉満男・平野裕・米沢確・高野文夫・清原悦朗・大川晶・佐々木武虎・岡島正昭・佐々木忠勝・伊藤吉郎・小沢栄二・黒沢順平 (1975): 水田利用の近代化に関する研究, 岩手県立農業試験場研究報告, 第19号, 1-112
  - 31) 志村博康 (1982): 現代水利論, 東京大学出版会
  - 32) 鈴木守 (2003): 農民に学ぶ技術の総合化-多収穫栽培技術-, 昭和農業技術発達史第2巻水田作編, 124-135, 農林水産省農林水産技術会議事務局編, 農林水産技術普及協会
  - 33) 田中市郎 (1970): 灌漑排水, 戦後農業技術発達史第1巻, 456-466, 日本農業研究所・農林水産省農林水産技術会議事務局編, 日本農業研究所
  - 34) 谷口智之・佐藤政良 (2006): 耕起乾田直播水田における実測減水深の分析-茨城県報恩寺地区を事例として-, 農土論集, 245, 9-18
  - 35) 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, 農工研技報, 209, 131-138
  - 36) 豊田勝・鈴木光剛・西出勤・四方田穆 (1984): 開水路水田における水管理の特性, 農土誌, 52(11), 991-998
  - 37) 渡辺紹裕・丸山利輔 (1984): 栽培管理用水の発生とその水量, 農土誌 52(11), 39-44
  - 38) 渡辺紹裕・丸山利輔・三野徹 (1986): 水田圃場における水利用動向と用水量-水田圃場の用水需要に関する実証的研究 (I), 農土論集, 124, 1-9
  - 39) 渡辺紹裕・丸山利輔・三野徹 (1988a): 栽培管理用水量の実態と推定について-水田圃場の用水需要に関する実証的研究 (III), 農土論集, 135, 9-16
  - 40) 渡辺紹裕・丸山利輔・三野徹 (1988b): 水田圃場における降雨有効化の実態-水田圃場の用水需要に関する実証的研究 (IV), 農土論集, 135, 17-25
  - 41) 山際栄司 (1984): 近年における水稲単収水準をめぐって, 農業構造問題研究, 139, 5-35
  - 42) 吉田武郎・増本隆夫・堀川直紀 (2010): 中山間水田の管理状態に着目した小流域からの流出特性の比較, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 56-57
  - 43) 吉井勘一 (1984): 現場管理から見た大規模用水計画とその節水について-愛知川沿岸土地改良区を事例として-, 農土誌, 52(8), 689-697

# A Case Study Evaluating Effect of Mid-Summer Drainage on Irrigation Water

HORIKAWA Naoki, YOSHIDA Takeo and MASUMOTO Takao

## Summary

Mid-summer drainage is one of water management methods for paddy irrigation. It is widely used in Japan, because it stabilizes rice yields. Standing water is drained from paddy fields one month after transplanting and this situation is kept for one to several weeks. Mid-summer drainage can also save irrigation water demand. However, the effect of mid-summer drainage on water demand is not clear. After mid-summer drainage is summarized, case study is implemented. Seven large scale irrigation schemes are selected as target areas. Data of irrigation water is collected and pattern of irrigation water is made. Saved water amount caused by mid-summer drainage is estimated as 5~24 times of average daily irrigation water. This amount is equivalent to 10 % ~20 % of the effective storage of reservoirs and seems important for water resources planning. In water shortage year, water withdrawals of reservoir oriented irrigation schemes are restricted to save water. While, mid-summer drainage is cancelled in irrigation schemes without reservoirs because of avoiding water demand decrease after mid-summer drainage.

**Keywords** : paddy field irrigation, mid-summer drainage, diversion requirement for paddy area, reservoir, water management





## 石川県珠洲市における小規模ため池の施設管理実態

吉迫 宏\*・福本昌人\*・嶺田拓也\*\*・松森堅治\*\*・瀬川徳子\*\*\*

## 目 次

I 緒 言	121	3 日常的な維持管理	124
II 調査地域の概要と調査方法	122	4 施設の点検, 補修・管理	125
1 調査地域の概要	122	5 貯水池, 洪水吐の現況	126
2 調査方法	122	6 ため池利用に関する将来の意向	128
III 調査結果と考察	123	IV 結 言	128
1 ため池の概要	123	参考文献	128
2 利用状況	124	Summary	130

## I 緒 言

ため池は古来より日本各地で築造されてきた農業水利施設である。ため池の築造や改修, 管理は農民自身が長年担ってきた。小規模なため池は今日においても集落, 水利組合(申し合わせ組合), ないし個人による所有と管理が一般的であり, ため池等整備事業で行われる改修などを除き, 小規模ため池の施設管理に関わる作業は基本的に受益農家自身の手によって行われている。

農林水産省は2007年度に農地・水・環境の良好な保全とその質の向上を図る目的で「農地・水・環境保全向上対策」を創設した。「農地・水・環境保全向上対策」は農業者だけでなく地域住民や自治会など地域内の多様な主体が参加する共同作業によって農地・農業用水等の資源や農村環境の保全・向上を図るものであり, ため池の点検や補修, 管理に関する活動項目も含まれている(農林水産省, 2010a)。「農地・水・環境保全向上対策の中間評価」では「圃場周りの用排水路等施設の老朽化が進む中, これら施設の長寿命化に向けた取組の強化が課題」とされている(農林水産省, 2010b)。また, 2009年度には農林水産省によって「地域ため池整備事業」が創設され, 受益農家, 地域住民等で行う防災・減災のための活動を含む事業が行われている(農林水産省, 2009)。

しかし, ため池の管理に関する研究は, 管理組織や管理者, 住民参加, 費用などの人的要素(例えば今田ら,

2009, 鈴木ら, 2003), 防災・減災(例えば堀ら, 2010, 内田, 2008), 水管理(例えば吉迫・小川, 2009, 北村・喜多, 1997), 動植物(例えば嶺田ら, 2009, 渡辺・高村, 2006)などの分野に関しては多くの研究が進められているものの, 受益農家自身が行う点検や補修, 防災・減災のための管理作業などの実態については明らかにされていない。行政機関においても, 小規模ため池は主として集落や申し合わせ組合, 個人が所有・管理することから, 施設管理に関する情報を一元的に把握する体制はとられていない。

小規模ため池において施設の長寿命化に向けた点検や補修・管理, 防災・減災のための管理に関する作業体系や技術マニュアルの作成, 個別技術の開発などを行うためには, 受益農家の手によって行われている施設管理の実態を明らかにする必要がある。そこで, 本報では石川県珠洲(すず)市のため池を対象に, 利用度合や見回りなどの日常的な管理の実態, 将来意向とともに, 従来明らかにされていない長寿命化, すなわち予防保全に資すると考えられるため池管理者や受益農家が行う施設の点検, 補修・管理の実施状況, 並びに防災・減災の視点から見た洪水吐・貯水池の管理現況について, ため池管理者に対するアンケート調査と現地調査に基づいて明らかにする。

なお, 本報は農研機構農村工学研究所の交付金研究と共に, 「いしかわの里山・水と土保全再生に係るモデル地区調査委託事業」((社)農村環境整備センター, 2008～2010年度)によって得られた成果をとりまとめたものである。現地調査に関しては, (社)農村環境整備センターに特段の配慮を頂いた。記して謝意を表す。

\* 農地・水資源部土地資源研究室

\*\* 農村環境部環境評価研究室

\*\*\* 石川県農林水産部経営対策課

平成23年1月19日受理

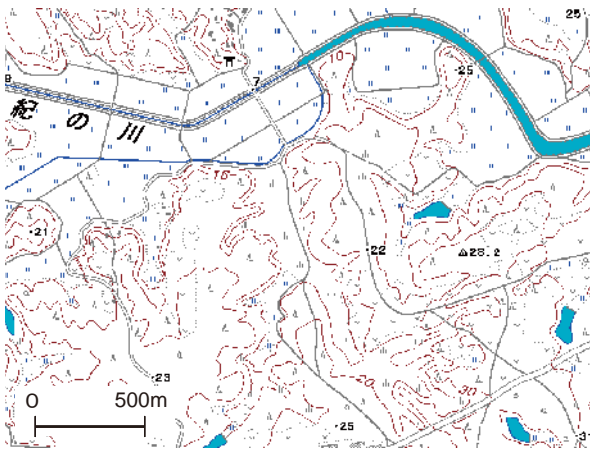
キーワード: ため池, 管理, 点検, 補修

## II 調査地域の概要と調査方法

### 1 調査地域の概要

調査地域である石川県珠洲市は能登半島の先端に位置する。珠洲市一帯は海成段丘が発達しており、また残丘が山地を形成している。国土地理院発行の1/25,000地形図 (Fig.1) や空中写真より、段丘面には国営農地開発事業による開畑地を含む畑地、河川による段丘面の開析により形成された谷底部には大区画水田を含む水田、及び山地や段丘涯には針葉樹または広葉樹からなる林地が展開していることが判読できる。農業地域類型は中間農業地域に区分される。珠洲市の市勢と農業の概略をTable 1に示す。

珠洲市内には、石川県が管理する12本の二級河川が存在する。しかし、低平な山地や丘陵地が海に迫っていることから、いずれの河川とも河川延長は短い。このため古くからため池が築造、利用されている (北陸農政局珠洲開拓建設事業所, 1992)。



この地図は国土地理院発行の1/25,000地形図 (能登飯田) を使用したものである。

Fig.1 珠洲市域の地形とため池, 土地利用 (珠洲市三崎町の一部)  
The topography, irrigation ponds and land use in Suzu City

Table 1 珠洲市の市勢と農業

The topography, irrigation ponds and land use in Suzu City

面積 (km <sup>2</sup> )	247.2	農業経営体数	1,207
人口 (人)	16,722	経営耕地総面積 (ha)	1,483
65歳以上人口率 (%)	40.6	うち、田面積 (ha)	939

※左列は平成20年石川県統計書に基づく2008年10月1日現在の値。  
右列は2005年農林業センサスに基づく値。

### 2 調査方法

#### a 調査の対象と方法

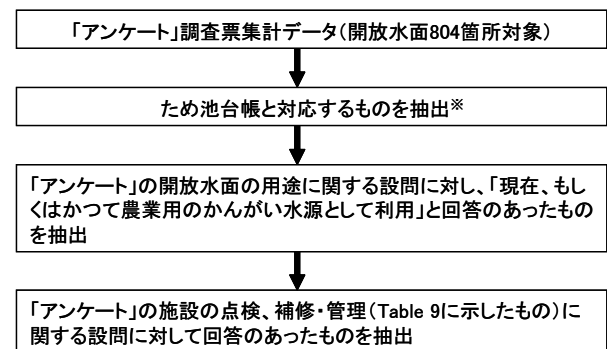
施設管理の実態は「利用状況」、「日常的な維持管理」、「施設の点検、補修・管理」、「貯水池、洪水吐の現況」、及び「ため池利用に関する将来の意向」の5分野を対象

に調査した。このうち「貯水池、洪水吐の現況」は現地調査により、これ以外の分野は石川県農林水産部と農研機構農村工学研究所が共同で行った「ため池の管理に関するアンケート」(2010年1月実施)の分析により実態を明らかにした。加えてため池台帳の分析により、珠洲市内のため池の概要を把握した。

「ため池の管理に関するアンケート」(以下「アンケート」とする)は1/2,500地図 (珠洲市:1975年及び1993年作成)ないし市販の住宅地図 (「ゼンリン住宅地図 石川県珠洲市」:2007年発行)で判読できた開放水面 (804箇所)を調査対象としたものである。ため池管理者への調査票の配付と回答依頼は珠洲市と珠洲市土地改良区の協力を得て行われた (回収は郵送による。有効回答率60.1%)。「アンケート」の対象とした開放水面は現存するため池だけでなく、既に廃止されたため池や防火水槽、個人宅の庭池、養魚池などを多数含んでいる。また、「アンケート」は石川県環境部による「外来生物アンケート」と一体の調査票で共同実施しており、その設問は多岐にわたる上、一部の設問のみ回答がなされた調査票もある。そこで、「アンケート」の分析に用いるデータはFig.2の手順によりため池106箇所分を抽出した。分析対象のため池の内、珠洲市土地改良区が管理するものは4箇所のみで、他は受益農家により管理が行われていた。

「貯水池、洪水吐の現況」は珠洲市を流れる二級河川である紀の川流域において、1/25,000地形図 (国土地理院2009年発行)とため池台帳の双方に記載されているため池25箇所 (うち20箇所は「アンケート」分析の対象)を調査の対象とした。現地調査は2010年3月3日~7日と2010年6月12日~15日に予備調査、2010年8月25日~26日に本調査を実施した。

珠洲市のため池台帳には珠洲市内218箇所のため池が記載されている。ため池台帳の分析はため池台帳にデータの記載がないもの (12箇所)、データの記載があっても所在地の特定ができないもの (12箇所)、「アンケート」対象外のため池 (前述の開放水面として判読できなかったもので、前2者と重複するものを除いた16箇所)、及



※ ため池台帳と対応できるため池においても、ため池台帳上にデータの記載がないもの (12箇所)と堤高15m以上のもの (3箇所)は除外した。

Fig.2 分析データの抽出手順  
The extraction procedure of analysis data

び法令等でダムとして扱われる堤高 15m 以上のもの（3箇所）を除いた175箇所を対象に行った。また、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池についても比較のために分析を行った。

## b 分析項目

### (1) ため池の概要

分析項目はため池台帳の項目の内、ため池の規模を表す「堤高」,「総貯水量」,及び「かんがい受益地」とした。

### (2) 利用状況

分析項目は、「アンケート」の設問の内、「ため池のかんがい水源としての具体的な利用」と「ため池の日常のかんがい水源以外での具体的な利用」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、かんがい水源としての具体的な利用についての設問は2009年の1年間に関して問うたものである。

### (3) 日常的な維持管理

分析項目は「アンケート」の設問の内、「ため池に何らかの用務で出向いた回数」と「堤体の草刈り（作業回数,作業回数）」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、ため池に出向いた回数は2009年の1年間に関して問うたものである。

### (4) 施設の点検, 補修・管理

ため池管理者や受益農家が行う施設の点検, 補修・管理に関しては従来体系的に明らかにされていない。そこで「アンケート」の設問の内、堤体と洪水吐, 取水施設, 貯水池の点検と補修・管理に関する設問を分析項目とし、作業内容と作業回数, 作業者に関する選択肢の回答数を施設別に分析した。

### (5) 貯水池, 洪水吐の現況

分析項目は貯水池内の流木・倒木の状況, 並びに洪水

吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂, 枯れ草等の状況とし、現地調査において目視でこれらを把握した。

### (6) ため池利用に関する将来の意向

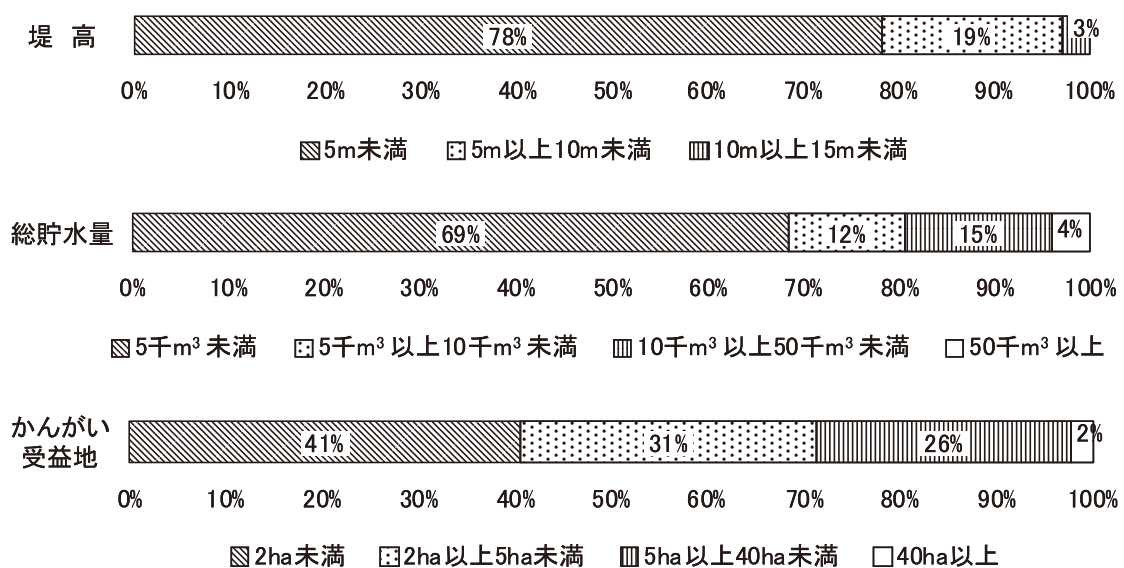
分析項目は「アンケート」の設問である「かんがい水源の今後」と「かんがい水源以外に今後期待する役割」とし、各選択肢の回答数を分析した。

## III 調査結果と考察

### 1 ため池の概要

珠洲市全体のため池に関する堤高と総貯水量, かんがい受益地の規模別割合を **Fig.3** に示す。また、項目別の平均値と中央値を **Table 2** に示す。堤高 5m 未満のものは78%, 総貯水量 5,000m<sup>3</sup> 未満のものは69%であり、老朽ため池研究会（1979）が全国のため池を対象にため池台帳の集計により求めた値である堤高 5m 未満の割合32%と総貯水量 5,000m<sup>3</sup> 未満の割合26%と比べ、珠洲市内のため池は小規模なものが主体であるといえる。一方、規模の大きなため池は少数に留まる。

「アンケート」分析ため池と現地調査ため池に関する各項目の平均値と中央値を **Table 2** 中に示す。珠洲市全体と「アンケート」分析ため池, 現地調査ため池を比較すると、中央値については各項目とも同様の値である。平均値は現地調査ため池の「総貯水量」と「かんがい受益地」において他よりも高い値となる傾向が認められるものの、20%水準（両側検定）によるt検定ではいずれの項目についても珠洲市全体と「アンケート」分析ため池, 現地調査ため池の相互間に有意差は認められなかった。従って、ため池の規模に関しては、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池は珠洲市内のため池を代表するデータであると判断できる。



※「かんがい受益地」は全て水田である（Table 2も同じ）

**Fig.3** ため池の規模別割合（珠洲市全体）

The ratio according to the scale of irrigation ponds

**Table 2** 調査ため池の概要  
The summary of the investigated irrigation ponds

	ため池数	堤高 (m)	総貯水量 (m <sup>3</sup> )	かんがい受益地 (ha)	
珠洲市全体	平均値	175	3.9	10,476	5.8
	中央値		3.5	2,300	2.0
アンケート分析	平均値	106	3.7	13,124	5.8
	中央値		3.5	2,900	2.0
現地調査	平均値	25	3.7	19,308	11.8
	中央値		3.2	3,600	2.0

## 2 利用状況

**Table 3** かんがい水源としての利用状況を示す。「アンケート」分析ため池の内、82%のため池は主たる水源として利用されている。その一方、かんがい水源として利用しないため池は8%に留まる。水稲作の水源としての利用は主たる水源と補助水源を合わせて91%に達するのに対し、畑作物と果樹園の水源として利用されるため池は少数に留まる。なお、水稲作以外の作目のみを対象に主たる水源として使用するため池は存在しない。

**Table 3** かんがい水源としての利用状況  
The use situation as the irrigation source of irrigation ponds

	全用途	水稲作	畑作物	果樹園
主たる水源	82%	82%	14%	4%
補助水源	10%	9%	6%	0%
利用しない (無回答を含む)	8%	9%	80%	96%

※畑作物には水田転作・転換畑を含む

**Table 4** に10年前と比べた利用の変化を示す。この設問はかんがいの水量や頻度、受益面積の変化など、管理者が認識する利用の変化を問うている。61%のため池においては利用の変化は見られないものの、26%のため池においては以前よりも利用度合が低下している。

**Table 4** 10年前と比べた利用の変化  
A change of the use in comparison with ten years ago

利用の変化	割合
以前より使わなくなった	26%
変わらない	61%
以前より使うようになった	7%
わからない・無回答	6%

**Table 5** に日常のかんがい水源以外の利用方法を示す。60%のため池では日常のかんがい水源以外の利用はなされていない (無回答を含む)。10%以上のため池で行われている利用方法は上位から順に「干ばつ時の緊急水源」、「防火用水」、及び「生物の生息場所」である。なお、「干ばつ時の緊急水源」以外の利用、すなわち干ばつ時を含めたかんがい水源以外の目的で利用がなされているため池は27%、日常のかんがい水源以外の利用を含め、

**Table 5** 日常のかんがい水源以外の利用方法  
Usage except the everyday irrigation source

(複数回答)	
利用目的	割合
干ばつ時の緊急水源	19%
防火用水	14%
生物の生息場所	10%
散歩などの憩いの空間として	3%
養魚	3%
釣り (養魚池以外)	2%
全く利用していない (無回答を含む)	60%
その他	1%

全く利用されていないため池は6%に留まる。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池は利用度合の低下傾向は見られるものの、約9割のため池においては水稲作を主としたかんがい水源として利用されているといえる。

## 3 日常的な維持管理

**Table 6** に管理者が何らかの用事でため池に出向いた回数 (2009年) を示す。「アンケート」分析ため池の内、64%のため池で年11回以上、77%のため池で年6回以上の頻度で管理者は利用・管理のためにため池へ出向いている。管理者が全く出向かないため池は6%に留まる。なお、管理者が全く出向かないため池は水稲作の補助水源として使われている1箇所を除き、かんがい水源ない

**Table 6** 何らかの用事でため池へ出向いた回数 (2009年)  
The number of times that went to the irrigation pond

回数	割合
0回	6%
1~2回	8%
3~5回	8%
6~10回	13%
11~20回	15%
20回以上	49%
不明	1%

しかんがい水源以外の利用がなされていない。

**Table 7** に草刈りの回数を示す。59%のため池において年1回以上の草刈りが行われている。なお、「アンケート」では草刈りの回数は「作業の回数」として回数を明示的に問うていること、その一方「実施せず」の選択肢がないことから、草刈りを実施していないため池は「10年以上行っていない」だけでなく「無回答」にも含まれている可能性がある。

**Table 8** に草刈りの作業者の内訳を示す。作業者の割合は受益農家による共同 (分担) 作業による場合が最も多く、次に管理者自身 (家族を含む) による作業、集落

**Table 7** 草刈りの回数  
The mowing number of times

作業回数	割合
10年以上行っていない	1%
数年に1回程度	5%
年1回	12%
年2回	26%
年3～5回	20%
年6回以上	1%
不明	2%
無回答	33%

の共同作業による作業の順が多い。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては大半のため池で管理者は施設の異変を把握する上で十分と考えられる頻度でため池に出向いているといえる。草刈りについても、前述したように大部分のため池はかんがい水源として利用されていることから、多くのため池において水源施設として利用する上で支障ない程度の雑草管理はなされていることが推定される。但し、草刈りの実施は雑草の繁茂度合にも規定されるものであり、雑草の繁茂が取水などの作業や施設管理に支障ない程度であれば、草刈りを実施しないことも当然考えられる。このため、単純に草刈り回数を指標として維持管理の状況を判断することは適当ではない。

**Table 8** 草刈りの作業者  
The worker of the mowing

作業者	割合
受益農家の共同（分担）作業	24%
管理者自身（家族を含む）	22%
集落の共同作業	16%
その他	3%
不明	3%
無回答	32%

#### 4 施設の点検、補修・管理

**Table 9**に「アンケート」分析ため池における点検、補修・管理作業に関する作業内容ごとの実施ため池割合を施設別に示す。

堤体に関しては、30%を超えるため池で「堤体の亀裂や陥没」と「漏水箇所」、「堤体の浸食や崩れ」の点検が実施されている。また10%を超えるため池で「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「安全施設」の点検についても実施されている。補修・管理作業については、10%を超えるため池で「堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し」と「漏水箇所の補修」、「堤体の浸食や崩れ箇所の修復」が実施されている。

洪水吐に関しては、10%を超えるため池で「コンクリー

ト部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「落ち葉、流木の堆積」の点検、並びに補修・管理作業として「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

取水施設に関しては、30%を超えるため池で「樋管など周辺施設の草の繁茂状況」の点検、10%を超えるため池で「樋管の破損状況」と「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」、「落ち葉、流木の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、40%を超えるため池で「樋管など周辺施設の草刈り」、10%を超えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

貯水池に関しては、40%を超えるため池で「貯水状況の確認」の点検、20%を超えるため池で「落ち葉、流木の堆積」と「池内の藻の発生状況」、「池内の土砂の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、20%を超えるため池で「池の水抜き」、10%を超えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

なお、「アンケート」分析ため池において、**Table 9**で分析した項目の点検、補修・管理作業を全く実施していないため池は9%に留まる。

**Table 10**に点検と補修・管理作業の作業回数を施設別に示す。点検を1回以上実施しているため池の割合は高い順に堤体で50%、貯水池と取水施設で43%、洪水吐で34%である。

**Table 11**に点検と補修・管理作業の作業者の内訳を施設別に示す。洪水吐の補修・管理作業において「受益農家の共同（分担）作業」の割合が低いことを除くと、各施設とも点検、補修・管理の作業者の割合は「管理者自身（家族を含む）」と「受益農家の共同（分担）作業」、「集落の共同作業」で概ね同比率となっている。

これらの結果から、約9割の「アンケート」分析ため池においては、何らかの施設の点検、補修・管理に関する作業が行われていることがわかる。この中で、「漏水箇所」や「堤体の亀裂や陥没」、「堤体の浸食や崩れ」、「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」などの点検、補修・管理については、実施割合が高いことや内容から考えてため池を利用する上で直ちに補修等の対応が必要となる施設の異常だけではないと考えられ、通常の利用においては支障のない軽微な施設の劣化や破損についても対象としている可能性が高い。農業水利施設の予防保全は劣化等による施設の性能低下が許容範囲を超える前に適切な補修等の対策を行い、施設の長寿命化を図るもの（機能保全における性能設計入門編集委員会、2008）であることから、ため池の各施設においても受益農家の手によって慣行的な維持管理を通じて予防保全的な対策が行われている可能性、また現在実施されている補修・管理を基本に、より確実、広範囲な予防保全を行い得る可能性は存在するものと考えられる。今後、管理者や作業を行う受益農家に対する聞き取り調査等を行い、点検と補修・管理に関するより詳細な作業

内容を明らかにする必要がある。

### 5 貯水池, 洪水吐の現況

**Table 12** に貯水池内の流木・倒木の状況を示す。現地調査ため池の内、40%のため池で貯水池内に流木・倒木が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口に漂着した流木の例を **Fig.4** に示す。

**Table 13** に洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ

草等の状況を示す。軽度のものを含めれば洪水吐内で25%、流入口付近で54%のため池において、洪水吐を流下する洪水の通水を阻害しうる雑草の繁茂、枯れ草等が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口付近に繁茂する雑草の例を **Fig.5** に示す。

なお、貯水池内の流木・倒木と洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の両方、ないしはどちらか一方が見られたため池は現地調査ため池の80%である。

**Table 9** 点検、補修・管理に関する作業内容別の実施ため池  
The ratio of irrigation ponds about check, repair, the management

(複数回答)

	堤 体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理
A	36%	14%	4%	2%	3%	2%	1%	1%
B	37%	16%	—	—	—	—	—	—
C	30%	12%	—	—	—	—	—	—
D	16%	3%	18%	1%	14%	0%	0%	0%
E	3%	0%	7%	0%	1%	0%	0%	0%
F	3%	2%	2%	3%	1%	4%	8%	9%
G	15%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
H	7%	8%	5%	8%	30%	42%	0%	2%
I	1%	0%	—	—	17%	2%	0%	0%
J	4%	1%	16%	14%	10%	12%	22%	16%
K	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
L	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
M	—	—	—	—	—	—	21%	8%
N	—	—	—	—	7%	8%	45%	24%
O	—	—	—	—	—	—	21%	5%
P	1%	0%	1%	0%	1%	0%	1%	1%
実施せず	32%	49%	56%	68%	31%	43%	28%	43%
不明	2%	16%	4%	9%	12%	4%	6%	12%

記号	作業の内容	
	点 検	補修・管理作業
A	漏水箇所	漏水箇所の補修
B	堤体の亀裂や陥没	堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し
C	堤体の侵食や崩れ	堤体の侵食や崩れ箇所の修復
D	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの補修
E	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞の埋め戻し
F	ゴミの不法投棄	ゴミの回収
G	安全施設(柵や看板が壊れていないか)	安全施設(柵や看板など)の補修
H	樋管など周辺施設の草の繁茂状況	樋管など周辺施設の草刈り
I	樋管の破損状況	樋管の補修
J	落ち葉、流木の堆積	落ち葉、流木の除去
K	機械部分の動作確認	機械部分への注油
L	機械部分の損耗	機械の部品等の交換
M	池内の藻の発生状況	池内の藻刈り
N	貯水状況の確認	池の水抜き
O	池内の土砂の堆積	池内の泥上げ・泥吐き
P	その他	その他

**Table 10** 点検と補修・管理の作業回数  
The number of times of check and repair, the management

	堤 体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理
10年以上行っていない	1%	2%	1%	1%	1%	2%	1%	1%
数年に1回程度	5%	4%	4%	4%	5%	4%	3%	6%
年1回	20%	11%	16%	8%	14%	11%	10%	8%
年2回	14%	5%	8%	4%	12%	10%	10%	6%
年3～5回	10%	7%	8%	4%	5%	9%	11%	9%
年6回以上	6%	1%	2%	2%	12%	4%	12%	5%
実施せず	32%	48%	55%	68%	31%	43%	29%	41%
不明	12%	22%	6%	9%	20%	17%	24%	24%

**Table 11** 点検と補修・管理の作業者  
The worker of check and repair, the management

	堤 体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理	点 検	補修・管理
管理者自身(家族を含む)	17%	14%	14%	11%	23%	20%	19%	20%
受益農家の共同(分担)作業	20%	11%	10%	3%	25%	16%	21%	12%
集落の共同作業	19%	19%	11%	11%	15%	15%	21%	19%
その他	4%	3%	4%	3%	2%	2%	4%	4%
実施せず	32%	48%	55%	68%	31%	43%	29%	41%
不明	8%	5%	6%	4%	4%	4%	6%	4%

**Table 12** 貯水池内の流木・倒木の状況  
The situation of driftwood and the fallen tree in the reservoir

状 況	割 合
問題なし	60%
流木・倒木あり	40%



**Fig.4** 洪水吐流入口に漂着した流木  
The driftwood in spillway

**Table 13** 洪水吐の状況  
The management situation of the spillway

状 況	洪水吐内	流入口付近
問題なし	75%	46%
雑草の繁茂、枯れ草等(軽度)	4%	25%
同上(通水を阻害)	21%	29%

Table 9 に示したように取水施設で「樋管など周辺施設の草刈り」を行うため池の割合は42%なのに対して「落ち葉、流木の除去」を行うため池の割合は貯水池で16%、洪水吐で14%に留まる。従って、これら流木・倒木と雑草・枯れ草等の除去は少なくないため池管理者と受益農家にとって作業すべき事柄として意識されていない、もしくは意識されていても労力面などの理由で実施できていないと考えられる。流木・倒木や雑草・枯れ草等の除去が行われていないため池においても、多くのため池では現地調査において堤体の草刈りは適切に行われていると判断できた。従って、草刈りなどの慣行的な



**Fig.5** 洪水吐流入口付近に繁茂する雑草  
The weed in front of the spillway

維持管理は適切に行われていても、施設管理上の改善の余地があるため池は多数存在すると考えられる。

地球温暖化に伴って生じる降雨形態の変化に対しては、ため池についても洪水吐の排水能力の不足が懸念されている（農林水産省，2008）。貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等は単純に洪水吐の排水能力を低下させるだけでなく、降雨形態の変化に伴って懸念される降水の極値現象の変化、すなわち既往の観測値を超える豪雨時に洪水吐の閉塞、ひいては堤体越流による堤体の決壊を引き起こす原因となるおそれがある。ため池利用上の直接的な問題を生じていない場合においても、これら流木・倒木や雑草の繁茂、枯れ草等は豪雨時の災害リスクの軽減のために除去することが望ましい。今後、これらの除去に対する管理者への啓蒙や除去作業に対する支援を行う必要があると考えられる。

## 6 ため池利用に関する将来の意向

**Table 14** にかんがい水源としての今後の意向を示す。「アンケート」分析ため池の内、63%のため池で管理者は現状維持を望んでいる。一方、ため池の廃止を望む管理者は1%、公的機関などへの管理の委譲を望む管理者は6%に留まる。

**Table 14** かんがい水源としての今後の意向  
Future intention as the irrigation source

選 択 肢	割 合
現状のままでよい	63%
かんがい時の水源としてもっと活用したい	14%
干ばつ時の緊急水源として活用したい	8%
かんがい水源として管理することが困難なので、公的な機関などに管理を委ねたい	6%
かんがい水源として利用しないので、つぶしたい（埋めたい）	1%
その他	4%
不明	4%

**Table 15** にかんがい水源以外の役割への期待を示す。29%のため池で生物生息の場としての役割、27%のため池で防火用水としての役割が求められているものの、45%のため池ではかんがい水源以外の役割は求められていない。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては当面現状の利用と施設管理が維持されるものと考えられる。しかし、高齢化と人口減少、水田面積の減少などは珠洲市においても進行しており、将来を考えた場合には維持管理の困難を来したため池に対する対応策が必要となることが想定される。

**Table 15** かんがい水源以外の役割への期待  
Future intention except the irrigation source

選 択 肢	割 合
生物の生息場所としての役割	29%
防火用水としての役割	27%
散歩など憩いの空間としての役割	8%
災害や洪水防止としての役割	8%
養魚池としての役割	4%
釣り場所としての役割	3%
その他	6%
かんがい水源としての役割以外は求めない	45%
不明	6%

## IV 結 言

小規模ため池の施設管理の実態を明らかにするために、石川県珠洲市において106箇所のため池を対象としたアンケート分析と25箇所のため池を対象とした現地調査を行った。アンケート分析ため池においては、①約9割のため池は水稲作を中心にかんがい水源として利用されていること、②大半のため池では、高い頻度で見回りが行われていること、③ため池の廃止や公的機関などへの管理の移譲を望む管理者は少ないこと、④特に、従来明らかにされていない長寿命化、すなわち予防保全に資すると考えられるため池管理者や受益農家が行う施設の点検、補修・管理の実施状況に関して、約9割のため池で堤体や洪水吐、取水施設、貯水池に関する何らかの点検と補修・管理に関する作業が行われていること、等を明らかにした。その一方、現地調査ため池では、⑤防災・減災の視点から見た洪水吐・貯水池の管理現況として、8割のため池で慣行的な維持管理の範囲を越えると考えられる貯水池内の流木・倒木と洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂等の両方、ないしはどちらか一方が見られたことを明らかにした。また、これらの結果を踏まえ、①ため池の各施設においても受益農家の手によって慣行的な維持管理を通じて予防保全的な対策が行われている可能性が考えられること、②豪雨時の災害リスクの軽減の観点から貯水池や洪水吐の管理には改善の余地があること、等を考察した。

## 参考文献

- 1) 北陸農政局珠洲開拓建設事業所(1992): 珠洲事業誌, 22-23, 北陸農政局珠洲開拓建設事業所, 石川
- 2) 堀 俊和・毛利栄征・松島健一・有吉 充(2010): 豪雨リスクを考慮したため池の減災対策, 水土の知



- (農業農村工学会誌), 78(9), 15-19
- 3) 今田美穂・青柳みどり・渡辺貴史・高村典子(2009):  
ため池の管理組織形態と存続をめぐる費用負担の実態, 農村計画学会誌, 27(論文特集), 239-244
  - 4) 機能保全における性能設計入門編集委員会編  
(2008): 機能保全における性能設計入門, 142-143, 農業農村工学会, 東京
  - 5) 北村邦彦・喜多威知郎(1997): 石川県能登地域における中山間ため池地帯の水管理, 農業土木学会論文集, 188, 145-152
  - 6) 嶺田拓也・小出水規行・石田憲治(2009): 水田における冬期湛水の導入による持続的な多面的機能の発揮—宮城県大崎市仲萌地区の生物相保全機能を事例とした考察—, 農村計画学会誌, 27(論文特集), 335-340
  - 7) 農林水産省(2008): 農業農村整備における地球温暖化対応策のあり方, <http://www.maff.go.jp/j/nousin/keityo/kikaku/pdf/data1-2.pdf>
  - 8) 同上(2009): 地域ため池総合整備事業(新規), [http://www.maff.go.jp/j/aid/hozyo/2009/nousin/pdf/nouson0\\_55.pdf](http://www.maff.go.jp/j/aid/hozyo/2009/nousin/pdf/nouson0_55.pdf)
  - 9) 同上(2010a): 農地・水・環境保全の向上対策のために—農地・水・環境保全向上対策の取り組み方—, [http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/nouti\\_mizu/pdf/pam4.pdf](http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/nouti_mizu/pdf/pam4.pdf)
  - 10) 同上(2010b): 農地・水・環境保全向上対策の中間評価, <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/kankyo/pdf/100913-02.pdf>
  - 11) 鈴木隆善・河合宏夫・米村 誠・西島信一(2003): 住民参加によるため池の保全・管理体制づくり, 農業土木学会誌, 71(10), 921-924
  - 12) 内田和子(2008): ため池—その多面的機能と活用—, 139-153, 農林統計協会, 東京
  - 13) 渡辺貴史・高村典子(2006): 兵庫県東播磨地域における生物保全に対するため池管理者の意識, 農村計画学会誌, 27(論文特集), 353-358
  - 14) 吉迫 宏・小川茂男(2009): ため池における利水容量の転用による洪水調節容量の創出—東広島市六道池における検討—, システム農学, 25(1), 63-70

# The Actual Conditions of The Management of Small Irrigation Ponds in Suzu City, Ishikawa Prefecture

YOSHISAKO Hiroshi, FUKUMOTO Masato, MINETA Takuya,  
MATSUMORI Kenji and SEGAWA Noriko

## Summary

To clarify the current status of the management of small irrigation ponds, a survey result was analyzed and a field study was conducted in Suzu City, Ishikawa Prefecture. The analysis showed that for the reservoirs in the city, many of which are small, inspections, repairs and maintenance of dam bodies, flood spills, intake works and reservoirs have been conducted (management practices contributing to the long life of facilities) as well as patrols and mowing (routine management practices). On the other hand, it also showed that management of reservoirs and flood spills, which contribute to the prevention of disasters in times of heavy rain, has not necessarily been paid attention to. Considering the attitude expressed in terms of the future use of reservoirs, it was concluded that for the time being, it would be possible to maintain the current management level. Furthermore, based on the current status of the management of reservoirs in the city, the future direction toward more advanced and systematic facility management, which aims at extending the life of the facilities and reducing disasters, was discussed.

**Keywords** : irrigation pond, maintenance, check, repair

# Feasibility Study on Producing Domestic Biofuels from Agricultural Biomass in Japan

UEDA Tatsuki\*

## Contents

I	Introduction	131
II	Life cycle assessment (LCA)	132
1	Methodology	132
2	Results	138
III	Cost analysis	143
1	Methodology	143
2	Results	143
IV	Biofuel production potentials across Japan	145
1	Scenarios	145
2	Estimated potentials	146
V	Discussions and conclusions	147
	References	147
	Summary (in Japanese)	151

## I Introduction

Following recent increases in energy demands from large emerging economies, it is now widely recognized that the current global trends in energy supply and consumption are unsustainable, both economically and environmentally (IEA, 2008). Mankind is thus facing a major challenge of developing a low-carbon, environmentally-friendly, yet reliable and affordable, system of energy supply.

Bioenergy could contribute to this challenge because of its renewable and low-carbon nature. In particular, global production of liquid biofuels is significantly increasing in recent years. It had tripled between 2002 and 2005, to attain around 38 billion L of bioethanol mainly in Brazil, USA and China, and over 3 billion L of biodiesel mostly in Europe (OECD/IEA, 2007).

On the other hand, the world is increasingly aware of negative impacts of biofuel productions on world agriculture and food security (FAO, 2008). This is because the world energy markets are far bigger than the food markets, and therefore the increasing demand for energy crops (feedstock) could potentially overwhelm the demand for food crops. For instance, sharp increases in global food prices in 2008 were partly attributed to the increases in biofuel productions (FAO, 2008). Besides, growing feedstock productions have provoked widespread concerns for associated land-use changes (i.e. conversions of natural lands into farmlands), and subsequent negative impacts on land and water resources and biodiversity (FAO, 2008). For instance, it has been criticized that biofuel productions caused, either directly or indirectly, conversions of natural rainforests into energy crop plantations in some tropical countries.

The above backgrounds would give rationale for investigating into the possibilities of producing domestic biofuels in Japan for three reasons. First, farmland resources in rural Japan are now underutilized: around 0.38 million ha of

---

\* Laboratory of Farmland Engineering, Department of Land and Water Resources

Received: 1 December 2010

Keywords: Agricultural residues, Bioenergy, Bioethanol, Biomass, LCA

farmlands (or about 10% of the total) remained fallow or abandoned (Census of Agriculture and Forestry 2005 (MAFF, 2010)). Such farmlands could be employed for energy crop cultivation without changing current food production potential. In addition, most of agricultural and forestry residues remains underutilized at present. Therefore, biofuels could be produced at a large scale in Japan without causing much land-use change. Second, Japan depends heavily on imported fossil resources to drive its economy, and hence struggles to increase the energy self-sufficiency. Japan's energy mix in 2003 was 50% of oil, 20% of coal, 14% of natural gas and 9% of nuclear energy (METI, 2006), and virtually all of the raw materials were imported from abroad. The Japanese government therefore envisages increasing its energy self-sufficiency by promoting renewable energies which could be supplied domestically. Third, under the Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Japan is obliged to cut greenhouse gas emission by 6% compared to the 1990 level. Although every sector in Japan is now struggling to reduce its part of emissions, additional countermeasures are awaited in order to meet the goal of the Kyoto Protocol.

As one of the possible solutions to meet these challenges, biofuel production has been paid increasing attentions in recent years. Accordingly, in February 2007, the Japanese Government established a plan to expand domestic biofuel production, with a goal of replacing 10% of Japan's gasoline consumption (roughly equivalent to 6 million kL/year of bioethanol) by 2030, by employing domestic energy crops as well as agricultural and forestry residues (MAFF, 2007).

In order to formulate detailed plans to achieve such a goal, quantitative analyses and discussions based on actual circumstances surrounding Japanese agriculture are essential. However, whereas a number of studies have evaluated energy balances and costs of biofuels in USA and Europe (e.g. Hill et al., 2006; Hammerschlag, 2006; Shapouri et al., 2002; Pimentel and Patzek, 2005; ETSU, 1996), such studies are still few in Japan. For instance, Saga et al. (2008; 2010) demonstrated that a positive energy balance could be achieved in bioethanol and electricity productions from rice straw. Yanagida et al. (2010) conducted detailed cost analyses on bioethanol using rice straw, and found the costs depended on various process efficiencies. Although their studies provided useful information, the analyses were limited to bioethanol from rice straw. By contrast, Ueda (2006; 2008) conducted life cycle assessment (LCA) on energy balance and greenhouse gas emission, as well as cost analysis, on several potential energy crops and rice straw produced in Japan, but his arguments were sometimes based on rather ideal assumptions on crop yields as well as the conversion efficiency of ligno-cellulosic bioethanol.

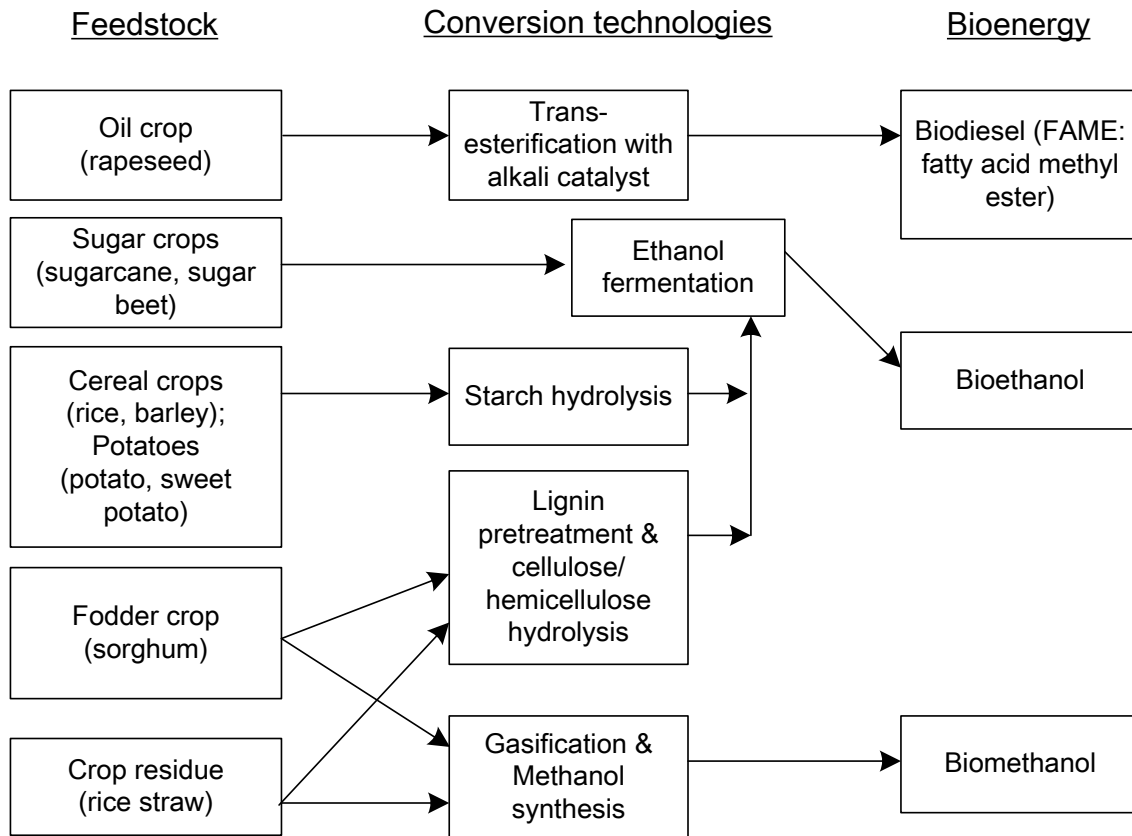
The present study therefore aims at investigating the feasibilities and potentials of producing biofuels from several sorts of agricultural biomass in Japan by following the approach of Ueda (2008), but employing more realistic statistics and data as far as possible. Following Ueda (2008), analyses are focused on energy balance, greenhouse gas emission and production cost. These factors are selected because any biofuel production should at least produce positive energy and reduce some greenhouse gas: otherwise it may end up in wasting, rather than saving, fossil fuels, and degrading the environment. Moreover, economic viability also matters for actually disseminating biofuels, although simple cost analyses may often ignore such externalities as enhancement of rural employment and conservation of farmland resources, which are important issues in Japan. It should be noted that, although the author tries his best to collect realistic, actually demonstrated data as far as possible, some calculations still have to be done on various assumptions, as commercial-scale biofuel productions are yet to be materialized in Japan so far.

## II Life cycle assessment (LCA)

### 1 Methodology

#### a Scope of study

**Fig.1** shows feedstock for biofuel production, which comprises several energy crops and rice straw, with associated conversion technologies and bioenergies, which are examined in this study. (Sorghum and rice straw are classified here as ligno-cellulosic biomass.) All the crops in **Fig.1**, including ones for tropical, temperate and cold climates, are currently cultivated somewhere in Japan for food or animal feed, thanks to an extensive geographical range of the Japanese archipelago. It is assumed that all the energy crops are cultivated on dedicated farmlands (mainly fallow lands), while rice straw is collected at ordinary paddy fields which regularly produce rice for food.



**Fig.1** Feedstock, conversion technologies and bioenergy examined in this study

#### b Functional units

The functional unit of the LCA is “1 GJ of bioenergy produced”. However, within the crop production inventory (mentioned below), the functional unit is set as “crop production on 1 ha of farmland”.

#### c System boundary and allocation

The system boundary of the LCA is cultivation of energy crops; their transportation from farms to conversion facilities; conversion from crops to biofuels; and transportation of biofuels to fuel-supply stations. Exceptionally, a boundary of the “rice straw” inventory only includes collection of straw on farms, its transportation, and application of chemical fertilizer that compensates the nutrient removed with the straw (Ohta, 2007; Ueda et al., 2007), but excludes cultivation of rice itself. (It should be noted, however, preparation of rice straw in this way may later be referred to as “cultivation” alongside the other crops to simplify the terms.) Such an approach to system boundary is similar to a previous study on corn stover ethanol (Sheehan et al., 2004).

Within these boundaries, two life cycle inventories (LCI) are created and interconnected: i.e. “crop production” and “energy conversion” LCIs, both of which also include relevant transportation phases (**Fig.2**). Production of bioenergy could simultaneously produce various byproducts, such as process residues and wastewater. In this study, however, energy consumption or greenhouse gas emission is not allocated to these byproducts, because the demands for them have not been well established in Japan so far.

#### d Data collection

Ueda (2008) earlier compiled the above-mentioned two LCIs, which is basically followed in this study. Nevertheless, this study updates the information on the following points:

1. The yields of energy crops are drawn from the statistical database of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, instead of those of experimental stations. This would make the analytical results more representative of ordinary farmlands across Japan.
2. Some data on inputs for crop cultivation are updated after Shimizu et al. (2009).

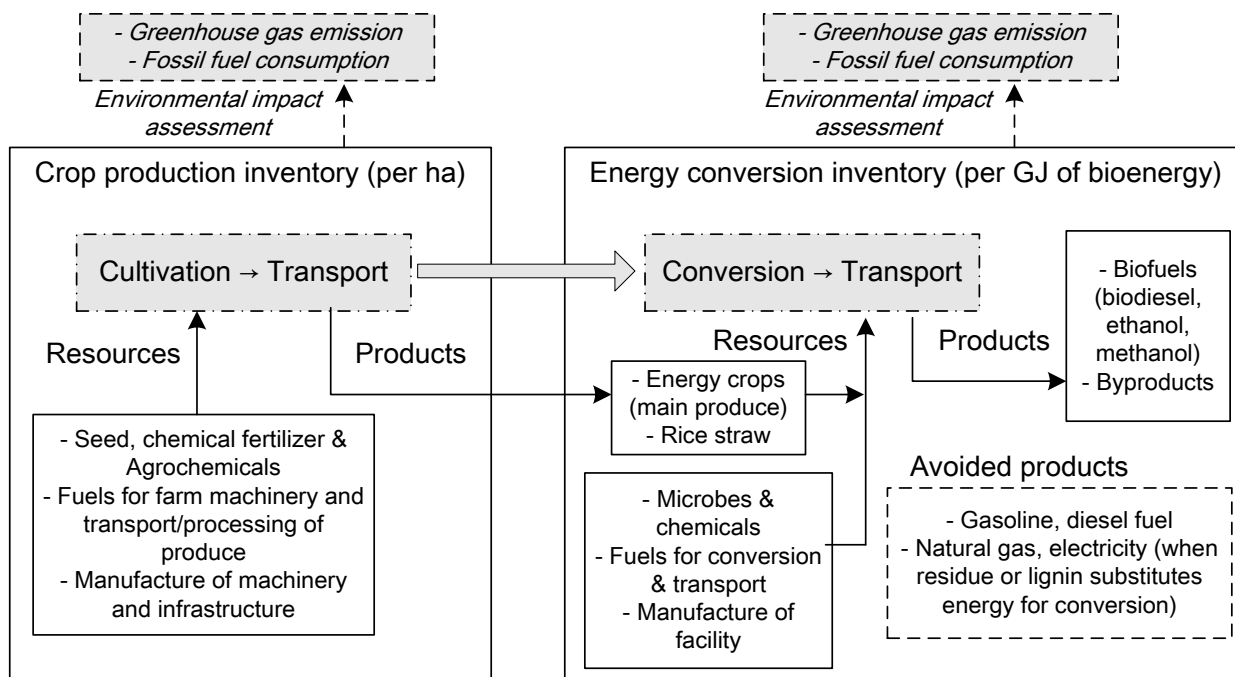


Fig.2 Outline of the life cycle inventory

3. Some data regarding ethanol production from rice straw are updated after JARUS (2010).

4. Assumptions for the two scenarios (explained in Section II-1-e below) were simplified.

Outlines of the LCIs and LCI analyses for this study, including the above points, are described below. For further details, Ueda (2008) should be consulted.

#### (1) Data on crop production

Data on yields of energy crops are collected from the statistical database of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (MAFF, 2010). The analyses are therefore confined to the crops for which such data are provided (**Table 1**). **Table 1** shows the average yields of all regions where the relevant crops are cultivated, and of the last 5 years in which statistics are available. The yield of rice straw is assumed to be 80% of the amount produced at ordinary paddy fields (**Table 1**), as 80% of them is not positively utilized at present (MAFF, 2005).

Data on fuel inputs for crop cultivation are mainly drawn from Shimizu et al. (2009). Data on chemical fertilizer inputs are collected from reports of experimental stations across Japan, as the LCA needs quantitative data based on the ingredients (e.g. nitrogen and phosphorous). Those stations usually follow standard amounts of fertilizer inputs when they test their varieties. Data on other inputs for crop cultivation (e.g. seeds and agrochemicals) and crop processing were supplemented by NIAES (2003) and other sources.

As for the manufacture and maintenance of agricultural machinery, irrigation facilities and agricultural buildings, it is assumed that these operations consume a sum of 1538 MJ of primary energy per 1 ha of farmland per year (Hill et al., 2006) for each crop. This is a rather simplified assumption neglecting complex nature of Japanese agricultural systems. (For instance, it is not simple to allocate energy consumption for building and maintaining irrigation canals, which may be used for both food and biofuel productions.) However, as energy crop production has not been widespread in Japan, detailed analyses on this issue will be left to future studies.

Regarding greenhouse gas emission from farmland soils, it is assumed that nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) gas is emitted at 0.029kg (from upland field) or 0.024kg (from paddy field), when 1 kg-N of nitrogen fertilizer is applied onto the farm (MOE, 2003). In addition, 32 kg/ha of methane gas is thought to be emitted in paddy fields (MOE, 2003; IPCC, 1996), which applies to a case of rice production only.

**Table 1** Main data on crop production and energy conversion efficiency

	Unit	Rapeseed	Sugarcane	Sugar beet	Rice	Barley	Potato	Sweet potato	Sorghum	Rice straw
Biofuels <sup>a</sup>		BDF	ET (sugar)		ET (starch)				ET (ligno-cellulosic) / MT	
<b>Products (Outputs) and efficiencies</b>										
Crop yield <sup>b</sup>	t/ha	2.1	61.7	63.6	5.2	3.1	44.4	24.7	15.3	4.2
Oil/sugar/starch content	%	45.8	15.0	17.7	73.8	76.2	22.5	29.1	–	–
Biofuel yield <sup>c</sup>	%	90.0	79.9	79.9	81.0	81.0	86.1	86.1	–	–
Gross biofuel production per feedstock <sup>d</sup>	L/t	472	78.0	92	430	444	139	180	145 (565)	145 (488)
Gross biofuel production per farmland <sup>d</sup>	kL/ha	0.98	4.78	5.82	2.25	1.36	6.19	4.46	2.21 (8.63)	0.61 (2.06)
<b>Resources (Inputs)</b>										
Ammonium nitrate (as N)	kg/ha	100	162	116	120	150	120	36	320	21
Phosphate (as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg/ha	160	120	248	90	90	200	48	200	12
Potassium (as K <sub>2</sub> O)	kg/ha	100	150	140	131	150	150	72	320	87
Magnesium	kg/ha	–	–	50	–	–	35	–	–	–
Lime	kg/ha	–	–	–	–	–	–	–	1000	–
Silica	kg/ha	–	–	–	–	–	–	–	–	267
Agrochemicals	kg/ha	1	58	16	22	15	7	2	–	–
Seed	kg/ha	6	–	1	35	100	–	–	20	–
Gasoline (for cultivation)	MJ/ha	–	–	45	840	62	–	333	2135	–
Diesel (for cultivation)	MJ/ha	4259	16376	9577	1368	3469	7166	3961	7839	1203
Electricity (for cultivation & drying)	kWh/ha	–	–	–	17	279	–	–	9	–
Diesel (for drying)	MJ/ha	2422	–	–	5956	7088	–	–	–	–

**Notes:**

<sup>a</sup> BDF: biodiesel fuel, ET: bioethanol, MT: biomethanol.

<sup>b</sup> Air-dry weight for oil and cereal crops; oven-dry weight for sorghum and rice straw; wet weight for other crops.

<sup>c</sup> Ratio to the theoretical yield: i.e. from 100g of oil to c.a. 100g of biodiesel; from 100g of glucose to 51.14g of bioethanol.

<sup>d</sup> Calculated on the basis of biomass weights stated in Note (b). As for ligno-cellulosic biomass, figures in the upper row indicate the yields of bioethanol, while those in the lower row (in parentheses) those of biomethanol.

**Main data sources** (for more details, see text and Ueda (2008)):

– Crop yield: MAFF (2010): [Energy crops] national average of the last 5 years; [Rice straw] 80% of the amount generated at ordinary paddy fields.

– Biofuel yield & Gross biofuel productions: [Biodiesel] JIE (2002); [Bioethanol from sugar crops and potatoes] Daisho et al. (2004); [Bioethanol from cereal crops] NFACA (2006); [Ligno-cellulosic bioethanol] JARUS (2010); [Biomethanol] NEDO (2001).

– Oil/sugar/starch content & Fertilizer inputs: [Rapeseed] Aomori Pref. (2001) and Okuyama et al. (1994); [Sugarcane] Ujihara et al. (2002); [Sugar beet] Kawakatsu et al. (1991); [Rice] Uehara et al. (2003) and MEXT (2005); [Barley] Shikoku region naked barley research group (2003) and MEXT (2005); [Potato] Asama et al. (1982); [Sweet potato] Kumagai et al. (2002); [Sorghum] Nakagawa et al. (1995); [Rice straw] Ohta (2007).

– Other inputs: Shimizu et al. (2009); NIAES (2003); TSK (2005); MAFF (1965-72).

## (2) Data on energy conversion and transportation

Data on energy conversion of biomass (**Tables 1 and 2**) are obtained from publications in Japan and the United States (Daisho et al., 2004; Hill et al., 2006; JIE, 2002; NEDO, 2001; 2006; NFACA, 2006; JARUS, 2010).

Among the collected data, those of conversion efficiencies for ligno-cellulosic bioethanol remain most controversial as the technology has not been fully mature yet. This study follows recent data from a pilot experiment in Japan (JARUS, 2010). Their experiment was conducted at a scale of 300L/year, using rice straw as raw material and hydrothermal-enzymatic processes for hydrolysis. They consequently achieved a conversion efficiency of 145(L-ethanol/odt (oven dry ton)-feed) on average, which is adopted for the current analysis. The conversion efficiency for sorghum is assumed to be the same as this data.

Fossil energy requirement for energy conversion processes has also caused much controversy. This study adopts an average energy requirement (referred to as  $ER_{\text{corn}} = 625 \text{ MJ/GJ-ethanol}$ ) (**Table 2**) after Hammerschlag (2006), who reviewed six representative studies on corn bioethanol in the United States. Bioethanol conversion from other starch crops is thought to consume the same amount of energy as  $ER_{\text{corn}}$ . As bioethanol conversion from sugar crops does not require the starch hydrolysis process (**Fig.1**), energy required for that process (25% of the total) is subtracted from  $ER_{\text{corn}}$  (**Table 2**). As for ligno-cellulosic bioethanol, energy for producing chemicals for lignin pretreatment and hydrolysis (NEDO, 2006) is added to  $ER_{\text{corn}}$  (**Table 2**). It should be noted, however, the total energy requirement for producing ligno-cellulosic bioethanol still remains uncertain, as it depends on the hydrolysis process applied, the conversion efficiency and the scale of production.

Manufacture and maintenance of a conversion facility is thought to consume a total of 2 MJ of primary energy per 1 GJ of biofuel produced (Hill et al., 2006). Although this is a rather simplified assumption, detailed analyses on this point may well be left until commercial-scale conversion plants are actually built in Japan.

Regarding transportation, the author assumes that agricultural produce is transported from farms to conversion plants on a 43-km trip (TSK, 2005), while biofuels from plants to fuel-supply stations on a 209-km trip (CNRE, 2006).

### e Scenarios

This study compares two kinds of scenarios, namely “Scenario 1 (fossil-fuel based systems)” and “Scenario 2 (bioenergy based systems)” (**Table 2**), which are explained below. Both scenarios commonly assume that fossil fuels provide necessary fuel energy in crop production/processing and transport phases.

#### (1) Scenario 1 (fossil-fuel based systems)

Scenario 1 simply assumes to depend on fossil fuels alone (natural gas and grid electricity) to drive energy conversion processes (**Table 2**), including wastewater treatment processes. There would be no recycling of wastewater or residues to farmlands.

#### (2) Scenario 2 (bioenergy based systems)

Scenario 2 sets a primary objective on saving fossil energy inputs. It therefore assumes to employ crop residues, lignin, or biomass co-generation (explained below) to replace fossil fuels as far as possible. In addition, in bioethanol production, wastewater from fermentation process is directly applied to farmlands, thereby halving nitrogen and potassium fertilizer inputs, and cutting energy input for drying/treating the wastewater. Details of the assumptions are discussed below.

Firstly, we discuss a possibility of using crop residues for providing energy for conversion. To begin with, using harvest residues (such as leaves and stalks) for this purpose would face a potential problem of depleting soil nutrition provided by them. Under the assumed crop yields, generated amounts of harvest residues from each crop are actually smaller than the required amounts that should be left on fields for controlling erosion and soil nutrition, which is assumed to be 4.91 (odt (oven dry ton)/ha) after Sheehan et al. (2004). Besides, collecting and transporting harvest residues to a conversion facility would entail additional costs. Therefore, this study does not consider the use of harvest residues for providing heat for conversion.

On the other hand, process residues, such as rice/barley husks, bagasse (solid residue of sugarcane), lignin, and other fibrous matters contained in the produce, would be easier to recover and use. In fact, bagasse and lignin are widely utilized for providing energy at bioethanol plants in Brazil as well as sugar refineries and paper mills across the world. By contrast, residues from sugar beet, potato and sweet potato are so moist and degradable that they are not



**Table 2** Outline of the scenarios in LCA

	Rapeseed	Sugarcane	Sugar beet	Rice	Barley	Potato	Sweet potato	Sorghum	Rice straw	Sorghum	Rice straw
Biofuels <sup>a</sup>	BDF	ET (sugar)		ET (starch)				ET (ligno-cellulosic)		MT	
<b>Scenario 1 (fossil-fuel based systems)</b>											
Crop production											
Chemical fertilizer <sup>b</sup>	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Wastewater application to farm	–	No	No	No	No	No	No	No	No	–	–
Energy sources for hydrolysis, fermentation, distillation & wastewater treatment											
Fossil fuels	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Available energy from residues (MJ/GJ-fuel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy consumptions in conversion processes (MJ/GJ-fuel)											
Total	245	469	469	625	625	625	625	684	684	421	421
Hydrolysis	–	0	0	156	156	156	156	156	156	–	–
Fermentation & distillation	–	262	262	262	262	262	262	262	262	–	–
Wastewater treatment	–	207	207	207	207	207	207	207	207	–	–
Wastewater transport to farms	–	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–
Chemicals for pretreatment	–	–	–	–	–	–	–	59	59	–	–
<b>Scenario 2 (bioenergy based systems)</b>											
Crop production											
Chemical fertilizer <sup>b</sup>	ST	R	R	R	R	R	R	R	R	ST	ST
Wastewater application to farm	–	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	–	–
Energy sources for hydrolysis, fermentation & distillation											
Fossil fuels			○	○	○	○	○				
Process residue (Lignin)								○	○		
Process residue (Others)	○	○		○	○						
Biomass co-generation										○	○
Available energy from residues or biomass co-generation (MJ/GJ-fuel)	270	667	0	196	263	0	0	552	960	421	421
Energy consumptions in conversion processes (MJ/GJ-fuel)											
Total	245	360	360	516	516	516	516	575	575	421	421
Hydrolysis	–	0	0	156	156	156	156	156	156	–	–
Fermentation & distillation	–	262	262	262	262	262	262	262	262	–	–
Wastewater treatment	–	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–
Wastewater transport to farms	–	98	98	98	98	98	98	98	98	–	–
Chemicals for pretreatment	–	–	–	–	–	–	–	59	59	–	–

**Notes:**

<sup>a</sup> BDF: biodiesel fuel, ET: bioethanol, MT: biomethanol.

<sup>b</sup> ST (standard amount): the amount stated in Table 1. R (reduced amount): 50% of standard amount for nitrogen and potassium fertilizers, and 100% for other fertilizers.

**Main data sources** (for more details, see text and Ueda (2008)):

– Energy consumptions in conversion processes: [Biodiesel] Hill et al. (2006); [Sugar/starch bioethanol] Hammerschlag (2006); [Ligno-cellulosic bioethanol] NEDO (2006); [Biomethanol] NEDO (2001).

suitable for energy recovery by combustion, and therefore excluded from further analyses. (Nevertheless, energy could still be recovered from those residues using methane fermentation. Analyses on such possibilities are left to future studies.) **Table 2** (Scenario 2) shows the available amounts of the other process residues, which would be generated alongside the production of 1 GJ of biofuels. Rapeseed, sugarcane, and sorghum and rice straw (for bioethanol) have enough residues to meet direct energy demands of conversion processes (i.e. hydrolysis, fermentation and distillation) (**Table 2**). Accordingly, the heat and electricity provided by them are thought to replace the relevant fossil-fuel inputs. Thereafter, there would still remain excess amounts of bagasse and lignin (**Table 2**), which could be utilized for co-generating additional electricity. However, this study does not consider such a possibility to simplify the arguments as far as possible. (Earlier analyses (Ueda, 2008) indicated that electricity generated in this way would be relatively small compared to biofuel productions – around 62 to 126 MJ/GJ-biofuel for sugarcane, for example. Hence the current simplified approach would not affect the results significantly.) Meanwhile, energy derived from the residues of cereal crops falls short of the demands (**Table 2**). Hence fossil fuel is thought to fill the gap.

As for biomethanol, its production generates no energy-bearing residues at all (but ashes only). Hence “biomass co-generation” is assumed to provide the required energy. Biomass co-generation in this context means that a part of biomass (i.e. sorghum or rice straw) is set aside and supplied instead to a gasification and co-generation process, where biomass is converted to fuel gas that in turn is burned in a gas turbine to generate both heat and electricity, at efficiencies of 70% and 30% , respectively.

Secondly, the author assumes that liquid wastewater from fermentation process in bioethanol production is directly applied to farmlands. This would save the energy for treating or drying the wastewater (33% of the total energy requirement for conversion (Wang, 1999)), but consume additional energy for transporting wastewater to farmlands (**Table 2**). The author further assumes that the nutrients contained in wastewater would save inputs of nitrogen and potassium fertilizers by 50% after Furue and Nagata (1994).

Although some previous studies on corn bioethanol have claimed the efficacy of co-producing DDGS (distillers' dark grain with solubles) for animal feed by drying up liquid wastewater (e.g. Malça and Freire, 2006; Hill et al., 2006), this study rather emphasizes the importance of saving fossil energy input by omitting the DDGS production process. This is because the demands for DDGS are uncertain in Japan at present, and sustainability of energy crop production might be enhanced through applying nutrients in wastewater to farmlands, just as practiced widely in sugarcane fields in Brazil (Pessoa-Jr et al., 2005).

#### f Methods for life cycle inventory analysis

Life cycle inventory analysis is conducted using the LCA software SimaPro 6 (PRé Consultants, the Netherlands). Collected data described above are input and the following parameters calculated with the incorporated programs shown in square brackets (Frischknecht et al., 2004):

- Fossil fuel consumption [Cumulative Energy Demand]
- Emission of greenhouse gas [IPCC 2001 GWP 20a V1.01]

Using the above results, the author further calculates several indicators as described later.

In this way, the data collected by the author are supplemented by the databases incorporated in SimaPro 6, namely ecoinvent 1.01 and Buwal 250, which enable the inclusion of materials, energy and emissions associated with the manufacture and transport of various inputs (resources) in the LCI analysis. Although the information in these databases had been accumulated mostly in West Europe, it could be assumed that the manufacturing processes for common industrial products like agrochemicals and fertilizers would be quite similar between West Europe and Japan.

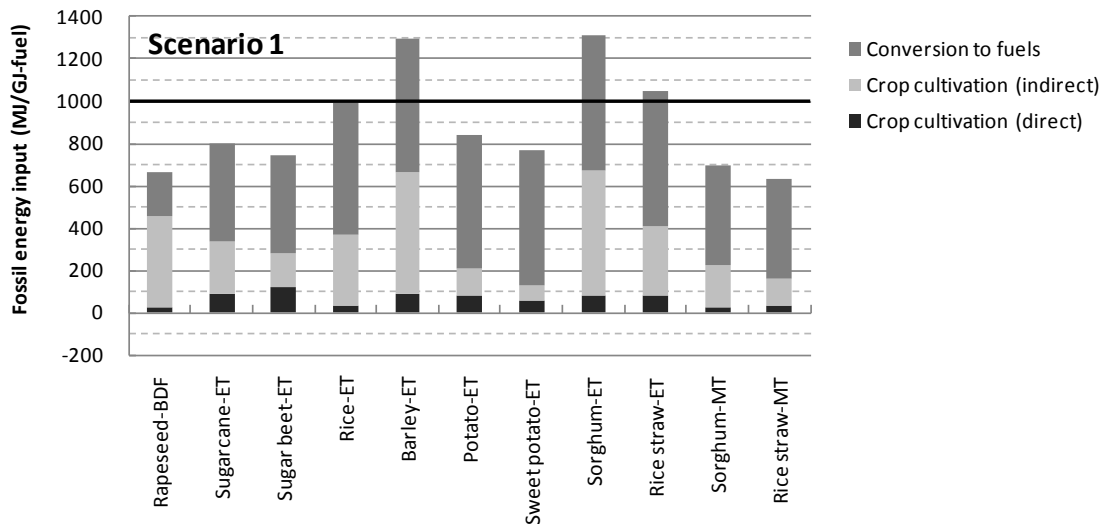
## 2 Results

### a Fossil fuel consumption

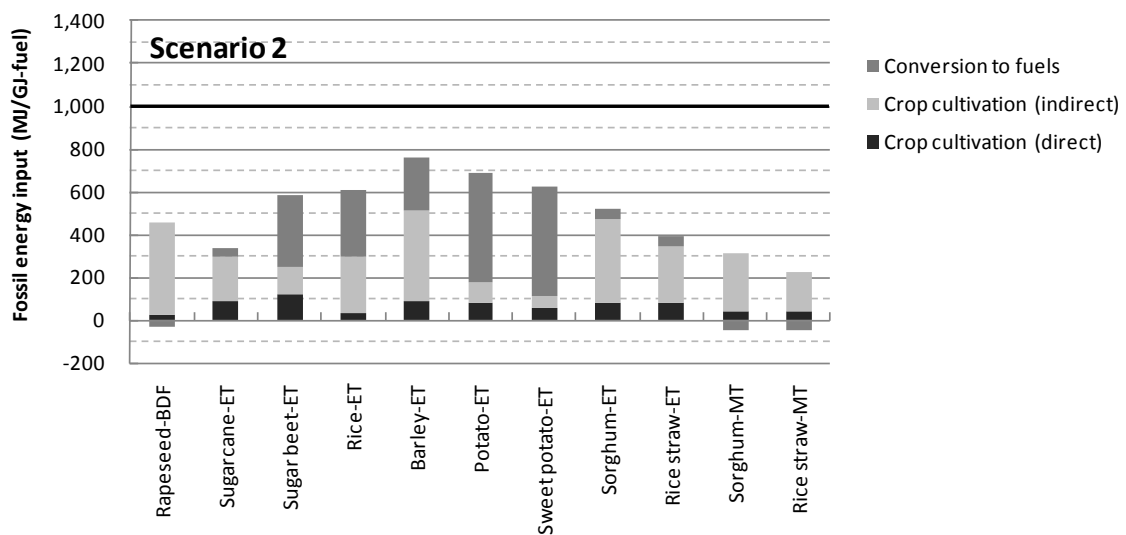
Fossil fuel consumptions in producing 1 GJ of biofuels are shown in **Figs.3** (Scenario 1) and **4** (Scenario 2). In these figures, energy consumptions exceeding 1000 MJ (= 1 GJ) imply negative energy production: fossil energy input is larger than the bioenergy produced.

#### (1) Energy consumption for crop production

For the most crops examined, the indirect energy consumptions for crop cultivation (i.e. energy required to



**Fig.3** Fossil fuel consumption in producing 1 GJ of biofuel (Scenario 1)  
 Note: BDF: biodiesel fuel, ET: bioethanol, MT: biomethanol.  
 Fossil energy input below 1000 MJ indicates positive bioenergy production.



**Fig.4** Fossil fuel consumption in producing 1 GJ of biofuel (Scenario 2)

produce fertilizers, agrochemicals, seeds and fixed assets) are much larger than the direct ones (i.e. fuel consumptions for driving agricultural machinery and transporting/processing the harvests) in both scenarios. Therefore, if energy consumption for crop cultivation is to be reduced, cutting fertilizer and agrochemical inputs should first be attempted.

When comparing each crop, an important factor to affect the energy requirement is the crop yield. This is because a lower yield implies that a larger area of farmland should be cultivated in preparing feedstock for producing 1 GJ of biofuels. Hence potato and sweet potato show relatively lower energy consumptions, which are largely attributed to their higher yields (as well as the lower fertilizer inputs per ha) (**Table 1**). Similarly, a large difference between rice and barley could be explained by their difference in yields.

When comparing Scenarios 1 and 2 on bioethanol, Scenario 2 shows lower indirect energy consumptions, as it assumes to cut nitrogen and potassium fertilizers by half (**Table 2**). For biomethanol, by contrast, Scenario 2 shows larger energy requirements than Scenario 1, as additional amount of feedstock should be input into the conversion process to provide heat (“biomass co-generation”) under Scenario 2.

## (2) Energy consumption for converting biomass to bioenergy

When comparing energy consumptions for converting feedstock to biofuel in Scenario 1 (**Fig.3**), biodiesel is distinctive in its smaller energy consumption even though the conversion processes are assumed to be driven solely by fossil fuels. For the other biofuels, the energy for conversion occupies a significant share in total energy requirement.

In Scenario 2 (**Fig.4**), fossil energy consumptions are reduced compared to Scenario 1 owing to the following reasons. First, process residues substitute a part or all of the direct fossil-fuel inputs for conversion, except for sugar beet and potatoes. Second, for bioethanol, energy consumptions for drying/treating fermentation wastewater are saved through direct application of wastewater to farmlands. Thus, large differences in energy consumptions between the two scenarios would demonstrate the efficacy of strategies of Scenario 2 in saving fossil fuels in conversion processes.

### b Net energy balance

**Fig.5** shows the net energy balance (NEB) of bioenergy production, which is defined as:

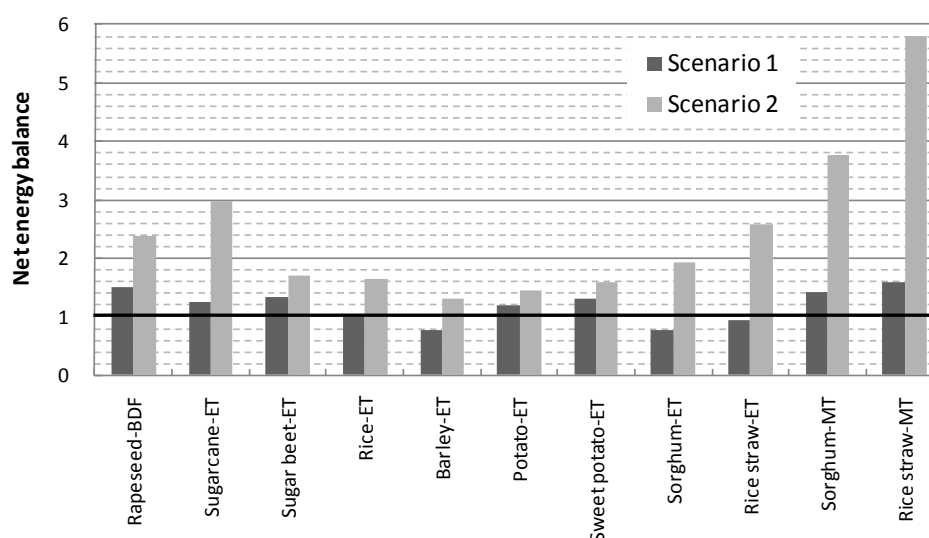
$$NEB = GP/FC \quad (1)$$

where: *GP* is gross production of bioenergy (GJ), and *FC* is fossil fuel consumption (both direct and indirect) in producing *GP* (GJ).

In Scenario 1, NEBs for rice, barley, sorghum and rice straw (bioethanol) stay below 1.0, indicating negative energy productions. Energy consumptions for these crops are characterized by large energy requirements for crop cultivation (**Fig.3**). Thus, for cereal crops, improving the crop yields without significantly increasing fertilizers etc. would be necessary for improving the NEBs. As for ligno-cellulosic bioethanol, improving the conversion efficiency is also indispensable, as it should save feedstock inputs for conversion. Meanwhile, NEBs for the other crops are in a moderate range between 1.0 and 1.6.

In Scenario 2, NEBs are generally improved relative to Scenario 1 (**Fig.5**), and all the crops show NEBs above 1.0. In particular, the effects of replacing fossil fuels by process residues should be significant, as NEBs improve significantly for rapeseed, sugarcane and ligno-cellulosic biomass, where the entire fossil-fuel inputs for conversion are replaced by process residues. Nevertheless, wastewater application assumed in Scenario 2 contributes to small improvements in NEBs for the other crops as well.

Comparing the result of this study with recent LCA studies, NEBs of corn bioethanol in USA were reported roughly between 1.2 and 1.6 (Hammerschlag, 2006; Hill et al., 2006), which are larger than those of cereal-crop bioethanol in Scenario 1 (0.8 to 1.0), but comparable with those in Scenario 2 (1.3 to 1.7). NEBs of sugarcane



**Fig.5** Net energy balance of biofuel production

Note: Net energy balance above one indicates positive bioenergy production.

bioethanol in Brazil were reported as 8.3 on average (IEA, 2004), which are far larger than the results of this study (1.3 to 3.0). The main reason for discrepancies in these crops would be the differences in crop yields as well as the scale of production. NEBs of ligno-cellulosic bioethanol were reported to be 4.4 to 6.6 (Hammerschlag, 2006), which are larger than those of either scenarios of this study. This would mainly be attributed to the differences in assumed conversion efficiencies.

### c Land use efficiency

**Fig.6** shows the land use efficiency (LUE), which is the net energy production per unit area of farmland, and defined as:

$$LUE = \frac{GP - FC}{A} \quad (2)$$

where:  $A$  is an area of farmland (ha) required to produce  $GP$ .

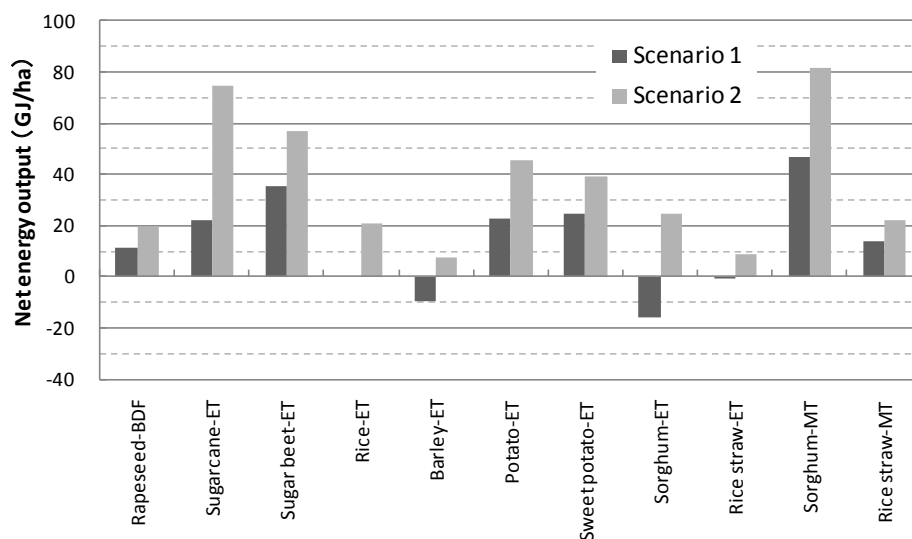
This indicator roughly corresponds to the crop yields. For instance, higher-yield crops like sugarcane, sugar beet, potato, sweet potato (bioethanol) and sorghum (biomethanol) show higher LUEs. On the other hand, LUEs of rice straw stay low in both scenarios, because only straw is used for generating biofuels. This implies that the feedstock must be collected from larger areas if a conversion facility is solely fed with rice straw.

### d Greenhouse gas (GHG) emissions

Greenhouse gas (GHG) emissions associated with biofuel production are shown in **Figs.7** (Scenario 1) and **8** (Scenario 2). Here the direct emissions in crop cultivation include  $N_2O$  and  $CH_4$  emissions from farmland soils, in addition to the factors discussed earlier in Section II-2-a-(1). GHG emissions in burning biofuels (and process residues) are assumed to be zero according to their carbon-neutral nature. Accordingly, consuming 1 GJ of biodiesel is thought to displace emissions from consuming 1 GJ of diesel fuel (termed “avoided emission” in **Figs.7** and **8**). Likewise, both bioethanol and biomethanol would displace emissions from energy-equivalent gasoline.

Unlike energy consumptions, direct GHG emissions in crop cultivation have significant impacts for some crops, due in part to  $N_2O$  and  $CH_4$  emissions from farmlands (**Figs.7** and **8**). Accordingly, for bioethanol, halving of nitrogen fertilizers through wastewater recycling in Scenario 2 has effects of reducing both direct emissions ( $N_2O$  from soils) and indirect ones (emissions in producing the fertilizers). Moreover, GHG emissions in the conversion processes are reduced in Scenario 2 thanks to the similar reasons as discussed in Section II-2-a-(2).

In order for biofuel productions to be meaningful in terms of GHG reduction, emissions throughout producing biofuels must be smaller than the displaced (avoided) emissions from fossil-fuel production and use. Hence **Fig.9** shows



**Fig.6** Land use efficiency of biofuel production (Net energy output per 1 ha of farmland)

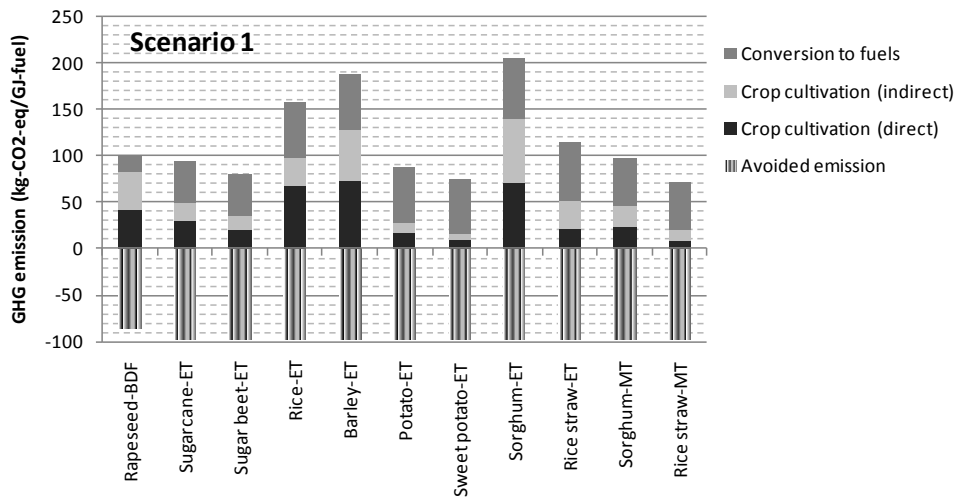


Fig.7 Greenhouse gas emissions in producing 1GJ of biofuels (Scenario 1)

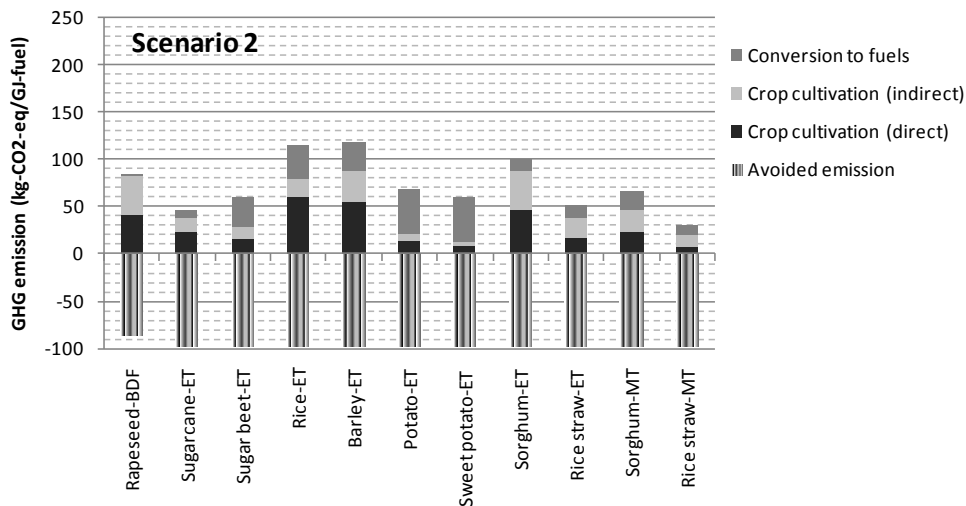


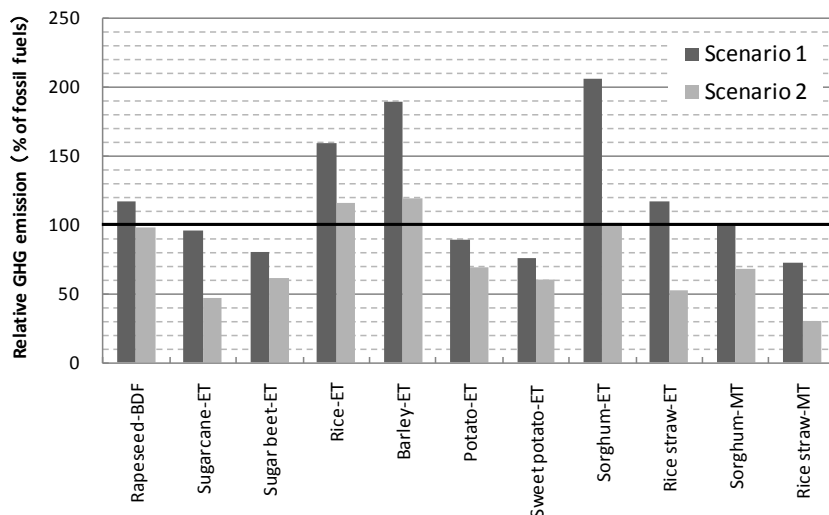
Fig.8 Greenhouse gas emissions in producing 1GJ of biofuels (Scenario 2)

GHG emissions of biofuels relative to those of fossil fuels, which is defined as:

$$R = \frac{GGE}{AGG} \times 100 \quad (3)$$

where:  $R$  is the relative GHG emission (%),  $GGE$  is the emission in producing 1 GJ of bioenergy (kg-CO<sub>2</sub>-eq.), and  $AGG$  is the emission in producing and burning 1 GJ of diesel fuel or gasoline (kg-CO<sub>2</sub>-eq.) (i.e. avoided emission by using 1 GJ of bioenergy).

In general, Scenario 2 shows smaller emissions compared to Scenario 1 (Fig.9). Nevertheless, emissions of rice, barley and sorghum (bioethanol) still exceed 100 % relative to fossil fuels. Therefore, some improvements (e.g. increasing crop yields) should be attempted before those kinds of biofuels become viable in terms of GHG reduction. On the other hand, sugarcane, sugar beet, potato, sweet potato, rice straw (bioethanol), as well as sorghum and rice straw (biomethanol), show significant reductions in GHG emission in Scenario 2. Hence those crops should be recommended from the viewpoint of GHG reduction.



**Fig.9** Greenhouse gas emissions of biofuels relative to fossil fuels  
 Note: Relative GHG emission below 100% indicates positive GHG reduction.

### III Cost analysis

#### 1 Methodology

##### a Crop production costs

Data on crop production costs (**Table 3**) are mostly collected from statistical databases of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) of Japan (MAFF, 2010). The cost includes those for variable inputs (seeds, fertilizer, chemicals, fossil fuels etc.), fixed capital (agricultural machinery, farm building, irrigation facilities etc.), as well as labor, interests and rents. Data on rapeseed were obtained from other local sources, as the MAFF did not offer them. It should be noted that the above data refer to the costs (mostly in 2005) for producing food or fodder crops, and therefore do not directly indicate the costs for energy crops. Nevertheless, analyses based on these data should provide a reference for future discussions on cost reduction in cultivating energy crops.

Data on costs for supplying rice straw are drawn from JARUS (2010). The figure is the average of three pilot studies in Japan, and includes costs for straw collection in fields, transportation and storage. Although the original data did not include fixed costs, the author estimated and added them referring to data of fodder crop production (MAFF, 2010).

##### b Energy conversion costs

Cost data for conversion processes were obtained from the following sources: CNRE (2005) for biodiesel (at an annual production of 550kL/y); NFACA (2006) for bioethanol from starch crops (35,700kL/y); and Kobayashi et al. (2005) for biomethanol (37,900kL/y). For biodiesel, the author employed a cost at relatively small-scale production, because such a scale had been predominant for biodiesel in Japan. Conversion costs of bioethanol from sugar crops were assumed to be 71% of that from starch crops, according to a hearing from experts at National Food Research Institute in Tsukuba, Japan. Conversion costs of ligno-cellulosic bioethanol are not included in **Table 3**, because current technologies are too primitive to obtain any plausible point estimate. The author omits costs for transporting biofuels to supply stations, profit margin of biofuel producers, as well as possible taxes imposed on biofuels.

#### 2 Results

Total costs of biofuel production are estimated at 633Yen/L-DE (Diesel Equivalent) for biodiesel and 223 to 773 Yen/L-GE (Gasoline Equivalent) for bioethanol, and 136 to 263 Yen/L-GE for biomethanol (**Table 3**). These figures are dominated by crop production costs, and are significantly higher than current fossil fuel prices in Japan. Nevertheless,

the costs are relatively smaller for potato, sugar beet (bioethanol), as well as sorghum and rice straw (biomethanol). In any crops, however, significant efforts are required in cost reduction, before biofuels become competitive with fossil fuels.

For ligno-cellulosic bioethanol, a simple sensitivity analysis is provided in **Fig.10**: given the assumed feedstock production costs, the effect of varying conversion costs is depicted against the total cost. It is implied that bioethanol from rice straw may become competitive with gasoline (tax included), provided that the conversion cost is reduced roughly in the same range as that for sugar/starch bioethanol.

**Table 3** Estimated costs of biofuel production in Japan

	Unit	Rapeseed	Sugarcane	Sugar beet	Rice	Barley	Potato	Sweet potato	Sorghum	Rice straw	Sorghum	Rice straw
Biofuels <sup>a</sup>		BDF	ET (sugar)		ET (starch)				ET (ligno-cellulosic)		MT	
<b>Costs per kg of produce<sup>b</sup></b>												
Crop production cost	Yen/kg	235	28	15	210	199	16	50	37	9	37	9
<b>Costs per liter (fossil-fuel equivalent) of biofuel<sup>c</sup></b>												
Crop production cost	Yen/L	547	526	243	719	661	169	406	377	91	176	49
Energy conversion cost	Yen/L	87	38	38	54	54	54	54	–	–	87	87
Total cost	Yen/L	633	564	281	773	715	223	460	–	–	263	136
Total cost	\$/L <sup>d</sup>	7.45	6.64	3.31	9.09	8.42	2.62	5.41	–	–	3.10	1.60
<b>Ratio to fossil fuel price<sup>e</sup></b>												
(taxes on fossil fuels excluded)		10.63	9.49	4.73	12.99	12.02	3.74	7.73	–	–	4.43	2.29
(taxes on fossil fuels included)		5.73	4.30	2.14	5.88	5.44	1.70	3.50	–	–	2.00	1.04

**Notes:**

<sup>a</sup> BDF: biodiesel fuel, ET: bioethanol, MT: biomethanol.

<sup>b</sup> Original data were shown in costs per ha of farmland (excluding rice straw). They are converted to the costs per kg of produce using the crop yields in Table 1.

<sup>c</sup> Costs per diesel-equivalent liter for biodiesel; and costs per gasoline-equivalent liter for bioethanol and biomethanol.

<sup>d</sup> Exchange rate: 85 yen/\$.

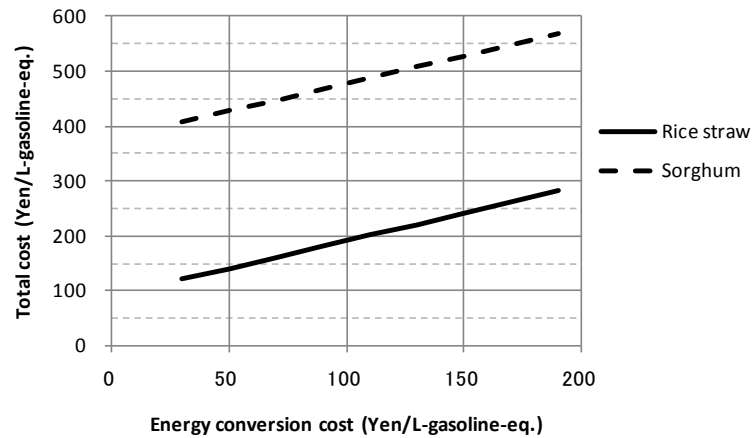
<sup>e</sup> Ratio to diesel fuel for biodiesel; ratio to gasoline for bioethanol and biomethanol. Fossil fuel prices are the national averages between Sep. 2009 and Aug. 2010 (OIC, 2010): [Diesel fuel] 59.6 (tax excluded) or 110.6 Yen/L (tax included); [Gasoline] 59.5 (tax excluded) or 131.4 Yen/L (tax included).

**Main data sources** (for more details, see text and Ueda (2008)):

– Crop production cost: [Rapeseed] Yokohama Town Council (2001); [The other energy crops] MAFF (2010); [Rice straw] JARUS (2010).

– Energy conversion cost: [Biodiesel] CNRE (2005); [Sugar/starch bioethanol] NFACA (2006); [Biomethanol] Kobayashi et al. (2005).





**Fig.10** Relationship between the energy conversion cost and the total cost for ligno-cellulosic bioethanol  
 Note: Feedstock production costs are drawn from **Table 3**.

## IV Biofuel production potentials across Japan

### 1 Scenarios

Among biofuel conversion processes analyzed, biodiesel suffers lower land use efficiency compared to some of bioethanol and biomethanol (**Fig.6**). This would discourage their large-scale applications using dedicated crop (i.e. rapeseed) in Japan, where land resources are rather scarce. (Alternatively, however, small-scale biodiesel productions from waste cook oil as a main feedstock are becoming increasingly popular across Japan.)

Next, comparing bioethanol and biomethanol, biomethanol shows some advantages in terms of net energy balance, land use efficiency and production costs (**Figs.5 and 6; Table 3**). However, as the Japanese government is currently focusing on bioethanol for supplementing gasoline, it would be rather difficult to establish fuel distribution infrastructure for biomethanol in addition to that for bioethanol. Besides, biomethanol is currently not favored as a gasoline alternative because of the lower energy content and possible toxicity (IEA, 2004). (Alternatively, however, biomethanol may find other demands like fuel cells and additives for biodiesel production in the near future.)

Thus, the following discussion focuses on a strategy for replacing gasoline with bioethanol by employing domestic biomass in Japan at a large scale. The discussions and calculations of relevant parameters are based on the conditions of Scenario 2 (**Table 2**) discussed previously.

#### a Energy crops on fallow lands

For many years, Japan has suffered from low food self-sufficiency, which decreased to around 40% (on a calorie basis) in 2005. Therefore, converting farmlands for food/fodder crops to those for energy crops would be discouraged in view of food security. Thus, we will discuss below about an option of cultivating energy crops on fallow farmlands, which amount to 385,800ha across Japan in 2005.

Among the energy crops for bioethanol, sugarcane attained the best figures on net energy balance, land use efficiency and GHG reduction (**Figs.5, 6 and 9**). Sugar beet, potato and sweet potato showed the second-best performances in terms of land use efficiency and GHG reduction (**Figs.6 and 9**). In terms of production costs, potato offers the cheapest option, followed by sugar beet, sweet potato and sugarcane (**Table 3**). By contrast, results of rice, barley and sorghum (bioethanol) are rather disappointing, especially in terms of GHG reduction and costs (**Fig.9 and Table 3**). Therefore, potato is selected as the main crop to be cultivated on fallow lands, supplemented by sweet potato and sugarcane in southern, warmer regions of Kyushu and Okinawa (**Table 4**).

#### b Crop residues

Rice is the predominant cereal crop in Japan, occupying over 90% of the total cereal crop production on a value

basis. Therefore, the author focuses on rice straw among various crop residues generated. MAFF (2005) estimated that around 20% of rice straw is currently utilized for compost production, animal feed or bedding materials for livestock, while the remaining 80% is underutilized (mostly burned or plowed back to fields). Thus, this study assumes that 80% of rice straw that is generated on all the paddy fields across Japan is collected and converted to bioethanol. It should be noted, however, realizing this potential requires the commercialization of second-generation (ligno-cellulosic) bioethanol. Compensation of nutrients taken from fields with the straw had already been taken into account when setting the system boundary of the LCA (see Section II-1-c).

**Table 4** Estimated potentials of bioethanol production in Japan

	Region	Area <sup>b</sup> ha	Feedstock	Gross production kL/y	Net production <sup>c</sup> kL/y	GHG reduction t -CO <sub>2</sub> /y
Energy crops in fallow farmlands	Hokkaido, Honshu & Shikoku	321,661	Potato	1,348,802	422,175	1,423,391
	Kyushu	60,899	Sweet potato	184,005	69,370	247,023
	Okinawa	3,240	Sugarcane	10,505	6,986	19,046
Total of energy crops		385,800		1,543,312	498,531	1,689,460
(% of national gasoline consumption or GHG emission) <sup>a</sup>				2.61	0.84	0.13
Residue from all paddy fields in Japan		1,864,714	Rice straw	770,430	470,733	1,260,870
Total of energy crops and rice straw				2,313,742	969,263	2,950,330
(% of national gasoline consumption or GHG emission) <sup>a</sup>				3.89	1.62	0.23

**Notes:**

The potentials are calculated on the basis of Scenario 2 in text.

<sup>a</sup> Gasoline consumption is the national sum in 2007 (MIAC, 2010); GHG emission in 1990 (MOE, 2005).

<sup>b</sup> Census of Agriculture and Forestry 2005 (MAFF, 2010).

<sup>c</sup> (Gross production) – (Fossil energy input for producing the gross production).

## 2 Estimated potentials

As a national total of energy crops on fallow lands, gross bioethanol production would amount to 2.6% of national gasoline consumption in 2007 (MIAC, 2010), but net production (i.e. gross production minus energy requirement in biofuel production) remains 0.8% (**Table 4**). If the potential from rice straw is included, the gross and net productions would increase to 3.9 and 1.6%, respectively. The corresponding gross production of 2.31 million kL-GE (gasoline eq.)/year is smaller than the long-term projection of MAFF (2007), which estimated 2.6 to 2.8 million kL-GE/year could be produced in 2030 using energy crops on fallow lands and crop residues. The discrepancy would probably come from the differences in assumed crop yields and conversion efficiencies.

In producing the above sum (2.31 million kL-GE/year) of bioethanol, total net GHG reduction potential is estimated to be 3,078 thousand ton-CO<sub>2</sub>-eq/year, which comprises of: 1,689 thousand ton from energy crops and 1,389 thousand ton from rice straw. The total reduction potential corresponds with 0.23% of Japan's national GHG emission in 1990 (MOE, 2005). On the other hand, the Kyoto Protocol demands Japan to cut the GHG emission by 6% compared to that in 1990. The reduction potential from biofuel production would therefore be worth considering as Japan is struggling to meet the obligation of the Protocol, although the costs of such reduction should first be compared with other options such as promoting solar cells.

## V Discussions and conclusions

This study has demonstrated the potential of domestic biofuels in contributing to national strategies of cutting fossil fuel consumptions and related GHG emissions in Japan to some extent. Using energy crops on fallow lands and rice straw across Japan, the net production potential of bioethanol were estimated as 1.62 % of national gasoline consumption in 2007, and the relevant GHG reduction potential as 0.23% of national emission in 1990 (**Table 4**).

Nonetheless, realizing such a potential would face two major barriers to overcome. First, for the most crops studied, implementing Scenario 2 would be necessary for achieving significant results in positive net energy production (**Figs.5 and 6**) and GHG reduction (**Fig.9**). These strongly suggest the importance of saving fossil fuel input by exploiting heat from combusting crop residues and by directly applying fermentation wastewater to farmlands. However, effects of applying such wastewater remain controversial. On the positive side, Furue and Nagata (1994) demonstrated that wastewater from spirit (*shochu*) production process could be applied to sugarcane farms, provided that it was done well before plantation, since such wastewater released nitrogen only slowly. On the negative side, Chen and Shinogi (2010) applied ethanol-fermentation wastewater (that used final molasses from sugarcane refinery as raw material) to farm soils, and suggested negative impacts on nitrogen availability and soil physics (such as reduction in soil permeability). Kamimura et al. (1993) similarly suggested that direct application of fermentation wastewater might inhibit growth of vegetables because of the nutrient imbalances contained in wastewater. This study followed the results of Furue and Nagata (1994), and simply assumed to recycle wastewater directly to farmlands used to provide each feedstock, and the whole amount of wastewater could safely be applied. Nevertheless, the mixed results of previous studies imply that efficacy or safety of such application may depend on the type of crops, soils and wastewater, as well as the methods of application. These issues have not been thoroughly examined in Japan, and hence are left to future studies.

Second, the production costs of biofuels are significantly higher than those of fossil fuels (**Table 3**). As for lignocellulosic bioethanol, reducing the conversion costs would be indispensable before it becomes economically viable (**Fig.10**). This is essentially a matter of increasing the conversion efficiency, because doing so should save expensive inputs such as enzyme and yeast. Nevertheless, this has been a major challenge in research and development for decades, which therefore requires a lot more efforts to overcome. As for the other biofuels, there would not be much room to cut the conversion costs, as the relevant technologies are already matured. Hence reducing crop production costs would be essential. This would be achieved, above all, by increasing the crop yields without significantly increasing fertilizer inputs. This is another big challenge which calls for developments in new crop varieties as well as cultivation technologies.

Finally, we discuss the limitations of this study, and hence the directions for future research. First, this study focused on biofuel production processes, and hence the role of crop residues was limited to energy supplements. Nevertheless, the whole system of biofuel production could become more cost-effective by integrating co-production processes. For instance, research institutes across Japan are investigating to exploit process residues (such as beet pulp) for co-producing industrial chemicals (such as cosmetics) alongside biofuels (Ueda, 2006). Involving such results in cost analyses will be left to future studies. Second, this study confined analyses on liquid biofuels only. Nonetheless, several pilot studies in Japan suggested the importance of integrating different kinds of bioenergy production processes, including methane fermentation and pyrolysis, in order to fully exploit various kinds of biomass generated in Japanese rural areas (e.g. Yuyama et al., 2010; Shinogi and Kameyama, 2007), where various types of agriculture and forestry, rather than a large-scale monoculture, are concurrently conducted. Undertaking LCA and cost analyses on such an integrated system will be another challenging issue.

## References

- 1) Aomori Prefecture (2001): *A crop calendar for rapeseed* (in Japanese).
- 2) Asama, K., Ito, H., Murakami, N. and Itoh, T. (1982): New potato variety "Konafubuki" (in Japanese), *Bull. Hokkaido Pref. Agric. Exp. Stn.*, **48**, 75-84.

- 3) Chen, Y. and Shinogi, Y. (2010): Study of application of vinasse from bio-ethanol production to farmland – influence of tomato and red radish growth and soil environment (in Japanese), *Trans. JSIDRE*, **265**, 1-7.
- 4) CNRE (2005): *Supply stability and economic viability of domestic biofuels* (in Japanese), Commission for Natural Resources and Energy, the Agency of Natural Resources and Energy, Japan: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g30922b42j.pdf>
- 5) CNRE (2006): *LCA on CO<sub>2</sub> emissions in biofuel production, Vol. 2* (in Japanese), Commission for Natural Resources and Energy, the Agency of Natural Resources and Energy, Japan: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g30922b42j.pdf>
- 6) Daisho, Y. and Mitsui&Co. Ltd. (ed.) (2004): *Frontiers of bioethanol* (in Japanese), Kogyo Chosa-kai, Tokyo.
- 7) ETSU (1996): *Alternative road transport fuels – a preliminary life-cycle study for the UK, Volume 2*, Energy Technology Support Unit, UK.
- 8) FAO (2008): *The state of food and agriculture 2008 – Biofuels: prospects, risks and opportunities*, Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
- 9) Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2004): *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*,ecoinvent report No. 3., Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf: <http://www.ecoinvent.ch/>
- 10) Furue, K. and Nagata, S. (1994): Effect of spirits (*Kokuto Shochu*) wastes on sugarcane for fertilizer in the field (in Japanese), *Bull. Kagoshima-Ken Nogyo Shikenjo*, **23**, 33-40.
- 11) Hammerschlag, R. (2006): Ethanol's energy return on investment: a survey of the literature 1900-present, *Environ. Sci. Tech.*, **40**, 1744-1750.
- 12) Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., and Tiffany, D. (2006): Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels, *Proc. Natl. Academy Sci*, **103**(30), 11206-11210.
- 13) IEA (2004): *Biofuels for transport*, International Energy Agency, OECD Publishing, Paris.
- 14) IEA (2008): *World energy outlook 2008*, International Energy Agency, Paris.
- 15) IPCC (1996): *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 2*, Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP/WMO.
- 16) JARUS (2010): *Interim report on model areas of the pilot project on establishing technologies for utilizing soft cellulosic materials* (in Japanese), The Japanese Association of Rural Resources Recycling Solutions, Tokyo, October 2010.
- 17) JIE (2002): *Biomass handbook* (in Japanese). The Japan Institute of Energy, Ohmsha, Tokyo.
- 18) Kamimura, Y., Hatono, T. and Nishizono, N. (1993): The methods of arable land application of *Shochu* distillers wastes (in Japanese), *Bull. Kagoshima-Ken Nogyo Shikenjo*, **22**, 105-111.
- 19) Kawakatsu, M., Tanabe, H., Sonoda, T., Nagata, N., Masutani, T., Amma, S., Nakajima, J., Hayashi, T., Sekimura, K., Tsuge, M., Mizoguchi, T., Takahashi, R., Kuranouchi, T. and Hachinohe, M.(1991): Breeding of sugar beet cultivar “Monohomare” and its agronomic characteristics (in Japanese), *Res. Bull. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Stn.*, **155**, 65-80.
- 20) Kobayashi, M., Takahara, M., Inafuku, M., Harada, T., Ichinose, T., Takeno, K., Matsumoto, S., Matsumoto, K., Nakagawa, J., Sakai, M. (2005): A possibility of year-round use of fodder crops as a feedstock for bioenergy conversion (in Japanese), *Japanese Journal of Grassland Science*, **51**, 472-473.
- 21) Kumagai, T., Yamakawa, O., Yoshinaga, M., Ishiguro, K., Hidaka, M. and Kai, Y. (2002): “Konahomare”: a new sweetpotato cultivar for starch production (in Japanese), *Bull. Natl. Agric. Res. Cent. Kyushu Okinawa Reg.*, **40**, 1-16.
- 22) MAFF (1965-72): *Standard methods for crop cultivation in each agricultural region* (in Japanese), the Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council, the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan: <http://rms2.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/JASI/gijutu.html>
- 23) MAFF (2005): *Current status of rice straw* (in Japanese), Livestock Department, The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan: [http://www.maff.go.jp/lin/zousan\\_koudou/dai02/sankou1.pdf](http://www.maff.go.jp/lin/zousan_koudou/dai02/sankou1.pdf)
- 24) MAFF (2007): *Towards significant expansion of domestic biofuel production* (in Japanese), Biomass Nippon

- Strategy, The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan:  
<http://www.maff.go.jp/biomass/energy/biokakudai01.pdf>
- 25) MAFF (2010): *Statistical database of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan* (in Japanese):  
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/index.html>
  - 26) Malça J. and Freire, F. (2006): Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): assessing the implications of allocation, *Energy*, **31**, 3362-3380.
  - 27) METI (2006): *Energy in Japan 2006*, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan: <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2006E.pdf>
  - 28) MEXT (2005): *Standard tables of food composition in Japan, fifth revised and enlarged edition* (in Japanese), Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.
  - 29) MIAC (2010): *A table of national energy balance*, Statistical database of the Statistics Bureau, the Ministry of Internal Affairs and Communication of Japan (in Japanese): <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/10.htm>
  - 30) MOE (2003): *Guideline for estimating greenhouse gas emissions from industries, ver. 1.6* (in Japanese), The Ministry of the Environment, Japan: [http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/pdf1\\_6/mat\\_01.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/pdf1_6/mat_01.pdf)
  - 31) MOE (2005): *Strategy for achieving the goal of Kyoto Protocol* (in Japanese), the Ministry of the Environment of Japan.
  - 32) Nakagawa, H., Maeda, M., Doi, Y., Matsuura, M., Katsuba, Z. and Endo, T. (1995): A new forage sorghum cultivar 'GreenAce'(in Japanese), *Bull. Hiroshima Pref. Agric. Res. Cent.*, **62**, 39-51.
  - 33) NEDO (2001): *A survey on energy conversion technologies using biomass resources, part 3, a report for FY 2000* (in Japanese), The New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan.
  - 34) NEDO (2006): *High Efficiency Bioenergy Conversion Project/Development of fuel ethanol production technology from cellulosic biomass based on highly efficient ethanol fermentation, [FY2001-2005] Final Report 1* (in Japanese), The New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan.
  - 35) NFACA (2006): *A survey report on bioethanol production and use from energy rice in Nigata Prefecture* (in Japanese), National Federation of Agricultural Cooperative Associations (*Zen-noh*), Japan.
  - 36) NIAES (2003): *Life cycle assessment for environmentally sustainable agriculture* (in Japanese), National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan.
  - 37) OECD/IEA (2007): *Good practice guidelines: Bioenergy project development and biomass supply*, Organization for Economic Cooperation and Development/International Energy Agency, Paris.
  - 38) Ohta, K. (2007): *Issues on producing bioenergy and maintaining soil fertility in paddy fields* (in Japanese), Proceedings of the Autumn Meeting, Council of soil sciences in Kanto-Tokai region, Japan, Sep. 2007.
  - 39) OIC (2010): *Statistics on fossil fuel prices* (in Japanese), Oil Information Center, Japan:  
<http://oil-info.ieej.or.jp/price/price.html>
  - 40) Okuyama, Y., Shibata, M., Endo, T., Sugawara, S., Hiraiwa, S. and Kaneko, I. (1994): A new zero-erucic rape variety "Kizakinonatane" (in Japanese), *Bull. Tohoku Natl. Agric. Exp. Stn.*, **88**, 1-13.
  - 41) Pessoa-Jr., A., Roberto, I.C., Menossi, M., Santos, R.R.D., Filho, S.O. and Penna, T.C.V. (2005): Perspective on Bioenergy and Biotechnology in Brazil, *Appl. Biochem. Biotech.*, **121-124**, 59-70.
  - 42) Pimentel, D. and Patzek, T.W. (2005): Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, *Natural Resources Research*, **14**(1), 65-76.
  - 43) Saga, K., Yokoyama, S. and Imou, K. (2008): Net Energy Analysis of Bioethanol Production System from Rice Cropping (in Japanese), *J. Japan Soc. of Energy and Resources*, **29**(1), 30-35.
  - 44) Saga, K., Imou, K., Yokoyama, S. and Minowa, T. (2010): Net energy analysis of bioethanol production system from high-yield rice plant in Japan, *Applied Energy*, **87**(7), 2164-2168.
  - 45) Shapouri, H., Duffield, J.A., and Wang, M. (2002): *The energy balance of corn ethanol: an update*, Agricultural economic report No.813, U.S. Department of Agriculture.
  - 46) Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M. and Nelson, R. (2004): Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol, *J. Ind. Ecol.*, **7**, 117-146.
  - 47) Shikoku region naked barley research group (2003): High-yielding culture tests of naked barley new cultivar

- mantenboshi* at five agricultural research stations in Shikoku Region (in Japanese), *Misc. Pub. Natl. Agric. Res. Cent. West Reg.*, **2**, 7-42.
- 48) Shimizu, N., Yuyama, Y. and Nakamura, M. (2009): Arrangement of database for energy crop productivity (in Japanese), *Tech. Rep. Natl. Inst. Rural Eng. Japan*, **209**, 29-56.
- 49) Shinogi, Y. and Kameyama, K. (2007): Case study of sustainable agricultural and rural development at Miyako Island, Japan (in Japanese), *J. JSIDRE*, **75**(7), 41-46.
- 50) TSK (2005): *Feasibility study on bioethanol production using sub-standard produce and residues in Tokachi, Hokkaido* (in Japanese): *Tokachi-ken Shinko Kiko* (Tokachi region development agency), Hokkaido, Japan.
- 51) Ueda, T. (2006): Toward energy uses of biomass resources (in Japanese), In: *An investigation of research strategies on agricultural technology 2006, Research and Analysis Team*, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, Japan, **6**, 20-53.
- 52) Ueda, T., Kunimitsu, Y. and Shinogi, Y. (2007): Potential conflicts for the reuse of rice husk in Thailand, *Paddy and Water Environ.*, **5**, 123-129.
- 53) Ueda, T. (2008): Preliminary analysis on efficiencies and costs of bioenergy production systems (in Japanese), *Reports of Research&Analysis Team*, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, Japan, **12**, 1-54.
- 54) Uehara, Y., Kobayashi, A., Koga, Y., Ohta, H., Shimizu, H., Miura, K., Fukui, K., Otsuki, H., Komaki, Y., Sasahara, H., Horiuchi, H., Okuno, K., Fujita, Y. and Goto, A. (2003): A new rice variety "Kusayutaka" (in Japanese), *Bull. Natl. Agric. Res. Cent.*, **2**, 83-105.
- 55) Ujihara, K., Sugimoto, A., Maeda, H., Shimoda, S., Oka, M., Mogami, K., Katsuda, Y., Sonoda, T., Mizumoto, F., Higashi, T., Sato, M., Yoshida, N., Kozuma, M., Matsumoto, Y., Mochidome, N., Komaki, Y., Tanaka, S., Hayashi, T. and Hidaka, N. (2002): Ni14: A New High-Quality Sugarcane Cultivar (in Japanese), *Bull. Natl. Agric. Res. Cent. Kyushu Okinawa Reg.*, **40**, 17-31.
- 56) Wang, M.Q. (1999): *REET 1.5-Transportation Fuel-Cycle Model, Vol.1: Methodology, Development, Use, and Results, ANL/ESD-39, Vol. 1*, Argonne National Laboratory, Illinois, USA.
- 57) Yanagida, T., Fujimoto, S., Bespyatko, L.Y., Inoue, S., Tsukahara, K., Sawayama, S. and Minowa, T. (2010): Cost analysis of ethanol production from rice straw by phosphoric acid-hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis method (in Japanese), *J. Japan Soc. of Energy and Resources*, **31**(3), 15-20.
- 58) Yokohama Town Council (2001): *Rapeseed in Yokohama Town* (in Japanese), Yokohama Town, Aomori Prefecture.
- 59) Yuyama, Y., Nakamura, M. and Yamaoka, M. (2010): Development of a pilot-scale biomass refinery system for suburban agricultural and livestock industrial areas, *JARQ*, **44**(1), 93-100.

# 国産農業バイオマスを用いたバイオ燃料生産の可能性

上田達己

## 要 旨

世界各地では、化石燃料依存からの脱却、地球温暖化防止への貢献、農村における雇用の拡大などを目的として、近年大規模なバイオ燃料の生産が拡大しているが、それに伴う熱帯雨林の破壊、土地・水資源の逼迫などが懸念されている。一方で、我が国は、耕作放棄地や未利用バイオマスを活用した、土地利用の改変を伴わないバイオ燃料生産拡大の可能性を有している。そこで本研究は、国産バイオマスを用いたバイオ燃料生産について、ライフサイクルアセスメントとコスト分析を行い、さらに全国的にみた生産ポテンシャルを概観する。結果として、以下の点が明らかとなった。①エネルギー収支、土地利用効率および温室効果ガス削減の観点からは、おおむねサトウキビ・テンサイ・イモ類(バイオエタノール)、ソルガム・稲わら(バイオメタノール)が高く評価された。②生産費の点からは、バイオメタノールおよびジャガイモ・テンサイのバイオエタノールが比較的商用生産への距離が近いとみられた。しかしながら、化石燃料と同等の生産費を実現するには、さらなる作物栽培費の低減が必要である。③作物残渣・リグニンを代替エネルギーとして活用すること、および発酵廃液の農地還元をシステムに組み込むことが、エネルギー収支などの向上を図るうえで重要である。④耕作放棄地へのイモ類・サトウキビの作付けおよび全国の水田からの稲わらの収集により、バイオエタノールの純生産ポテンシャルは全国のガソリン消費量(2007年)の1.62%、また温室効果ガス削減ポテンシャルは全国排出量(1990年)の0.23%であると試算された。

キーワード：農業系残渣、バイオエネルギー、バイオエタノール、バイオマス、LCA





# バイオエタノール残渣液の島尻マージ土壤への施用が 浸透溶脱と土壤理化学性に与える影響

陳 媽\*・塩野隆弘\*

## 目 次

I 緒 言	153	2 結果と考察	161
II 供試した残渣液の特性	154	V 残渣液の施用が土壤蒸発に与える影響	163
III 残渣液の施用が浸透水成分に与える影響	154	1 試験方法	163
1 試験方法	154	2 結果と考察	163
2 結果と考察	156	VI 結 言	167
IV 残渣液の施用が土壤透水性に与える影響	160	参考文献	168
1 試験方法	160	Summary	169

## I 緒 言

沖縄県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。サトウキビ製糖業の副産物である糖蜜は、現在県外に持ち出して飼料として使用されている。宮古島では、平成17年度から糖蜜の有効利用と運輸部門における二酸化炭素排出削減を目的として、現地プラントにおいて糖蜜を原料とする燃料用エタノールの製造の試運転を開始し、糖蜜由来のバイオエタノールをガソリンに混ぜてCO<sub>2</sub>を削減し、地球温暖化を防止しようとする実証的な試みが始まっている。このバイオエタノールの製造過程では多量の蒸留残渣液が発生する。1Lのバイオエタノールを製造すると15~20L程度の高BODの蒸留残渣液（以下残渣液とする）が排出される。宮古島は河川がなく、浄化槽による下水処理が主流であるため、残渣液がそのまま雑排水として地下浸透すると、貴重な水資源である地下水の水質悪化が懸念される。そのため、持続的なバイオエタノール生産のためには、製造時多量に排出される残渣液の処理および利用技術の開発が不可欠となる。

農地に人為的に新たな物質を投入する際には、作物と環境に悪影響がないかを確認することが不可欠である。これまでの知見では、ブラジルで残渣液を農地に還元して作物栽培で有効利用する研究が行われ、残渣液の施用

により化学肥料の一部代替が可能であることが報告されている（Booth and Lightfoot, 1990；Resende, 2006）。筆者ら（陳・凌, 2010）もトマトとダイコンの栽培試験を通して残渣液のカリウム代替の可能性を示している。また、宮古島の総耕地面積の89.9%を占めている島尻マージ土壤は有機物が乏しく、粘土質に富む琉球石灰岩の風化堆積土で、透水性がよく、保水性に乏しい特徴をもっている。このことから、島尻マージは良好な耕土とはいえず、有機資材などの投入による土壤改良を必要とする特殊土壤といえる（足立・與古田, 1981）。そのため、島尻マージに対して有機物を含む残渣液の施用が土壤の理化学性を改善する効果があれば、残渣液の利活用の可能性を示すことができると考えられる。一方、宮古島は生活および農業用水のほとんどを地下水に依存しているため、残渣液の農地への大量投入による地下水水質への影響を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では残渣液の島尻マージ土壤畑への農地施用による浸透の動態や土壤の理化学性への影響を明らかにし、残渣液の農地施用の可能性を考察した。本研究の成果はバイオエタノールの持続的生産利用による循環型社会を構築する上で重要な知見となる。

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各位、残渣液を提供していただいた現地プラントの株式会社りゅうせきに対して感謝申し上げる。

\* 農地・水資源部 農地工学研究室

平成23年1月18日受理

キーワード：バイオエタノール, 残渣液, 浸透, 透水性, 分散, 蒸発

本研究の一部は農業農村工学会論文集265号で公表した。

## II 供試した残渣液の特性

供試した残渣液は現地プラントから2007年12月と2008年1月に提供され、農村工学研究所畑地灌漑実験棟（茨城県つくば市）で常温保存した。残渣液の理化学性として、SS、色度、pH、COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TOC、BOD、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、T-Nなどの項目を分析した。K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は原液および濾紙を通過した濾液の2種類を分析し、TOCは濾紙を通過した濾液のみ分析した。SSは乾燥法より、色度は分光光度計（700nm）により、pHはpH/COND meterにより分析し、COD<sub>Mn</sub>（酸化剤として過マンガン酸カリウムを使用）、COD<sub>Cr</sub>（酸化剤としてニクロム酸カリウムを使用）、TOC、BOD、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、T-Nは工業排水試験法 JIS K 0102 に基づいて分析した。

残渣液の化学特性を **Table 1** に示す。バイオエタノール製造における原料、発酵条件および生産過程の差異によって残渣液の成分にバラツキがあるが、異なる採取日の残渣液の各成分の構成率には顕著な差は見られなかった。粘性が低く、浮遊物質を約10%含んでおり、TOCとCODが高く、浮遊物質の多くが有機物であるという特徴があった。また、残渣液はCOD<sub>Cr</sub> > COD<sub>Mn</sub> > BODという特徴もあった。一般的に、COD<sub>Cr</sub>法は最も酸化力が強く、ほぼ全量の有機物が分解されるが、COD<sub>Mn</sub>法は比較的酸化力が弱く、COD<sub>Mn</sub>値は生物分解性物質に近いと解釈される（下水道用語集、2000）。COD<sub>Cr</sub>がCOD<sub>Mn</sub>より大きいことは、残渣液に難分解性有機物が多く含まれることを示唆する。生物処理によってBOD値が下げられても、難分解性有機物の高度な色素（高分子有機色素）が残っており、残渣液を安易に流域などに放流することは難しいと考えられる。一方、残渣液はカリウム含量が高く、ほとんどが水溶性であり、カリウム肥料としての利用が示唆される。トマトとダイコンのカリウム肥料の1/3を代替した栽培試験（陳・凌、2010）では、カリウム肥料として利用できることが実証された。ただし、塩素濃度が高いことから、肥料として利用する

場合は、塩類障害を引き起こさないよう施用量に十分な注意を払うべきである（陳・凌、2010）。

一方、土壤中の浸透や理化学性の視点から見ると、残渣液を農地施用する場合、以下の制限要因があると考えられる。①年平均降雨量が多い宮古島では、有機物含量が多く、カリウムと塩素の濃度が高い残渣液が土壤中に浸透することによる地下水水質の悪化。②平均気温が高い宮古島では、有機物添加することで微生物増殖により土壤間隙が閉塞し、飽和透水係数が低下するバイオクロッキング現象（Allison, 1947）の発生。③粘土含量が多い島尻マージ土壌では、一価陽イオン濃度が高い残渣液の添加により粘土分が分散して土壤間隙が閉塞し、透水性や蒸発特性が変化することによる土壤水分特性変化。そこで、①についてはⅢ章に示す実験により残渣液成分の浸透について検討する。②と③についてはⅣとⅤ章に示す実験により残渣液成分が土壤物理性に与える影響について検討する。

## III 残渣液の施用が浸透水成分に与える影響

### 1 試験方法

農地に施用した残渣液の降雨や灌水による地下への浸透、その施用が土壤の物理性に与える影響、残渣液の施用量や施用方法による色素成分の浸透変化を明らかにするため、試験1～3の試験を行った。試験1は2007年12月の残渣液を使用し、その他の試験は2008年1月の残渣液を使用した。

#### a 試験1

残渣液を基肥として農地土壤に全面混合した場合、降雨によって残渣液の成分が作土の下層に浸透して地下水水質に影響を及ぼすことが想定される。そこで、残渣液を施用した土壤の浸透水の水質特性を明らかにするため、25℃の恒温室でカラム試験を行った。使用したカラムは **Fig.1** に示す通り、内径20cm、高さ50cmの塩ビ製の円筒形カラムである。カラムの底部に排水孔（φ2cm）をあけ、カラムの側面に時間別、層別に土壤採取がで

**Table 1** 残渣液の化学特性  
Chemical properties of vinasse

生産時期	pH	色度 (度)	SS (mg/l)	TOC (mg/l)	TN (mg/l)	COD <sub>Mn</sub> (mg/l)	COD <sub>Cr</sub> (mg/l)
2007.12	4.28	44000	108000	55400	1976	81900	172000
2008.1	4.56	34800	86000	32950	1560	61900	100000
	BOD (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	
	50900	17000 (13500)	767 (120)	508 (423)	11500 (1400)	11400	
	40600	15400 (12700)	390 (30)	420 (311)	9820 (900)	9880	

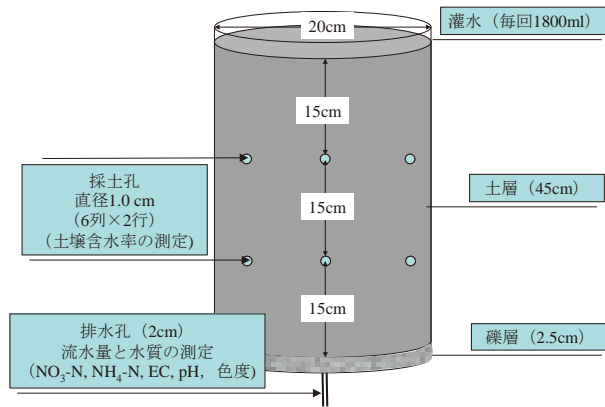
注：K<sup>+</sup>、PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>の数値について、前記の値は原液、括弧内の値は濾過液の値（水溶性に相当）と記載している。

きるように、頂部から 17.5cm (土壌表面から 15cm)、32.5cm (土壌表面から 30cm) の 2 層に同間隔の 6 個の孔 (φ 1.5cm) をあけた。試験に使用した土壌は鳥尻マージで、土壌の物理性は **Table 2** に示している。5mm のふるいを通じた鳥尻マージ土壌に化学肥料または残渣液を混合し、カラム内の土壌乾燥密度が現地サトウキビ畑の平均的の値 (0.9g/cm<sup>3</sup>) になるように、土壌を秤量し、均一になるようにカラムに圧縮充填し供試体を作成した。カラム試験の処理は **Table 3** に示す 4 種類で、試験は 2 反復行った。処理 (2) では宮古島の夏植えサトウキビの施肥基準に従って、240kgN/ha 等量の硫酸を全層土壌に混合した。処理 (3) では 240kgN/ha 等量の残渣液を全層土壌に混合した。処理 (4) では残渣液投入初期の窒素飢餓 (陳・凌, 2010) を考慮し、240kgN/ha 等量の硫酸に加えて処理 (3) の半分量の残渣液を全層土壌に混合した。土壌カラムの下端とマリオットタンクをチューブで繋ぎ、土柱下部の礫層に水を張った状態で 2~3 日静

置して、すべてのカラム内の水頭が一定になったのを確認し、これを初期条件として実験を開始した。灌水は週 1 回の割合で、合計 6 回行った。1 回の灌水量は 1800ml であり、これは宮古島市の平均月間降雨量 (気象庁, 2009) の 1/3 に相当する。灌水後 24 時間まで排水孔からの排水を採取し、排水量、硝酸態窒素とアンモニア態窒素濃度、EC、pH および色度について測定を行った。なお、硝酸態窒素濃度は銅カドミウムカラム還元法により、アンモニア態窒素濃度はネスラー法により分析した。灌水の 24 時間後、時計廻りに、6 カ所の採土孔の中の 1 つから土壌を乾土重量で約 10g 採取し、土壌含水比を測定した。

b 試験 2

限られた面積の農地に残渣液を施用する場合、作物栽培に必要な窒素成分よりも多量の窒素成分量に相当する残渣液の投入が求められる。そこで、残渣液を土壌に大量混合または連続表面散布した場合における浸透水の色度や EC などへの影響を明らかにするため、室温 (20℃) 条件下のカラム試験を行った。試験に用いたカラムは、内径 10cm、高さ 60cm の塩ビ製の円筒形で、底部には排水孔 (φ 1.5cm) がある。5mm のふるいを通じた鳥尻マージ土壌を乾燥密度が 0.9g/cm<sup>3</sup> になるようにカラムに圧縮充填し供試体を作成した。試験は、**Table 4** に示す (1) ~ (4) の 4 処理条件で行った。試験開始前、カラムの排水孔から排水が出るまで表面から蒸留水を供給した後、カラム内の土壌が圃場含水量に達してから実験を開始した。処理 (2) では、夏植えサトウキビ栽培に必要な窒素成分量 2 倍以上の窒素成分量に相当する残渣液を上層土壌に混合し、灌水による残渣液成分の溶脱を検討した。処理 (3) では、多量の残渣液を数回に分けて表面散布し、残渣液成分が下方への移動を検討した。処理 (4) では、残渣液の希釈液を表面散布し、地下水水質に悪影響をおよぼす残渣液成分の流出における限界投入量を検討した。残渣液の浸透度合を見ながら、各カラムの土壌表面が乾いた時点で蒸留水または残渣液を与えた。ただし、処理 (2) の残渣液投入土壌-水投入カラムと処理 (3) の残渣液無投入土壌-残渣液原液投入カラムで



**Fig.1** カラム実験装置  
Diagram of column experiment

**Table 2** 供試土壌の物理性  
The physical properties of soil

真比重	粒径組成 (%)					土性
	礫	粗砂	細砂	シルト	粘土	
2.76	0.26	0.77	7.32	32.96	58.69	HC

**Table 3** 実験条件  
Experimental condition

処 理	投入窒素量	硫酸や残渣液の施用条件
(1) 無施肥	0kgN/ha 0gN/ 314cm <sup>2</sup>	—
(2) 標準施肥 (硫酸)	240kgN/ha 7.5gN/ 314cm <sup>2</sup>	夏植えサトウキビ標準施肥量
(3) 100%残渣液代替	240kgN/ha 7.5gN/ 314cm <sup>2</sup>	残渣液量330t/ha (1.03L/314cm <sup>2</sup> ) 窒素以外の調整なし (残渣液肥効率は1/3として計算)
(4) 標準施肥 + 50%残渣液増肥	360kgN/ha 7.5(硫酸) + 3.8(残渣液)g N/ 314cm <sup>2</sup>	残渣液量165t/ha (0.52L/314cm <sup>2</sup> )

は、液体の浸透速度が遅く、土壌表面に液体が溜まったため、供給量は他の2カラムより少なく、処理(1)の残渣液無投入土壌-水投入カラムの各々23%、39%であった。灌水後24時間までの排水を採取し、排水量、EC、pHおよび色度を測定した。ただし、処理(2)残渣液投入土壌-水投入カラムと処理(3)残渣液無投入土壌-残渣液原液投入カラムについては、灌水から24時間以後の排水も採取し、灌水から24時間後に採取した排水に混合した。さらに、実験終了後、残渣液の物質移動を明らかにするため、カラムの表層から5cm、30cmと55cmの土壌を採取し、C/Nアナライザーを用いて土壌の有機物含量を測定した。

### c 試験3

飽和土壌に残渣液を液肥として施用した直後に降雨や灌水があった場合、残渣液の施用量が少量であっても、土壌間隙に保持されている残渣液の成分が下方へ移動し、地下水水質に影響を及ぼす可能性がある。そこで、降雨や灌水による残渣液の色素成分の下方への移動動態を明らかにするため、室温条件下のカラム試験を行った。試験には内径10cm、高さ20cmの塩ビ製の円筒形カラムを用いた。カラムの底部には排水孔(φ1.5cm)がある。カラム内土壌の乾燥密度が0.9g/cm<sup>3</sup>になるように、5mmのふるいを通した島尻マージ土壌を秤量し、均一になるようにカラムに圧縮充填し供試体を作成した。

試験は、Table 5に示す(1)~(6)の6処理条件で行った。

試験開始前、カラムの排水孔から排水が出るまで表面から蒸留水を供給した後、カラム内の土壌が圃場容水量に達してから、実験を開始した。土壌表面から残渣液を前述の(1)~(6)の条件で与えた。具体的に処理(1)と(4)では、残渣液原液または希釈液の投入によって、投入前に存在していた間隙水が下方へ押し流されて入れ替わった状態を想定し、浸透水の色度が100度を超えるまで残渣液原液または希釈液を表面散布した。処理(2)と(5)では処理(1)と(4)の2/3の量、処理(3)と(6)では処理(1)と(4)の1/3の量の残渣液原液または希釈液を表面散布した。その後、土壌表面に100ml(水深12.7mm)の蒸留水を与え、カラム下部の排水孔から100mlの浸透流出水を採取し、色度を測定した。さらに、この蒸留水を与えて色度を測定する操作を排水の色度が100以下になるまで行った。

## 2 結果と考察

### a 残渣液を基肥として土壌に全面施用する場合

試験1における各試験カラムの累積排水水量、排水の全窒素(硝酸態+アンモニア態窒素)濃度、全窒素負荷、EC、pHおよび色度の時間変化をFig.2に示す。また、各試験カラムの上下層の土壌含水比の変化をFig.3に示す。各試験カラムの浸透流出水量は、処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムを除いて、顕著な差が

Table 4 実験条件  
Experimental condition

処 理	残渣液投入量 (方法)	蒸留水投入量 (方法)
(1) 残渣液無投入土壌-水投入	—	毎回250mlずつ、計22回、5500ml投入
(2) 残渣液投入土壌-水投入	土壌深さ0-30cmの上層に600ml (770t/ha) 原液混合	毎回250mlずつ、計5回、1250ml投入
(3) 残渣液無投入土壌-残渣液原液投入	毎回250 or 150ml (一回のみ) ずつ、計9回、2150ml (2760t/ha原液) 表面投入	—
(4) 残渣液無投入土壌-残渣液希釈液投入	毎回250ml or 150ml (一回のみ) ずつ、10倍希釈液計9回、5倍希釈液計2回、2倍希釈液計9回 (内1回は150ml投入)、5125ml (1813t/ha原液相当) 表面投入	—

Table 5 実験条件  
Experimental condition

処 理	残渣液投入量 (方法)
(1) 原液570t/ha投入	浸透水の色度が100度を超えるまで、土壌表面から450ml (570t/ha) 原液投入
(2) 原液380t/ha投入	(1) の2/3の量原液投入
(3) 原液190t/ha投入	(1) の1/3の量原液投入
(4) 2倍希釈液760t/ha投入	浸透水の色度が100度を超えるまで、土壌表面から600ml (760t/ha) 希釈液投入 (380t/ha原液相当)
(5) 2倍希釈液560t/ha投入	(4) の2/3の量希釈液投入 (280t/ha原液相当)
(6) 2倍希釈液250t/ha投入	(4) の1/3の量希釈液投入 (125t/ha原液相当)

見られなかった。処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムの累積排水量は約4,400mlであった。これは、総灌水量の41%であり、最も累積排水量が多い処理(3)の100%残渣液代替カラムの排水量の62%であった。その理由はFig.3に示す通り、処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムの灌水24時間後(重力水が排水された時点)の上下層土壤の含水比が他のカラムより高いためであった(実験の後半に採取した下層土は泥濘状態であった)。

また、時間経過に伴って、各カラムでは窒素成分が徐々

に流出し、処理(2)の標準施肥カラムでは直ちに全窒素負荷のピークを迎えたが、処理(3)の100%残渣液代替カラムと処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムは、実験開始26日後に全窒素負荷のピークが現れ、その後下降する傾向が見られた。処理(3)の残渣液窒素代替カラムの全窒素累積流出量は、処理(2)の標準施肥カラムより低いことから、夏植えサトウキビ栽培において窒素100%代替量の残渣液の施用は無機態窒素の浸透流出の面では問題がないことが示唆された。ただし、処理(3)の100%残渣液代替カラムと処理(4)の標準施肥+

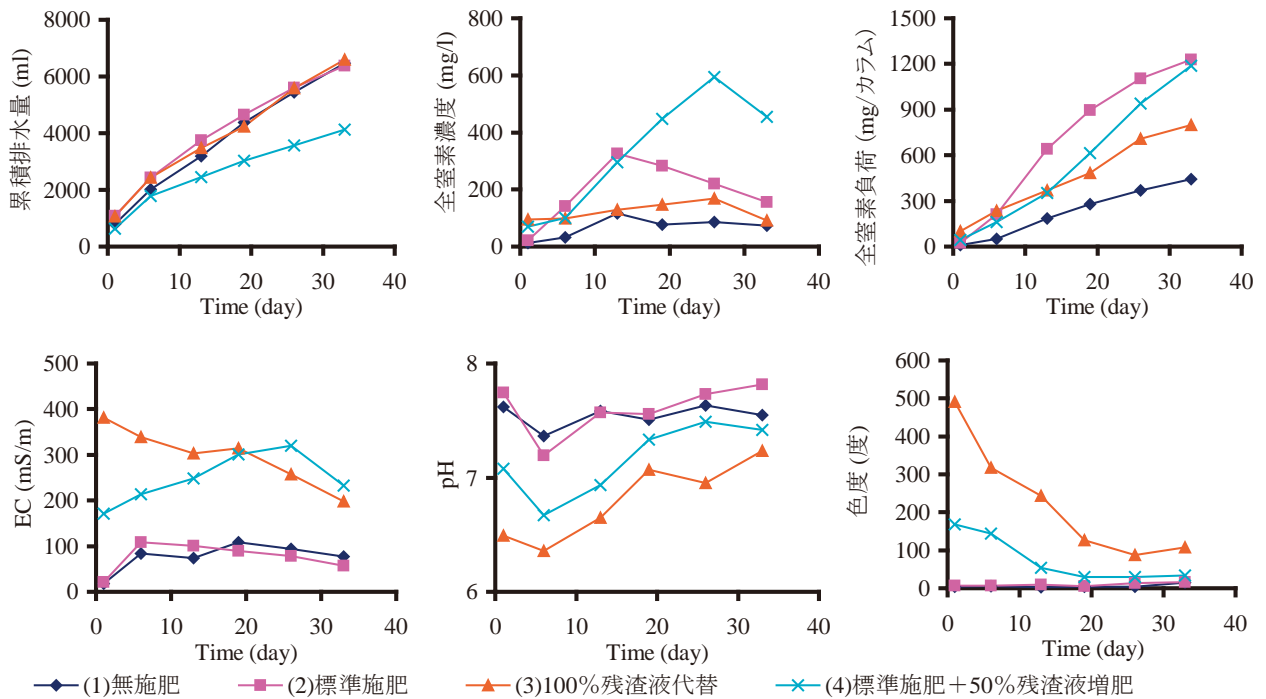


Fig.2 累積排水量と排水の水質

Changes in cumulative percolating water volume and water quality in each column

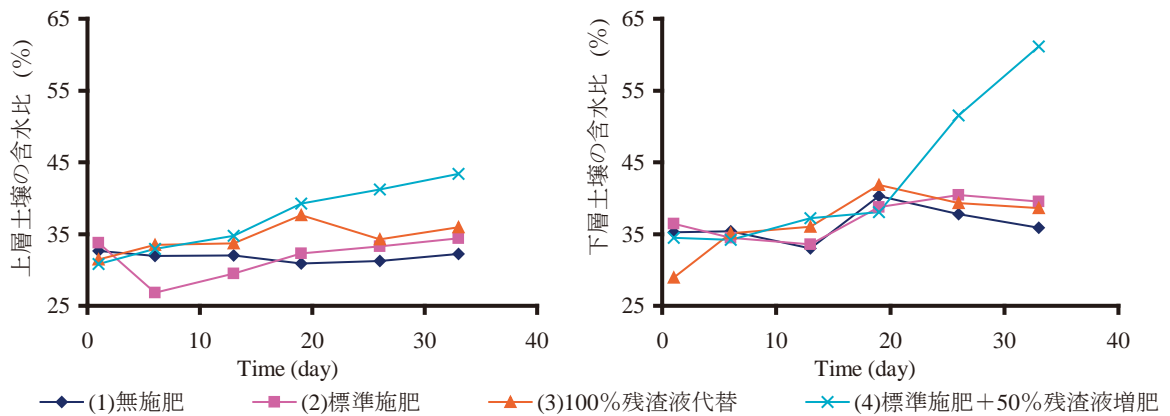


Fig.3 土壤含水比の変化

Change in water contents of soil in each column

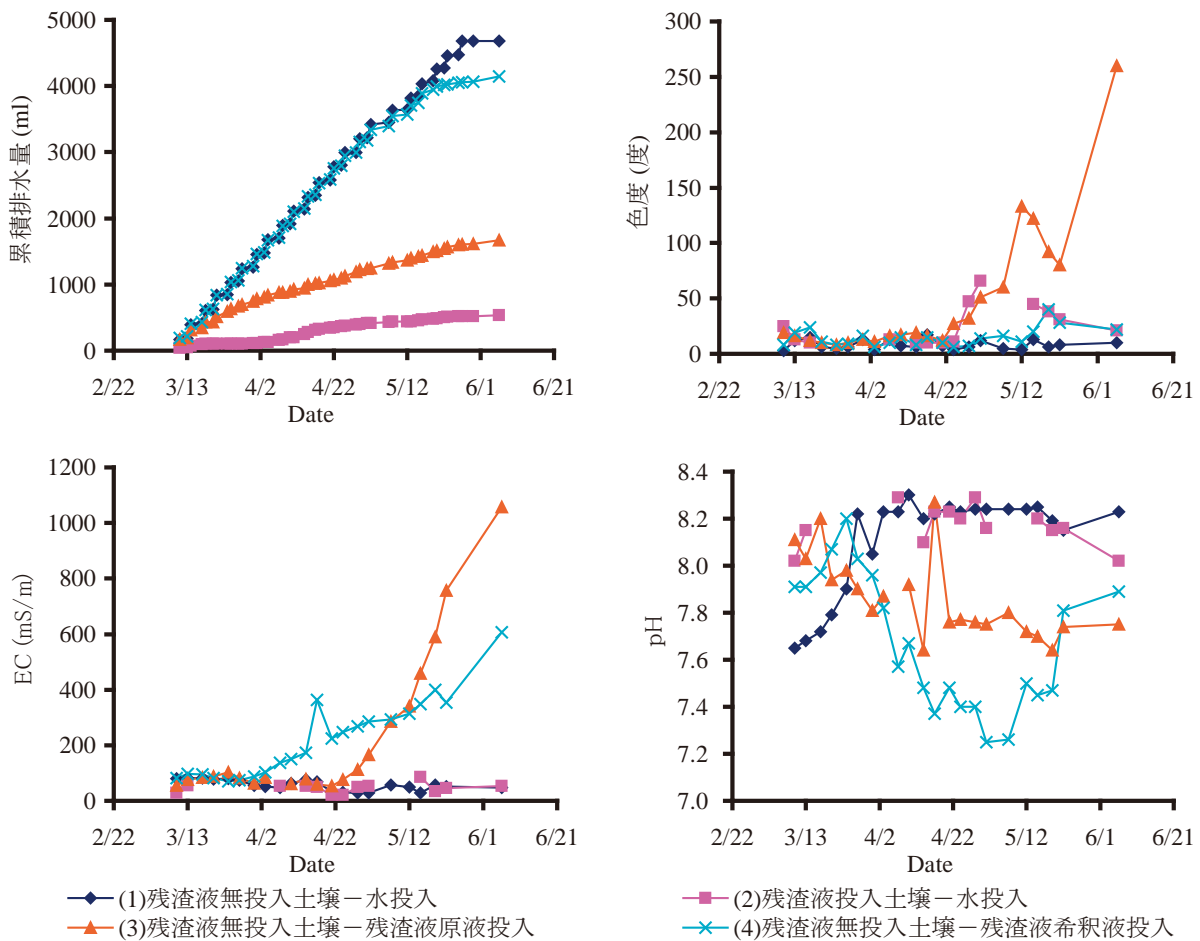
50%残渣液施肥カラムでは、浸透流出水のECと色度の値が処理(2)の標準施肥カラムより高く、pHは処理(2)の標準施肥カラムより低かった。全実験期間中、処理(3)の残渣液窒素代替カラムのECの平均値は299mS/mで、処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムの247.8mS/mとほぼ同じで、処理(1)の無施肥カラムの76.0mS/mと処理(2)の標準施肥カラムの76mS/mの3.9倍であり、農業用水基準(農林水産省:昭和46年10月4日農林水産技術会議)の30mS/mより大きく上回った。また、実験初期における処理(3)の100%残渣液代替カラムの浸透排水の色度は490度で、処理(4)の標準施肥+50%残渣液施肥カラムの3倍であり、処理(1)の無施肥カラムと処理(2)の標準施肥カラムの70倍以上であった。

これらの実験では、連続灌水によって浸透排水のEC値と色度が下がりpHは中性付近になったが、農業用水を地下ダムから直接利用する宮古島ではEC値が農業用水基準を超えることや浸透水の色が目視で確認できることから、土層厚が小さい場所において多量の残渣液を農地施用する場合、降雨や灌水のタイミングを考慮する必

要がある。

**b 残渣液を土壤に大量混合施用または連続して表面施用する場合**

試験2における各試験カラムの累積排水量、排水のEC、pHおよび色度の時間変化をFig4に示す。処理(1)の残渣液無投入土壤-水投入カラムと処理(4)の残渣液無投入土壤-残渣液希釈液投入カラムの浸透排水量には顕著な差が見られず、累積排水量は総給液量の約80%であった。処理(2)の残渣液投入土壤-水投入カラムの累積排水量は約520mlで、総給液量の41%であり、処理(3)の残渣液無投入土壤-残渣液原液投入カラムの累積排水量は約1600mlで、総給液量の74%であった。処理(2)の残渣液投入土壤-水投入カラムは、実験開始から浸透率が非常に低く、土壤の乾燥に伴って浸透率が高くなった。処理(3)の残渣液無投入土壤-残渣液原液投入カラムは、給液量が約750ml(960t/ha相当)の時点から浸透率が低下し、処理(4)の残渣液無投入土壤-残渣液希釈液投入は、給液量が約5000ml(1730t/ha原液相当)の時点から浸透率が低下した。これらのことから、飽和し



**Fig.4** 累積排水量と排水の水質  
Changes in cumulative percolating water volume and water quality in each plot

た土壤に大量の残渣液を混合または表面散布することによって土壤透水性が急激に低下すると推察される。

実験後における各試験カラムの各層の土壤有機物含量を Fig.5 に示す。処理 (2) の残渣液投入土壤－水投入カラムは、水の浸透が少なく、有機物は殆ど残渣液を混合した部分に留まり、下方への移動が見られなかった。このことから残渣液混合層の土壤間隙の閉塞が土壤透水性の低下の要因であることが推察された。処理 (3) の残渣液無投入土壤－残渣液原液投入と処理 (4) の残渣液無投入土壤－残渣液希釈液投入カラムでは、表層 5cm に多量の有機物が溜まっていたが、浸透に伴って下方への移動が見られた。このことから、残渣液の土壤混合より表面散布のほうが土壤間隙の閉鎖が少なく、土壤透水性に与える影響が小さいことが推察される。

残渣液を連続表面散布することによって、浸透流出水の EC と色度は増加する傾向にあり、pH が低くなる傾向があった。処理 (3) の残渣液無投入土壤－残渣液原液投入カラムの EC 値は、1000ml (1280t/ha) の残渣液原液投入した時点で上昇し始め、最終的に 1058mS/m に達した。処理 (4) の残渣液無投入土壤－残渣液希釈液投入の EC 値は、2000ml の (原液 200ml (260t/ha) 相当) 希釈残渣液投入した時点で上昇し始め、最終的に 607mS/m に達した。また、処理 (3) の残渣液無投入土壤－残渣液原液投入カラムの色度は 1600ml (2100t/ha) の残渣液原液投入した時点で 60 度になり、最終的に 260 度に達した。処理 (2) の残渣液投入土壤－水投入カラムの色度は浸透水量が 400ml を超えた時点で 66 度に達した。

以上のことから、残渣液を大量に土壤へ投入する場合、土壤透水性の急激な低下を抑制させるためには、残渣液を飽和土壤に混合するよりも表面散布することが望ましい。また、残渣液の散布量が原液で 1000ml (1280t/ha)、10 倍希釈液で 2000ml (原液 200ml 相当 (約 250t/ha)) を超える時点で土壤の浄化・保持する能力が限界に達

し、浸透流出水の EC や色素は急激に増加したことから、残渣液の投入量は短期的に流出する成分を考慮すると 250t/ha 以下に設定する必要があると考える。

### c 飽和土壤へ残渣液施用後の色度の溶脱特性

試験 3 における各試験カラムの浸透水の色度の時系列変化を Fig.6 に示す。各試験カラムの排水の色度は直ちにピークを迎えた。処理 (1) の原液 570t/ha 投入、処理 (2) の原液 380t/ha 投入、処理 (3) の原液 190t/ha 投入、処理 (4) の 2 倍希釈液 760t/ha 投入、処理 (5) の 2 倍希釈液 560t/ha 投入、処理 (6) の 2 倍希釈液 250t/ha 投入カラムの色度ピーク値は各々 4590, 2500, 654, 2145, 1530, 564 度であった。色度が 100 度以下になるまでの灌水量は各々 636mm, 420mm, 509mm, 356mm, 420mm, 318mm で、残渣液の投入量が少ないほど色度の溶脱が少ないことが明らかになった。また、同じ原液相当量投入の処理 (2) の原液 380 t/a 投入と処理 (4) の 2 倍希釈液 760t/ha 投入に比べ、2 倍希釈投入における色度のピーク値が小さかった。

異なる残渣液投入方法による色度の溶脱特性を比較するため、ここでは、残渣液投入色度を (1) 式、排水累積色度を (2) 式に定義した。

$$\text{残渣液投入色度 (度} \cdot \text{L)} = \text{残渣液の色度 (度)} \times \text{投入量 (L)} \quad (1)$$

$$\text{排水累積色度 (度} \cdot \text{L)} = \sum \text{排水の色度 (度)} \times \text{流出量 (L)} \quad (2)$$

排水累積色度の動態変化および残渣液投入色度と排水の累積色度の比較を Fig.7, Table 6 に示す。処理 (2) の原液 380t/ha 投入と処理 (4) の 2 倍希釈液 760t/ha 投入については、投入した残渣液投入色度が同じであったが、処理 (4) の 2 倍希釈液 760t/ha 投入の色度のピーク値や色度が 100 度以下までの時間が短いため、排水累積色度は処理 (2) の原液 380 t/a 投入より少ない。また、処理 (1)

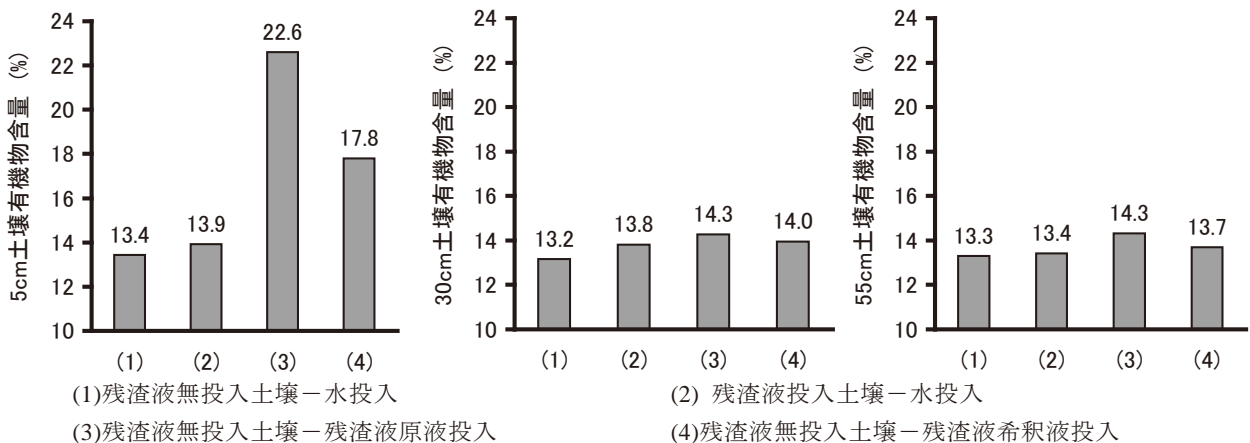


Fig.5 各層の土壤有機物含量  
The organic matter contents of each soil layer in each column

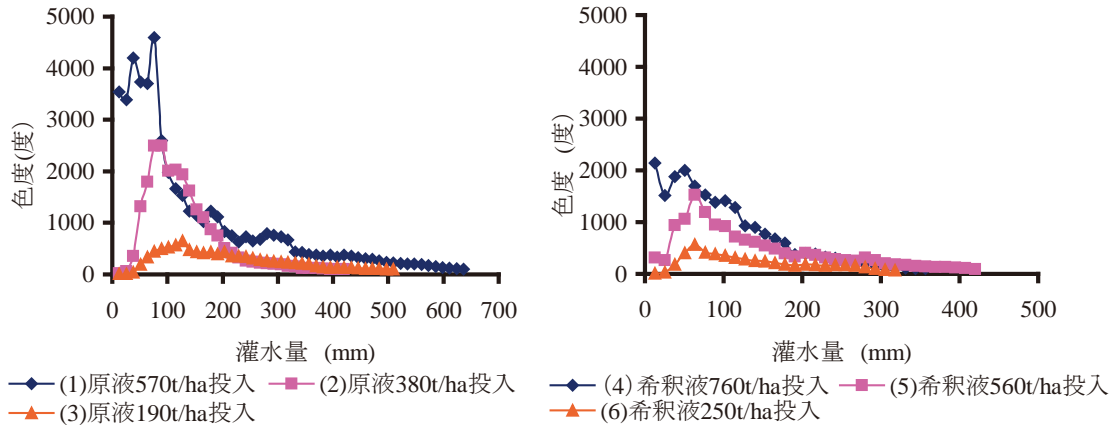


Fig.6 排水の色度  
Changes in chromaticity of percolating water in each column

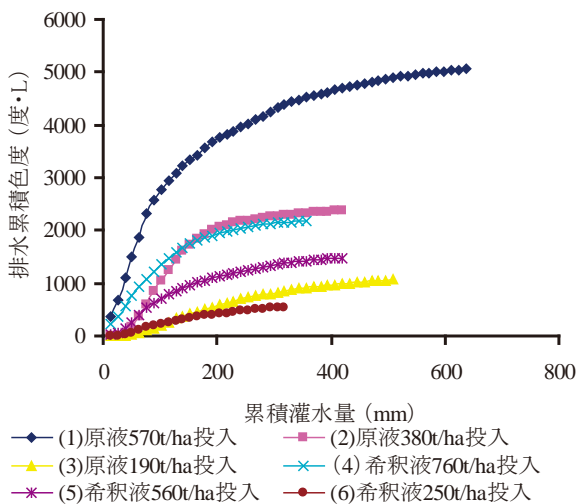


Fig.7 排水の累積色度  
Changes in cumulative discharge chromaticity in each column

Table 6 投入色度と排水累積色度  
Applying and cumulative discharge chromaticity

処 理	投入色度 (度・L)	排水累積色度 (度・L)
(1) 原液570t/ha投入	19800	5056
(2) 原液380t/ha投入	13200	2381
(3) 原液190t/ha投入	6600	1067
(4) 2倍希釈液760t/ha投入 (原液380t/ha相当)	13200	2184
(5) 2倍希釈液560t/ha投入 (原液280t/ha相当)	9900	1481
(6) 2倍希釈液250t/ha投入 (原液125t/ha相当)	4400	539

の原液 570t/ha 投入, 処理 (2) の原液 380t/ha 投入, 処理 (3) の原液 190t/ha 投入, 処理 (4) の 2 倍希釈液 760t/ha 投入, 処理 (5) の 2 倍希釈液 560t/ha 投入, 処理 (6) の 2 倍希釈液 250t/ha における排水累積色度と投入色度の比は各々 0.28, 0.18, 0.16, 0.16, 0.14, 0.12 であった。原液相当投入量が同じであっても, 希釈液を散布する方は排水累積色度が低い。また, 飽和した土壤に残渣液を投入後, 降雨などにより過剰の間隙水圧が生じると, 土壤間隙に拘束された色素が直ちに浸透流出するため, 土壤が飽和状態である場合や降雨予報がある時の残渣液投入または残渣液投入直後の灌水を避けるべきである。

#### IV 残渣液の投入が土壤透水性に与える影響

有機物含量が多い残渣液を鳥糞マージに施用した場合, 土壤透水性に影響をあたえると考えられる。土壤透水性は, 土中の粘土含量と土壤溶液の塩濃度, 組成に強く依存する (Quirk and Schofield, 1955)。粘土分は土壤溶液中に多価の陽イオンが多いと凝集しやすく, 一価の陽イオンが多く存在すると分散しやすい。膨潤性の低い鳥糞マージでは, 残渣液中の多量のカリウム成分 (一価陽イオン) による粘土粒子の分散や残渣液中の多量な有機物成分による土壤間隙の目詰まりにより透水性が低下すると考えられる。そこで, 残渣液施用が鳥糞マージ土壤の透水性に与える影響を明らかにするため, 異なる残渣液施用量が土壤透水性に与える影響と微生物の増殖が土壤透水性に与える影響について, 残渣液混入した土壤試料の変水位透水試験を行って検討した。

##### 1 試験方法

農地への残渣液の投入方法は土壤混入と表面散布の 2 種類を想定して試験を行った。土壤混入条件の試験では, 乾土重量 90, 100, 110g の鳥糞マージ土壤に, 0, 5,



10, 15, 20, 25, 30ml (100g と 110g の試料のみ) の残渣液を混入した試料について飽和透水係数を測定した。表面散布条件の試験では、乾土重量 90g, 100g の鳥尻マージ土壌を 100ml 円筒に充填し、水飽和後、円筒上部に接続したゴムリングと変水位目盛り管を残渣液原液、2 倍希釈液、5 倍希釈液、10 倍希釈液と脱気水で満たし、目盛り管内の水面の上部線から下部線まで降下する時間を測定し、透水係数を求めた。1 試験あたりの表面散布の回数は 20 回までとし、各試験は 2 反復行った。

残渣液を投入した土壌の微生物増殖が透水性に与える影響を明らかにするため、変水位透水試験を行った。乾土重量 90g, 100g, 110g の鳥尻マージ土壌に、0, 5, 10, 15, 20, 25ml, 30ml (100g と 110g の試料のみ) の残渣液を混入して、100ml の円筒に充填した。24 時間水飽和と 1 週間水飽和後 (25℃ 静置) の飽和透水係数を測定し、比較した。ここで、1 週間水飽和の処理は、微生物の増殖状態と想定した。

残渣液の投入が土壌の分散に与える影響を調べるため、残渣液を添加した土壌懸濁液の浮遊物質含量を測定した。用いた土壌懸濁液は 0.2mm ふるいを通過した 5g の土壌に、残渣液を 0ml, 10ml, 20ml, 50ml, 100ml 添加し、純水を加え 500ml にした後、攪拌機で 10 分間攪拌 (回転数 1500rpm) する処理と 3 回手動反転する処理により作成した。攪拌または反転直後と静置 1 時間後に液面から深さ 5cm までの懸濁液の浮遊物質量を測定した。また、懸濁液中の浮遊物質は浮遊土粒子と残渣液成分の浮遊物で構成されているため、残渣液 10ml, 20ml, 50ml, 100ml 添加の 500ml 残渣液懸濁液も同様の攪拌処理と反転処理を行い、攪拌直後と静置 1 時間後の残渣液成分の浮遊物質量を測定した。最後に、懸濁液中の浮遊土壌含量を全浮遊物質と残渣液成分の浮遊物質の差から求めた。

## 2 結果と考察

残渣液の土壌混入条件での透水試験において、各試験条件における残渣液の添加量が土壌の飽和透水係数に与える影響を Fig.8 に示す。乾燥密度  $0.9\text{g/cm}^3$  の土壌では、25ml 以上の残渣液の添加によって土壌が泥濘状態になるため、残渣液の添加を 25ml までとした。一方、乾燥密度  $1.0\text{g/cm}^3$  と  $1.1\text{g/cm}^3$  の土壌には、30ml の残渣液を添加した。各乾燥密度の土壌では、0 ~ 20ml の残渣液添加による土壌透水係数の差が見られなかったが、土壌飽和含水比に近い 25ml 以上の残渣液の混合により土壌透水係数は一気に低下した。

残渣液の表面散布条件での透水試験において、各試験条件における残渣液の添加量が土壌の飽和透水係数に与える影響を Fig.9 に示す。各乾燥密度の土壌の透水係数は原液 > 2 倍希釈液 > 5 倍希釈液 > 10 倍希釈液 > 脱気水の順であった。原液散布については、土壌溶液が初期の間隙水からすべて残渣液に入れ替わる期間における透水係数の低下が早く、土壌溶液がすべて残渣液に入れ替

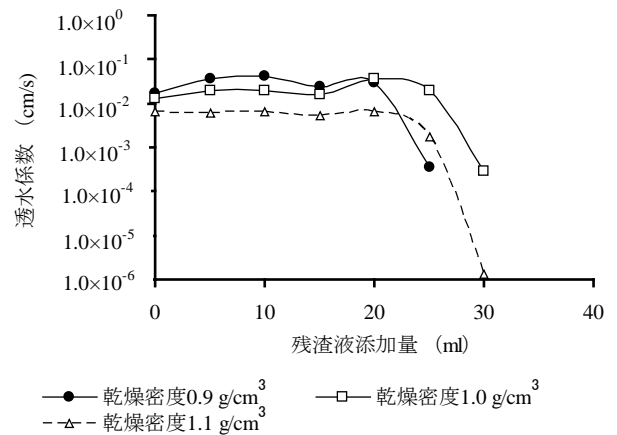


Fig.8 土壌透水性の変化 (残渣液土壌混入条件)  
Changes of soil permeability

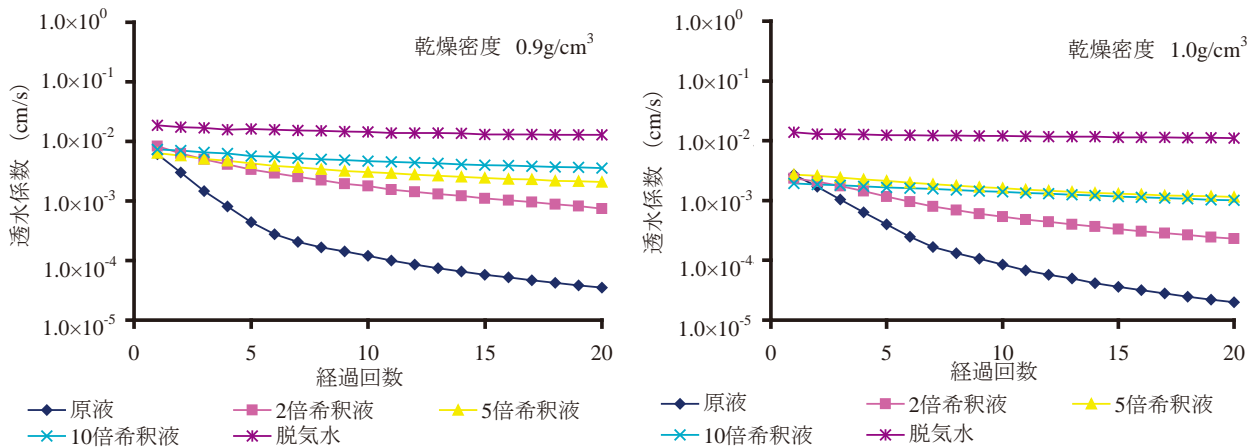
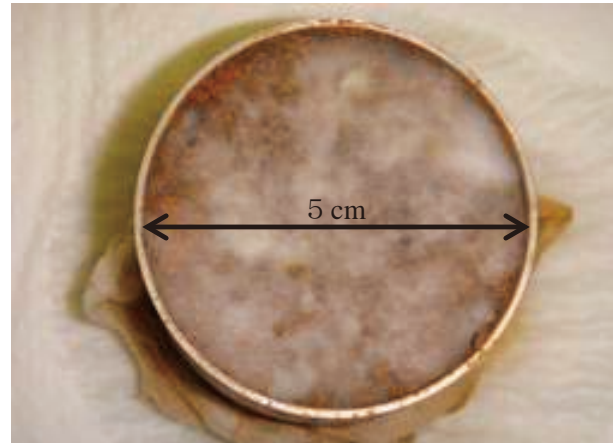


Fig.9 土壌透水性の変化 (残渣液表面散布条件)  
Changes of soil permeability

えると、透水係数の低下率が小さくなった。乾燥密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  における10倍、5倍、2倍希釈液添加による透水性の低下率は乾燥密度  $0.9 \text{ g/cm}^3$  にくらべて大きい。その理由は、乾燥密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  の土壌では間隙量が少ないことによると考えられる。

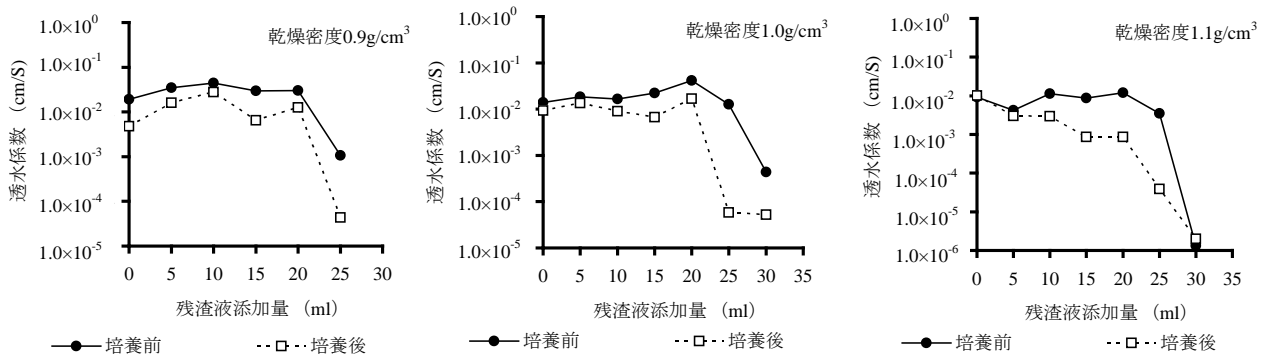
**Fig.10** は残渣液添加後、飽和状態で1週間放置した土壌表面の写真である。カビが土壌表層に膜を作っていたことが目視で確認できる。カビ増殖による土壌の透水性の変化を **Fig.11** に示す。いずれの乾燥密度の土壌サンプルについても、カビ増殖後の土壌透水係数は、増殖前に比べ小さい。また、残渣液添加量が多いほど透水係数の低下度合いが大きいことも明らかであった。その理由は、増殖した微生物による土壌表面の撥水性膜の形成と土壌間隙の詰まりであると考えられる。

残渣液を添加した懸濁液分散直後と分散1時間後の懸濁液表層5cmの浮遊土砂濃度を **Fig.12** に示す。5倍希釈液（残渣液100ml添加の500ml溶液）では、分散1時間後においても、分散した粘土粒子が浮遊し続けている。このことから、土壌中の残渣液濃度は5倍希釈であ

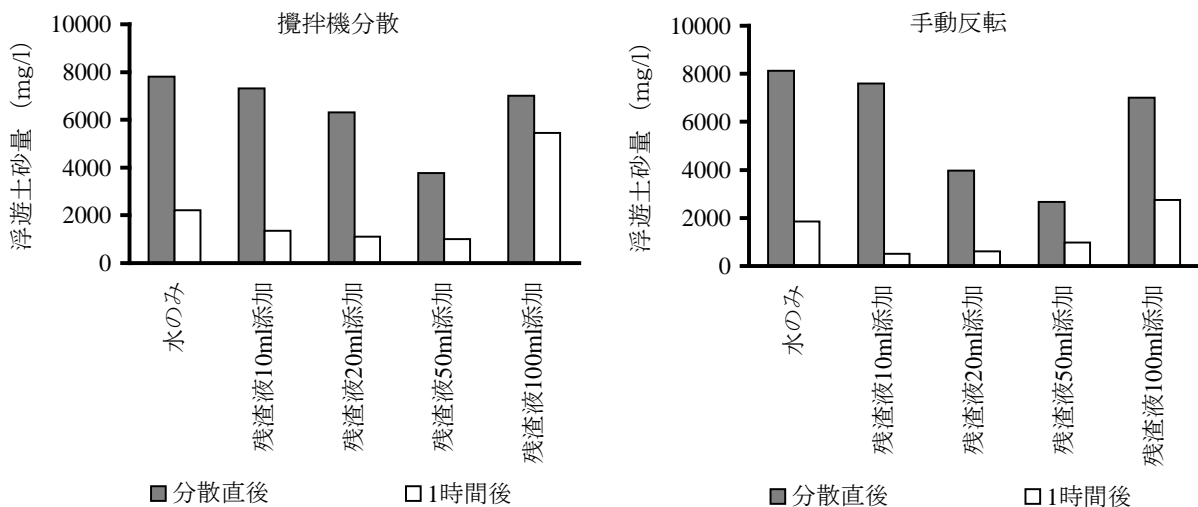


**Fig.10** カビの増殖  
Mold propagation

れば（液相の1/5が残渣液より入れ替わった場合）、粘土分が分散して、土壌透水性を低下させる可能性があると考えられる。



**Fig.11** 土壌透水性の変化（カビ増殖）  
Changes of soil permeability (mold propagation)



**Fig.12** 浮遊土砂の変化  
Suspended solid in different concentration of vinasse

## V 残渣液の施用が土壤蒸発に与える影響

### 1 試験方法

前章の結果から、残渣液の投入が膨潤性の低い鳥尻マーヅ土壌の水分特性に及ぼす影響は、粘土粒子の分散や残渣液中の有機物による土壤間隙の目詰まりによるものであると推察され、これにより土壤蒸発が減少することが考えられる。また、大量の有機物を含む残渣液を表面散布することで、土壤表面に有機物の膜が形成され、通気性が低下し、土壤表面からの蒸発量の減少につながる事が考えられる。

そこで、土壤蒸発に対するこれら二つの要因の影響を検証するためカラム実験を行った。まず、残渣液の蒸発特性を明らかにするため、100gの純水、残渣液原液、残渣液2倍希釈液、残渣液10倍希釈液をビーカーに入れ、温室（平均気温30℃）に静置し、定期的にカラムの重量を測定し、重量変化から蒸発量を求めた。また、残渣液の投入による粘土分の分散の影響を段階的検討するため、粘土含有率が異なる豊浦砂、黒ボク土、鳥尻マーヅを試料として用い、内径6cm、高さ10cmの円筒（Fig.13）に試料（豊浦砂、鳥尻マーヅ、黒ボク土）を詰め、試料が飽和するまで上部からの液体（純水、残渣液原液、残渣液2倍希釈液、残渣液10倍希釈液）を供給した。カラムを温室（平均気温30℃）に静置し、定期的にカラムの重量を測定し、重量変化から蒸発量を求めた。試料表面土壌の水分ポテンシャルが $-60000\text{Pa}$ ～ $-50000\text{Pa}$ 程度に達した時点で観測を終了し、観測終了後の円筒内土壌の上下層の含水比を測定した。

また、大量の一価陽イオンの添加が土壤蒸発に与える影響を明らかにするため、最も粘土含量が多い鳥尻マーヅ土に、純水、2% KCl 溶液（残渣液2倍希釈液相当）、4% KCl 溶液（残渣液原液相当）添加して、蒸発量の変化を比較した。なお、残渣液は $\text{K}^+$ と $\text{Cl}^-$ の含量が多いため、本実験ではKCL溶液を用いることとした。

次に、残渣液の投入が土壤蒸発に伴う水分特性の変動に与える影響を明らかにするため、土壤カラム実験を行った。内径12cm、高さ20cmの円筒形カラム（Fig.14）

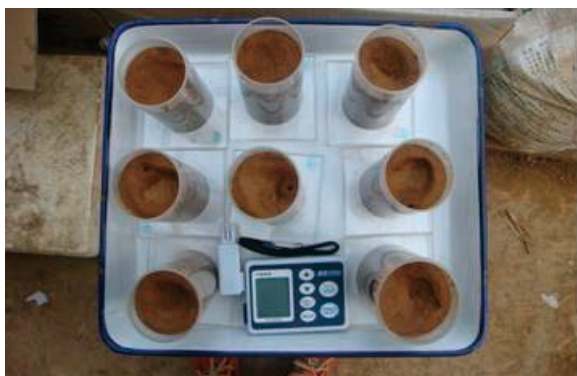


Fig.13 蒸発実験

The evaporation experiment

に試料（豊浦砂、鳥尻マーヅ土、黒ボク土）を底辺から15.5cmまで詰め、試料が完全に飽和するまで、カラムの下端の吸水口から液体（純水、残渣液原液、残渣液2倍希釈液、残渣液10倍希釈液）を供給した。カラム側面の土壤表面から0.5cm、5.5cm、15.5cmの位置にテンシオメーターを取り付けてポテンシャル水頭を測定した。さらに、カラム全体を電子天秤の上に設置し、自動計測した重量変化から積算蒸発量を求めた。試料の上部乾燥し、最上部のテンシオメーターが $-90000$ ～ $-80000\text{Pa}$ 程度に達して測定不能になった段階で、実験を終了した。その後、カラムの0～10cmの上と10～20cm下層の試料を採取し、含水比、透水性および $-100000$ ～ $-3160\text{Pa}$ の土壤水分特性を測定した。なお、 $-100000$ ～ $-3160\text{Pa}$ の土壤水分特性は100ml円筒で採取した試料を加圧板法で測定した。

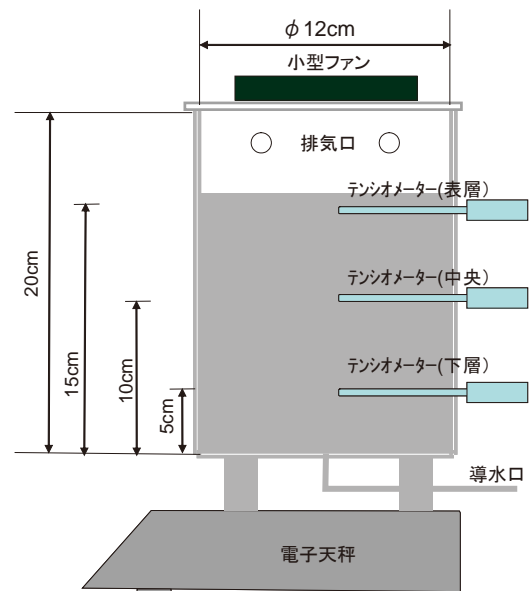


Fig.14 蒸発実験装置

Diagram of evaporation experiment

### 2 結果と考察

残渣液原液、2倍希釈液、10倍希釈液と純水の蒸発量の変化をFig.15に示す。残渣液の原液の蒸発量が最も多く、純水の蒸発量の1.1倍であった。その理由として、残渣液の色による熱吸収性と残渣液中に残留していたメタノールの蒸発による影響と考えられる。

残渣液原液、2倍希釈液、10倍希釈液と純水で飽和した鳥尻マーヅ土、豊浦砂および黒ボク土の蒸発量の変化をFig.16～Fig.18に示す。全てのカラムは、観測初期にくらべて観測後期の蒸発量が小さい。また、残渣液原液と2倍希釈液で飽和したカラムの蒸発量は純水で飽和したカラムのより蒸発量より小さい。鳥尻マーヅ土では残渣液原液と2倍希釈液で飽和したカラムの累積蒸発量は純水で飽和したカラムの62%、82%で、豊浦砂では残渣液原液と2倍希釈液で飽和したカラムの累積蒸発量

は純水で飽和したカラムの44%, 56%であり, 黒ボク土では残渣液原液と2倍希釈液で飽和したカラムの累積蒸発量は純水で飽和したカラムの74%, 91%であった。一方, 鳥尻マーヅ土と黒ボク土では, 10倍希釈液で飽和したカラムと純水飽和したカラムの蒸発量に顕著な差が見られなかった。黒ボク土は鳥尻マーヅに比べて粘土

分が少なく, 残渣液の投入による蒸発量の減少量も少ないことから, 残渣液が土壌の分散に与える影響は粘土分の多い鳥尻マーヅ土壌のほうが大きいと考えられる。また, 残渣液を投入した豊浦砂の土壌蒸発量の減少が最も多いのは, 残渣液中の有機物が土壌表面で形成した黒い膜層 (Fig.19) が最も厚いためと考えられる。

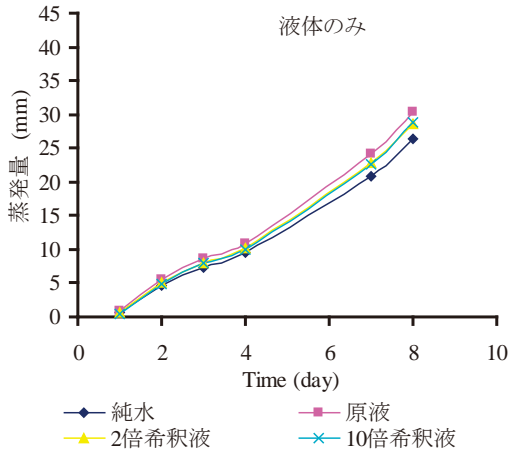


Fig.15 液体蒸発量変化  
Changes in evaporation of liquid

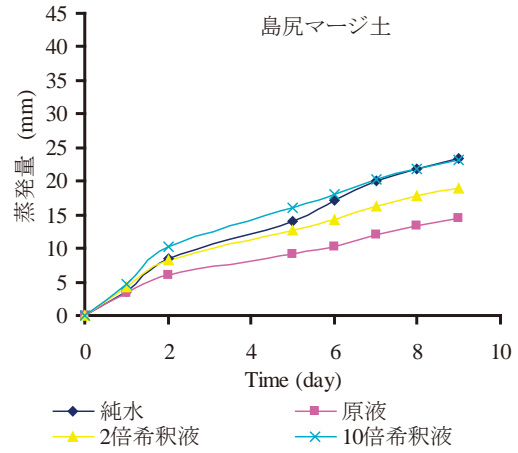


Fig.16 土壌蒸発量の変化 (鳥尻マーヅ土)  
Changes in evaporation of soil (Shimajiri-maji)

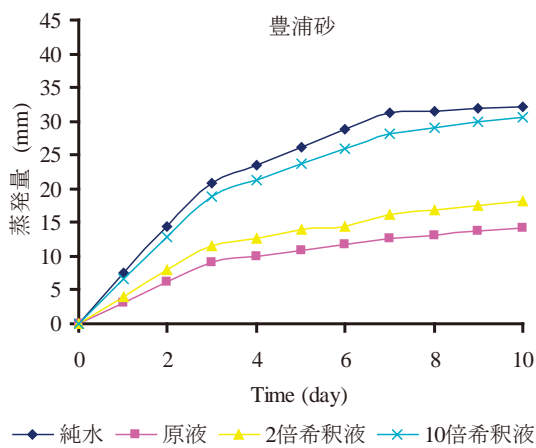


Fig.17 土壌蒸発量変化 (豊浦砂)  
Changes in evaporation of soil (Sand)

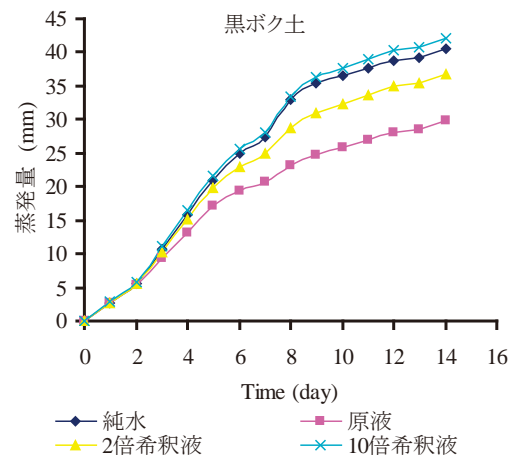


Fig.18 土壌蒸発量の変化 (黒ボク土)  
Changes in evaporation of soil (Andosols)

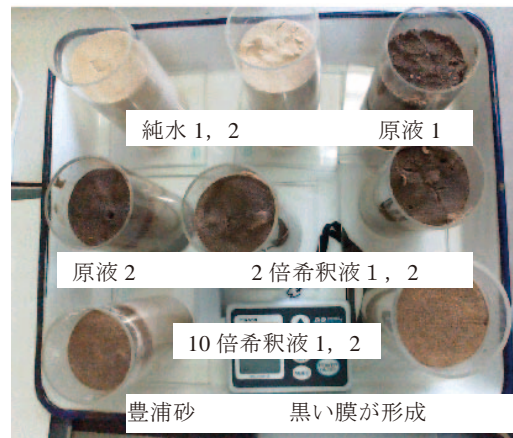
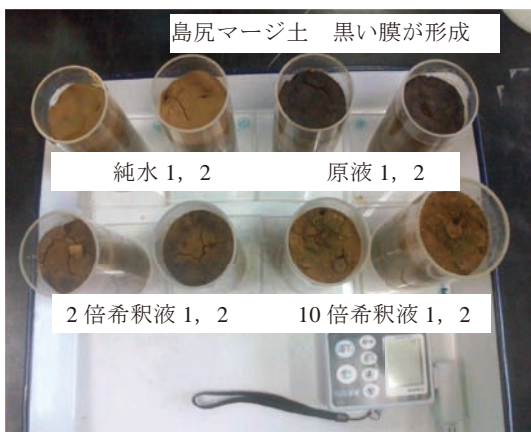


Fig.19 土壌表面の黒い有機物膜  
Black organic film on surface of soil

異なる KCl 濃度の溶液で飽和した鳥尻マージの蒸発量の変化を Fig.20 に示す。KCl 4% 溶液と KCl 2% 溶液で飽和した土壌の累積蒸発量は純水飽和した土壌の 77%, 87%であった。KCl の投入が土壌蒸発量を減少させたことが明らかになり、残渣液の大量の一価陽イオンは土壌蒸発量を減少させた要因の 1 つであることが推察

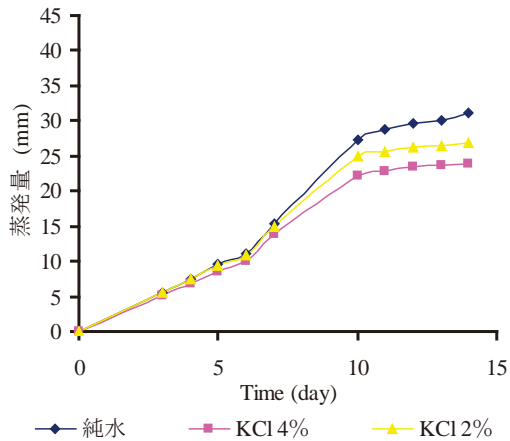


Fig.20 土壌蒸発量変化 (KCl 添加)  
Changes in evaporation of soil (applying KCl)

される。

蒸発カラム試験で観測した豊浦砂、鳥尻マージ土、黒ボク土の土壌蒸発の時系列変化とテンシオメーターで観測された各土層の水分変化を Fig.21 ~ 23 に示す。豊浦砂と鳥尻マージ土では、下層土壌の水分ポテンシャルに比べ、表層土壌の水分ポテンシャルの急激な低下が見られた。一方、クロボク土では表層と下層土壌の水分ポテンシャルの低下が緩やかであった。純水、残渣液原液、残渣液 2 倍希釈液、残渣液 10 倍希釈液投入カラムにおいて最上部のテンシオメーターが  $-80000 \sim -90000$  Pa 程度に達するまでの所要時間は、豊浦砂では各々 8.7, 10.0, 18.1, 15.1 日、鳥尻マージ土では各々 9.7, 9.7, 9.0, 17.9 日、黒ボク土では各々 9.8, 6.0, 20.7, 34.7 日であった。累積蒸発量は、豊浦砂では各々 57.2, 50.9, 27.4, 20.1mm、鳥尻マージ土では各々 44.4, 51.2, 31.6, 31.9 mm、黒ボク土では各々 47.8, 40.8, 41.5, 38.1 mm であった。平均日蒸発量は、豊浦砂では各々 6.6, 5.1, 1.5, 1.3mm/d、鳥尻マージ土では各々 4.6, 5.3, 3.5, 1.9 mm/d、黒ボク土では各々 4.9, 6.9, 2.0, 1.1mm/d であった。土壌性質によって異なるが、残渣液 2 倍希釈液や原液の投入した場合、カラムの最上部のテンシオメーターが  $-80000 \sim -90000$  Pa 程度に達するまでの所要時間が長くなり、平均日土壌蒸発量が少なくないことが明らか

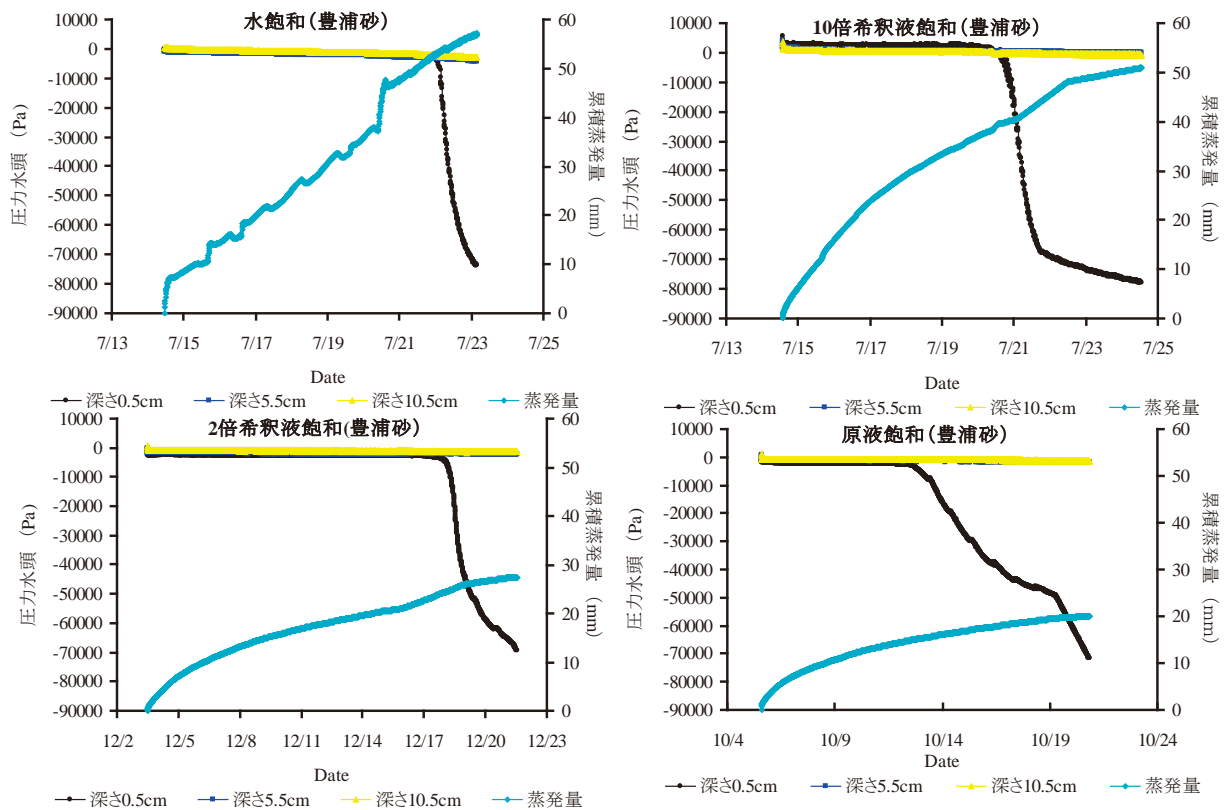


Fig.21 土壌蒸発量の変化 (豊浦砂)  
Changes in evaporation of soil (Toyouira sand)

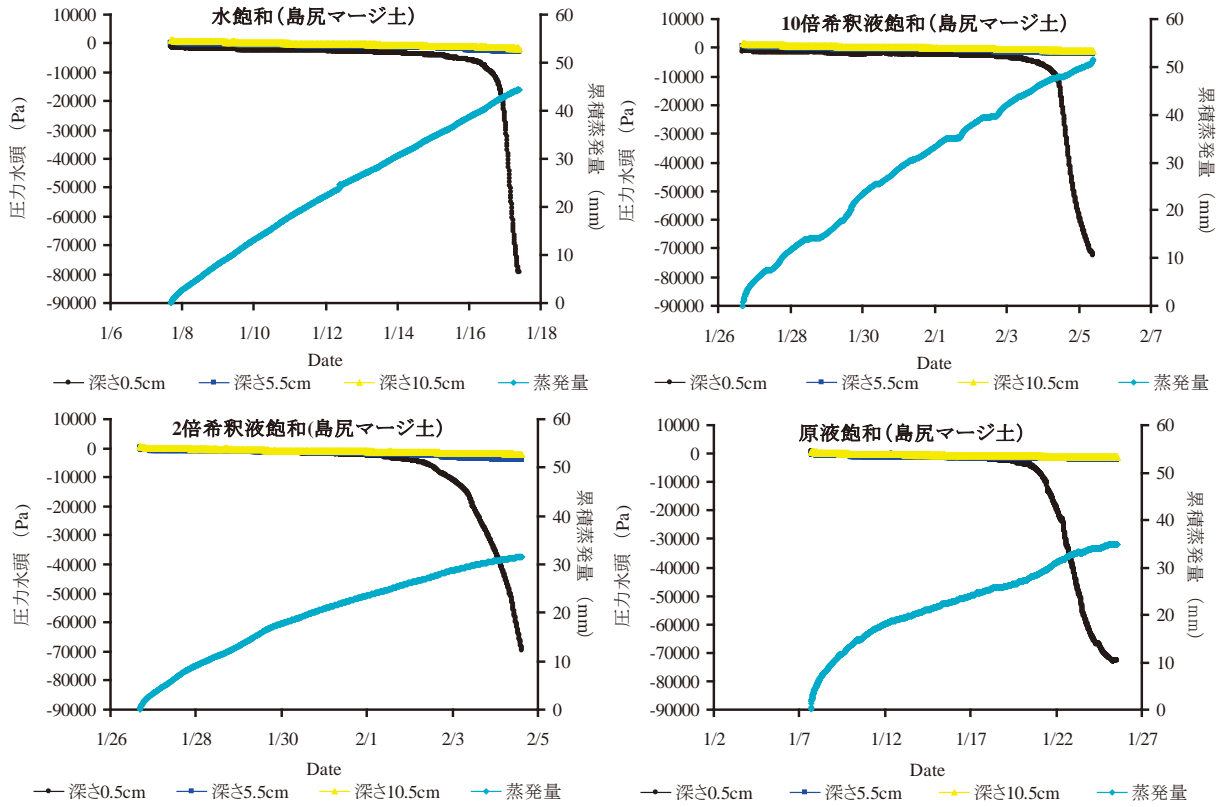


Fig.22 土壤蒸発量の変化 (島尻マーヅ)  
Changes in evaporation of soil (Shimajiri-maji)

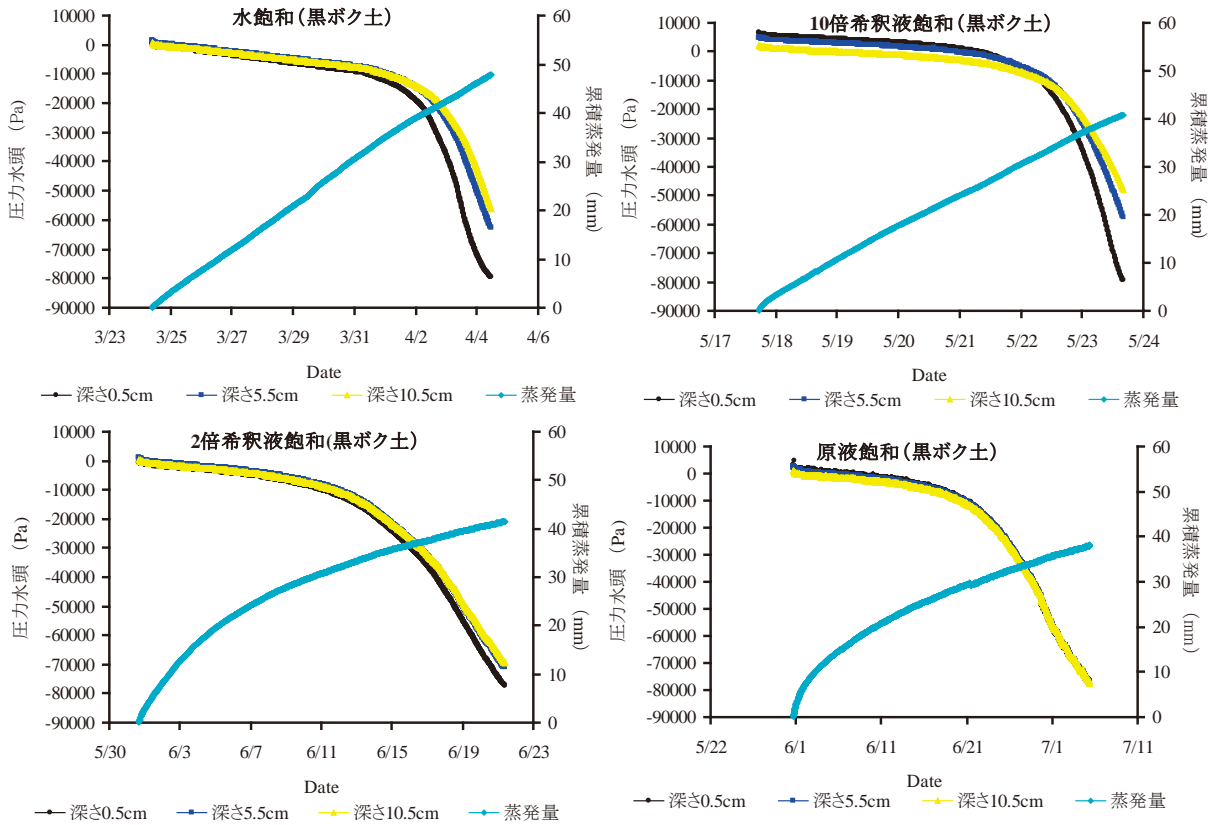


Fig.23 土壤蒸発量の変化 (クロボク土)  
Changes in evaporation of soil (Andosol)

となった。

実験終了後カラム上下層土壌の含水比、 $-100000 \sim -3160\text{Pa}$ の体積含水比および透水係数を **Table 7** に示す。豊浦砂および鳥尻マージ土では、残渣液を添加したカラムの土壌含水比は純水を添加したカラムより高い傾向が見られた。黒ボク土では残渣液を添加したカラムの土壌の含水比は純水を添加したカラムより低い傾向が見られた。また、豊浦砂と黒ボク土では、残渣液を添加したカラムの透水係数は純水を添加したカラムのより低い傾向が見られた。さらに、鳥尻マージ土について残渣液を添加したカラムの $-100000 \sim 3160\text{Pa}$ の体積含水比は純水を添加したカラムより高い傾向が見られた。透水性が良く、保水性が悪い鳥尻マージ土は残渣液の投入によって、有機物や分散した粘土粒子が土壌間隙を閉塞し、土壌の有効水分量（ $-100000 \sim -3160\text{Pa}$ の水分量）が増加したことが明らかになった。

## VI 結 言

残渣液を農地土壌に還元する場合、作物に与える影響のみならず、農地土壌中における残渣液の動態および土壌環境の変化も検討しなければならない。そのため、本研究ではエタノール蒸留残渣液の農地施用による土壌の水分・養分の移動特性や土壌物理性への影響を各種試験により明らかにし、残渣液の農地施用の留意点や可能性を示すことが必要である。そこで、残渣液の農地への施用が地下水水質に与える影響を明らかにするため、施用量については、残渣液中の窒素成分を窒素肥料としての有効利用する場合と限られた面積に残渣液の大量施用する場合を考慮して3つの浸透試験を行った。また、施用方法については、作土層混合と表面散布の違い、原液散布と希釈液散布の違いを検討した。また、施用時期については、施用直後に降雨が発生した場合を想定して、降雨に伴う残渣液の色素の浸透特性を検討した。さらに、保水性が悪い鳥尻マージに対して有機物を含む残渣液の

施用が土壤理化学性改善する効果を検討するため、残渣液施用による土壌水分移動の変化を透水性試験と蒸発試験を行った。これらの試験結果から、以下の事項が明らかになった。

(1) 夏植サトウキビ栽培に必要な窒素成分の全量を残渣液で代替（330t/ha）する実験では、残渣液施用による無機態窒素の下方への浸透量は化学肥料施用より少ないが、浸透水のEC値が農業用水基準を超えることや、浸透水の色が目視で確認できることが明らかになった。このことから、土層が浅い場所で多量の残渣液を農地還元するには、降雨期や施用直後の灌水を避けるべきである。

(2) 飽和した鳥尻マージ土壌に大量の残渣液を混合すると鳥尻マージ土壌の透水性を著しく低下することが確認されたため、農地に残渣液を投入する場合は土壌混合よりも表面散布することが望ましい。また、希釈した残渣液の散布量が原液相当で約250t/haを超える時点で浸透流出水のECの急激な増加が見られたため、残渣液の施用量は原液成分に換算して250t/ha以下に設定する必要がある。

(3) 飽和した土壌に残渣液を施用した後、降雨などにより過剰間隙水圧が発生すると、色素が直ちに浸透流出するため、土壌が飽和状態である場合は残渣液を施用してはならないと判断される。また、残渣液に含まれる成分の施用量が同じ場合、希釈液の色素の流出率が原液のよりも低いことから、残渣液の希釈液による施用が望ましい。

(4) 保水性が悪い鳥尻マージ土は残渣液の施用によって、有機物や分散した粘土粒子が土壌間隙を閉塞して、土壌の透水性と蒸発を低下させることが明らかとなった。一方、土壌の有効水分量が増加して土壌の保水性を改善する効果が見られた。

以上のことから、鳥尻マージ土壌畑における多量の残渣液の農地施用は土壌の保水性を改善する効果があると考える。ただし、残渣液の農地施用にあたっては、降雨期や施用直後の灌水を避け、250t/ha以下の原液相当量

**Table 7** 実験終了後各カラムの土壤物理性  
The physical properties of soil in each column

	含水比 (%)			$-100000 \sim -3160\text{Pa}$ の体積含水比 (%)			透水係数 (m/h)		
	豊浦砂	鳥尻マージ土	黒ボク土	豊浦砂	鳥尻マージ土	黒ボク土	豊浦砂	鳥尻マージ土	黒ボク土
水 (上層)	0.30	21.59	39.48	2.96	6.91	10.93	2.26	0.28	0.34
水 (下層)	3.41	34.48	43.00	2.68	6.74	14.05	2.38	0.29	0.36
10倍希釈液 (上層)	4.92	28.22	40.12	3.15	6.49	10.71	1.42	3.57	0.32
10倍希釈液 (下層)	9.53	35.21	41.91	2.77	6.60	11.73	1.28	0.89	0.10
2倍希釈液 (上層)	8.89	24.88	37.58	3.04	7.08	9.11	0.82	0.97	0.07
2倍希釈液 (下層)	16.04	32.81	38.46	3.01	7.15	8.49	0.71	0.34	0.27
原液 (上層)	7.76	35.06	31.85	3.70	7.30	7.03	0.45	1.09	0.04
原液 (下層)	21.53	44.04	39.51	3.56	9.32	7.70	0.97	0.91	0.11

の希釈残渣液を施用すべきである。

なお、本研究では、残渣液の農地施用にあたり、土壌物理性と地下水に悪影響を与えない投入限界を検討した。現地における残渣液の農地施用の可能性については、作物生育の面についても十分な検討を行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 足立嗣雄, 與古田幹也 (1981) : 主要土壌群の生産的特性, 沖縄県に分布する特殊土壌の生産的特性, 九州農業試験所研究資料, 60, 1-35
- 2) Allison, L. E. (1947) : Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence, *Soil Sci.*, 63, 439-450
- 3) 赤江剛夫 (1988) : 添加塩濃度がベントナイト・水系の分散・凝集および流動特性に及ぼす影響ーベントナイト・水系の分散・凝集と流動特性 (II)ー, 農業土木学会論文集, 133, 43-50
- 4) Booth, R. J. and Lightfoot, C. J. (1990) : The reticulation of ethanol stillage through irrigation systems and its use for fertilisation of sugarcane in Zimbabwe, *Agricultural Water Management*, 17(1), 49-58
- 5) 陳 嫣, 凌 祥之 (2010) : バイオエタノール蒸留残渣液の農地利用についてー土壌環境およびトマト・ダイコンの生育・品質に与える影響ー, 農業土木学会論文集, 265, 1-7
- 6) 北原はるか, 軽部重太郎 (2002), 火山灰土の分散凝集特性に及ぼす土壌構成成分の影響, 農業土木学会論文集, 220, 43-49
- 7) 馬 玉露, 軽部重太郎 (2004) : カオリナイトとハロイサイト質粘土の分散凝集特性およびそれらに対するイモゴライト添加の効果, 農業土木学会大会講演会講演要旨集, 2004, 332-333
- 8) 日本下水道協会 (2000) : 下水道用語集 2000 年版
- 9) Quirk, J. P. and Schofield, R. K. (1955) : The effect of electrolyte concentration on soil permeability, *J. Soil Sci.*, 6, 163-178
- 10) Resende, M. D. V. de (2006) : Selection via simulated individual BLUP based on family genotypic effects in sugarcane., *Pesquisa Agropecuária Brasileira (Brazil)*, 41 (3), 421-429
- 11) 関 勝寿, 神谷準一, 宮崎 毅 (2005) : 湛水浸透条件下における細菌・糸状菌による飽和透水係数の低下およびその温度依存性について, 農業土木学会論文集, 237, 13-19



# A Study on The Effect of Applying Vinasse From Bio-Ethanol Production to Farmland on Leaching and Physical and Chemical Properties of Soil

CHEN Yan and SHIONO Takahiro

## Summary

During bio-ethanol production from sugarcane molasses, a large amount of vinasse, which is strongly acidic with high COD and BOD, is produced as a by-product. Disposal of vinasse poses restriction in conducting sustainable bio-ethanol production. This study therefore investigates the effect of applying vinasse to farmland on leaching and physical and chemical properties of soil, in order to evaluate the possibility of applying vinasse to farmland.

The results indicate that, when large amounts of vinasse are applied to farmland as a substitute for the nitrogen in conventional chemical fertilizers in sugarcane cultivation, it is necessary to take into account the leaching of ions and colored materials contained in the vinasse.

It is recommended that the vinasse be applied to soil surface after being diluted. This reason is because: (1) incorporation of a lot of vinasse into soil reduced permeability of the Shimajiri-maji soil remarkably; and (2) the leaching rate of colored materials after applying the diluted vinasse was lower than that after applying the undiluted vinasse. Moreover, if soil is saturated and there is a rainfall after vinasse application, there would be a sudden increase in leaching of ions and colored materials in the vinasse. Therefore, applying undiluted vinasse in excess of 250t/ha is not recommended.

In addition, the high contents of monatomic cations and organic matters of vinasse would have significant impacts on the dispersion of clay, which in turn caused a change in soil porosity and eventually permeability and evaporation capacity of the soil.

**Keywords** : bio-ethanol, vinasse, infiltration, soil permeability, dispersion, soil evaporation



〔農工研技報 211〕  
171～185, 2011〕

## 越流堰からの落水によって発生する低周波騒音の特徴と低減工法

高木強治\*・後藤真宏\*\*・浪平 篤\*・関谷 明\*\*\*・峯岸雄一\*\*\*\*・長嶺拓夫\*\*\*\*\*

### 目 次

I 緒 言	171	2 スポイラの騒音低減効果	176
II 実験方法	171	V 新たな低周波騒音低減工法	177
1 防音室の設置と水理模型の製作	171	1 原理と特徴	177
2 騒音の物理的評価と落水音の計測方法	172	2 騒音低減効果の検証	178
III 落水音の特徴	173	VI 現地実証試験	182
1 越流水深と騒音レベル	173	1 地区の現況	182
2 落水音の周波数特性	174	2 樋型対策工の設置とその効果	183
3 音圧レベルの鉛直分布	174	VII 結 言	183
IV 低周波騒音低減工法の課題	175	参考文献	183
1 スポイラの原理	175	Summary	185

### I 緒 言

騒音規制法施行状況調査によれば、平成21年度の騒音苦情件数は15,101件で、このうち低周波騒音に係る苦情件数は245件ある(環境省水・大気環境局大気生活環境室, 2010)。ここ20年ほど、前者は横ばいで推移している一方で、後者は急速に増加傾向にあり、低周波騒音の問題はしだいに表面化するとともに、その対応が求められつつあるところである。

近年、都市の拡大に伴って、都市と農村域が接近し、農家と非農家との混住化が進んでいる。同時に、農業用施設が市街地内に埋没するなど、施設と地域の生活圏が急接近して来ている。このため、農業用施設の運用面でも、様々な課題がクローズアップされて来ている。その一つとして、農業水路を構成するゲートや落差工などの水利施設の設置箇所周辺で、通水時に発生する落水による騒音が挙げられる。落水騒音には、越流水の着水または着床時の音だけでなく、水膜の振動により発生する音があり、特に後者の騒音には、人の聴覚では認識できない低周波音が含まれている(竹林ら, 1986)。一般に、

このような低周波音には、障子や窓枠のがたつきなどの物理的問題や、頭痛や不眠などの生理的問題を誘発する可能性が指摘されている(環境省環境管理局大気生活環境室, 2002)。

水膜振動による低周波音の発生は古くから知られている課題で、治水のための堰やダムのゲートからの大規模な越流に起因する落水音については、その特性の把握や対策の検討もなされている(竹林ら, 1993)。一方、農業用の頭首工や分水工のような、比較的低落差の越流堰で、運用時の越流水深が小さな水利施設に対しては、その低周波騒音の実態把握や対策の検討は十分とは言えない。そこで本研究では、越流堰における落水音の特徴を詳細な室内実験により明らかにする。さらに、低周波騒音低減に係る対策工とその効果について述べる。

本研究は、農林水産省官民連携新技術研究開発事業(2007～2009年度)による成果である。著者らの既報(高木ら, 2010; 関谷ら, 2010)では、その研究の一部が報告されている。本稿は、これらに加えて、低周波騒音の発生メカニズムを含め、低減工法開発に係る過程を詳細に示すことを目的としてとりまとめた。なお、現地実証試験にあたっては、会津北部土地改良区の頭首工を利用させていただくなど、関係各位に多大なるご協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

### II 実験方法

#### 1 防音室の設置と水理模型の製作

本研究では、越流堰からの落水によって発生する低周

\* 施設資源部水源施設水理研究室

\*\* 施設資源部上席研究員

\*\*\* (株)建設技術研究所

\*\*\*\* ライト工業(株)

\*\*\*\*\* 埼玉大学

平成23年1月19日受理

キーワード: 水膜振動・周波数特性・G特性・A特性・音圧

波騒音を対象とする。越流堰は頭首工の土砂吐や用水路の分水工で多く採用されているが、ここでは前者の規模を参考にして水理模型を製作し、越流時に発生する音を目的に応じた騒音計で測定する。

ある種の騒音を測定する場合、それ以外の騒音が存在すると、騒音計はそれらを重ね合わせてひとつの音として捉える。この影響を避けるためには、一般に騒音が大きくなる昼間の時間帯を避け、騒音が小さくなる夜間に実験を行うことが推奨される。しかし、農村工学研究所の敷地内で夜間に行った落水音の予備実験では、周囲からの雑音の影響が大きく、目的とする騒音の特性を把握することが困難であった。そこで、自然環境下の暗騒音の影響を取り除き、精度良く騒音特性を把握するために、まず越流堰の水理模型が入る大きさの防音室を設置することとした。

防音室は、農村工学研究所頭首工第1実験棟内に設置した。寸法は幅5m、奥行き7m、高さ5mで、厚さ12mmの合板に吸音材として厚さ50mmの高密度グラスウールボード（旭ファイバーグラス株式会社製、ソノボードSNB32）を内壁、外壁に敷き詰めた（Fig.1）。給水のために、防音室の背面から内部に導水管を引き込み、前面には越流堰からの落水の排出口（幅2m、高さ0.4m）を設けた。

防音室の内部に、落差2m、幅1.77mの木製の越流堰を製作した（Fig.2）。一般に、水理模型実験では、Froudeの相似則に従って原型寸法を縮小した模型を使用するが、音にはFroudeの相似則が適用されないため、この越流堰の規模は原型を想定している。なお、模型の落差は、国営で建設された頭首工の堰高が2m前後に集中している（農業農村整備情報総合センター、2009）ことから決定しており、幅は実験に供せられる施設の制約等から定めたものである。実験用水の供給は、導水管を越流堰の背後の給水槽に接続し、整流後に前面の堰を越流させる。越流水は側方に飛散しないよう、片側を木製、片側をアクリル製の高さ2.5m、幅1mの板で覆い、落水後はコンクリートブロックで作成した長さ2.4mの導水路で防音室の外に排出する。

## 2 騒音の物理的評価と落水音の計測方法

一般に、音は様々な周波数の音の重ね合わせで成り立っている。人間の聴覚で捉えることができる音は、20～20kHzといわれており、この範囲を可聴音域と呼ぶ。ここで、低周波領域は1～100Hz、このうち超低周波領域が1～20Hzである。音の大きさは、音圧の実効値（ $p$  = 大気圧との差の二乗平均）と基準音圧（ $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa）の比の対数  $20 \log_{10} (p/p_0)$  で表す。これを音圧レベルと呼ぶ。単位はデシベル（dB）である（日本音響材料協会、1982）。

騒音は人間にとって不快に感じる音のことである。感覚的尺度である騒音は、前述の物理的尺度である音圧



Fig.1 施工中の防音室  
Sound proof room under construction



Fig.2 越流堰の水理模型  
Hydraulic model of overflow weir

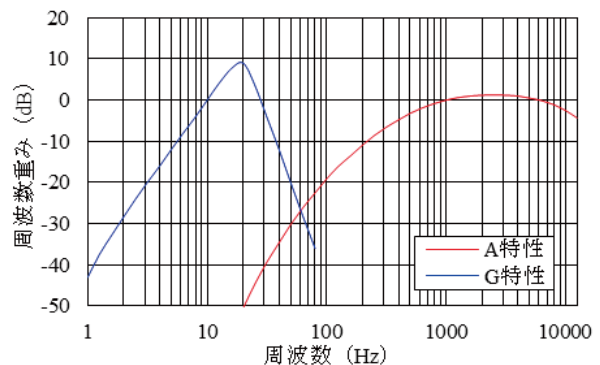


Fig.3 A特性とG特性の周波数重み  
A-weighted and G-weighted frequency response

レベルに、人間の感覚に応じた周波数補正を行って算出される。つまり、騒音の大きさを表すには、周波数ごとに補正を行った音圧レベルを積算して表示する。これが騒音レベルで、単位は音圧レベルと同じくdBで表す。可聴音域の補正を行ったものがA特性値、超低周波音が人体感覚に与える影響を評価する補正を行ったものがG特性値である。A特性値の聴感補正フィルタ（経済産業省、2005）では、低周波領域における負の補正值が大きい（Fig.3）。たとえば、周波数1000Hzの補正值は0dBであり、200Hzで-11dB、100Hzで-19dB、50Hzで-30dB、20Hzで-51dB程度の補正を行う。このため、

A 特性値の計算には、低周波領域の音圧レベルがほとんど考慮されない。一方、G 特性の聴感補正フィルタ（環境省，2000）では、周波数 20Hz に正の補正值のピーク +9dB があり、周波数が低い方へは 10Hz で 0dB，5Hz で -12dB，高い方へは 25Hz で +4dB，40Hz で -12dB，80Hz で -36dB と急激に音圧レベルを減衰させる（Fig.3）。したがって、G 特性に影響するのは 80Hz 以下の周波数領域の音になる。

低周波音の測定には、リオン社製低周波音レベル計 NA-18A，可聴音の測定には、同社製精密騒音計 NA-27 を用いた。計測位置は、Fig.4 に示すように、堰の下流から 1m，床板から 1.2 m の地点である。一般に、音源の音を正確に捉えるには、対象に近接して測るのが望ましいが、ここでは側方に設けた飛散防止板の大きさを考慮して測定位置を決めた。ただし、計測高さについては、その目的によって騒音計の位置を適宜変更する。計測時間は、1 回の測定につき 60 秒である。騒音計では、1/3 オクターブバンドレベルの同時周波数分析を行い、対象周波数を 1～12.5kHz とする。よって、本研究で騒音計によって測定された音の周波数は、すべて 1/3 オクターブバンド中心周波数を意味する。騒音の分析には、A 特性値、G 特性値、周波数ごとの音圧レベルを使用した。

### III 落水音の特徴

#### 1 越流水深と騒音レベル

越流堰からの落水による低周波音を抑制するには、その発生条件や形態を知ることが重要である。I で述べたように、落水騒音には越流水膜の着水あるいは着床時の音だけでなく、水膜の振動により発生する音がある。以下では、落水音の特徴を詳細に分析し、また鉛直方向の音圧レベル分布を評価することで、低周波音の発生条件や発生箇所を把握する。

ここでは、II に示した越流堰の水利模型において、堰上流の越流水深を 1～10cm まで 1cm 刻みで変化させて騒音の観測を行ない、越流水深と騒音レベルの関係を明らかにする（Fig.5）。A 特性値は、越流水深の増加に従って緩やかに大きくなる。ただし、越流水深 1cm の騒音レベルと 10cm のその差は 10dB 程度である。また、騒音レベルが 90dB を過ぎたあたりから、越流水深に対する騒音レベルの増分は小さくなる。一方 G 特性値は、越流水深の増加に従って一様には増加しない。越流水深が 1cm のときは 62dB と小さく、2cm になると急激に大きくなって 85dB となる。さらに、越流水深が 4cm のとき 97dB のピークに達し、5cm でいったん 84dB まで低下する。その後、騒音レベルは、越流水深の増加に従って大きくなるが、その増分は次第に小さくなっていく。このように、越流水深の変化に対して、可聴音域の騒音を表す A 特性値と、超低周波領域の騒音を表す G 特性値の特徴は大きく異なる。また、G 特性値は越流水深に

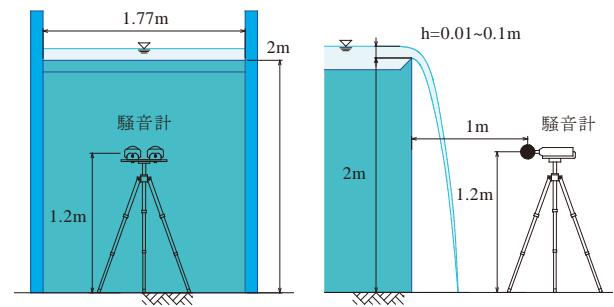


Fig.4 騒音の計測位置  
Measurement position of noise

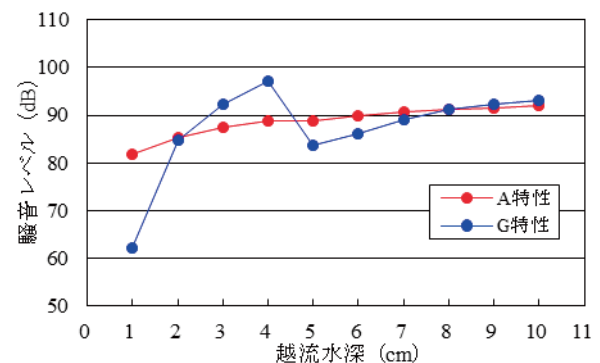


Fig.5 越流水膜から発生する騒音  
A-weighted and G-weighted sound pressure level at water screen against overflow depth

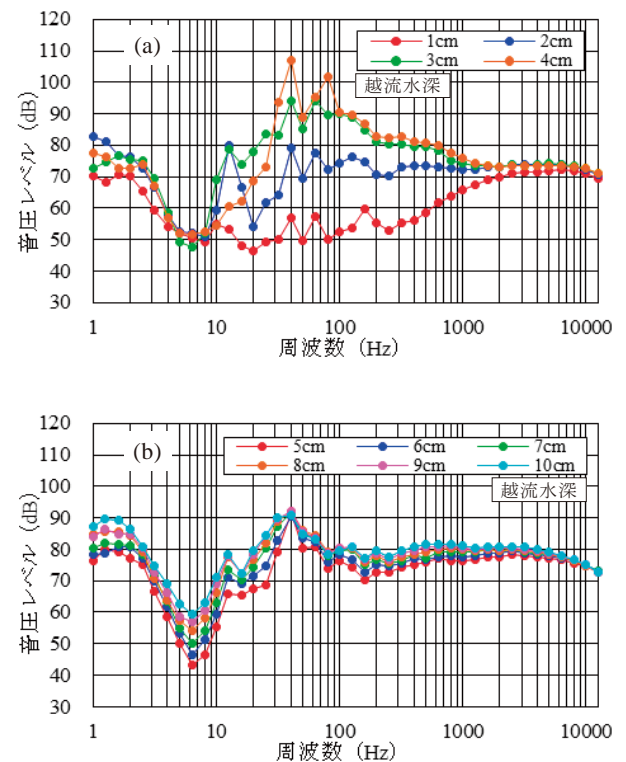


Fig.6 越流水膜から発生する騒音のパワースペクトル：  
越流水深 (a) 1-4cm, (b) 5-10cm  
Power spectrum at water screen by overflow depth

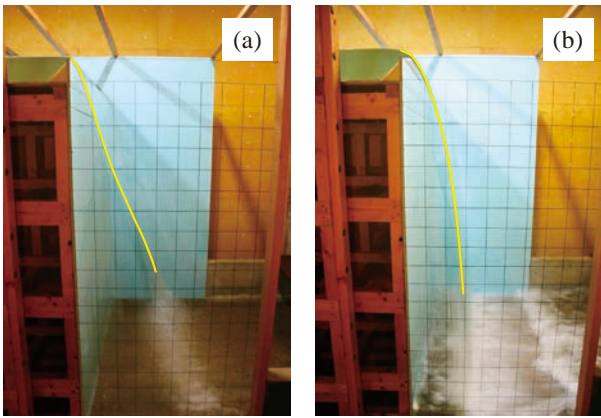


Fig.7 越流水膜の形状：越流水深 (a) 1cm, (b) 4cm  
Shape of water screen: overflow depth = (a) 1cm, (b) 4cm

対して一様に増加せず、水深が比較的小さな 4cm のときに騒音レベルのピークを示す。なお、低周波音による心身に係る苦情に関する G 特性の参照値は 92dB である（環境省環境管理局大気生活環境室，2004）。ここで、参照値は規制基準、要請限度とは異なり、苦情に対する低周波音影響の可能性を判断する目安の値である。したがって、越流水深が 3～4cm と 9～10cm の G 特性値は、超低周波音の発生による苦情が現地の住民から寄せられた場合に、何らかの対応が必要なレベルの騒音となる。

落水音は、落水の挙動が空気を振動させることで発生する。ここで、仮に越流水膜からは音が発生しないならば、落水音は着床時のエネルギー損失を伴う乱れが発生させているということになる。この場合、落水によって発生する音は、エネルギーと強い相関がある。越流水深の増加は、エネルギーの増加を意味するので、水深の増加に従って騒音レベルが変化しない場合、騒音の要因は水膜着床時の騒音とは別と考えるのが自然である。この観点から、越流水深が 2～4cm で発生している超低周波騒音は、越流水膜の乱れや振動が発生させていると推察される。

## 2 落水音の周波数特性

次に、越流水深ごとの落水音のパワースペクトル、すなわち周波数に対する音圧レベル分布を検討する。分布の特徴を捉えやすいように、越流水深を (a) 1～4cm と (b) 5～10cm に分けて示す (Fig.6)。いずれの水理条件にも共通しているのは、周波数 6Hz 付近に音圧レベルの極小値があり、それから周波数が小さくなるにつれて音圧レベルが上昇すること、および 2000Hz 以上の高周波数領域では、周波数の違いによる音圧レベルの変化が小さいことである。ただし、前者については、後述する V で示すように、落水が水膜を形成していない場合にも同様の現象は発生し、また VI で示すように、屋外にある実際の頭首工では同様の現象は観測されないことが多い。このため、周波数 6Hz 以下の音圧レベル上昇は、模型の共振等によるものと考え、以下の分析からは除外する。なお、

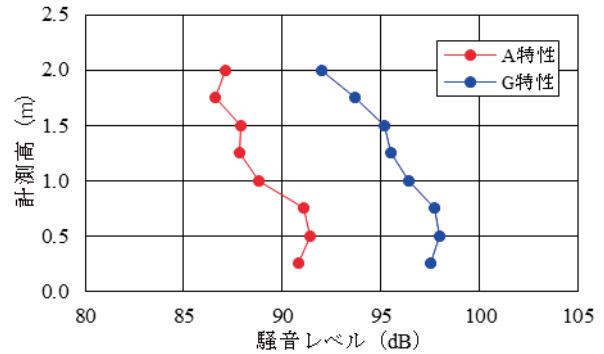


Fig.8 計測高に対する騒音レベル  
A-weighted and G-weighted sound pressure level against measurement height

この周波数領域の音圧レベルは、G 特性ではほとんど考慮されないの、分析結果に実質的な影響はない。

越流水深 1～4cm では、越流水深が増加するに従って、周波数 10～2000Hz の音圧レベルが大きく上昇している (Fig.6 (a))。ピークが現れる周波数に多少の違いはあるが、スペクトルの形状もよく似ている。ここで、越流水深 1cm の音圧レベルは低いが、このときの水膜は非常に薄くて不安定で、水膜の下方で水しぶきが観察される (Fig.7 (a))。このため、水膜の形成が不完全で、水膜と堰の間は完全な閉空間にはなっておらず、水膜の下端が堰から離れている。越流水深が増加して水膜が厚くなってくると、水膜はしだいに安定して、越流水深 4cm では水しぶきが見られなくなる (Fig.7 (b))。このときは水膜と堰の間が閉空間となり、水膜の下端が堰の方に吸い寄せられる。

一方、越流水深が 5cm を越えると、水深の増加に伴って、音圧レベルは全周波数領域に渡ってわずかに上昇する (Fig.6 (b))。また、周波数スペクトルの形状はほぼ同じであり、いずれの越流水深でも、周波数 40Hz に音圧レベルのピークがある。スペクトルの形状が似ている水理条件では、落水音の発生機構も同様であると考えられるので、越流水深が 2～4cm で発生している低周波騒音については、5cm 以上の水深で発生するそれとは異なる騒音の発生機構を有していると考えられる。

なお、低周波音による心身に係る苦情に関する参照値は、1/3 オクターブバンド中心周波数の音圧レベルについても定められており、Fig.6 で音圧レベルのピークがある周波数 40Hz では 57dB となっている（環境省環境管理局大気生活環境室，2004）。したがって、音圧レベルの参照値に従えば、越流水深が 1cm の時を除き、超低周波音の発生による苦情が寄せられた場合には、対応が必要な騒音が発生していることがわかる。

## 3 音圧レベルの鉛直分布

騒音の発生位置を探るために、低周波騒音がもっとも

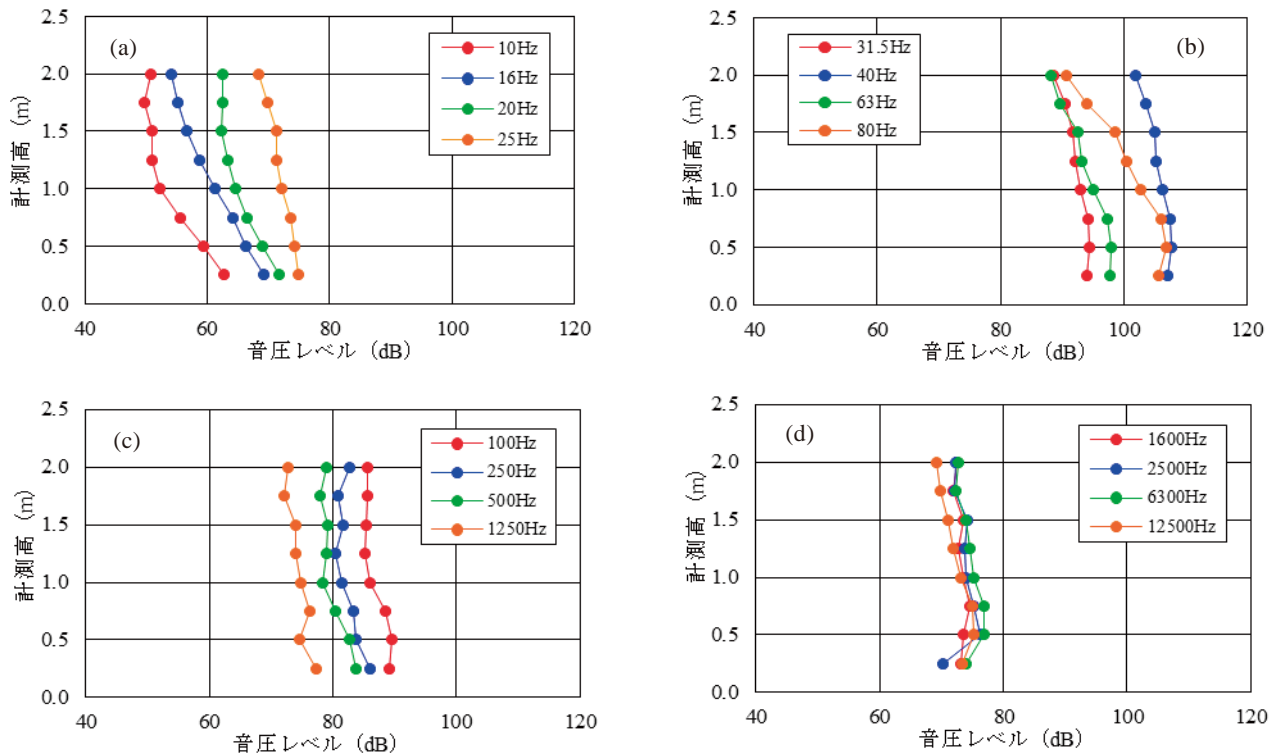


Fig.9 高さ方向の音圧レベル分布  
Distribution of sound pressure level against measurement height

大きくなる越流水深4cmで、鉛直方向の音圧レベル分布を評価する。床版から鉛直上向きに0.25mの地点から、0.25m刻みで堰高2mの地点まで騒音を測定する。

計測高に対する騒音レベルを見ると(Fig.8)，いずれの高さにおいてもG特性値がA特性値を上回っている。また、A特性値、G特性値とも床版に近いほど騒音レベルが高くなる。計測高0.25～0.75mの騒音レベルはほとんど変わらないが、わずかに0.5mの値が高い。このことから、床版よりやや上方の水膜自体から、大きな騒音が発生していることがわかる。

次に、高さ方向の音圧レベル分布(Fig.9)を示す。ただし、すべての1/3オクターブバンド中心周波数を示すと特徴が把握しづらいので、音圧レベルの分布形状が似ている周波数領域ごとに結果を分類し、各領域で4つの周波数を選んで表示した。Fig.9(a)～(d)から、周波数領域ごとの音圧レベルの高さ、分布形状が異なっていることがわかる。

周波数10Hzから25Hzにかけては、音圧レベルがしだいに上昇する。そのピークは床版から0.25m地点にあり、床版近傍の騒音が大きいことを示唆している。周波数がそれを超えると、音圧レベルは急に高くなる。30～80Hzの音圧レベルは、他の周波数領域に比べてもかなり高く、そのピークは床版から0.5m地点にある。ただし、周波数ごとの音圧レベルは、不規則に上下している。100Hzから1200Hzにかけては、音圧レベルがしだ

いに低下していく。そのピークは0.25m地点である。さらに、周波数が1600Hzを越えると音圧レベルの変化が小さくなる。そのピークは0.5m地点である。

このように、周波数領域によって高さ方向の音圧レベル分布は大きく異なっており、床版と床版から上方0.5m付近に大きな音源が存在することが示唆された。特に、G特性値に大きく影響しているのは、Fig.3のフィルター特性とFig.9の音圧レベルの大きさから、30～40Hz付近の音圧レベルである。この周波数領域の音圧レベル分布は0.5mにピークを持つことから、越流水深2～4cmで発生しているG特性値のピークは、水膜下方の振動が主要な音源になっていると考えられる。

#### IV 低周波騒音低減工法の課題

##### 1 スポイラの原理

水膜振動の防止対策としては、一般にゲート天端の突起、すなわちスポイラの設置が挙げられる。これは、スポイラにより水膜を分断して、背面を開いた空間とすることで、その圧力を開放する方法である。低周波騒音の発生原因は、水膜と大気の間での密度と渦度が不均一になって、界面の擾乱が成長することと、ゲートと越流水膜の間に形成される閉空間の圧力変動が相互に作用することとされている(竹林ら, 1986)。したがって、スポイラは後者の要因を取り除くことによって、水膜振動

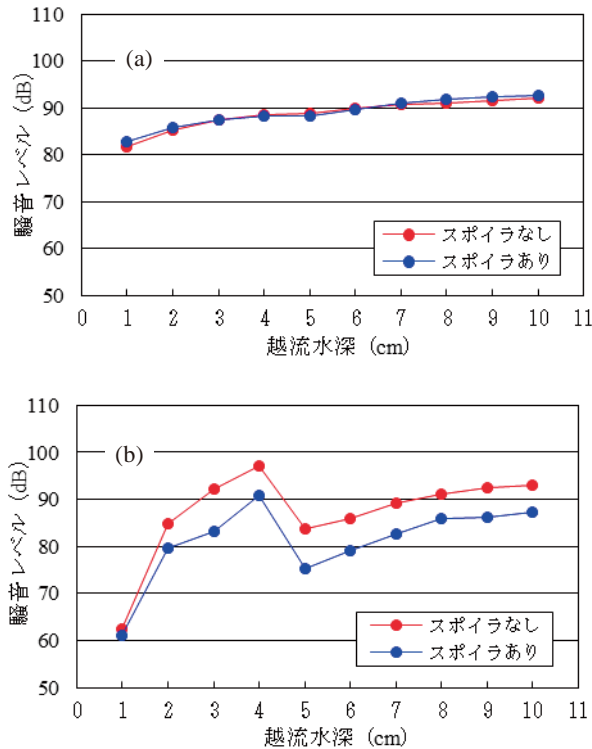


Fig.10 スポイラの有無と騒音レベルの関係：  
(a) A 特性値, (b) G 特性値

(a) A-weighted and (b) G-weighted sound pressure level against overflow depth with or without a spoiler

の抑制を図ろうとするものである。実際に、スポイラの設置は低周波騒音の抑制に一定の効果を上げているのであるが、越流水深が3~4cm程度と小さい場合には、スポイラの設置間隔を1m程度に狭くしても、低周波領域で音圧レベルのピークが発生することが報告されている(後藤ら, 2008)。以下では、新たな対策工開発の指針を得るため、スポイラの設置が騒音に与える影響を分析し、従来工法の問題点を明らかにする。

## 2 スポイラの騒音低減効果

Ⅲと同じ水理条件で、スポイラの有無と騒音レベルの関係について調べた(Fig.10)。なお、このときのスポイラは角材で代用し、越流堰の端に1つだけ設けた。図から明らかなように、A特性値はスポイラの有無に関わらず変化がない。一方、G特性値は、越流水深2~10cmまで、騒音レベルがほぼ均等に5~10dB低下している。ところが、越流水深が2~4cmの騒音レベルは、スポイラがないときのそれと同様に上昇しており、この水理条件での騒音を消去できていない。

Fig.11に、スポイラの有無に対する水膜の形状を示す。水理条件は、G特性値がピークを示す越流水深4cmの場合である。スポイラがないと、水膜は越流堰の方向に引き寄せられ、また水膜の下方に顕著な振動が認められる。Ⅲで述べた、越流水深2~4cmにおけるG特性値

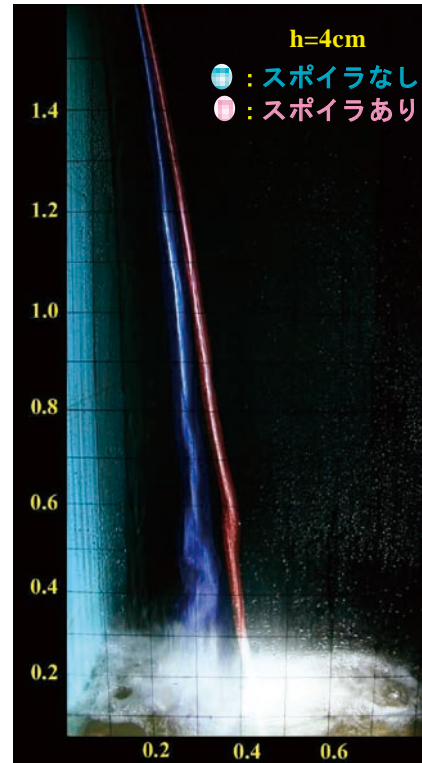


Fig.11 スポイラの有無と水膜の形状：越流水深4cm  
Shape of water screen with or without a spoiler:  
overflow depth = 4cm

のピークの主音源は、水膜のこの部分の振動が原因と考えられる。一方、スポイラがあると、水膜の位置が流下方向前方に移動する。すなわち前者では、水膜背面に閉じ込められている空気が負圧になっており、後者ではスポイラにより給気が行われた結果、水膜の位置が移動したと考えられる。

このように、小さな越流水深時の低周波騒音が効果的に抑制できない事例は各地で見られる。高木ら(2010)の調査によれば、一般に水膜振動の抑制に効果があるとされる3mより狭い間隔で設置されたスポイラ(農林水産省構造改善局建設部設計課, 1999)からでも、実際にはかなり大きな低周波騒音が発生している。

次に、スポイラの有無によるパワースペクトルの変化をFig.12に示す。ただし、越流水深7cm以上では、スペクトル形状が水深6cmのそれとほぼ同じとなるので図を省略した。いずれの水理条件でも、スポイラのパワースペクトル形状はスポイラがないときとほぼ同じである。低周波領域の音圧レベル上昇が水膜振動に起因するものだとすれば、スポイラはその現象そのものを抑制できていない。これは、スポイラが水膜背面の閉空間の開放のみを目的としたもので、水膜の形成とその振動の抑制には機能しないためである。つまり、スポイラは、水膜の規模を縮小することで、低周波領域の音圧レベルを低下させる効果がある装置だということになる。なお、



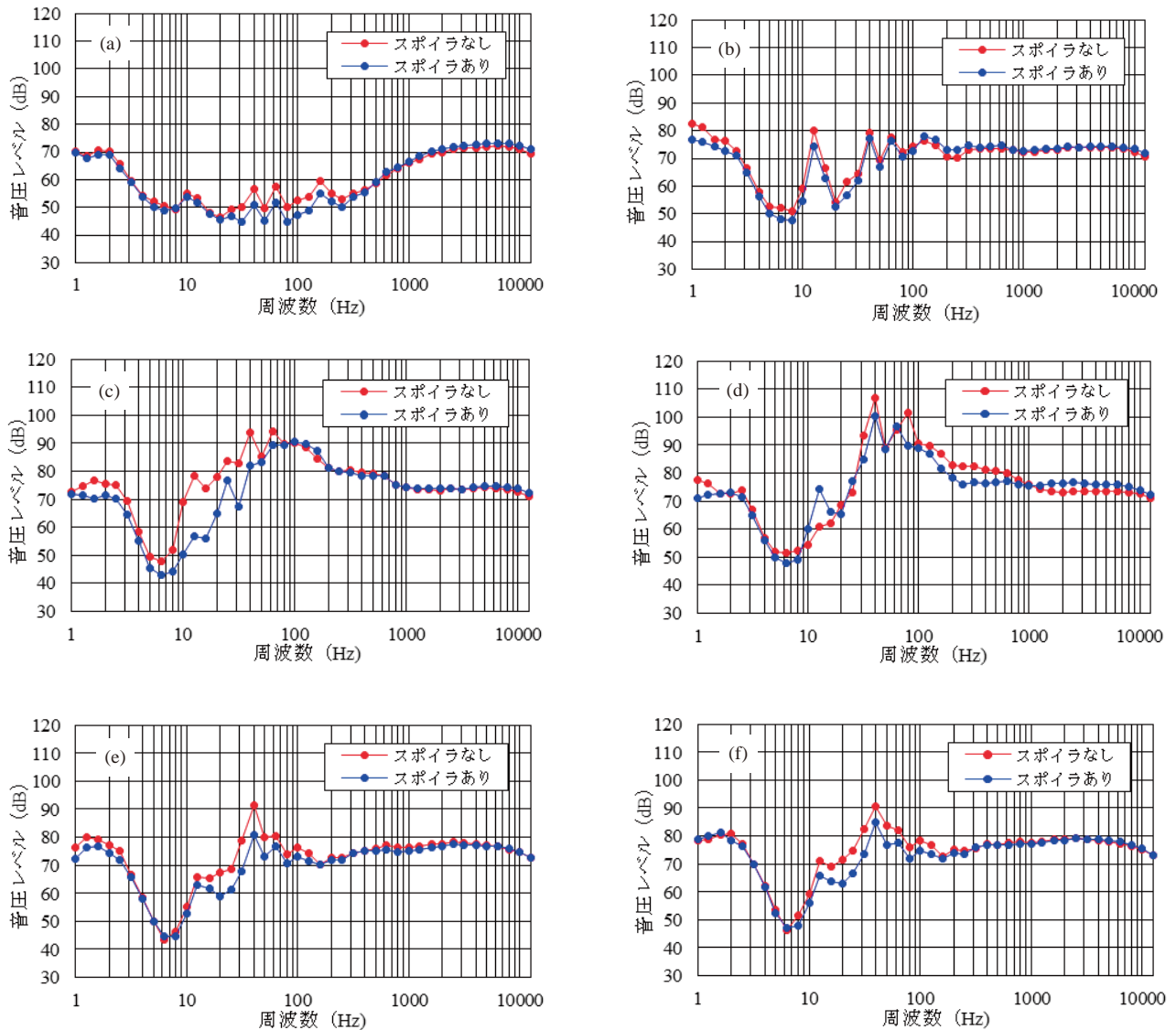


Fig.12 スポイラの騒音低減効果：越流水深 (a) 1cm, (b) 2cm, (c) 3cm, (d) 4cm, (e) 5cm, (f) 6cm  
Noise reduction effect of a spoiler: overflow depth = (a) 1cm, (b) 2cm, (c) 3cm, (d) 4cm, (e) 5cm, (f) 6cm

水膜振動を抑制するには、スポイラの設置間隔を狭くし、設置基数を増やすことで対応することも考えられる。しかし、既存のゲートにスポイラを設置した場合、その越流係数が変化し、上流の水位上昇につながるため、現実にはスポイラを数多く設置できない。よって、水膜の形成を阻害しない限り、低周波騒音を効果的に抑制することは困難であろうと考えられる。

## V 新たな低周波騒音低減工法

### 1 原理と特徴

スポイラは越流水膜を堰天端で分断し、水膜背面の閉空間を開放することに着眼した工法である。しかし、IVで示したように、スポイラによる低周波騒音の抑制効果は、顕著なものとは言えない。これは、水膜の存在自体

が低周波騒音を誘発していることを示している。そこで、落下流を水の束とし、水膜そのものが形成されないようにすることを意図して、2種類の対策工を試作した。それがTable 1に示す箱型対策工と樋型対策工である。これらの対策工は、ゲートの越流機能への影響を回避するため、流水がゲートの天端を通過後に効果が発揮されるよう、ゲートの天端直下に取り付ける。ここで、従来技術との相違点は、次のように整理できる。

- ①箱型、樋型等の装置により、越流水を複数の水流の束として水膜を発生させない。
- ②越流部の下方に取り付けることにより、越流部の機能や越流係数等に影響しない。
- ③堰の越流機能に影響を与えないので、設置基数を任意に設定できる。
- ④既存の堰でも、後付で容易に設置が可能である。

2 騒音低減効果の検証

予備実験によって、対策工の高さと奥行きを定めた後、その幅を **Table 1** のように変化させて、Ⅲと同じ水理条件、計測方法で騒音を測定した。このとき、対策工の間隔は対策工の幅と同一にした。

箱型対策工の騒音レベル (**Fig.13**) のうち、A 特性値を見ると、対策工の幅が小さくなるにつれ、騒音レベルが若干低下する。しかし、対策工がない場合と比べて、騒音低減効果はわずかである。一方 G 特性値は、対策

工の幅が小さくなるにつれ、騒音レベルが大きく低下する。特に、騒音レベルが高かった越流水深 2~4cm で、20~30dB 余り低下している。越流水深がそれを越えても、20dB 程度の低減幅はあるが、水深が 9~10cm になると、騒音の低減効果は小さくなる。

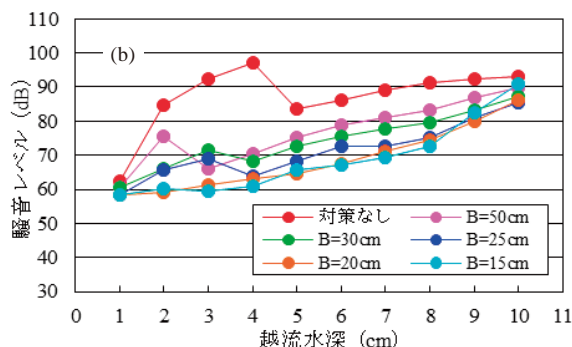
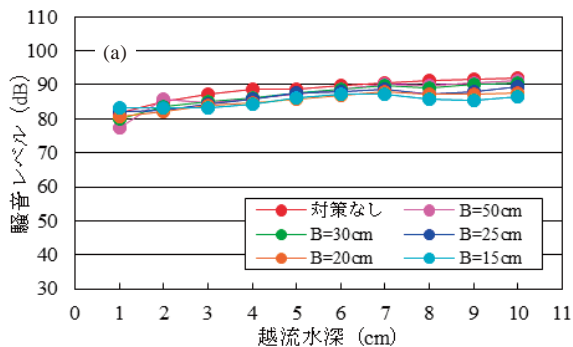
次に、桶型対策工の騒音レベル (**Fig.14**) では、箱型対策工と同じく、A 特性値の低下はわずかである。しかも、対策工の幅による違いはほとんど認められない。一方 G 特性値も、箱型対策工と同じく対策工の幅が小さくなるにつれ、騒音レベルが大きく低下する。しかし、対策工の幅による騒音低減効果の違いが少なく、越流水深が 9~10cm においても、効果はほとんど低下しない。

ここで、箱型対策工のパワースペクトル (**Fig.15**) を見ると、低周波領域の音圧レベルは低下するが、その効果は越流水深 8cm 程度までにとどまっている。その範囲では、パワースペクトルの形状もほぼ同じで、周波数 10~1000Hz で発生していた音圧レベルの上昇も抑えられ、対策工の効果が顕著に現れている。つまり、水膜振動による騒音は、低周波領域だけではなく、10~1000Hz にわたって発生している。対策工は、この周波数領域の音圧レベルの上昇を抑制することができるので、その効果は超低周波数領域の騒音指標である G 特性値の低減だけにとどまらない。しかし、越流水深が 9cm になると、対策工のスペクトル形状は、対策工がない場合と同様になってしまう。これは越流エネルギーの増

**Table 1** 実験に使用した対策工の寸法と設置数

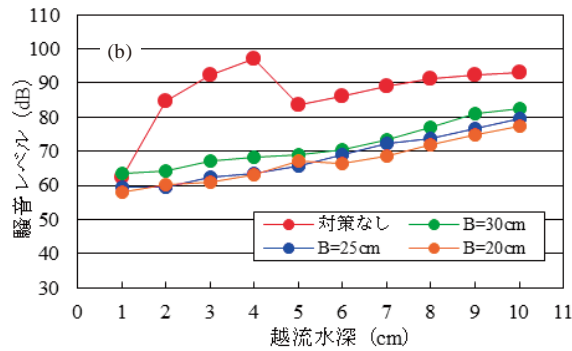
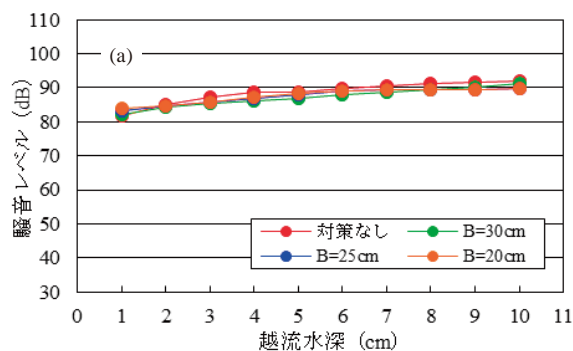
Dimension and number of installation of countermeasure works used by experiments

形状	B (cm)	H (cm)	D (cm)	基数
箱型	50	30	10	1
	30	30	10	2
	25	30	10	3
	20	30	10	4
	15	30	10	5
桶型	30	10	30	2
	25	10	30	3
	20	10	30	4



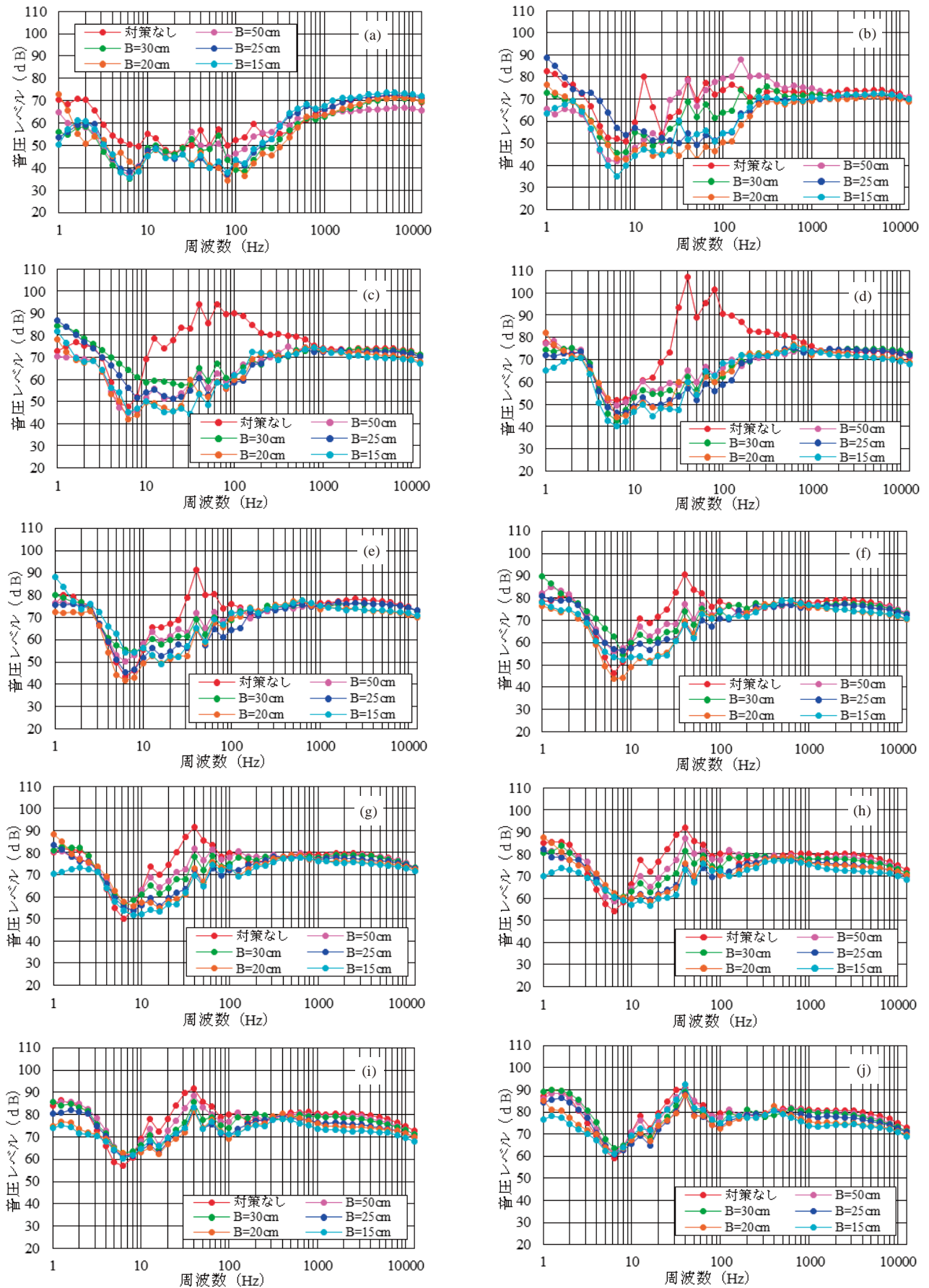
**Fig.13** 箱型対策工設置時の騒音レベル：(a) A 特性値, (b) G 特性値 (B は対策工幅)

(a) A-weighted and (b) G-weighted sound pressure level at box-type countermeasure works against overflow depth (B: width of countermeasure work)

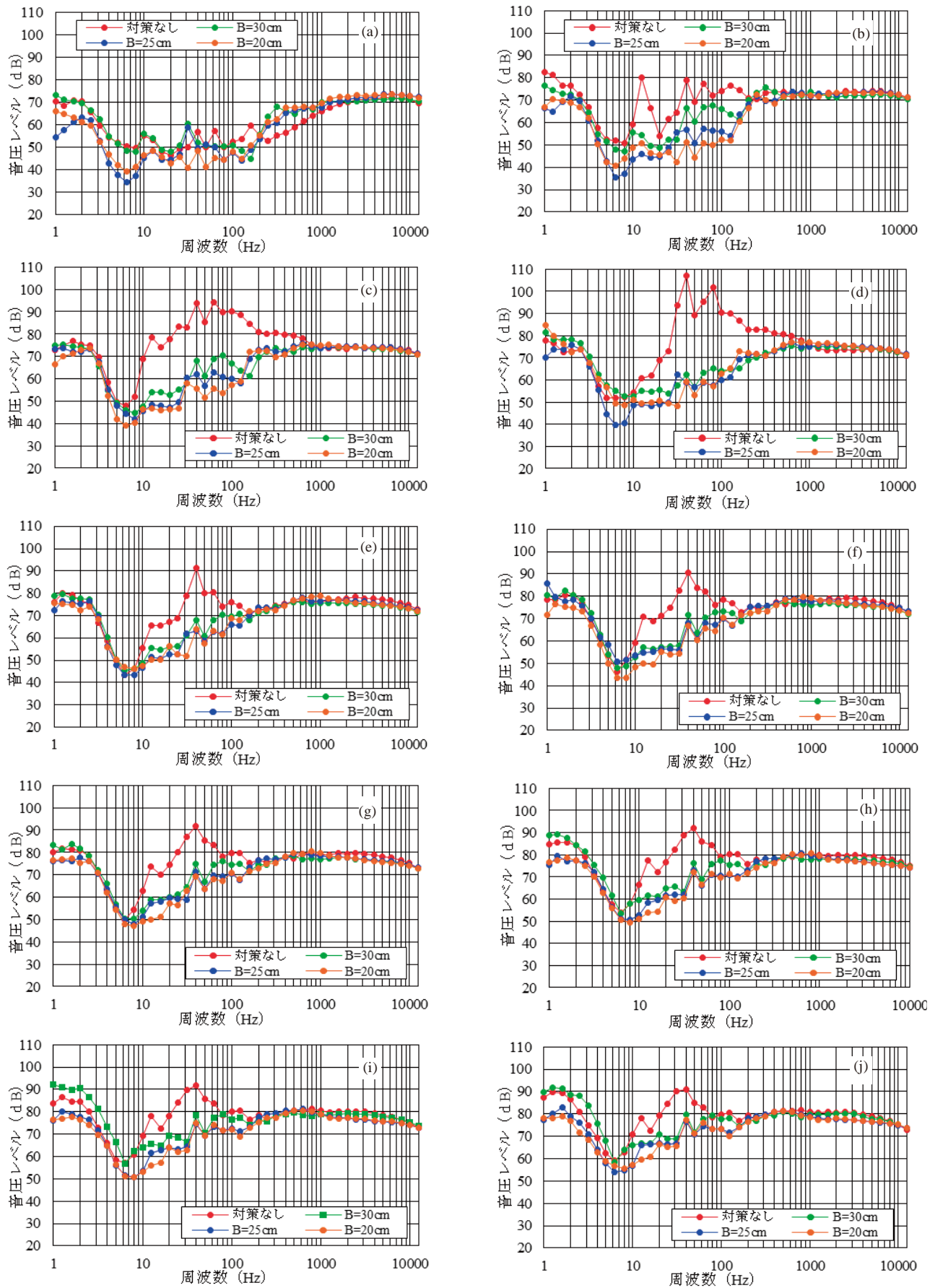


**Fig.14** 桶型対策工設置時の騒音レベル：(a) A 特性値, (b) G 特性値 (B は対策工幅)

(a) A-weighted and (b) G-weighted sound pressure level at gutter-type countermeasure works against overflow depth (B: width of countermeasure work)



**Fig.15** 箱型対策工設置時のパワースペクトル (B は対策工幅)：越流水深 =  
 (a) 1cm, (b) 2cm, (c) 3cm, (d) 4cm, (e) 5cm, (f) 6cm, (g) 7cm, (h) 8cm, (i) 9cm, (j) 10cm  
 Power spectrum at box-type countermeasure works by overflow depth (B: width of countermeasure work)



**Fig.16** 樋型対策工設置時のパワースペクトル (B は対策工幅) : 越流水深 =  
 (a) 1cm, (b) 2cm, (c) 3cm, (d) 4cm, (e) 5cm, (f) 6cm, (g) 7cm, (h) 8cm, (i) 9cm, (j) 10cm  
 Power spectrum at gutter-type countermeasure works by overflow depth (B: width of countermeasure work)



Fig.17 水膜の発生状況  
Current state of water screen

加によって越流水が対策工を乗り越え、水膜が形成されることに起因している。なお、越流水深が1cmでは、水膜振動による低周波騒音が発生していないと考えられるので、対策工の効果は現れていない。

さらに、桶型対策工のパワースペクトル (Fig.16) を見ると、箱型対策工と同じく、低周波領域の音圧レベルが低下する。しかも、その効果は越流水深10cmまで変わらない。また、どの越流水深に対しても、パワースペクトルの形状はほぼ同じで、対越流水深1cmを除いて、対策工の効果が顕著に現れている。

以上のように、対策工は10～1000Hzの音圧レベル、ひいてはG特性値を顕著に低下させることが確認された。対策工を施すと、G特性値は越流水深の増加、言い換えれば越流エネルギーの増加に伴い、単調に上昇することが示されている (Fig.13 (b), Fig.14 (b))。このことから、対策工の有無による騒音レベルの差は、越流エネルギーとの関係が薄い水膜振動による騒音であると考えられる。ただし、いずれの対策工もA特性値への騒音低減効果はない。また、二つの対策工を比べると、対策工の幅の違いや越流水深の変化に対して、安定した騒音低減効果が得られる桶型対策工が優位である。

ところで、水路における浮遊ゴミの流下が多い場合、対策工へのゴミの付着が懸念される。このため、越流堰上流へ落葉や枯枝を投入して、対策工へのゴミの付着状況を観察した。その結果、特に箱型の装置では必要に応じたメンテナンスが必要となるが、桶型の装置は従来型のスポイラに比べても、ゴミへの耐性は高いことが確認された。

以上の結果から、越流堰からの水膜振動に起因する低周波騒音の低減には、幅25cm程度の桶型対策工の設置が効果的と言えよう。その効果は、低周波音による心身に係る苦情に関するG特性の参照値を大きく下回ったが、1/3オクターブバンド中心周波数の音圧レベルについてはいくらか上回っている。しかし、落水騒音を示すパワースペクトルの形状から判断すると、低周波領域の音圧レベル低減幅はこの程度が限界であろう。

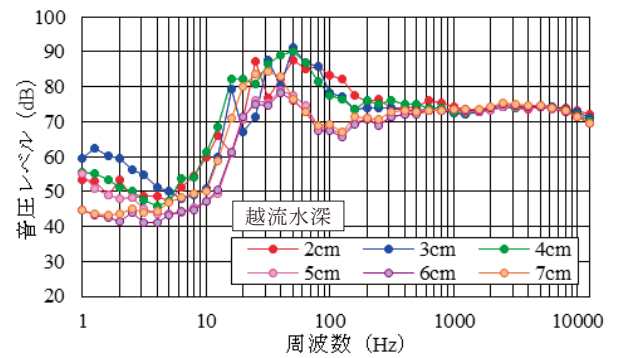


Fig.18 越流水膜から発生する騒音のパワースペクトル  
Power spectrum at water screen by overflow depth

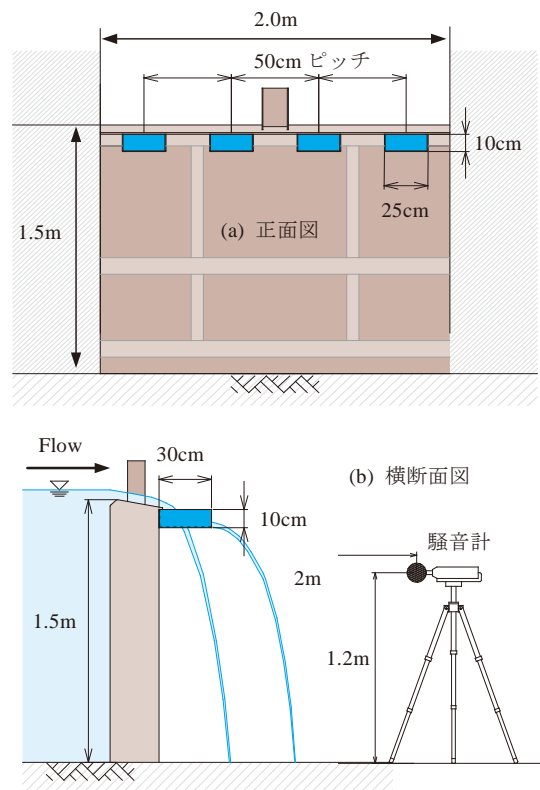


Fig.19 土砂吐ゲートに取り付けられた対策工  
Countermeasure works fixed on the sand sluice gate



Fig.20 対策工からの越流状況  
Overflow state through countermeasure works

## VI 現地実証試験

### 1 地区の現況

現地実証試験は、福島県喜多方市の大塩川にかかる諏訪頭首工で実施した。諏訪頭首工は、幅 23.275m、高さ 1m のゴム引き布製洪水吐ゲート 1 門、幅 2m、高さ 1.5m

の鋼製土砂吐ゲート 1 門等で構成される可動堰である。洪水吐ゲートと土砂吐ゲートの天端高は等しく、取水時には双方のゲートからの越流が見られる。土砂吐ゲートは引き上げ式のスライドゲートであり、ゲート中央にスポイラが備わっている。越流幅は 1m 程度になるので、一般には水膜振動が発生しない条件である（農林水産省

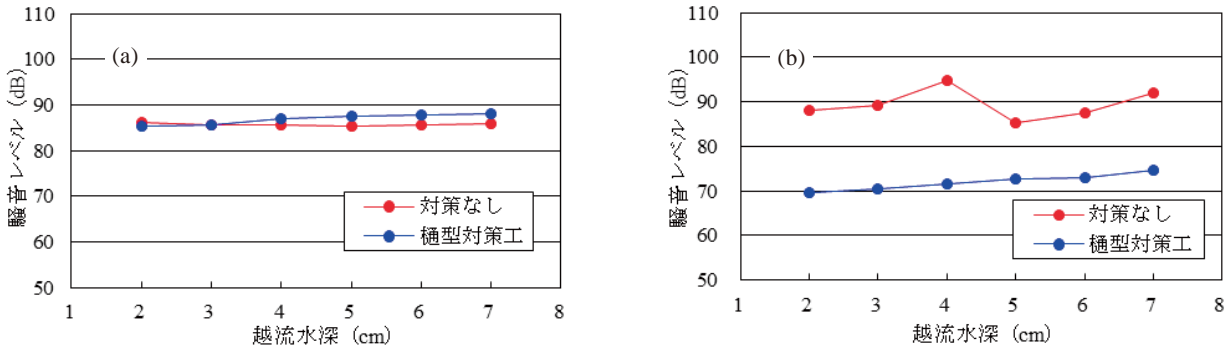


Fig.21 樋型対策工設置時の騒音レベル：(a) A 特性値, (b) G 特性値

(a) A-weighted and (a) G-weighted sound pressure level at gutter-type countermeasure works against overflow depth

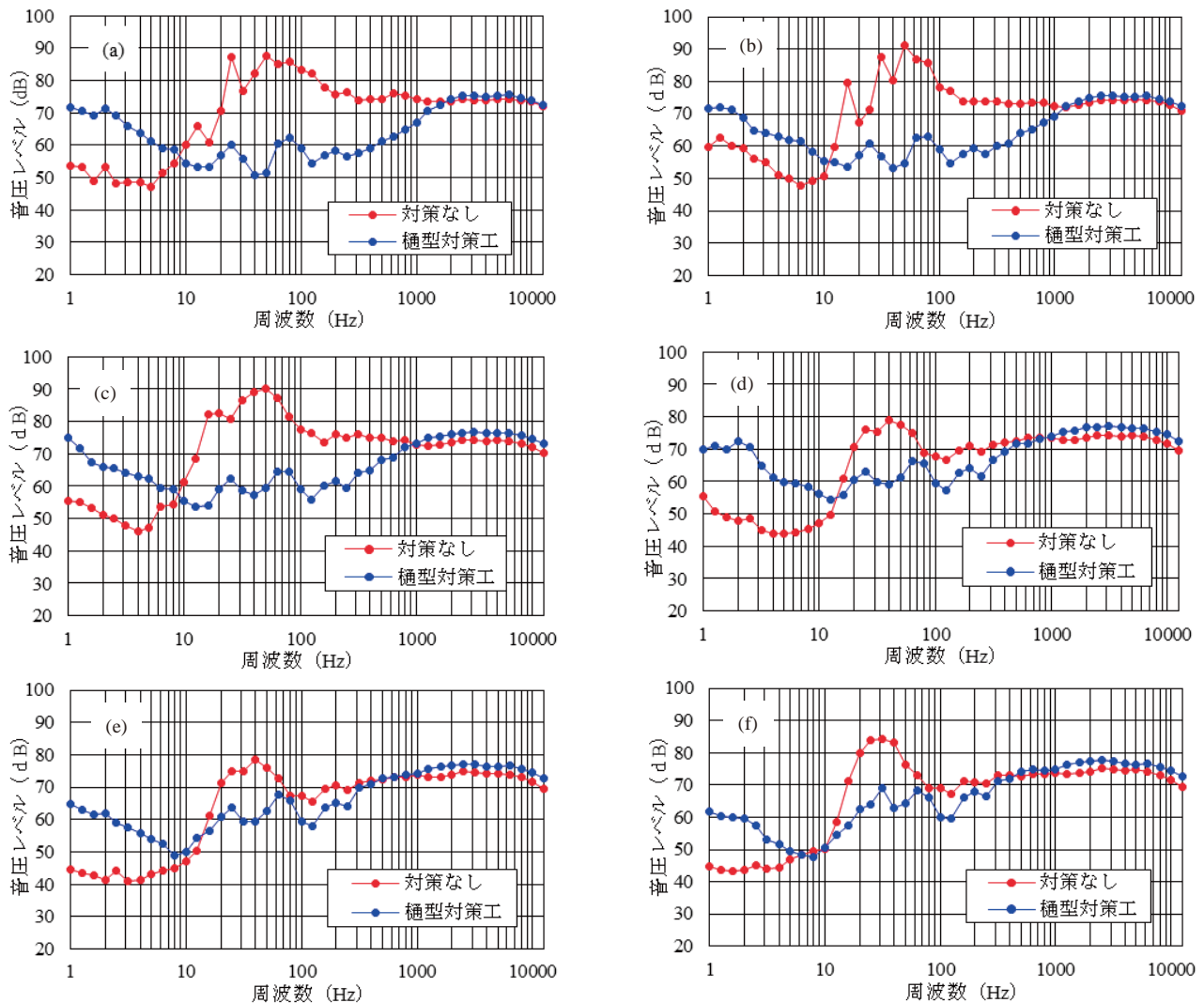


Fig.22 樋型対策工設置時のパワースペクトル：越流水深 (a) 2cm, (b) 3cm, (c) 4cm, (d) 5cm, (e) 6cm, (f) 7cm

Power spectrum at gutter-type countermeasure works: overflow depth = (a) 2cm, (b) 3cm, (c) 4cm, (d) 5cm, (e) 6cm, (f) 7cm

構造改善局建設部設計課, 1999)。しかし, 本研究でも確認されたとおり, この幅でもその越流水深が小さいときには水膜振動の発生が予想される。対策工の現地実証試験は, この土砂吐ゲートを対象に実施した。

対策工を設置する前の状況を把握するために, 洪水吐ゲートで頭首工上流の水位を調節して, 土砂吐ゲートにおける越流水深 2 ~ 7cm の音圧レベルを測定した。騒音の観測は, 計測位置をゲート直下流の高さ 1.2m, 距離 2m の地点とし, 模型実験と同じ要領で行った。ここで, ゴム引き布製洪水吐ゲートからの騒音は, 越流式ゲートからのそれに比べて相対的に小さいと考えられること, また土砂吐と洪水吐が導流壁で仕切られていることを考慮して, 洪水吐からの騒音の影響は無視した。

目視によれば, 越流水深を 1cm 刻みで変化させると, いずれのケースでもゲートからの越流水脈は水膜となって流下する (Fig.17)。音圧レベルの観測結果では, すべての越流水深について, 100Hz 以下の低周波領域に音圧レベルのピークがある (Fig.18)。特に, 越流水深 2 ~ 4cm の音圧レベルが高い。また, 10Hz 以下の超低周波数領域では, 室内実験に見られたような周波数低下に伴う音圧レベルの上昇はほとんど見られない。このように, この洪水吐ゲートには中央にスポイラが付いているが, 水膜振動が発生する流況では, 低周波騒音の低減に役立っているとは言いがたい。

## 2 樋型対策工の設置とその効果

樋型対策工の規格は, 室内実験で得られた諸元, すなわち幅 25cm, 高さ 10cm, 奥行き 30cm とした。また, 対策工は, 土砂吐ゲートの幅 2.0m に合わせて 4 基制作し, 現地で溶接により附設した (Fig.19)。

対策工の附設後, 水膜の状態であった越流水脈は, 模型実験の結果と同じく, 水束となって流下するようになった (Fig.20)。対策工附設前後の騒音レベルの低減状況を越流水深ごとに比較すると, A 特性についてはほとんど変化が見られないものの (Fig.21 (a)), G 特性については約 20dB の低減を達成し, 低周波騒音の削減に大きな効果が現れた (Fig.21 (b))。これらの特性を詳しく調べるために周波数ごとの音圧レベルをみると (Fig.22), いずれの越流水深でも周波数 10 ~ 1000Hz の範囲で対策工の効果が現れ, 特に越流水深が小さくなるほどそれが顕著になることが明らかとなった。スペクトルの形状も越流水深に対して変化がない。

現況で最も低周波騒音のピークが大きかった越流水深 4cm のパワースペクトルを比較すると (Fig.22 (c)), 周波数 50Hz で 90dB の音圧レベルを示していたのが, 対策工の設置によって 63Hz で 65dB にまで低下している。また, 周波数が 1000Hz を越えると音圧レベルが変わらないことから, 対策工が A 特性にほとんど影響しないことも明らかである。なお, 周波数 10Hz 以下では, 対策工を敷設した場合の音圧レベルが現況を上回ってい

る。原因としてはゲートの共振等が疑われるが, G 特性は周波数 10Hz 以下での負の補正量が大きいので, G 特性値の算定には影響しない。

このように, 本研究で提案された樋型の低周波騒音低減対策工は, 現地においても室内実験とほぼ同様の効果が得られた。

## Ⅶ 結 言

農業水利システムでは, 取水や送水管理のために越流堰のような落水を伴う構造物を設置することがある。このような施設では, 音源を完全に断つことは不可能であるから, その特性を考慮した音源対策を施すか, 場合によっては大規模な防音対策を採らざるを得ない。いずれにしても, 騒音対策は騒音抑制レベルと対策コストのバランスを取りながら, その実行可能性を探る作業である。

本研究で提案した対策工は, 高さ 2m 程度の比較的落差の越流堰で, 越流水深 10cm 以下の小規模越流時に発生する低周波騒音を対象としたものである。したがって, 堰高がこれを大きく越えたり, 越流水深が大きくなったりするときに発生する低周波音には, 別途検討が必要である。これらは今後の課題としたい。

本対策工では, 従来工法であるスポイラのように水膜背面の閉空間を開放するだけでなく, 落下流を水の束とし, 水膜そのものが形成されないようにすることに着目した。箱型, 樋型の 2 種類の対策工を試作したが, 対策工の幅の違いや越流水深の変化に対し, 安定した騒音低減効果が得られる樋型対策工が推奨された。この対策工は, 現地においても簡易な取り付けが可能で, かつ 20dB 程度の G 特性値の低減効果もあることから, 水膜振動による騒音対策の一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 後藤眞宏・浪平 篤・小林宏康・常住直人・関谷明 (2008) : ゲートの越流水の低周波音とスポイラによる低減効果について, 農村工学研究所技報, 207, 139 - 147
- 2) 環境庁大気保全局 (2000) : 低周波音の測定方法に関するマニュアル, <http://www.env.go.jp/air/teishuha/manual/index.html>
- 3) 環境省環境管理局大気生活環境室 (2002) : 低周波音防止対策事例集, <http://www.env.go.jp/air/teishuha/jirei/index.html>
- 4) 環境省環境管理局大気生活環境室 (2004) : 低周波音問題対応の手引書, <http://www.env.go.jp/air/teishuha/tebiki/index.html>
- 5) 環境省水・大気環境局大気生活環境室 (2010) : 平成 21 年度騒音規制法施行状況調査について, [http://www.env.go.jp/air/noise/kujou\\_h21/index.html](http://www.env.go.jp/air/noise/kujou_h21/index.html)

- 6) 経済産業省 (2005) : 電気音響—サウンドレベルメータ (騒音計) — 第1部 : 仕様, 日本工業規格 C1509-1
- 7) 日本音響材料協会 (1982) : 騒音・振動対策ハンドブック, 技報堂出版, 3-36
- 8) 農業農村整備情報総合センター (2009) : 事業誌・技術誌に見る農業水利施設諸元考, 80
- 9) 農林水産省構造改善局建設部設計課 (1999) : 鋼構造物計画設計技術指針 (水門扉編) 改訂版, 244
- 10) 関谷 明・最上谷吉則・寺井和弘・峯岸雄一・高木強治・後藤真宏・長嶺拓夫 (2010) : 落下流により発生する低周波音の低減対策工の提案, 河川技術論文集, 16, 383-388
- 11) 高木強治・後藤真宏・浪平 篤・関谷 明・峯岸雄一 (2010) : 越流式ゲートの水膜振動に起因する低周波騒音の低減対策, 水土の知, 78 (12), 25-28
- 12) 竹林征三・野口一弘・増本晴久 (1986) : 堰越流放流時に発生する低周波空気振動に関する一考察, ダム技術, 4(4), 70-79
- 13) 竹林征三・角 哲也・箱石憲昭 (1993) : 堰等からの放流に伴う低周波空気振動対策, ダム技術, 82, 4-21



# Sound Characteristics of Spilled Water and Countermeasure Works of Low-Frequency Noise at Overflow Weirs

TAKAKI Kyoji, GOTO Masahiro, NAMIHIRA Atsushi, SEKIYA Akira  
MINEGISHI Yuichi and NAGAMINE Takuo

## Summary

Nowadays, it is not uncommon to see residential houses constructed along agricultural canals due to advancement of urbanization. Around installation sites of water management facilities such as gates and drops in agricultural canals, passing irrigation water generates overflow water noise. In this study, the sound characteristics of spilled water at overflow weirs are elucidated by detailed laboratory experiments. In addition, the issue of conventional art related to low-frequency noise reduction, countermeasure works to prevent vibration of water screen and its effect are indicated.

According to the experiments, low-frequency noise generates in any hydraulic conditions, however, the peak of noise shown in between 2 and 4cm of overflow depth generates due to turbulence and vibration of lower domain of water screen. Spoilers as a conventional work aims at only making enclosed region of the back of water screen open, and they aren't often unable to function in inhibiting the formation of water screen and its vibration.

Countermeasure works proposed in this study are aimed at low-frequency noise generated by water screen at relatively low drops around 2m. They not only make enclosed region of the back of water screen open such as conventional spoilers but also make falling water into water bundle, and inhibit the formation of water screen. Though we made two types of trial model, box type and gutter type countermeasure works, the gutter type model is recommended because they have stable noise reduction effect against the difference of width of works and the change of overflow depth. These countermeasure works can be installed easily in situ, and reduce G-weighted sound pressure level by 20dB or more.

**Keywords** : vibration of water screen, frequency characteristics, G-characteristic, A-characteristic, sound pressure



鉄筋およびコンクリートがワイヤレスコンクリートセンサの  
通信性に与える影響

浅野勇\*・増川晋\*\*・田頭秀和\*\*・林田洋一\*\*

## 目 次

I 緒 言	187	7 通信角度変化試験	191
II 屋外低周波電磁波減衰試験	188	8 鉄筋配置による受信電圧低下の検討	193
1 低周波電磁波による通信の概要	188	9 近接鉄筋による受信電圧低下の検討	197
2 低周波電磁波減衰の影響要因	188	III 埋設試験	199
3 気中試験における作業仮説	188	IV 結 言	201
4 埋設試験における仮説	189	参考文献	201
5 気中試験の概要	189	Summary	203
6 距離減衰特性試験	190		

## I 緒 言

我が国には延長約 40 万 km, 地球 10 周分の農業用水路が存在する。水路に代表される農業水利施設の多くはコンクリート施設である。これらの農業水利施設は 1960～90 年代に建設のピークを迎え、今後、施設の老朽化が大きな問題となる。老朽化が進む膨大な施設を目の前に、我々はより効率的な施設の維持管理を行う必要がある。

現行の農業水利施設の維持管理では、数年間隔の目視による定期点検により施設の健全度を推定し、補修・補強等の対策の必要性を判定している。しかし、点検項目が構造性能や水理性能などといった要求性能と直接的に結びついていない場合や性能低下がどの時点で発生したか正確に把握できないという問題点が存在する。性能低下をいち早く発見し適切な対策を講じる方法として、施設の性能を直接的かつ継続的に監視することを目指したヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring, 以下“SHM”) が近年注目されている。SHM では、施設の性能に直接関係する応力などの性能指標を継続的にモニタリングし、施設の性能低下に応じた補修・補強対策を講じることで、性能低下に応じた適切な維持管理の実現を目指す手法である。重要度が高くかつリスクの高い

施設では、地震や豪雨後の性能低下をいち早く把握することができ、災害時の復旧対策にも有効な手段である。SHM を実現するためには小型安価かつ設置性の優れたセンサが必要である。ケーブルが不要なワイヤレスセンサは小型化が可能であり SHM への適用が期待される。

土木用のワイヤレスセンサについては、筆者らが開発に携わった低周波電磁波を利用したセンサがある (向後ら, 2006; 林田ら, 2009)。低周波電磁波を利用したセンサは地盤や盛土内に設置する間隙水圧計, 土圧計として実用化されている。しかし、鉄筋コンクリート内からの通信特性については未だ検討されておらず、鉄筋コンクリート中における減衰特性は未解明である。一方、センサ付き無線 IC タグ (RFID) を利用した埋め込み型ワイヤレスセンサの研究も精力的に行われており、鉄筋計などが実用化されている (江里口ら, 2010; 杉山, 2009)。パッシブ型のセンサ付き無線 IC タグは電源が不要であるという大きな利点が存在するが、コンクリート中への埋設深が最大でも数 10cm であること、コンクリート中に自由水が多い打設初期などに通信性能が急激に低下する欠点も存在する。現在のところ、鉄筋コンクリートの表面から 1m 以上深い場所に埋設でき、鉄筋コンクリート表面から数 10m 離れた地点へ観測値の送受信が可能でワイヤレスセンサは開発されていない。

本研究では、鉄筋コンクリートに数 m 埋め込みが可能でかつコンクリートの表面から数 10m 離れて通信が可能でコンクリートワイヤレスセンサの開発を目的に、その通信手段である低周波電磁波の基本的な特性について検討する。

なお、本研究は、農林水産技術会議「新たな農林水産

\* 施設資源部水利施設機能研究室

\*\* 施設資源部構造研究室

平成23年1月21日受理

キーワード : SHM, 低周波電磁波, 鉄筋, コンクリート, ワイヤレス

政策を推進する「実用技術開発研究」の一部として行われたことを付記する。

## II 屋外低周波電磁波減衰試験

低周波電磁波の減衰特性を把握するために、①送信コイルを空气中に設置した場合の減衰特性を測定する試験（以下、気中試験）、②送信コイルを鉄筋コンクリートに埋設した場合の減衰特性を測定する試験（以下、埋設試験）を実施した。

### 1 低周波電磁波による通信の概要

低周波電磁波の通信概念を Fig.1 に示す。送受信の兼用コイルを内蔵した送受信装置とワイヤレスセンサの間で低周波電磁波（8.5kHz）を用いて双方向データ通信を行う。一方のコイルから発信された電磁波により他方のコイルには誘電電圧が発生し、その電圧値（受信コイルの回路電圧値、以下受信電圧をデジタル信号に変換し通信を行う。実用の際は受信コイル位置における環境ノイズが問題となる。データ送受信が可能ためには受信位置における受信信号対ノイズ比（S/N比）が2以上であることが必要である。送電施設等が近傍に存在しない一般的な屋外での環境ノイズは1～2mV（受信コイルの回路出力電圧値）であることが多い。よって、所要の通信距離において受信電圧が2～4mV確保されれば通信が可能である。

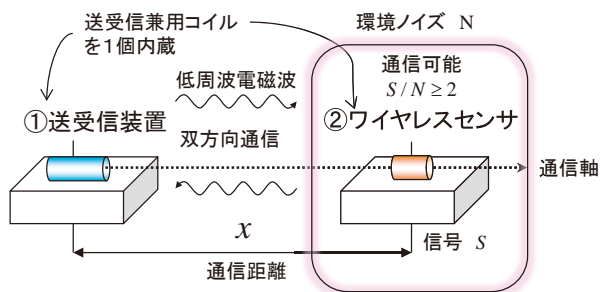


Fig. 1 低周波電磁波の通信概念

An outline of the wireless transmission with low frequency electromagnetic wave

### 2 低周波電磁波減衰の影響要因

透磁率及び導電率が均一である物質中における低周波電磁波の大きさは、①距離の3乗に反比例し、②地盤の透磁率と導電率に影響を受け減衰する（浅野ら，2009）。コンクリートの比透磁率は地盤と等しくほぼ1、鉄筋の比透磁率は地盤に較べはるかに大きな200～2,000程度を設定する人が多い（小井戸，2008；高村ら，2006）。一方、導電率については地盤では $10^{-1} \sim 10^{-3}$  [S/m]程度（高村ら，2006；黒田ら，2004）、鉄筋では $10^5 \sim 10^7$  [S/m]程度（小井戸，2008；高村ら，2006）を設定する人が多い。また、室内試験よりコンクリートの導

電率として $10^{-2}$  [S/m]程度（スジヨノ，1998）の値が得られている。これらの結果から、コンクリート自体の減衰は地盤と同程度と推定される。一方、鉄筋は透磁率が極めて大きいので、送信コイルから流れ出す磁力線が鉄筋に集中することが想定される。このため、鉄筋コンクリート中では地盤内とは異なった低周波電磁波の減衰が発生する可能性がある。そこで、鉄筋コンクリート中における低周波電磁波が低下する要因として、①通信距離、②コイルの位置関係、③媒質の違い（空気、鉄筋、コンクリート）の3つを仮定し試験を行う。

### 3 気中試験における作業仮説

#### a 距離減衰に関する仮説

前項2で述べたように、透磁率及び導電率が均一である物質中における低周波電磁波の大きさは理論的には距離の3乗に反比例する。よって、送受信コイルの配置、媒質などの試験条件を固定し、通信距離を変化させ受信電圧との関係を求めれば、受信電圧 $y$  [mV]と通信距離 $x$  [m]の間には式(1)の関係が成り立つと考えられる。

$$y = \frac{P}{x^3} \quad (1)$$

ここで、 $P$ はコイルの出力、位置関係で決まる定数である。(1)式の両辺の対数を取り、整理すると式(2)が得られる。

$$\log y = -3 \log x + \log P \quad (2)$$

すなわち、 $\log y$ と $\log x$ の間には直線関係が存在し、傾きは-3、コイル出力と位置関係に依存する切片 $\log P$ が得られる。理論上は(2)式の傾きは-3となるが、これは媒質が均質であることを仮定した結果であり、屋外試験では媒質が不均一であるため通常傾きは-3に一致しない。そこで、受信電圧と通信距離の試験値を整理するために式(3)を試験式として用いる。つまり、ある試験条件における通信距離-受信電圧の距離減衰特性を傾き $a$ で評価し、コイルの出力が受信電圧に与える影響を切片 $b$ で評価することにする。

$$\log y = a \log x + b \quad (3)$$

ここで、 $a$ はある試験条件における低周波電磁波の距離減衰特性を表す定数、 $b$ はコイルの出力、位置関係で決まる定数である。

#### b 送受信コイルの配置による受信電圧低下に関する仮説

Fig.2に示すように送受信コイルの配置によって受信コイルを通過する磁束密度が変化する。受信電圧は、受信コイルを通過する磁束密度の大きさに比例すると考え

られることから、磁束密度に比例して受信電圧は増加すると考えられる。すなわち、Fig.2 に示す (a) 軸方向のコイル配置では、受信コイルの位置が変化すると受信コイルを通過する磁束密度が変化するため受信電圧も変化する。一方、(b) 平行の位置関係では受信コイルを通過する磁束密度が変化しないため受信電圧は一定であることが想定される。これらの仮説が成り立つか、送受信コイルの配置を変化させた試験を行い検証する。

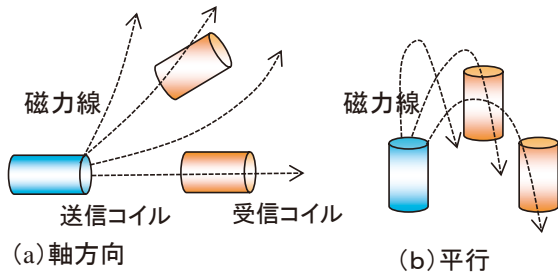


Fig. 2 送受信コイルの配置と磁力線

Layout of the transmitting and receiving coil and magnetic field lines

c 鉄筋による受信電圧低下の要因に関する仮説

鉄筋による受信電圧低下の要因として Fig.3 に示す 3 つを仮定する。鉄筋の透磁率は極めて大きいため送信コイルから流れ出す磁力線は鉄筋の長手方向に集中する。その結果、磁界の流れが乱され受信電圧が低下すると考えられる。次に、鉄筋が送信コイルに近接する場合（鉄筋から数 cm の範囲に存在）は、送信コイルから発信される電磁波によって鉄筋に渦電流が発生し、その熱エネルギー損失のため低周波電磁波が減衰し、受信電圧が低下すると考えた。さらに、送信コイルの周辺に帯鉄筋などが存在する場合には、Fig.3 に示すように帯鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルが発信する電磁界と逆向きの誘導電磁界を発生させる可能性があり、その結果として送信コイルから発信される電磁波を減衰させると考えた。これら 3 つの仮説を検証するために、主鉄筋の影響、帯鉄筋の影響および近接鉄筋の影響を調べる試験を実施する。

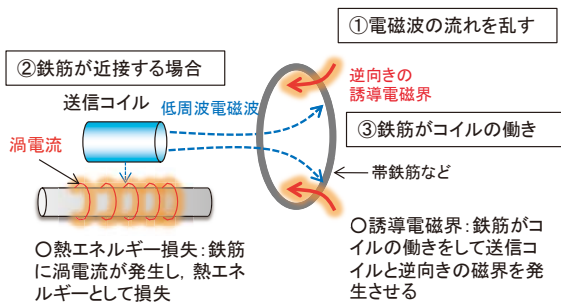


Fig. 3 鉄筋による減衰効果

The attenuation effects of electromagnetic waves by reinforcing bar

4 埋設試験における仮説

埋設試験では、送信コイルを鉄筋コンクリート供試体に埋設し、打設時、打設後のコンクリート硬化時における鉄筋コンクリート内からの通信可能性について検証する。作業仮説としては、鉄筋コンクリート中の低周波電磁波の減衰は主として鉄筋によって発生し、コンクリートに依存する減衰は小さいとする。

5 気中試験の概要

a 試験概要

気中試験の概要を Fig.4 に示す。試験では試作した送信コイルから低周波電磁波を発信し、受信コイルを内蔵したポータブル受信機により受信コイルに電磁誘導により発生する電圧を測定した。通信距離、コイルの位置関係、鉄筋遮蔽などの条件を変化させ、受信電圧の変化を調べた。試験は、2009年12月に農村工学研究所の地盤材料試験フィールドで実施した。受信機により測定した試験中におけるフィールドの環境ノイズは概ね 1mV (実効値電圧, 以下 V は実効値電圧を意味する) 以下であった。

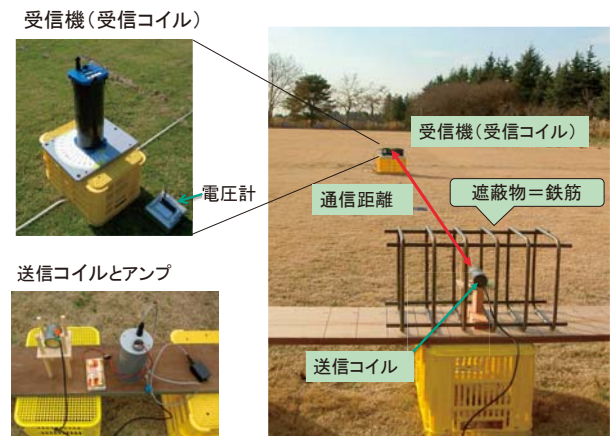


Fig. 4 気中試験の概要

Schematic view of experimental equipment (in field)

b 使用機材等

試作した送信コイルの外形および諸元を Fig.5 に示す。寸法、出力が異なる 2 種類の送信コイルを試作した。受信機には株式会社坂田電機製の地中無線通信ポータブル受信器 (EO-029) に電圧計を接続し受信回路出力電圧を測定した。送信コイルに対する遮蔽物としては丸銅あるいは鉄輪を使用した。

種類	コイル (mm)	容器 (mm)	出力 (W)	周波数
大(L)	φ 39 × 105	φ 48 × 120	1.8	8.5kHz
小(S)	φ 50 × 50	φ 60 × 60	1.0	

Fig. 5 送信コイルの諸元

Specification of the transmitting coils

c 試験シリーズ

低周波電磁波の空中における距離減衰，鉄筋による減衰効果を明らかにするために，以下の試験シリーズを実施した。

- (1) 低周波電磁波の空中における距離減衰特性
  - ①通信距離変化試験
  - ②通信角度変化試験
  - ③コイルの位置関係を変化させた試験
- (2) 鉄筋による減衰特性試験
  - ①主鉄筋の影響試験
  - ②帯鉄筋の影響試験
  - ③近接鉄筋の影響試験

6 距離減衰特性試験

a 試験概要および試験ケース

Fig.6 に距離減衰試験の概要を，Table 1 に試験ケースを示す。空中における低周波電磁波の減衰特性を調べるために，送受信コイルの通信距離を変化させ，通信距離と受信電圧の関係を求めた。試験水準はコイルの寸法，位置関係および通信距離である。コイル配置として Fig.6 に示す2つのコイルの通信軸を一致させた (a) 軸方向，2つのコイルの通信軸が平行な (b) 平行の2水準，コイル寸法として大小2水準を設定し，通信距離  $x$  を 5, 8, 10, 20, 30, 50m 変化させ受信電圧を求めた。なお，軸方向試験では2往復，計4回の測定を行った。また，平行試験では1往復，計2回の測定を行った。試験では，受信コイルの標高を一定にするために，送受信コイルの標高差が±100mm 以内に収まるように受信コイルの台座の高さを調整した。なお，送信コイルから発信される

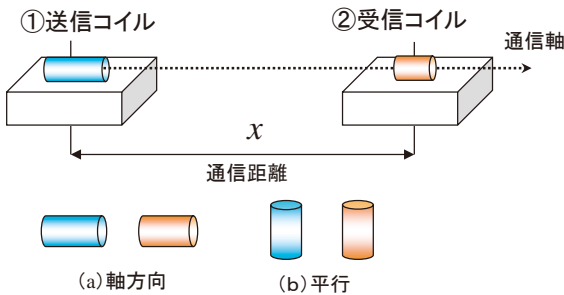


Fig. 6 距離減衰試験の概要 (気中)

Schematic illustration of the attenuation characteristics test (in field)

Table 1 試験ケース  
Experimental conditions

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	通信距離 [m]
LA	大 (L1)	軸方向	5, 8, 10, 20, 30, 50
LP		平行	
SA	小 (S1)	軸方向	
SP		平行	

電磁波の一部は地盤内を透過して受信コイルに到達しており，空中試験と称しているが，本試験は送受信コイルを完全に空中に設置した場合の減衰試験ではないことに注意されたい。

b 試験結果

軸方向試験および平行試験の試験結果をそれぞれ Fig.7, Fig.8 に示す。グラフの点は，軸方向試験は4回の測定，平行試験は2回の測定の平均値である。軸方向試験における受信電圧の平均変動係数は2~3%であった。Table 1 の試験ケースに対して Fig.7, Fig.8 のデータを直線回帰することにより式 (3) に示した低周波電磁波の距離減衰特性を表す定数  $a$  およびコイルの出力，位置関係で決まる定数  $b$  を求めた。決定係数はすべて 0.98 以上であった。試験結果を Table 2 に示す。

Table 2 距離減衰特性  
The characteristics of attenuation test (in field)

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	係数 $a$	係数 $b$
LA	大 (L1)	軸方向	-3.01	5.36
LP		平行	-3.03	5.11
SA	小 (S1)	軸方向	-2.89	4.92
SP		平行	-2.90	4.63

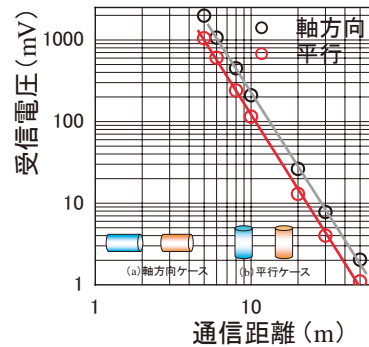


Fig. 7 距離減衰試験結果 (コイル大)  
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (the large coil)

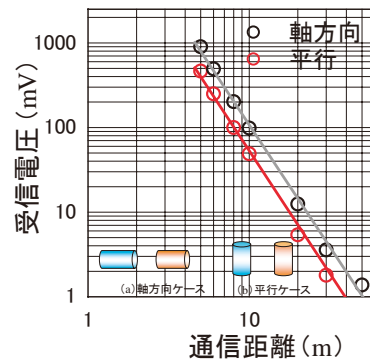


Fig. 8 距離減衰試験結果 (コイル小)  
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (the small coil)

c 考察

Fig.7 および Fig.8 から受信電圧の対数値と通信距離の対数値の間には線形の関係が成り立つと推察できる。Table 2 のコイル大とコイル小の  $a$  の値を比較すると、コイルの寸法が同一であれば  $a$  の値はほぼ等しい。つまり、コイルの寸法が同一であれば、コイルの配置が変化しても低周波電磁波が伝搬する場の条件が変化しなければ Fig.7 および Fig.8 に示した受信電圧の直線の傾きはほぼ一定であると推察される。しかしながら、今回は試験データも少ないため、定量的な検討は今後の課題と考える。

Table 2 に示す切片値  $b$  は通信距離がほぼ 0 の地点における受信電圧の値を示すと考えられる。このことから、 $b$  は送信コイルの出力値に比例すると考えられる。そこで、 $b$  はコイル出力  $P$  の対数値  $\log P$  [W] に比例すると仮定し、式 (4) により推定が可能と仮定した。ここで、 $k$  は比例定数である。

$$b = k \log P \tag{4}$$

式 (4) が成り立つか検証するためには出力の異なるコイルに対して距離減衰試験を行えば良い。しかし、今回の試験では出力が異なる 2 つの送信コイルのみしか試験を行っていない。そこで、過年度農工研で行ったワイヤレス間隙水圧計を対象とし距離減衰試験結果より求めた切片値  $b$  を今回の試験データに加えて検討を行った (向後

Table 3 コイル出力と切片値  
The coil outputs and the intercept  $b$

実験ケース	コイルの配置	コイル出力 [W]	切片値 $b$	備考
1	軸方向	1.0	4.92	S (コイル小)
2		1.8	5.36	L (コイル大)
3		5.4	5.81	ワイヤレス間隙水圧計

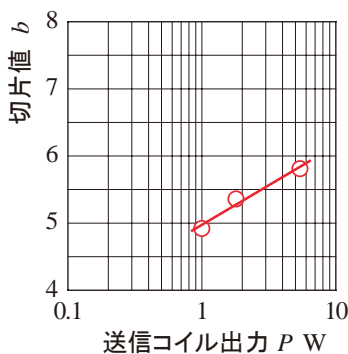


Fig. 9 送信コイル出力と切片値  $b$  の関係  
Relationship between the coil outputs and the intercept  $b$

ら、2006、図 -13 から引用)。検討に用いたコイル出力値と  $b$  の値を Table 3 に示す。Table 3 の値をグラフ化した結果を Fig.9 に示す。グラフから切片値  $b$  と  $\log P$  はほぼ線形関係にあることが分かる。最小 2 乗法により切片値  $b$  を  $\log P$  で線型回帰すると式 (5) の結果を得た。

$$b = 1.18 \log P + 4.97 \tag{5}$$

今回と同様な空中試験を実施する場合は、式 (5) を用いてコイル出力  $P$  から式 (3) の切片をある程度推定することが可能と考える。

7 通信角度変化試験

a 試験概要および試験ケース

送受信コイルの位置関係が受信電圧に及ぼす影響について調べた。Fig.10 に示す 9 通りの送受信コイルの位置関係を設定し、通信距離を 10m に固定し、各配置での受信電圧を測定した。なお、試験ケースは 9 通りであるが、実質的な送受信コイルの空間的配置は Fig.10 に示す (a) 軸方向、(b) 平行、(c) 直交の 3 通りである。

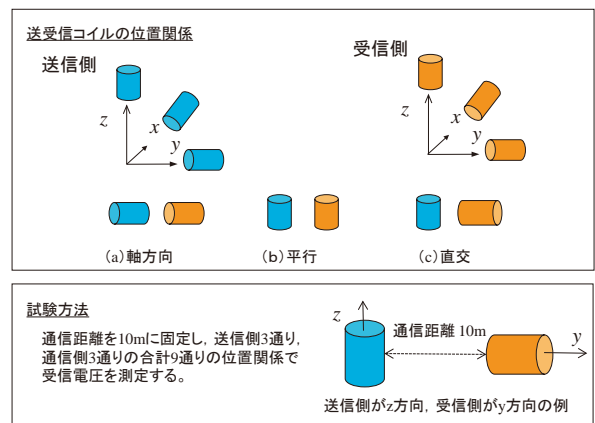


Fig. 10 試験概要

Schematic view of layout tests of the transmitting and receiving coil

次に、平面内における通信角度の変化が低周波電磁波の通信特性に与える影響を調べるために、Fig.11 に示すように通信距離を 10m に固定し、高さ一定の平面内で通信角度  $\theta$  を変化させ、送信角度と受信電圧の関係を調べた。Table 4 に試験ケースを示す。試験水準はコイルの寸法、位置関係および通信角度である。コイル寸法として大小 2 種類を、コイルの配置として軸方向と水平の 2 水準を変化させた。試験では、送信コイルを半径 10m の円の中心に固定し、通信角度  $\theta$  を 0, 15, 30, 60, 90° 変化させながら受信コイルを円周上で移動し、電圧測定を行った。軸方向配置における電圧測定の際は、受信コイルの通信軸が送信コイルに向かうように調整した。電圧測定は 1 往復、計 2 回の測定を行った。

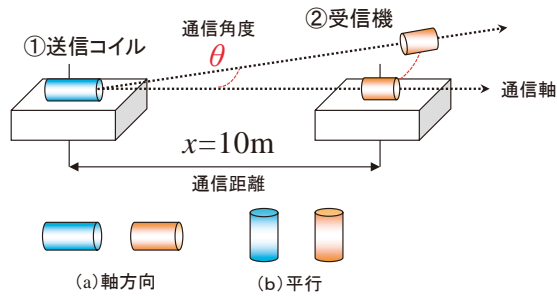


Fig. 11 通信角度変化試験の概要

Schematic of rotation tests for a receiving coil around a transmitting coil

Table 4 試験ケース (通信角度変化試験)  
Experimental conditions (rotation tests)

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	通信角度 [度]
1	大 (L 1)	軸方向	0, 15, 30, 45, 60, 90
2		平行	
3	小 (S 1)	軸方向	
4		平行	

b 試験結果

(1) 送受信コイルの配置と受信電圧の関係

送受信コイルの位置関係と受信電圧値を Table 5 に示す。表の値は3回以上測定した平均値である。また、表の電圧比は軸方向の配置に対する他の配置における受信電圧値の比を表す。Table 5 から送受信コイルの位置関係と受信電圧の関係として以下の結果を得た。

- ①送受信コイルの配置が軸方向において受信電圧は最大となる
- ②平行配置の場合、受信電圧は軸方向配置のほぼ 1/2 となる
- ③直交配置の場合、受信電圧は軸方向配置のほぼ 1/100 となる

Table 5 送受信コイルの位置関係と受信電圧  
The results of the layout tests

コイルの配置	(a) 軸方向	(b) 平行	(c) 直交
受信電圧 [mV]	240.0	108.0	2.4
電圧比	1	0.45	0.01

(2) 通信角度と受信電圧の関係

通信角度を変化させた試験結果を Fig.12 に示す。グラフの値は2回の測定の平均値である。軸方向配置では、受信電圧を通信角度の2次関数で近似することが可能であった。受信電圧を  $y$  [mV], 通信角度を  $\theta$  [度] とすれば、

軸方向配置の試験結果に対する受信強度と通信角度の回帰式として式 (6) ~ (7) が得られる。回帰式の決定係数はすべて 0.98 以上であった。Fig.12 に示すように平行配置 (グラフの記号□), つまり送受信コイルを地表面に対して鉛直に設置した場合には、通信角度が変化しても受信電圧はほとんど変化せず一定の値を示した。

$$y = -0.026 \theta^2 - 0.90 \theta + 290 \quad (\text{軸-大}) \quad (6)$$

$$y = -0.0098 \theta^2 - 0.32 \theta + 110 \quad (\text{軸-小}) \quad (7)$$

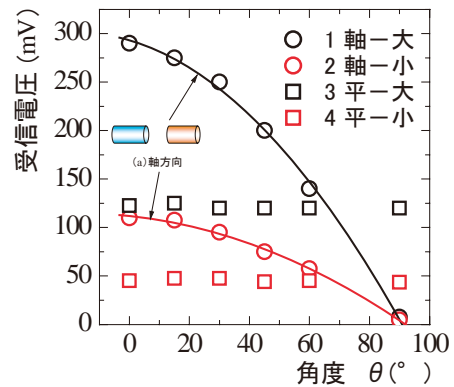


Fig. 12 通信角度変化試験の結果

Relationship between the transmission angle and the receiving voltage

c 考察

Fig.12 から、軸方向配置のケースでは送受信コイルの通信軸が一致する場合 (通信角度 0°) で受信電圧最大、通信軸が直交する場合 (通信角度 90°) で受信電圧は最小 (ほぼ 0) となった。それぞれのケースに対して、受信コイルを通過する磁力線の数を考えれば、Fig.2 から通信軸が一致する場合は受信コイルを通過する磁力線の数は最大に、通信軸が直交する場合は送信コイルから流れ出す磁力線が受信コイルの通信軸方向に侵入できないためほぼ 0 となると考えられる。すなわち、Fig.12 に示した軸方向配置における通信角度の増加に伴い受信電圧が減少する試験結果は、通信角度が大きくなると受信コイルを通過する磁力線の数、すなわち磁束密度が少なくなり、受信コイルに励起される電圧が低下するというメカニズムにより説明が可能である。さらに、Fig.12 に示す平行配置の試験結果が通信角度にかかわらず一定値を示すことも Fig.2 に示したように受信コイルを通過する磁束密度の大きさが変化しないことから説明することができる。以上の結果より、送受信コイルの位置関係による受信電圧の低下は、コイルの位置関係により受信コイルを通過する磁束密度が変化することが原因であり、受信コイルを通過する磁束密度が大きいほど受信電圧も大きくなると考えられる。



### 8 鉄筋配置による受信電圧低下の検討

鉄筋による受信電圧低下の要因について検討する。まずはじめに、鉄筋による電磁界の乱れが受信電圧の低下に及ぼす影響について検討する。送信コイルの周辺に透磁率の高い鉄筋が配置されると、鉄筋の長手方向に磁力線が集中する。このため、鉄筋が存在しない場合と異なる磁界の流れが生じ、受信コイルに発生する電圧も変化する。また、鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルが発信する電磁界と逆向きの誘導磁界を発生させることで電磁波を減衰させる可能性がある。しかしながら、配筋による減衰効果を検討するためには、3次元的な様々な鉄筋配置を考慮する必要がある、その試験ケースは膨大なものになる。そこで、今回の試験では、実際の構造物で設置される代表的な鉄筋配置を仮定し、試行錯誤的に鉄筋の配置を変化させ、配筋に対する受信電圧の変化を調べることにした。代表的な鉄筋配置としては、主鉄筋配置と帯鉄筋配置を選択した。

#### a 主鉄筋の影響試験

##### (1) 試験概要および試験ケース

鉄筋配置として主筋配置を想定し、主鉄筋配置と受信電圧低下の関係について調べる。試験の概要および送受信コイルの配置を Fig.13 に示す。送信コイルの配置により試験ケースを Fig.13 に示す 1) 直交配置 (送信コイルは西向き、主鉄筋軸方向と直交) および 2) 平行配置 (送信コイルは南向き、主鉄筋軸方向と同方向) に分けて試験を実施した。これは、実際のセンサの埋設に際しても、これら 2 つのケースのいずれかに合致すると考えたためである。送受信コイルの配置としては、最も受信電圧が大きいと想定される「軸方向」と次に大きいと考えられる「平行」の位置に配置した。

主鉄筋を固定するために Fig.14 に示す直径 150mm および 300mm の同心円上に鉄筋を通す孔を空けた塩ビ板を 2 枚準備し、2 つの板を向かい合わせて台座の上に固定し、鉄筋を所定の孔に通し、主鉄筋の配置を模擬した (Fig.13 の写真)。送信コイルは Fig.13 に示すように主筋の中央部に配置した。試験水準は鉄筋本数、径、長さ、コイルの位置関係および通信距離とした。Fig.14 に示す 1～8 の孔に全て鉄筋を配置した場合、鉄筋表面と送信コイル表面まで距離は 10cm 以上離れた状態にあった。Fig.14 に示す内側の円周上の 9～12 に鉄筋を配置すると、送信コイルを西に向けるか南に向けるかの配置によって異なるが、鉄筋表面から送信コイル表面まで距離は 2～5cm 程度に接近した。試験ケースを Table 6 に示す。MR1 シリーズでは、送受信コイルの位置関係、鉄筋径 (13mm)、長さ (50cm)、通信距離 (10m) を固定し、Fig.14 に示した鉄筋設置孔に鉄筋を 1 番の孔から順番に設置してゆき、鉄筋本数の増加と受信電圧の関係について調べた。MR2 シリーズでは、Fig.14 の 1～8 番の孔にすべて  $\phi 13$  の丸鋼を設置し、送信コイルを西方向に

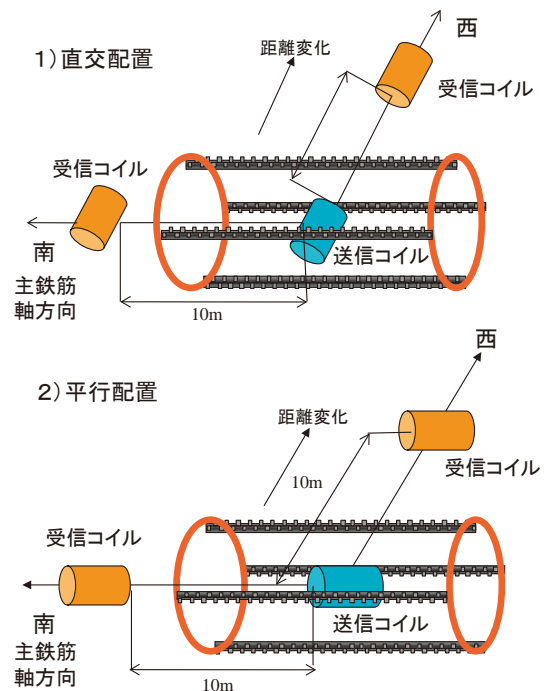
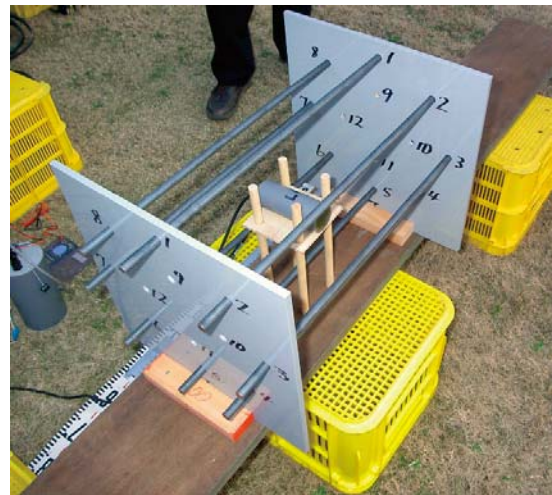


Fig. 13 主鉄筋影響試験の概要

Schematic of testing system for influence of reinforcing bar on receiving voltage

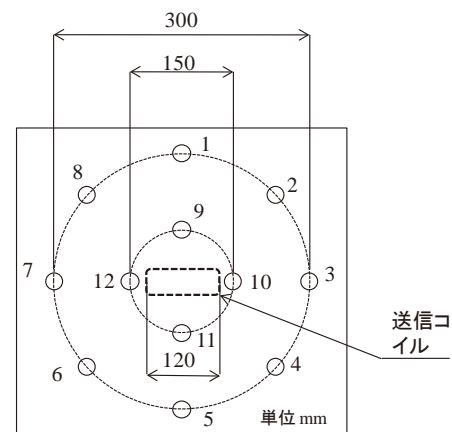


Fig. 14 鉄筋配置のための塩ビ板

Vinyl chloride panel for reinforcing bars set in

**Table 6** 主鉄筋影響試験の試験ケース  
Experimental conditions for the influence of reinforcing bar

試験シリーズ	試験ケース	目的	コイルの大きさ	送受信コイルの通信軸方向	受信コイル設置位置	通信距離	鉄筋径 [mm]	鉄筋本数	鉄筋長さ [cm]
MR1	MR1_1	コイルの位置関係と鉄筋本数と受信電圧の関係を調べる	大	直交	西	10m (固定)	φ 13	0 ~ 12	50
	MR1_2			直交	南				
	MR1_3			平行	西				
	MR1_4			平行	南				
MR2	MR2_1	鉄筋を8本に固定し、距離減衰を調べる		平行	西	5, 10, 20, 50m	8	8	50
	MR2_2			直交	西				
MR3		鉄筋を8本に固定して、鉄筋の径、長さを変えた場合の受信電圧変化を調べる		直交	西	10m (固定)	φ 13 φ 25	8	50 200
				直交	南				
				平行	西				
				平行	南				

10, 20, 30, 50m 移動させ主筋が存在する状態における通信距離と受信電圧の関係を求めた。MR3 では鉄筋径、鉄筋の長さが受信電圧に与える影響について検証した。

(2) 試験結果

鉄筋本数と受信電圧の関係を **Table 7** に示す。表の値は 2 回の測定の前平均値である。試験ケース MR1\_1, MR1\_3 の結果から φ 13 の丸鋼を **Fig.14** に示す 1 から 8 の孔すべてに設置しても受信電圧は鉄筋なしの値と同じであった。さらに、1 ~ 12 の孔に計 12 本の鉄筋を設置すると、鉄筋なしの場合に比べて受信電圧は 20 ~ 40% 低下するが、これは鉄筋の近接が影響したものと推察される。以上の結果から、送信コイルを主鉄筋から 10cm 程度離せば、主鉄筋による受信電圧低下は回避できると考えられる。

**Table 7** 主鉄筋影響試験結果  
Receiving voltage for some layouts of reinforcing bar

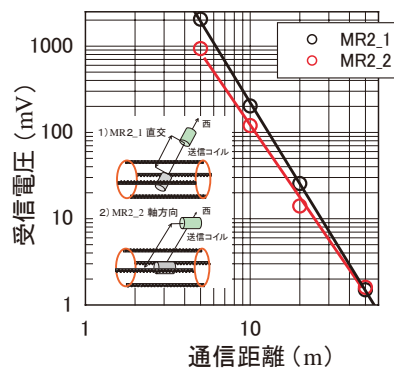
試験ケース	MR1_1	MR1_2	MR1_3	MR1_4
送信コイル配置	直交配置		平行配置	
受信コイル配置	西	南	西	南
鉄筋なし	220	-	113	-
1, 3	220	-	113	-
1, 3, 5, 7	220	-	113	-
1 ~ 8	220	110	113	220
1 ~ 12	135	-	90	-

試験シリーズ MR2 では、主鉄筋の数を 8 本に固定し、低周波電磁波の距離減衰特性を求めた。試験結果を **Fig.15** に示す。グラフの値は 2 回の測定の前平均値である。受信電圧を y [mV], 通信距離を x [m] とすれば、

**Table 6** の試験ケースに対して以下の y の線型回帰式が得られる。決定係数はすべて 0.98 以上であった。

$$\log y = -3.00 \log x + 5.36 \quad (\text{MR2}_1) \quad (8)$$

$$\log y = -2.78 \log x + 4.87 \quad (\text{MR2}_2) \quad (9)$$



**Fig. 15** 主鉄筋影響試験結果  
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (for the influence of reinforcing bar)



**Fig. 16** 主鉄筋影響試験 (鉄筋径 φ 13, φ 25, L = 50cm)  
View of effect test for reinforcing bar  
(diameter φ 13, 25mm, length = 50cm)



Fig. 17 主鉄筋影響試験 ( $\phi 13$ , 鉄筋長 200cm)  
View of effects test for reinforcing bar  
(diameter  $\phi 13$ , length = 200cm)

試験シリーズ MR3 では、通信距離 10m、鉄筋配置を Fig.14 の 1～8 の計 8 本に固定し、①鉄筋長 50cm、鉄筋径を  $\phi 13$  および  $\phi 25$  に変化させた試験 (Fig.16)、②鉄筋径  $\phi 13$ 、鉄筋長さを 50cm および 200cm に変化させた試験を行った (Fig.17)。その結果、鉄筋の長さおよび径を変化させても Fig.13 に示した 4 通りの送受信コイルの位置関係において、受信電圧に差は生じなかった。

b 帯鉄筋の影響試験

(1) 試験概要および試験ケース

帯鉄筋が受信電圧の低下に及ぼす影響について調べた。試験の概要を Fig.18 に示す。帯鉄筋を模擬するために、幅 20mm、厚さ 6mm の鉄板を曲げ加工し外径 320mm、質量 980g の鉄輪を 5 本作成した。5 本の鉄輪を Fig.18 に示すように等間隔に木製台座の上に固定し、鉄輪の中心に送信コイルを設置した。なお、帯鉄筋をコイルと想定した場合のコイルの軸方向を帯鉄筋軸と呼ぶことにする (Fig.18)。受信コイルは Fig.19 (Fig.18 の平面図) に示す①～④の 4 水準の配置を設定した。(1) 直

交配置では、送信コイルを西に向けて設置した。この場合送信コイルの通信軸と帯鉄筋軸は直交する。(2) 平行配置では、送信コイルを南に向けて設置した。この場合送信コイルの通信軸と帯鉄筋軸は一致する。試験水準は、鉄輪の間隔 (以下帯鉄筋間隔)、本数、コイルの位置関係および通信距離とした。試験ケースを Table 8 に示す。HR1 シリーズでは、通信距離 10m および鉄輪の本数 5 本を固定し、送受信コイルの位置関係を変化させ受信電圧に及ぼす影響について調べた。HR2 シリーズでは、送受信コイルの位置関係、通信距離 10m、鉄輪の本数 5



帯鉄筋軸

Fig. 18 帯鉄筋影響試験の概要

Schematic of testing system for influence of hoop iron on receiving voltage

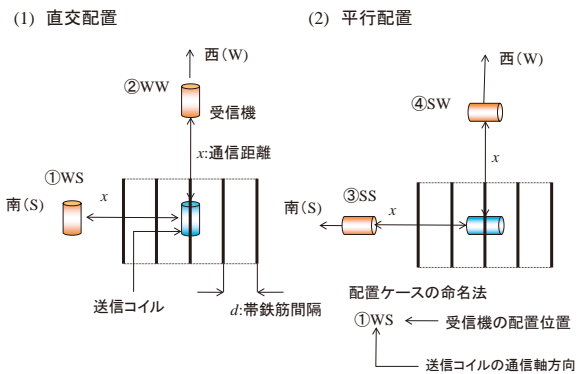


Fig. 19 帯鉄筋と送受信コイルの位置関係

Layout of the transmitting coil, receiving coil and hoop iron

Table 8 帯鉄筋影響試験の試験ケース  
Experimental conditions for the influence of hoop iron

試験シリーズ	目的	コイルの大きさ	送受信コイルの位置関係	通信距離	帯鉄筋本数	帯鉄筋間隔 [cm]
HR1	送信コイルの軸方向と帯鉄筋軸方向の位置関係と減衰の関係を調べる	大	WS WW SS SW	10m (固定)	5	10
HR2	帯鉄筋間隔、本数と減衰の関係を調べる		WW SS SW		2,5	10, 20, 30, 50
HR3	帯鉄筋の距離減衰を調べる		WW SW		5, 10, 20, 50m	5

本を固定し、帯鉄筋間隔を 10, 20, 30, 50cm に広げ、帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を調べた。また、SW ケースでは鉄輪の本数を 5 枚から 2 枚に変更した試験を行い、鉄輪の本数と受信電圧の関係を調べた。HR3 シリーズでは、鉄輪の数を 5 本、帯鉄筋間隔 10cm に固定し、受信コイルを 10, 20, 30, 50m 移動させ、帯鉄筋が存在する場合の受信電圧の距離減衰特性を求めた。

(2) 試験結果

試験シリーズ HR1 では送信コイルの設置方向と帯鉄筋軸の位置関係が受信電圧に及ぼす影響を調べた。試験結果を Table 9 に示す。測定値は 1 回の計測結果である。表中の  $y/y_0$  は帯鉄筋を設置する前の初期受信電圧  $y_0$  で帯鉄筋設置後の測定電圧  $y$  を割った値である。 $y/y_0$  の値に注目すると、直交配置（送信コイルを帯鉄筋軸方向と直交する方向に向け配置）では、受信電圧は低下しないが、平行配置（送信コイルを帯鉄筋軸方向に向けて配置）では、受信電圧は初期受信電圧の約 1/2 に低下した。

Table 9 帯鉄筋影響試験結果 (HR1)  
Receiving voltage (HR1)

試験ケース	①WS	②WW	③SS	④SW
送信コイル配置	直交配置		平行配置	
初期受信電圧 $y_0$ (鉄筋無し)	120	220	220	120
受信電圧 $y$	120	220	120	58
受信電圧比 $y/y_0$	1.00	1.00	0.55	0.48

試験シリーズ HR2 では、帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を調べた。試験結果を Fig.20 に示す。測定は 1 回のみである。Fig.20 から Fig.19 の直交配置では、帯鉄筋間隔を広げても受信電圧はほぼ一定であり変化しないことがわかる。一方、平行配置では、受信コイルの配置にかかわらず、帯鉄筋の間隔を狭めると受信電圧は低下する傾向が認められた。

試験シリーズ HR3 の結果を Fig.21 に示す。グラフの値は 2 回の測定の平均値である。受信電圧を  $y$  [mV]、通信距離を  $x$  [m] とし、最小 2 乗法により  $y$  の線型回帰式を求め、以下を得た。決定係数はすべて 0.97 以上であった。

$$\log y = -3.06 \log x + 5.43 \quad (\text{WW}) \quad (10)$$

$$\log y = -2.51 \log x + 4.32 \quad (\text{SW}) \quad (11)$$

c 鉄筋配置による受信電圧低下に関する考察

主鉄筋に関する試験結果より、送信コイルの表面から主鉄筋表面までの距離を 10cm 以上離なせば、送信コイルの設置方向にかかわらず、受信電圧の低下はほとんど

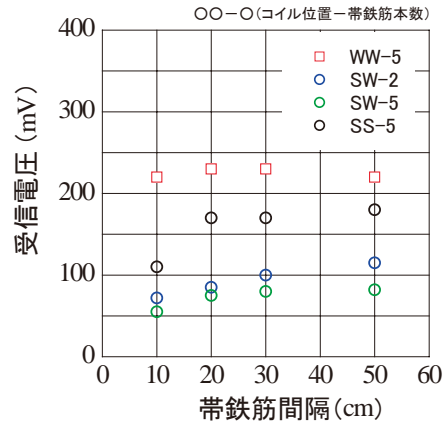


Fig. 20 帯鉄筋間隔と受信電圧の関係  
Relationship between the hoop spacing and the receiving voltage

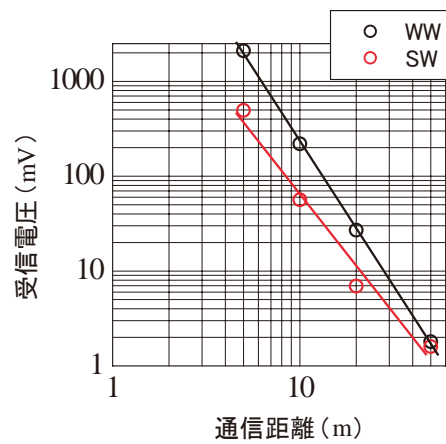


Fig. 21 帯鉄筋が存在する場合の距離減衰特性  
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (Under influence of hoop iron)

発生しない。また、鉄筋径および鉄筋長さを変化させても受信電圧低下に及ぼす影響は小さいと推察される。主鉄筋の配置は帯鉄筋のようにコイル状ではないため、磁界の流れを乱す効果はあるが、受信電圧に対する影響は小さいと推察される。

一方、帯鉄筋に関する試験結果からは、送信コイルを帯鉄筋軸方向に向けると受信電圧は帯鉄筋が存在しない場合の約 1/2 に低下することが確認された。また、送信コイルを帯鉄筋軸と直交する方向に向けた場合は受信電圧の低下は認められなかった。すなわち、帯鉄筋軸方向に送信コイルを向けると受信電圧が低下する結果を得た。この結果は、帯鉄筋に送信コイルから発信された低周波電磁界と逆向きの誘導電磁界が発生し、送信を阻害するという仮説を支持する。送信コイル周辺に帯鉄筋に代表されるループ状の鉄筋配置が存在する場合は送信コイルの通信軸方向の選択に注意が必要である。

帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を示した Fig.20 から、帯鉄筋間隔が狭く、本数が多いほど受信電圧は低下することが分かる。帯鉄筋本数が 5 本 (SW-5) と 2 本 (SW-2) の試験ケースを比較すると、帯鉄筋が 2 本と 5 本の場合

での受信電圧の差は20～30%と小さい。このことは、受信電圧の低下に対しては送信コイル近傍に存在する帯鉄筋の寄与が大きいことを示唆する。

9 近接鉄筋による受信電圧低下の検討

a 試験概要および試験ケース

送信コイルに鉄筋が近接した場合、鉄筋に渦電流が発生し、熱エネルギー損失が発生するため、鉄筋を透過する際に低周波電磁波が減衰する可能性がある。そこで、送信コイル表面から鉄筋表面までの距離  $L$  [cm] を試験水準とし、 $L$  と受信電圧の関係を調べた。試験の概要を Fig.22 に示す。また、Fig.23 には送信コイルに対する鉄筋の配置を示す。実際のセンサ設置を想定し、Fig.23 に示すように、LC1：正面、LC2：側面平行、LC3：側面直交の3つの鉄筋配置を設定した。試験では、Fig.22 に示すように送信コイルと受信機の通信軸を一致させ、通信距離 10m と固定し、Fig.24 に示す3種類の鉄筋配置に対して、それぞれ  $L$  を変化させ受信電圧との関係を求めた。他の試験水準は鉄筋径（丸鋼： $\phi 13$ 、 $\phi 25$ ）、鉄筋本数（1、2本）を設定した。試験ケースを Table 10 に示す。各試験ケースの命名方法を Fig.24 に示す。試験シリーズと試験水準を組み合わせ命名した。

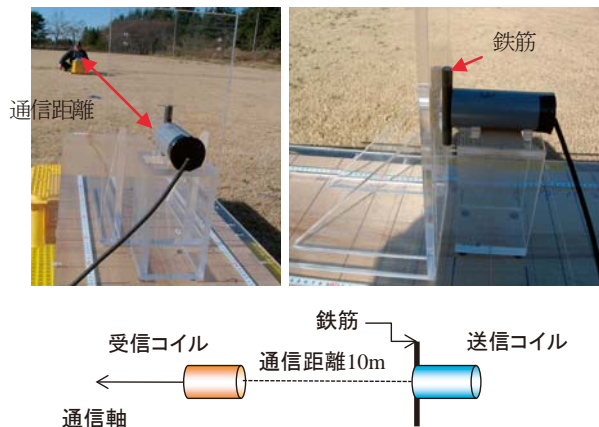


Fig. 22 送信コイル-鉄筋間距離変化試験の概要  
Schematic of testing system for the reinforcing bar closing to the transmitting coil

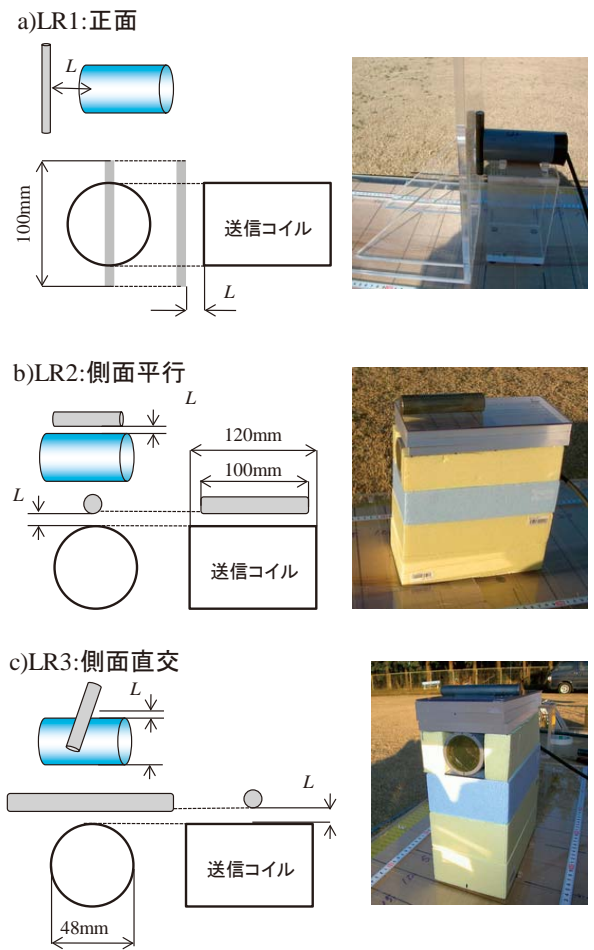


Fig. 23 鉄筋の配置  
Layout of reinforcing bar

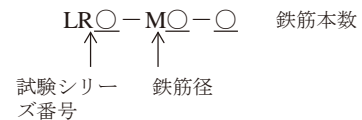


Fig. 24 試験ケースの命名方法  
Symbol of the test cases.

Table 10 試験ケース  
Test conditions

試験シリーズ	目的	コイルの大きさ	鉄筋と送信コイルの位置関係	通信距離	鉄筋径	鉄筋数	$L$ [cm]
LR1	鉄筋-送信コイル間距離 $L$ を変化させ受信電圧との関係を調べる	大	正面	10m (固定)	13, 25	1, 2	0 ~ 10
LR2			側面平行				0 ~ 5.2
LR3			側面直交				

b 試験結果

送信コイル-鉄筋間距離  $L$  と受信電圧の関係を Fig.25 ~ 27 に示す。すべての試験シリーズで鉄筋が近接すると受信電圧は低下した。特に  $L$  が 1 ~ 3cm 以下の領域で受信電圧は急激に低下した。電圧が急激に低下しはじめる  $L$  の値は、側面直交<正面<側面平行の順に大きかった。

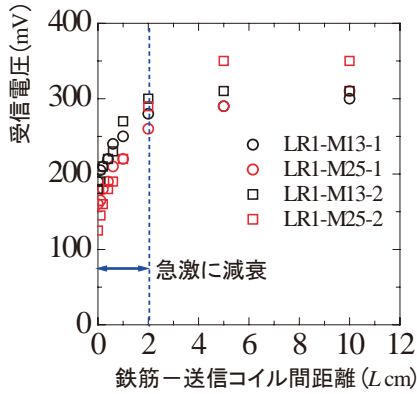


Fig. 25  $L$  と受信電圧の関係 (正面)

Relationship between  $L$  and the receiving voltage (front)

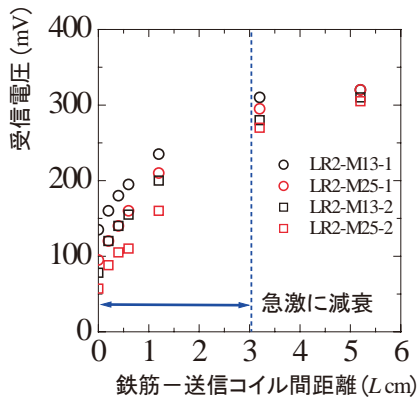


Fig. 26  $L$  と受信電圧の関係 (側面平行)

Relationship between  $L$  and the receiving voltage (along side)

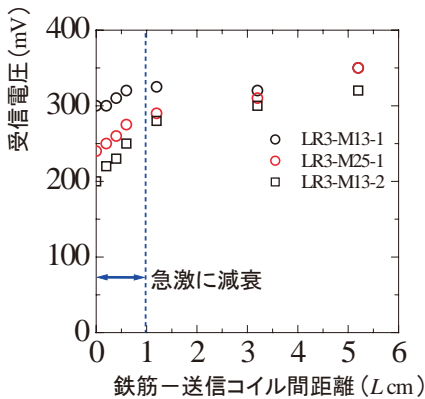


Fig. 27  $L$  と受信電圧の関係 (側面直交)

Relationship between  $L$  and the receiving voltage (traverse)

c 近接鉄筋による受信電圧低下に関する考察

送信コイルに鉄筋が近接すると Fig.23 に示したすべての鉄筋配置ケースで  $L$  が小さくなるほど受信電圧が低下する結果を得た (Fig.25 ~ 27)。この結果は、送信コイルと鉄筋が近接する際には鉄筋に渦電流が発生し、熱エネルギー損失が生じるため低周波電磁波が減衰するという仮説を支持する。一方、Fig.25 ~ 27 から、受信電圧が急激に減衰しはじめる  $L$  の範囲は鉄筋と送信コイルの配置によって異なる結果を得た。このことは、鉄筋と送信コイルの配置により熱エネルギーの損失量が異なる可能性があることを示唆する。すなわち、鉄筋と送信コイルの配置によって鉄筋の渦電流の発生の仕方が異なるため距離  $L$  が同じでも受信電圧の値が異なると考えた。小井戸 (2008) が行った 3 次元有限要素法解析結果によれば、鉄筋に発生する渦電流はコイルの磁束を打ち消す方向に流れる。そこで、鉄筋を送信コイルに対して (1) 正面および (2) 側面平行に設置した場合、Fig.28 に示すような渦電流が発生すると仮定し考察を試みる。

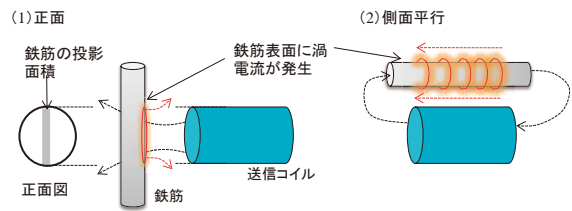


Fig. 28 鉄筋表面に発生する渦電流

Eddy currents produced on the surface of the reinforcing bar

Fig.28 に示すように鉄筋が正面に配置された場合は、電磁界の流れが鉄筋にぶつかる側の鉄筋表面に渦電流が発生すると仮定する。また、鉄筋が側面平行に設置された場合は、鉄筋の表面全体に渦電流が発生すると仮定する。鉄筋配置が正面の場合は、送信コイル断面に鉄筋を投影した面積に電磁界の流れがぶつかると考え、その面積が渦電流の大きさに関係すると考えた。側面平行の場合は、鉄筋を 1 つのコイルと仮定し、鉄筋によって発生する磁界は鉄筋の断面積に関係すると考えた。受信電圧は、渦電流の大きさに比例して低下すると仮定した。以上の仮説を検証するために、受信電圧低下が最大である  $L=0\text{cm}$  のケースを対象に、正面配置では鉄筋投影面積の比 ( $\phi 13$  の鉄筋のコイル断面への投影面積  $A_0$  に対する鉄筋径および本数を変化させたケースの投影面積  $A$  の比  $A/A_0$ )、側面平行では鉄筋断面積の比 ( $\phi 13$  の鉄筋断面積  $S_0$  に対する他ケースの鉄筋断面積  $S$  の比  $S/S_0$ ) と受信電圧比 ( $\phi 13$  鉄筋 1 本の場合の受信電圧  $V_0$  に対する各ケースの受信電圧  $V$  の比  $V/V_0$ ) の関係を求めた。結果を Fig.29, Fig.30 に示す。Fig.29 から、鉄筋配置が正面の場合、受信電圧比は鉄筋投影面積に比例して減少した。Fig.30 から、鉄筋配置が側面平行の場合、受信電

圧は鉄筋面積比に比例して減少した。ただし、両ケース共に鉄筋の本数が1本と2本の場合では、電圧低下特性に差がみられた。これは、2本の鉄筋間での電磁界の相互作用が要因である可能性がある。以上の結果から、鉄筋が送信コイルに近接する場合の低周波電磁波の減衰は鉄筋の投影面積あるいは断面積と関係することが示唆され、Fig.28に示した仮説をある程度支持する結果が得られたが、仮説を定量的に説明するまでには至らなかった。近接鉄筋の減衰効果については今後さらに詳細な検討が必要と考える。

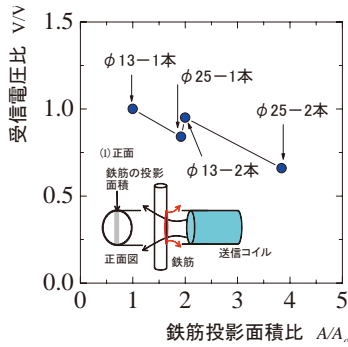


Fig. 29  $V/V_0$  と  $A/A_0$  の関係 (正面)  
Relationship between  $V/V_0$  and  $A/A_0$  (front)

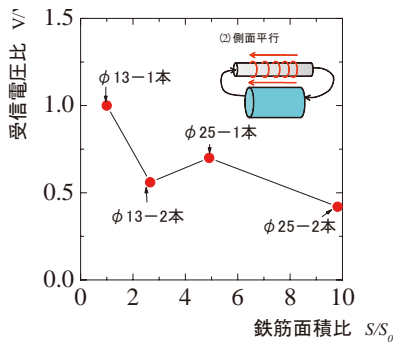


Fig. 30  $V/V_0$  と  $S/S_0$  の関係 (側面平行)  
Relationship between  $V/V_0$  and  $S/S_0$  (along side)

### III 埋設試験

#### a 試験概要

埋設試験の概要を Fig.31 に示す。試験では、送信コイルをφ58cm、H70cmの樽型容器(200L)の中心に鉄筋と共にコンクリートに埋設し、通信距離を変化させ受信電圧を測定した。試験は、2009年12～1月に農村工学研究所の資材性能試験場で実施した。環境ノイズは概ね1mV以下であった。

#### b 使用機材等

試験では、気中試験と同じ仕様の送信コイルおよび受信機を用いて試験を行った。送信コイルは大を使用した。打設コンクリートには、普通ポルトランドセメント、呼び強度21、スランプ12cm、最大骨材寸法20mmの配合

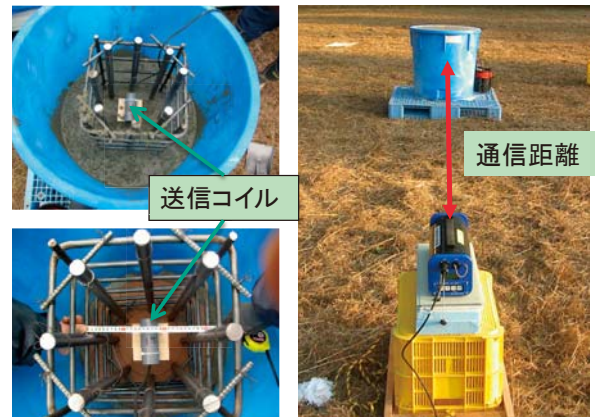


Fig. 31 埋設試験の概要  
Schematic illustration of the burial tests

の生コンを使用した。主鉄筋にはφ25mmの丸鋼を、帯筋にはφ13の丸鋼を使用した。配筋図を Fig.32 に示す。φ25の主筋を直径260mmの円周上に8本配筋した。主筋の回りにφ13の帯鉄筋を100mmピッチで6本配置した。鉄筋比は約1.5%である。

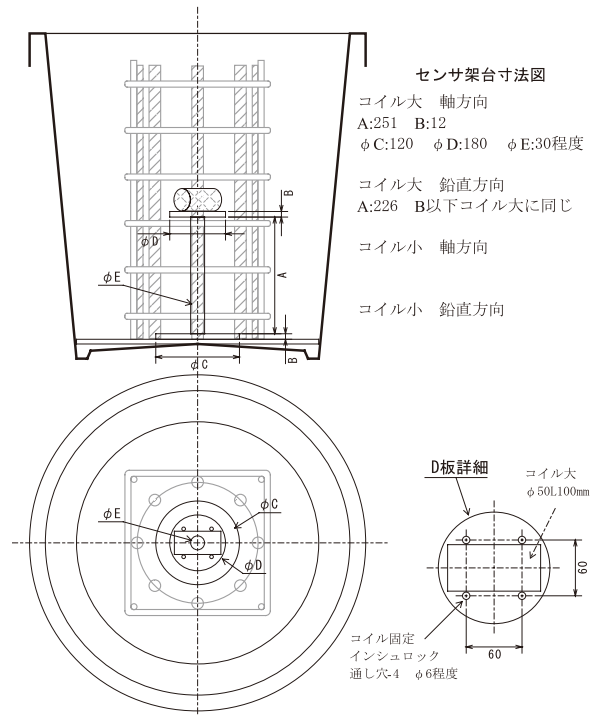


Fig. 32 配筋およびコイルの配置  
Arrangement of bar and layout of a transmitting coil

#### c 試験ケース

送信コイルを帯鉄筋の軸方向に直交させた配置(CASE1)および送信コイルを帯鉄筋の軸方向を一致させた配置(CASE2)の計2ケースの試験を行った。Fig.33に試験ケースを、Fig.34に試験手順および受信電圧の計測時期を示す。鉄筋およびコンクリートの影響が

無いセンサ設置時、鉄筋の影響を調べるための鉄筋立て込み後、コンクリートの影響を調べるためにコンクリート打設1.5時間後および材齢28日において、通信距離を5, 10, 20, 30, 50m変化させ受信電圧を測定した。

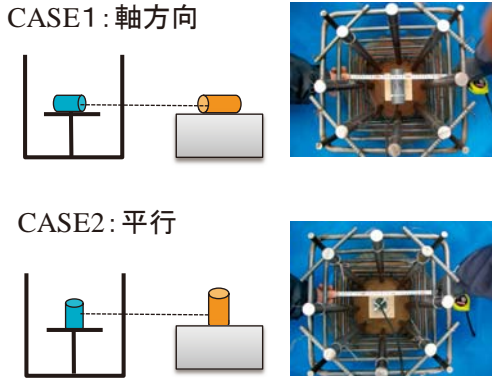


Fig. 33 試験ケース Test conditions

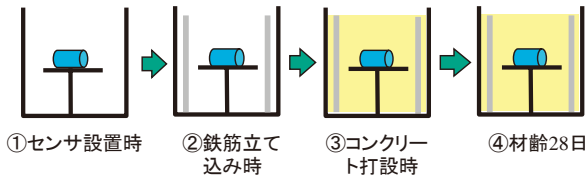


Fig. 34 試験手順 Test process

d 試験結果

試験結果を Fig.35, Fig.36 に示す。グラフの点は、2回の測定の平均値である。受信電圧を  $y$  [mV]、通信距離を  $x$  [m] とし、最小2乗法により各計測時期における試験値の式 (3) に対する線型回帰式を求め、計測時期ごとの係数  $a$ 、 $b$  を求めた。決定係数はすべて0.98以上であった。係数  $a$ 、 $b$  の値を Table 11 に示す。

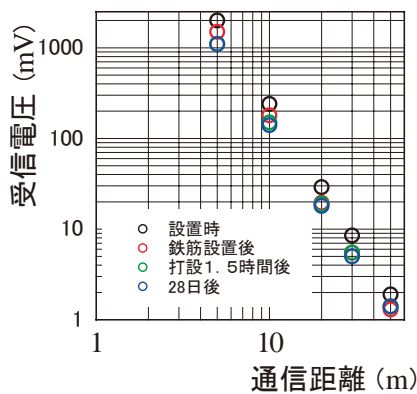


Fig. 35 距離減衰試験結果 (軸直交)

Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (orthogonal to axis of hoop)

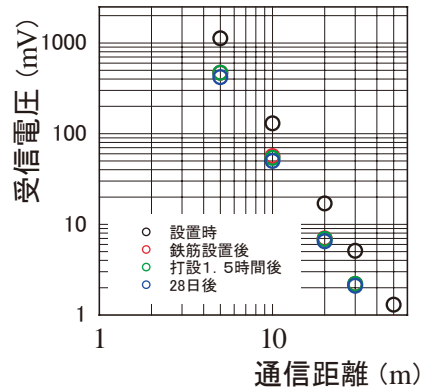


Fig. 36 距離減衰試験結果 (軸方向)

Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (Setting in the direction of hoop axis)

Table 11 埋設試験結果 The results of burial tests

試験ケース・係数	センサ設置時	鉄筋設置後	コンクリート打設時	材齢28日	
CASE1	係数a	-3.03	-3.09	-2.92	-2.93
	係数b	5.41	5.32	5.08	5.07
CASE2	係数a	-2.95	-2.82	-2.86	-2.81
	係数b	5.08	4.59	4.61	4.54

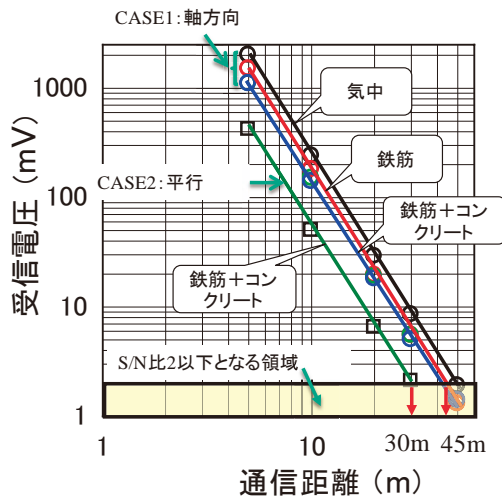
e 考察

Fig.35 から、送信コイルを軸方向に配置した CASE1 では、鉄筋設置後およびコンクリート打設後に受信電圧が低下した。すなわち、この配置では低周波電磁波は鉄筋およびコンクリートの両方に影響を受け減衰したことが分かる。一方、Fig.36 から、平行配置の CASE2 では、鉄筋設置後に受信電圧は大きく低下し、コンクリート打設後の受信電圧の低下はほとんどない。これは、帯鉄筋により発生する誘導磁界による受信電圧低下に対する影響が大きいと推察される。

Fig.37 に埋設試験における通信距離と受信強度の関係および周辺ノイズレベルを表したグラフを示す。図の CASE1 は帯鉄筋軸と直交する方向に送信コイルを向け試験を行ったケースであり、気中 (鉄筋を設置する前に測定)、鉄筋 (鉄筋設置後)、鉄筋+コンクリート (コンクリート打設後) の3条件に対する通信距離と受信電圧の関係を示した。CASE1 では、気中における受信電圧を100%とすると、受信電圧は、鉄筋設置後に75%、コンクリート打設後に65%に低下した。CASE2 は、帯鉄筋軸方向に送信コイルを向けて試験を行ったケースであり、コンクリート打設後の受信電圧は CASE1 の受信電圧の35%まで低下した。これは帯鉄筋の誘導磁界による影響と推定される。CASE1 および CASE2 に関して打設後1.5時間と材齢28日の受信電圧の測定値を比較するとほぼ等しい値を得た。すなわち、コンクリートの材



齢変化が低周波電磁波の減衰に与える影響は小さいと推察される。**Fig.33**の網掛けは周辺ノイズが1mVと仮定した場合、S/N比が2未満となる受信電圧の領域である。グラフの点がこの領域の外にあれば通信可能といえる。グラフから最大通信距離を推定すると、CASE1が45m、CASE2が30mであった。すなわち、周辺ノイズを1mVと仮定した場合、厚さ30cm、鉄筋比1.5%程度の鉄筋コンクリート中から最大30～40mの通信が可能と推察される。



**Fig. 37** 最大通信距離の推定  
Estimation of maximum transmission distance

#### IV 結 言

本研究では、低周波電磁波の減衰特性を把握するために、①送信コイルを空气中に設置した場合の減衰特性を測定する試験（空中試験）、②送信コイルを鉄筋コンクリートに埋設した場合の減衰特性を測定する試験（埋設試験）を実施した。本試験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

1) 空气中における低周波電磁波の受信電圧の対数値と通信距離の対数値の間には線形の関係が成り立つ。

2) 送受信コイルの配置によって低周波電磁波の空中減衰は変化する。これは送受信コイルの配置によって受信コイルを通過する磁束密度が変化するためと推察される。送受信コイルの通信軸が一致する配置で受信電圧は最大となる。送受信コイルの軸が平行の位置関係では通信軸が一致する配置の約1/2に受信電圧は低下する。送受信コイルの通信軸が直角の位置関係では受信電圧は極めて小さくなり、通信を行うことはできない。

3) 主鉄筋による低周波電磁波の減衰効果は小さい。送信コイルの表面から主鉄筋表面までの距離が10cm以上離れれば、受信電圧はほとんど低下しない。また、

鉄筋径、鉄筋長さも受信電圧に影響を与える要因にはならない。

4) 帯鉄筋により低周波電磁波は減衰する。送信コイルと帯鉄筋の軸方向を一致させた配置では、帯鉄筋が存在しない場合の電圧の約1/2に受信電圧は低下する。送信コイルと帯鉄筋の軸方向を一致させた配置では帯鉄筋に送信コイルと逆向きの誘導電磁界が発生するため電磁波の減衰が発生すると推察される。

5) 送信コイルと鉄筋が近接する場合、受信電圧の低下が発生する。これは、鉄筋に渦電流が発生し、鉄筋の中で熱エネルギーとして損失されることが原因と推察される。鉄筋と送信コイルが近接する場合の受信電圧の低下は送信コイル表面と鉄筋表面間の距離Lが3cm以上離れていればほとんど無視できるほど小さい。

6) 厚さ30cm、鉄筋比1.5%程度の鉄筋コンクリート中に送信コイルを埋設し、距離減衰試験を行った。その結果、空气中における初期受信電圧を100%とすると、受信電圧は、鉄筋設置により初期値の75%に、コンクリート打設により初期値の65%に減衰した。打設後1.5時間と材齢28日の受信電圧の測定結果はほぼ等しく、コンクリート材齢の影響は小さいと推察された。周辺ノイズを1mVと仮定した場合、コイルの設置法にも依存するが最大通信距離は30～40mと推測される。

以上述べたように、低周波電磁波を用いた無線通信により鉄筋コンクリート内からの通信が可能であることが供試体試験レベルで実証された。今後は、よりマシブな重力式コンクリートダム等において現場通信実験を行い、ワイヤレス通信の通信限界について検証を行う。また、センサの設置性を検討するための室内試験および施工中の重力式コンクリートダムへの埋設試験を実施する。

#### 参考文献

- 1) 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, 16(3), 165-176
- 2) 林田洋一, 遠目塚良一, 浅野勇, 増川晋, 田頭秀和(2010): ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証, 農工研技報, 210, 243-254
- 3) 浅野勇, 林田洋一, 増川晋, 田頭秀和, 遠目塚良一(2009): 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の検討, 農工研技報, 209, 163-171
- 4) 江里口玲, 小川彰一, 大竹淳一郎, 佐藤達三(2010): RFID ひずみ計測システム, 太平洋セメント研究報告(TAIHEIYO CEMENT KENKYU HOKOKU), 158, 55-64
- 5) 杉山央, 大久保孝昭, 中島史郎(2009): コンクリート中に埋め込んだ各種ICタグの通信性に関する研究(材料施工), 日本建築学会技術報告集

- 15(29), 9-14
- 6) 小井戸純司 (2008) : コンクリート中の鉄筋の電磁誘導式非破壊試験に用いる分割型マルチコイルの特性, 日本大学生産工学部研究報告 A, 41(1), 1-6
  - 7) 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内 仁 (2006) : 地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討, 原子力バックエンド研究, 12(1-2), 21-23
  - 8) 黒田清一郎, 中里裕臣, 奥山武彦 (2004) : 透過電磁波プロファイリングによる地盤導電率分布の推定精度, 農工研技報, 202, 205-214
  - 9) スジヨノ, A.S., 関博 (1998) : 導電率によるコンクリートの細孔構造の予想について, コンクリート工学年次論文集, 20(2), 727-732

# Effects of Concrete and Reinforcing Bar on The Wireless Transmission With Low Frequency Electromagnetic Wave

ASANO Isamu, MASUKAWA Susumu, TAGASHIRA Hidekazu and HAYASHIDA Yoichi

## Summary

We have developed wireless transducers using a low frequency electromagnetic wave to measure pore water pressure in fill dams. We call them “Wireless Pore Water Pressure Transducers”. This transducer is available to use Structural Health Monitoring (SHM) in reinforced concrete structures because it has no wire cables and it is easy to make the size smaller. However, few studies have been carried out on the communication characteristic of a low frequency electromagnetic wave through reinforced concrete. The aim of this paper is to investigate the communication characteristic of a low frequency electromagnetic wave through reinforced concrete. Some experimental tests were conducted to investigate the effects of concrete and reinforcing bar on the wireless transmission. (1) The attenuation characteristics of a low frequency electromagnetic wave in air. (2) The attenuation effects of electromagnetic waves by reinforcing bar. (3) The attenuation characteristics of a low frequency electromagnetic wave in reinforced concrete specimens.

The results are as follows:

- (1) The received voltage changes by arranging the transmission coil. When the both axes of the transmission and receiving coil are corresponding, the received voltage becomes maximum. When two axes are orthogonal, the received voltage becomes minimum.
- (2) The effect of main reinforcing bar on the attenuation of the low frequency electromagnetic wave is small.
- (3) The hoop attenuates the low-frequency electromagnetic wave when the axis of the transmission coil is corresponding to the axis of hoop axis.
- (4) The low frequency electromagnetic wave attenuates when the reinforcing bar exists within about 3cm by the transmission coil.
- (5) The communication examination was done by setting up the transmission coil in a cylindrical test piece of 60cm in the diameter, steel ratio 1.5%. As a result, it was confirmed a wireless transducer using a low frequency electromagnetic wave was capable of communicating in reinforced concrete structure by the distance of 30-40m.

In conclusion, it was confirmed a wireless communication using a low frequency electromagnetic wave was to communicate in reinforced concrete structure.

**Keywords** : SHM, A low frequency electromagnetic wave, Reinforcing bar, Concrete, Wireless transmission



## ジオテキスタイル工法による石川県宮ノ本池の強化復旧事例

— 下流法先部の補強およびパイピング防止対策 —

松島健一\*・毛利栄征\*\*・堀俊和\*・有吉 充\*・上野和広\*

## 目 次

I 緒 言	205	2 ジオテキスタイル工法による	
II 決壊した宮ノ本池	205	法先部の補強およびパイピング防止対策	209
1 宮ノ本池の被災状況	205	3 本対策工法の適用性	212
2 平成7年および平成22年の被災状況	206	IV 結 言	213
3 決壊原因について	208	参考文献	213
III 強化復旧対策	208	Summary	214
1 構造的ウィークポイント			
および復旧対策の考え方	208		

## I 緒 言

ため池は近代の設計法が適用される以前に築堤されたものが多く、毎年のように数多くのため池が地震や豪雨により被災を受けている。ため池は全国に21万カ所存在し、うち早急に改修が必要な老朽化ため池は約2万カ所に及んでいる（農林水産省，2000）。このため、豪雨や地震によるため池の被災リスクを低減するためには、従来の地盤材料のみを突き固めた伝統的な方法だけではなく、新しい補強技術を積極的に導入していく必要がある。本報では、決壊した石川県宮ノ本池を対象にして、現地調査に基づく構造的ウィークポイントを分析するとともに、復旧工法として採用されたジオテキスタイルによる法先補強対策の現場適用性について検討する。なお、本対策工法は、法先補強とパイピング防止を兼ね備えた効果を期待するものである。

なお、本報の取りまとめに際して、石川県農林水産部農業基盤課および石川県七尾市産業部農林水産課の関係者の皆様には多大なるご支援・ご協力を賜りました。記して感謝を述べます。

\* 施設資源部土質研究室

\*\* 施設資源部長

平成23年1月21日受理

キーワード：強化復旧，ため池，ジオテキスタイル，補強技術，パイピング

## II 宮ノ本池の被災状況

## 1 宮ノ本池の概要

**Fig.1**に宮ノ本池の位置および地形条件を示す。宮ノ本池は石川県七尾湾に浮かぶ東西約14km，南北約9km，周囲約72km，面積約46.6km<sup>2</sup>の能登島の西部に位置する（**Fig.1** (a)）。河川はいずれも流路が短小かつ急勾配で流量の季節変動が大きいため、安定的な農業用水の利用が困難な状況にある。そのため、**Fig.1** (b), (c)に示すように古くから溪流沿いの谷地形上のため池堤体を築堤し、農業用水を確保してきた。

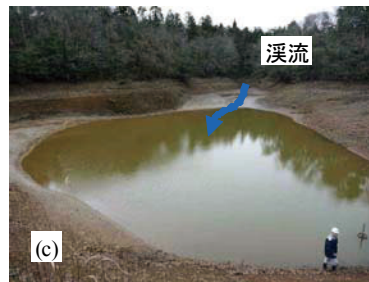
**Table 1**に宮ノ本池の緒元を示す。堤高6.3m，堤頂長56.0m，総貯水量15,000m<sup>3</sup>であり，下流域には3haのかんがい受益面積（水田）を有している。**Fig.2**に宮ノ本池の堤体断面図を示す。旧みお筋上に底樋管としてコンクリート巻き立てによるヒューム管（φ=400mm）が埋設されている。底樋出口付近の下流法先には腰石垣やフトン籠などは設置されていない。基盤には強風化凝灰岩が薄く堆積するが、それ以深には比較的良好的な基盤（スウェーデン式サウディング試験から換算したN値で18以上）が存在している。**Table 2**にコア材の緒元を示す。コア材の透水係数は $7.35 \times 10^{-7}$ cm/sであり，設計上の遮水性能を満足していた（土地改良事業設計指針「ため池整備」，2000）。また，平成7年のため池復旧工事記録（石川県七尾市，1996）には、ランダムゾーンおよびコアゾーンとも締固め基準を満足しており，適切な施工がなされていた。



(a)宮ノ本池の位置



(b)谷地形上に築堤される堤体  
(貯水側から下流側を見た様子)



(c)山地から流入水の進入経路  
(堤体から貯水側を見た様子)

**Fig.1** 石川県宮ノ本ため池の位置および周辺地形  
Location and terrain condition of “Miyano-moto pond” in Ishikawa Pref.

**Table 1** 宮ノ本ため池の諸元  
Specification of “Miyano-moto pond”

天端幅	4.0	m
堤体積	5,300	m <sup>3</sup>
堤高	6.3	m
堤頂長	56.0	m
法面勾配	上流 V: H = 1.0: 1.7	
	下流 V: H = 1.0: 1.8	
総貯水量	15,000	m <sup>3</sup>
有効貯水量	15,000	m <sup>3</sup>
流域面積	0.02	km <sup>2</sup>
満水面積	0.0050	km <sup>2</sup>
かんがい受益地 (水田)	3	ha
かんがい受益戸数	11	戸

**Table 2** 宮ノ本池堤体のコア材の諸元  
Property of core material used in “Miyano-moto pond”

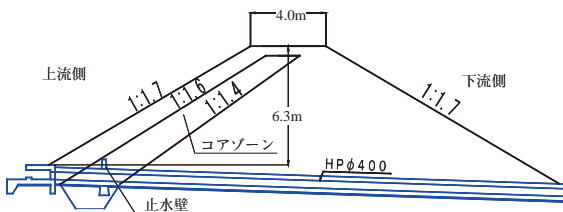
土の分類	粘土 (CH)
細粒分含有率F <sub>c</sub>	77.6%
塑性指数I <sub>p</sub>	21.4
土粒子密度r <sub>s</sub>	2.746 g/cm <sup>3</sup>
最大乾燥密度r <sub>dmax</sub>	1.286g/cm <sup>3</sup>
最適含水比w <sub>opt</sub>	36.2%
透水係数 (締固め度90%)	7.35 × 10 <sup>-7</sup> cm/s

2 平成 7 年および平成 22 年の被災状況

宮ノ本池は平成 7 年に底樋周りのパイピングによる浸透破壊が生じ、平成 22 年には完全な決壊が発生している。ここでは、これらの被災状況について、それぞれ平成 7 年のため池復旧工事記録 4) および平成 22 年の 4 月 15 日に筆者らが実施した現地調査結果 (決壊直後から 2 日後に実施)、聞き取り調査に基づいて記述する。

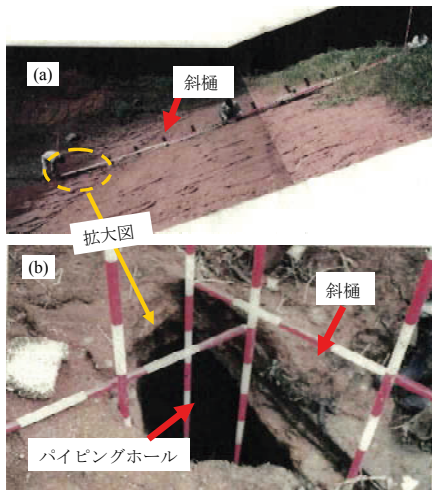
a. 平成 7 年の被災状況

当時の被災状況が復旧工事記録に残されている。Fig.3 に示すように堤体上流側の法面下部の斜樋側部にパイピングホールが形成されており、旧みお筋上に設置された底樋沿いに堤体上流側から下流の底樋出口にまでパイピングホールが発達していた。同年に実施された復旧工



**Fig.2** 決壊前の宮ノ本池の堤体断面図  
Cross section of the embankment before collapsed in “Miyano-moto pond”

事では、木管底樋から新しくコンクリート製の底樋管（コンクリートを巻き立てたヒューム管、 $\phi = 400\text{mm}$ 、**Fig.2** 参照）に取り替えられており、底樋管には底幅約 1,000mm、高さ 900mm のコンクリート製の止水壁がコアゾーンに設けられた。底樋管の設置に当たり、破損した底樋沿いに堤体上下流方向に V 字状に開削された。右岸左岸の法面は段切り施工（段切り高さ 50cm）によって処理されていた。底樋を設置した後、開削された堤体は購入したコア材と、開削した部分のランダム材を再利用して、盛立て直された（以下、新たに盛立てた部分を新堤と呼ぶ）。



**Fig.3** 平成 7 年災害による堤体の破損状況：  
(a) 上流法面；(b) パイピングホール  
Damaged embankment by disaster in 1991:  
(a) Upstream slope; (b) Piping hole

**b 平成 22 年の被災状況**

平成 22 年 4 月 11 日から 12 日の降雨により、13 日早朝に堤体が完全に決壊した。下流農地には流出した土砂が堆積し、県道田尻・祖母ヶ浦・半浦線に泥水が流出した。人的な被害は無かった。宮ノ本池付近で観測された降雨データによると、日積算雨量 76mm/day であり、この間に記録された時間最大降雨は 6mm/hr であった。ため池管理者によると、11 日の降雨前から貯水位はほぼ満水位の状態にあった。また、決壊前まで斜樋の栓（満水位付近）が開いており、斜樋による排水は行われていた。以下に決壊前後の堤体状況について記述する。

(i) 決壊前の堤体状況

- ・平成 15 年に石川県が実施したため池点検調査では、漏水が確認されていない。
- ・平成 19 年の能登半島地震では震度 6 強程度の地震力が堤体に作用したが、石川県が実施した地震直後の目視点検では、堤体のすべりや沈下は確認されていない。
- ・ため池管理者への聞き取り調査では、平成 21 年の時点で目視観察できる程度の堤体天端の沈下が確認

され、沈下が発生した部分は平成 7 年の復旧工事で盛立てた新堤部分に一致していた。

(ii) 決壊後の堤体状況

- ・**Fig.4** および **Fig.5** のように底樋中心から左岸側の部分で上下流方向に V 字状（下幅 2.5 m、上幅 11.5 m、高さ 7.5 m、推定流出土砂  $V = 650 \text{ m}^3$ ）に決壊した。また、**Fig.6** に示すように決壊により侵食された堤体の左岸部にはレキ混じり粘土層が露出し、その部分から湧水が確認された。
- ・**Fig.4** (a) のブルーシートで覆われた右岸部は、縦断方向に多数のクラックが発生していた。これは左岸側の堤体が流失したことにより副次的にすべりが誘発されたことが原因であると考えられる。
- ・流失および損傷した箇所は、平成 7 年の復旧工事で盛立てた新堤部分に一致していた。
- ・開削後に七尾市が実施した底樋管の健全調査結果によると、クラック等の損傷はなく、水密性は維持されていた。



**Fig.4** 平成22年4月13日に決壊したため池堤体の被災状況：  
(a) 貯水側から見た堤体の欠損部；(b) 下流側から見たV字状に欠損した堤体；  
(c) ゆるみ部分を段切り掘削で除去した状況（復旧時に貯水側から下流側を撮影）

Damaged embankment on April 13, 2010:

- (a) View of eroded part from reservoir;
- (b) V shaped eroded part at view from downstream;
- (c) After removal of loosened area by bench cut

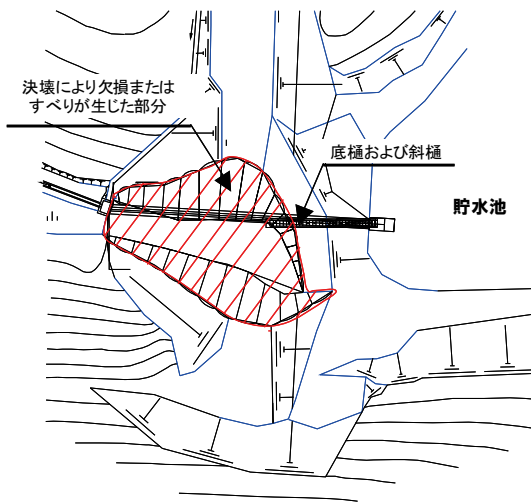


Fig.5 平成22年4月13日に決壊したため池堤体の平面図  
Plane view of collapsed embankment on April 13, 2010



Fig.6 決壊により露出した左岸地山からの湧水：  
(a) 下流法先の状況；  
(b) 左岸地山のレキ混じり粘土層からの湧水  
Seepage water from exposed ground at the left bank:  
(a) View of the downstream slope toe;  
(b) Seepage from clay containing gravel at the left bank

### 3 決壊原因について

降雨時にため池の決壊を引き起こす2つの原因（越流破堤、パイピング・すべり）を仮定して、決壊原因について検討を行った。

#### a 越流破堤の可能性

Fig.7に示すように宮ノ本池の土水路型式の洪水吐は、近代的な設計法（例えば、土地改良事業計画設計基準、1966）が適用される以前に造られたもので、越流幅も狭く十分な排水能力を持っていない。しかし、決壊時に記

録されている最大時間雨量6mm/hrであり、宮ノ本池から約7km離れた地点で観測された時間雨量（七尾市の統計気象情報）に比べて、極めて小さかった。また、決壊2日後に実施した現地調査では、土水路型式の洪水吐上に落ち葉が残されていること、草が押し流された痕跡も見られなかったことから、大量の越水が発生した可能性は極めて低いと考えられる。これらのことから、越流による破堤が引き起こされなかったものと推測される。



Fig.7 土水路型式の洪水吐  
Spillway of earth canal type

#### b パイピング・すべりの可能性

平成21年に実施したため池管理者による見回り点検では、平成7年の復旧工事で盛立てた新堤部分に目視で観察できる程度の沈下が確認されていた。この事実から判断すると、新堤は旧堤体よりも沈下し、その境界には段差が生じたと考えられる。新堤と旧堤体の境界面は、段切りされた鉛直面と水平面で構成されるが、新堤側に沈下が生じると、鉛直面に接した堤体は引き離される方向に変位するため、面圧が低下した可能性がある。一方、段切りされた水平面には、新堤側の堤体自重が旧堤体側の境界面に摩擦力として伝達されるので、底樋周辺に作用する鉛直荷重が低下し、底樋側面の水平土圧が低下した可能性がある。その結果、堤体内部の段切りした鉛直面や底樋側面に浸透水が集中し、ゆるみ領域が形成されやすい状態にあったと考えられる。また、地形的地質的に地山からの湧水や貯水からの浸透水が旧みお筋上の下流法先に集中するため、法先部は飽和状態あるいは局所的に高い浸透圧が作用しやすい状態にあったと考えられる。このような状態で、日積算雨量76mm/dayのまとまった連続降雨の影響により漏水量が一気に増加し、パイピングやすべりが引き起こされた可能性が高いと考えられる。しかし、決壊前の漏水の発生の有無、決壊以前に発生した堤体沈下がどのような要因で引き起こされたのか不明であり、決壊の原因としてパイピング・すべりであると特定するには至らなかった。

## III 強化復旧対策

### 1 強化復旧対策のための事前調査

強化復旧を図るためには、構造的ウィークポイントの



抽出と対策方法の検討が極めて重要になる。ここでは、(独)農研機構農村工学研究所(以下、農工研と呼ぶ)が実施した技術支援の内容について記述する。以下に、強化復旧に向けた調査項目および復旧時の留意点について記述する。

#### (i) 調査項目

- ① 決壊前に確認された堤体沈下の発生原因を調べるため、サウンディング試験等により基礎地盤の支持力の調査を実施する。また、コアゾーンの基礎地盤に透水性が高い地層が存在する場合は、基礎地盤の遮水方法を検討するため、現場透水試験等を実施する。
- ② 底樋を再利用する場合は、開削時に底樋周辺を掘り出し、底樋管の損傷の有無を確認する。特に、堤体天端直下に位置する底樋底面には、盛土荷重によって上下流方向の曲げ応力が集中するため、引張クラックの発生の有無を確認する。
- ③ 底樋管にクラックが発生していた場合は、基礎地盤の沈下が原因と考えられるので、地盤改良を検討するための基礎地盤の調査を実施する。

#### (ii) 復旧時の留意点

- ① 基礎地盤が軟弱な場合は、地盤改良に加えて、基礎地盤の沈下に追従できる柔構造底樋の導入が有効である。
- ② 堤体の開削に当たっては、決壊によってV字状に侵食された堤体の右岸左岸の法面にすべり崩壊やクラックが発生しているので、堤体が損傷した領域は取り除くこと。また、新しく盛立てる新堤と旧堤体の境界面のなじみを確保するため、段切り施工によって法面を開削すること。なお、段切り断面で立ち上がった部分は、面圧が確保されるよう、鉛直ではなく、勾配を緩めた法面を作ること。
- ③ 底樋周りのパイピングを防止するため、コアゾーンに設けられた止水壁に加えて、堤体中央に止水壁を設けることが有効である。これは、堤体中央に止水壁を設けることで底樋に沿って直線的なパイピング経路が形成されなくなるので、浸透流速を遅くし、土粒子を捕捉する効果が発揮されるためである。
- ④ 平成7年のパイピングによる底樋周りの浸透破壊および平成22年の決壊前の新堤部分の沈下が確認されていることから、復旧時には堤体材料の含水比に配慮し、確実な締固め作業を実施すること。また、盛立て時に堤体内部に形成された水平な転圧面がみず道にならないよう、堤軸方向に締固めて上下流方向に連続した転圧面を作らないようにする、あるいはタンピングローラー等で転圧面を凹凸にするなど工夫し、転圧層間なじみを確保すること。同様に、新堤と旧堤体の接続部や底樋

側面に面圧が確保されるよう、堤軸方向に締固める、タンパ等で入念に転圧すること。

- ⑤ 旧みお筋上の下流法先部は、底樋周りの漏水に加えて、貯水や地山からの浸透水が集中するため、構造的にすべり破壊やパイピングがもっとも生じやすい。そのため、法面補強対策とパイピング防止対策を講じることが有効である。

## 2 ジオテキスタイル工法による法先部の補強およびパイピング防止対策

現地調査結果から平成22年の宮ノ本池の復旧工事業に当たっては、浸透水がもっとも集中しやすい旧みお筋上にある底樋出口付近および下流法先部におけるすべり破壊およびパイピング破壊の防止対策が有効であることが分かった。そのため、パイピング対策として下流法先部にフィルター層およびドレーン層を配置することとした。ただし、フィルター材およびドレーン材は粘着力を有しない粒状の地盤材料であるため、ジオテキスタイルでドレーン材を巻き込み、その背面にフィルター材を配置した壁体構造を適用した。これにより、法先部の補強およびフィルター機能の向上を同時に図った。以下に、平成22年の宮ノ本池の復旧事業において取り組まれた強化復旧対策と、農工研で研究開発したジオテキスタイル工法による法先部の補強およびパイピング防止対策について説明する。

#### (i) 復旧対策の内容

平成22年の宮ノ本池の復旧事業において取り組まれた強化復旧対策を以下に示す。

- ① 堤体中央部にコンタクトクレーで巻き立てた止水壁の設置
- ② 下流法先部にドレーン材をジオテキスタイルで巻き込んだ排水性の高い壁体構造の設置
- ③ コンクリート製の洪水吐の設置

①の部分で、底樋周りに発達するパイピング防止を図り、②の部分で、底樋出口付近での法先補強およびパイピング防止対策を図っている。これにより、構造的ウィークポイントとなっている底樋周りおよび下流法先部を強化した。③は、今回の決壊原因が越流によって引き起こされた可能性が低いですが、既存の土水路洪水吐では排水能力が不足していたことから、排水能力の向上を図っている。

#### (ii) 本工法の特徴

ジオテキスタイル工法による法先部の補強およびパイピング防止対策はFig.8に示すように旧みお筋上に当たる下流法先の最大幅9.0m、高さ2.25m、法面勾配V:H = 1.0:0.8、奥行き3.65mの領域に適用した。Fig.9に使用した高密度ポリエチレン製のジオテキスタイルの形状を示す。図の通りジオテキスタイルの目寸法は28mm × 33mmである。本ジオテキスタイルは、紫外線劣化促進試験により屋外で50年以上の耐候性を有している。

**Fig.10** にジオテキスタイル工法によって補強した法先部の断面を示す。単粒碎石をジオテキスタイルで巻き込むことにより排水性の高い壁体構造（奥行き 1.1m, 高さ 45cm, 総段数 5 段）になっている。また、後述するように上載荷重が小さい法面においてもジオテキスタイルを巻き込むことにより、中詰め材がゆるみにくい構造となっている。さらに、巻き込み部に段差を設けることにより、水平方向の滑動抵抗力を高めている。なお、巻き込み部の中詰め材がジオテキスタイルの目合いからこぼれでないよう、粒径が大きな単粒碎石（S-40: 30mm ~ 40mm）を使用した。また、草刈り等によって破損した場合を想定して、堤体表面に露出した部分は 2 重のジオテキスタイルにより強化した。

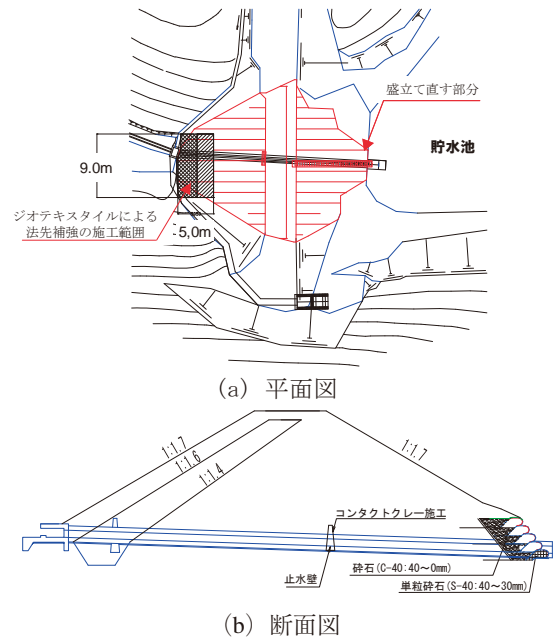
(iii) 本工法の施工手順

本工法の施工手順を以下に記述する。

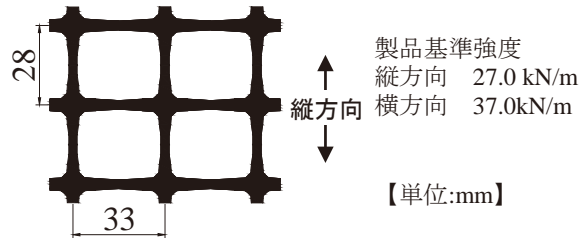
- ① 基盤面に不織布を敷設する (**Fig.11 (a)**)。
- ② 半円状の断面形状を有する壁面型枠を設置する (**Fig.11 (b)**)。
- ③ ジオテキスタイルを敷設する (**Fig.11 (c)**)。堤体表面に露出した部分は 2 重にジオテキスタイルを敷設する。
- ④ 単粒碎石を撒き出す (**Fig.11 (d)**)。
- ⑤ ジオテキスタイルを巻き返す (**Fig.11 (e)**)。
- ⑥ 堤体内部からランダム材、砂、碎石 (C-40) の順に裏詰め材を撒き出し、転圧する (**Fig.11 (f), (g), (h)**)。このとき、ランダム材、砂、碎石 (C-40) の仕上がり高さを巻き込み部よりも低くして、巻き込み部との間に段差を設ける。
- ⑦ 壁面型枠を取り外し、巻き込み部の上面を転圧する (**Fig.11 (i)**)。
- ⑧ ②~⑥を所定高さまで繰り返す (**Fig.11 (j)**)。

次に、本工法の 4 つの構造的な特徴について説明する。第一は、**Fig.12** に示す半円状の壁面型枠を用いることにより、**Fig.13 (a)** のように壁面を丸みの帯びた形状にした点である。あらかじめ丸みを帯びた形状とすることで、巻き込み部の上面を転圧した際に、破線のように壁面のジオテキスタイルが水平方向に張り出し、ジオテキスタイルに適度な引っ張り力を作用させることができる<sup>6)</sup>。その結果、中詰め材に拘束圧が付加され、巻き込み部の剛性・強度を向上させることができる。一方、**Fig.13 (b)** の角形状では、中詰め材が水平方向に押し出されても、最終的に丸みを帯びた形状になるまで、ジオテキスタイルに引っ張り力が発揮しない。そのため、あらかじめ丸みを帯びた形状に比べてジオテキスタイルに引っ張り力が発達しにくい。第二は、巻き込み部とその背面地盤の仕上がり高さの違いを利用して、**Fig.14** のように水平方向の滑動抵抗力を高めるための段差を設けた点である。第三は、**Fig.10** に示したように堤体内部にジオテキスタイルを敷設することにより、壁体とその背面を一体的に接続させ、すべりに対する安全性を向上さ

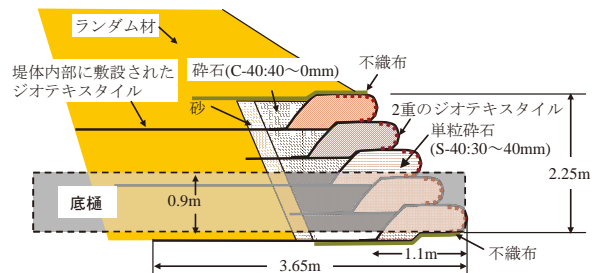
せた点である。最後は、ジオテキスタイルの補強領域内に堤体上流から粒径が細かい順（ランダム材→砂→碎石 (C-40) →単粒碎石 (S-40)）に埋め戻すことにより、フィルター機能を確保した点である。



**Fig.8** ジオテキスタイルによる法先補強対策の適用範囲  
Range in application of countermeasure for downstream toe using geotextile reinforcement technology



**Fig.9** ジオテキスタイルの形状  
Geotextile shape



**Fig.10** ジオテキスタイルによる法先補強対策の拡大図  
Enlarge part of countermeasure work for down stream toe using geotextile reinforcement technology



(a) 不織布を敷設する



(b) 壁面型枠を設置する



(c) ジオテキスタイルを敷設する



(d) 単粒砕石を撒き出す



(e) ジオテキスタイルを巻き返す



(f) ランダム材を撒き出し、転圧する



(g) 砂を撒き出す



(h) 砕石を撒き出し、転圧する



(i) 巻き込み部の上面を転圧する



(j) (b)～(i)を最上段まで繰り返す

**Fig.11** ジオテキスタイルによる巻き込み構造の施工手順  
Construction procedure of geotextile-wrapped wall structure

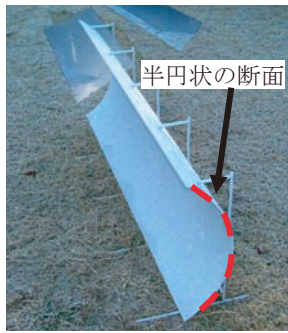
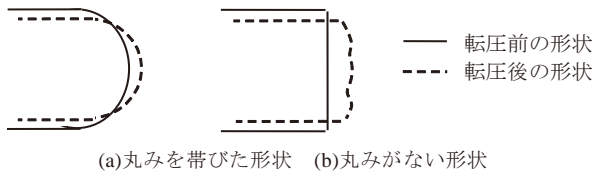


Fig.12 壁面型枠  
Wall form



(a)丸みを帯びた形状 (b)丸みがない形状

Fig.13 転圧前後の壁面の断面形状の違い  
Flange shapes before and after compaction

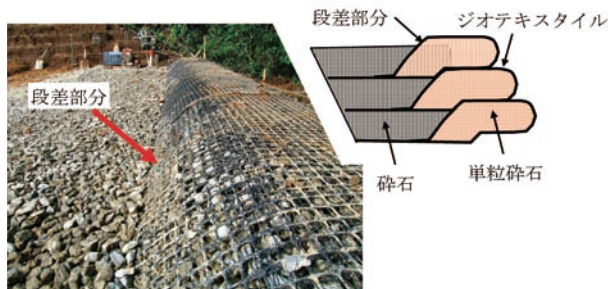


Fig.14 ジオテキスタイル巻き込み部の段差構造  
Step pattern of geotextile-wrapped wall structure

3 本対策工法の適用性

(i) 有効性

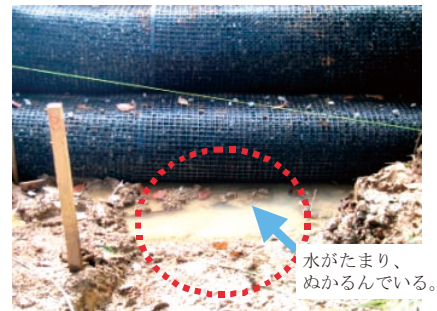
本対策工法は、ジオテキスタイルでドレーン材を巻き込んだ壁体構造と、その背面に粒径の細かい順に地盤材料を埋め戻したフィルター領域およびジオテキスタイルを敷設した補強領域を併せ持つ構造から形成されている。上載荷重が小さい法面においてもジオテキスタイルの引っ張り拘束により地盤材料のせん断強度を高め、変形しながらも強度の維持もしくは増加を図ることができる。このため、基礎地盤の沈下や堤体の変形への追従性が高く、安定したフィルター機能が期待できる。宮ノ本池のように過去に底樋周りのパイピングや堤体沈下が発生した堤体では、堤体のゆるみに伴って浸透水が底樋出口付近や下流法先部に集中する可能性が高いため、堤体のすべり崩壊やパイピング破壊の再発防止には、下流法先部の補強対策が極めて重要になる。このため、法先補強対策とパイピング対策を同時に確保できる本対策

工法の導入が極めて有効であると考えられる。実際に、Fig.15に示すように地山からの湧水等で法先に水が集まりやすい状況でも、ジオテキスタイルを巻き込むことで、ドレーン材が拘束され、排水性と強度・剛性を確保することができる。また、従来のフトン籠工や腰石垣と比べて、堤体変形に対して粘り強い性質が現れるので、堤体の変形に伴う地盤材料の強度低下やゆるみが生じにくい補強構造を採ることができる。

現時点ではため池への適用例は数少ないが、ジオテキスタイル工法は、腰石垣や重力式擁壁に比べて支持地盤が比較的不良な場合や、浸透水が集中しやすい軟弱な地盤条件でも対応可能であり、適用できる壁高(～15m)<sup>7)</sup>も極めて高い。そのため、建設用地や用土不足などの問題で従来技術では復旧が困難なため池への活用が期待できる。なお、本対策工法をため池に適用する場合には、フィルター則に従って堤体内部から下流法先にかけて順次に粒径が大き化したフィルター材を選定するなど、パイピングに対して十分に配慮しておく必要がある。



(a)対策後の下流法先の状況



(b)下流法先の拡大図

Fig.15 ジオテキスタイルによる法先補強対策を実施した後の状況  
Countermeasure for downstream toe against sliding and piping using geotextile reinforcement technology

(ii) 施工性

本対策工法は、丸みを帯びた壁面を形成することにより、巻き込み内部の中詰め材に効果的に拘束圧を付加させることができる。そのため、剛性・強度が高い壁体構造を構築することができる。また、巻き込み部に段差を設けることで、滑動抵抗力を向上させることができる。これらの構造的な特徴は、半円形状の断面を有する壁面型枠および地盤の仕上がり高さを利用して構築するもの

であり、一般的なジオテキスタイル工法と施工方法が異なる部分が存在する。ここでは、宮ノ本池で採用されたジオテキスタイルによる新しい法先補強対策工法の施工性を確認するため、一般的なジオテキスタイル工法との歩掛を比較した。Fig.16に宮ノ本池で実施した歩掛調査結果を示す。図は巻き込み部の各段に要した作業時間から日当たりの施工量に換算した値（ジオテキスタイルの敷設面積）を表している。図中の破線は土地改良事業等請負工事で定められたジオテキスタイル工法の日当たりの施工量 93m<sup>2</sup>/日である。1～2段目は施工方法を習得するまでに時間を要したため、日当たりの施工量はジオテキスタイル工法の標準歩掛で定められた施工量に比べて低いが、段数を重ねる毎に習熟度が増し、ジオテキスタイル工法の標準歩掛で定められた施工量を上回っていた。このことから、上述のように施工方法が一部異なるが、本現場では一般的なジオテキスタイル工法と同程度の施工性を確保できた。ただし、ため池復旧工事では、搬入経路や資材置き場の位置・規模によって施工性が大きく左右されるので、本対策工法の適用に当たっては、現場条件に十分に留意して施工計画を検討する必要がある。

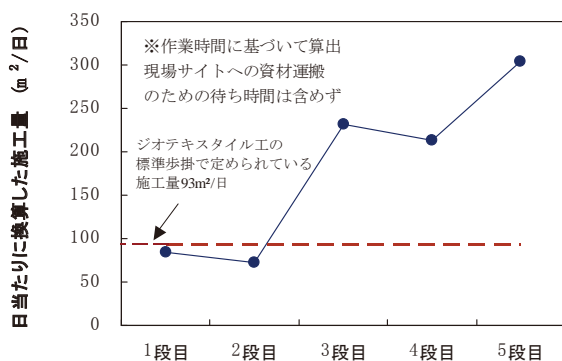


Fig.16 宮ノ本池に採用されたジオテキスタイルによる法先対策工事における歩掛

Result of survey for geosynthetic reinforcement work for downstream toe in "Miyano-moto pond"

#### IV 結 言

本報では、決壊した宮ノ本池の現地調査等に基づいて堤体の構造的ウィークポイントを明らかにするとともに、強化復旧対策として採用されたジオテキスタイル工法による法先部の補強およびパイピング防止対策の有効

性について検討を行った。以下に得られた知見をまとめる。

宮ノ本池では、地形地質的に旧みお筋上の底樋出口付近および法先部に地山からの湧水や貯水からの浸透水が集中しやすい状況にあるため、強化復旧の当たっては法先補強対策とパイピング防止対策を講じることが重要であることが分かった。そのため、堤体の変形への追従性が高く、法先補強対策とパイピング対策を同時に実施できるジオテキスタイル工法による法先補強対策を実施した。本対策工法は、従来のフトン籠工に比べてコスト高であったが、ジオテキスタイル引っ張り力によって壁体およびその背面の地盤材料に拘束圧を付加できるので、堤体の変形しても地盤材料がゆるみにくい。そのため、法先強度およびフィルター機能を有効に発揮させる特徴を有している。宮ノ本池では過去に底樋周りのパイピング破壊や堤体沈下が発生していることから、本対策工法の導入が有効であったと考えられる。今後は、本対策工法の効果を設計に導入するため、詳細な検討を実施するとともに、急勾配な法面を構築できる特長を活かして、建設用地や土不足などの問題で従来技術では対応が困難であったため池改修事業にも適用を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省 (2000) : ため池緊急整備計画の策定とその結果について、構造改善局, 平成 12 年 3 月 29 日プレスリリース
- 2) 土地改良事業設計指針 (2000) : ため池整備, 農林水産省構造改善局建設部設計課監修, 社団法人農業土木学会発行
- 3) 石川県七尾市 (1996) : 平成 7 年石川県宮ノ本池災害復旧工事記録
- 4) 土地改良事業計画設計基準 (1966) : 第 3 部設計第 1 編フィルダム, 昭和 41 年 6 月農地局
- 5) 七尾市の統計気象情報 : 気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/>
- 6) 松島健一 (2009) : ジオシンセティックスを用いた土質材料の補強メカニズムの解明と水利構造物への適用性に関する研究, 農工研報 49, 49-199.
- 7) 補強土入門 (1999) : 社団法人地盤工学会, 入門シリーズ 24, 平成 11 年 2 月
- 8) 土地改良事業等請負工事標準歩掛 : 補強土壁 (ジオテキスタイル工), 211-223.

# An Example of Enhanced Rehabilitation Work for “Miyano-Moto Pond” Using Geotextile Reinforcement Technology

– Countermeasure for downstream toe against sliding and piping –

MATSUSHIMA Kenichi, MOHRI Yoshiyuki, HORI Toshikazu, ARIYOSHI Mitsuru  
and UENO Kazuhiro

## Summary

Most of small earth fill dams had been built long before adopting the modern design. Every year, many small earth dams are seriously damaged or even totally collapsed by heavy rainfalls and earth quakes. Moreover, there are approximately 210,000 reservoirs with earth dams across Japan. It is reported that, among them, approximately 20,000 earth dams have deteriorated and need urgent (MAFF 2000) . In order to decrease disaster risks by heavy rainfall and earthquakes, it is necessary to introduce not only traditional method, which only compact embankment material, but also a new type of reinforcement technology. In this report, we described the structural weak points for “Miyano-moto pond” in Ishikawa Pref., which totally failed by rainfall on April in 2010, and adopted the proposed countermeasure to reinforce the downstream toe using geotextile technology. This new type of geotextile reinforcement technology is expected to have reinforcing effect against sliding and piping.

**Keywords** : enhanced rehabilitation, small earth dam, geotextile, reinforcement technology, piping

〔農工研技報 211〕  
215～221, 2011〕

## 平成21年（2009年）に発生した山形県鶴岡市七五三掛（しめかけ） 地区における地すべり災害対策への農工研の参画と技術開発

木下勝義\*・川本 治\*\*・正田大輔・石田聡\*\*\*・中里裕臣\*\*\*\*・田頭秀和\*\*\*\*\*

### 目 次

I 緒 言	215	2 農村総合研究部広域防災研究チーム (地すべり機構の解明及び技術支援関係)	218
II 参画の経緯及び参画内容	215	3 施設資源部構造研究室及び基礎地盤研究室 (地すべり機構の解明及び技術開発関係)	218
1 農林水産省関係(支援要請)	215	IV 結 言	219
2 山形県関係(支援要請)	216	参考文献	220
3 農工研関係(独自対応)	216	Summary	221
III 具体的な技術支援内容	217		
1 施設資源部基礎地盤研究室(派遣要請関係)	217		

### I 緒 言

平成21年（2009年）2月25日、住民が亀裂を発見し、鶴岡市朝日庁舎に通報があった山形県鶴岡市七五三掛（しめかけ）地区における地すべりは、4月9日、3戸に自主避難を要請するほど動きが激しくなった。

平成21年4月9日、農林水産省東北農政局より支援要請を受けた独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所（以下「農工研」という。）は、翌4月10日、職員一名を現地に派遣し、状況把握を行った。以降、4月22日までに計5箇所に観測機材を設置し、観測を開始した。

その後、観測機材より収集したデータの分析及び現地の地形・地質状況、ボーリング掘削時の孔内水位変化状況等により、地すべり活動に対して深さ25mのすべり面直下の被圧地下水の影響が大きいと判断し、当該被圧地下水を含めた地すべり土塊内の地下水を排除する対策工法（＝ディープウェルによる地下水排除）が提案され、当該工法の実施に対応し動きが沈静化した。

一方、平成20年度に実施された調査により、深さ50m以深にすべり面があることが確認されている。農工

研では、農林水産省防災課災害対策室の要請を受け、農林水産省東北農政局の支援を受けながら、平成22年1月、ダムや基礎地盤の埋設計器として開発されたワイヤレス間隙水圧計をベースに開発した観測機材を当該すべり面の挙動観測用に設置し、データの収集を開始するとともに、データの解析及び当該観測機材の性能試験を継続している。また、これとは別に、農林水産省が設置した委員会における委員の指摘に対し、農工研独自の活動として、すべり面の試料を採取し、せん断試験による残留強度等と逆算法によるすべり面強度の比較等を行っている。

本技術資料では、七五三掛地区の地すべり災害に関する農工研への支援要請がなされてから今日までの農工研の参画の経緯及び参画内容、並びに具体的な技術支援内容等についてとりまとめるものである。

なお、山形県鶴岡市七五三掛地区における農工研職員の現地調査その他において、農林水産省農村振興局防災課、東北農政局、山形県、山形県鶴岡市ほか関係機関にはご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

### II 参画の経緯及び参画内容

#### 1 農林水産省関係（支援要請）

平成21年4月9日、農林水産省東北農政局整備部次長より農工研施設資源部基礎地盤研究室長あてに「山形県鶴岡市七五三掛（しめかけ）地区における地すべり活動が活発になっているので、現地に来て対策等の指導をしてほしい」との電話要請があった。農工研は、災害対策基本法に基づく指定公共機関として、派遣要請があっ

\* 企画管理部

\*\* 農村総合研究部広域防災研究チーム

\*\*\* 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム

\*\*\*\* 施設資源部基礎地盤研究室

\*\*\*\*\* 施設資源部構造研究室

平成23年1月24日受理

キーワード：地すべり、派遣要請、指定公共機関、技術支援、ワイヤレスセンサ

た場合、特段の支障がない限りこれに応える義務を負い、その対応窓口は企画管理部防災研究調整役とされていることから、同室長が防災研究調整役に状況を説明した。防災研究調整役は農工研に派遣要請があったことを農工研所長に伝えた後、企画管理部長ほか関係者と協議し、基礎地盤研究室長を現地に派遣することが決定された。翌4月10日、現地において同室長による状況把握が行われ、その後観測機材（古野電気 MG-2110。以下「GPS」と記す。）による地すべり移動量観測が4月14日より開始された。

農林水産省東北農政局は、七五三掛地区地すべり指定区域内で平成21年度に実施する調査及び対策事業等の技術検討を行い、同区域の緊急及び恒久的な地すべり対策等に資するため、「七五三掛地区地すべり技術検討委員会」を、また、同委員会の円滑な審議に資するための「技術検討会」を、それぞれ設置した。同委員会については、平成21年7月30日、平成21年11月11日の2回、それぞれ現地で開催され、また同技術検討会については、平成21年7月29日、平成21年10月14日、平成22年3月9日の計3回、それぞれ現地近く又は農林水産省内にて開催された。

これらの技術検討委員会又は技術検討会の開催に前後し、農工研関係者は、平成21年6月4日、平成21年6月11日、平成21年6月19日及び平成21年10月8日に農林水産省防災課との打合せを、平成21年7月3日に農林水産省災害対策室ほかとの合同現地調査及び打合せを、それぞれ行った。

平成22年度に入り、平成22年12月7日、山形県七五三掛地すべり防止区域において農林水産省が施行する地すべり防止工事のための調査・計画・設計・施工及び維持管理等に関して、専門的立場から総合的かつ具体的に検討することを目的とする「庄内あさひ地区地すべり対策技術検討会」が開催され、農工研からは、農村総合研究部広域防災研究チーム長及び施設資源部基礎地盤研究室長が同検討会の委員として参加した。

また、東北農政局庄内あさひ農地保全事業所より、広域防災研究チーム長及び基礎地盤研究室長に対し、技術検討会の委員としての参画とは別に、個別案件毎に指導・助言が求められ、「七五三掛地区は農工研が災害派遣要請を受け対応するという段階は終了した」との観点から、農工研で平成22年度より開始した「特別対策」により、これを行っている。

## 2 山形県関係（支援要請）

基礎地盤研究室長は、山形県主催の「七五三掛地区地すべり対策技術検討会」の委員を委嘱され、5月18日に行われた第1回会合及び現地調査に参加した。

山形県（知事）の依頼を受けた独立行政法人土木研究所は、平成21年5月29日、現地調査を行った。この調査には、農林水産省防災課災害対策室長ほか参加した

が、同災害対策室の要請を受け、農工研基礎地盤研究室長も参加した。

山形県主催の「七五三掛地区地すべり対策調整会議・技術調整部会合同会議」（以下「合同会議」という。）が平成21年6月12日に行われ、農工研所長、基礎地盤研究室長及び防災研究調整役が出席した。なお、この3名は、合同会議開催前に現地調査を行うとともに、現地調査終了後合同会議前に山形県知事と農工研所長が懇談している。また、この合同会議後、農工研所長が単独記者会見を行った。

この合同会議は、その後第2回が平成21年8月26日に、第3回が平成22年2月16日に、第4回が平成22年9月1日に、それぞれ開催された。第4回会議において、七五三掛地区地すべり対策調整会議・技術調整部会合同会議を現地に密着した新たな組織体制へ移行することとされ、これまでの災害対策から復旧に向けた取組を進めていくこととされた。

一方、基礎地盤研究室長は、山形県知事より「七五三掛地区地すべり対策調整会議の中の技術調整部会」の技術アドバイザーを委嘱された（平成21年5月29日付け。委嘱期間：平成21年7月末日まで）。同室長が技術アドバイザーとして活動したのは「平成21年6月13日～14日」、「平成21年6月20日～21日」、「平成21年6月27日～28日」、「平成21年7月4日～5日」、「平成21年7月11日～12日」、「平成21年7月25日～26日」の計6回。このうち、平成21年7月11日～12日において、農工研より「主変動域内のディープウェル工による排水により、6月25日以降、顕著な移動速度低下が認められ、7/8～7/10の降雨（総雨量84mm）による大きな加速は認められない」とコメントした。この時のコメントが農工研の沈静化表明と言え、この沈静化について、農工研HPに掲載した。以降、地すべりの沈静化傾向は今日まで大きな変化はない。

また、七五三掛地すべり対策活動に貢献したとして、平成22年9月16日、山形県副知事より山形県知事名の感謝状が基礎地盤研究室長に贈呈された。

## 3 農工研関係（独自対応）

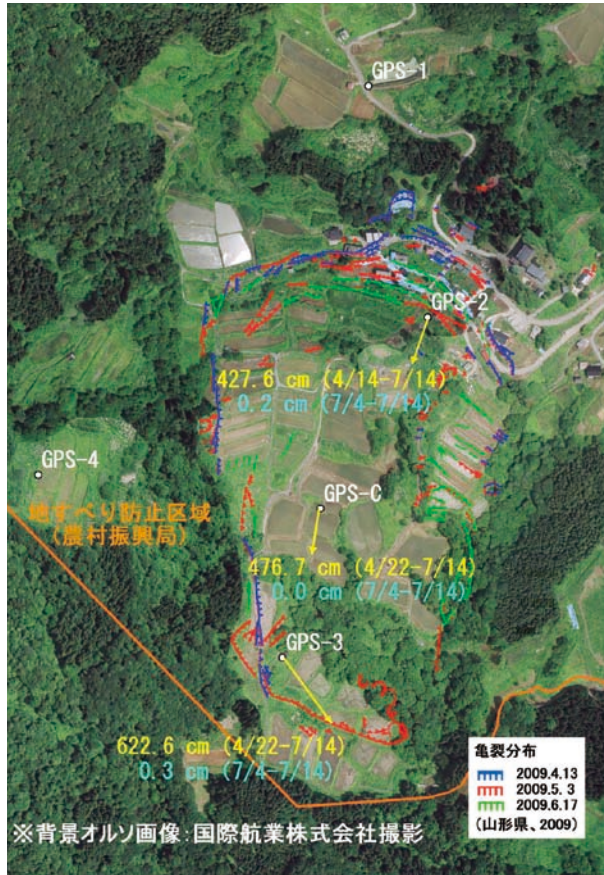
平成21年6月12日の記者会見において、農工研所長が「農工研の組織を挙げて支援する」と表明し、平成21年6月15日、農工研内に「七五三掛地区地すべり対策チーム」を設置した。その後、地すべりの動きが沈静化したこと等により、平成21年8月17日、「七五三掛地区地すべり対策チーム」を再編した。

平成21年7月9日、9月1日～2日、11月10日の計3回、同対策チームのメンバー（一部）ほかによる現地調査（7月9日は現地調査及び土質試験用の資料採取、9月1日～2日は地下水採取、11月10日は現地調査）をそれぞれ実施した。



### Ⅲ 具体的な技術支援内容

組織別、支援の開始時期の順に記述すると以下の通りである。なお、Ⅰ又はⅡで述べている内容と重複するところがある。

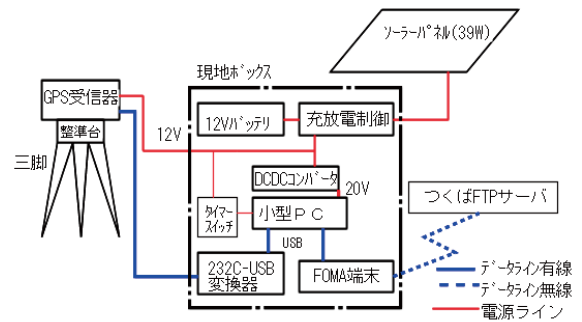


**Fig.1** 七五三掛地すべり防止区域における GPS 設置位置および水平累積移動量  
Location and horizontal movement of GPSs at SHIMEKAKE landslide area

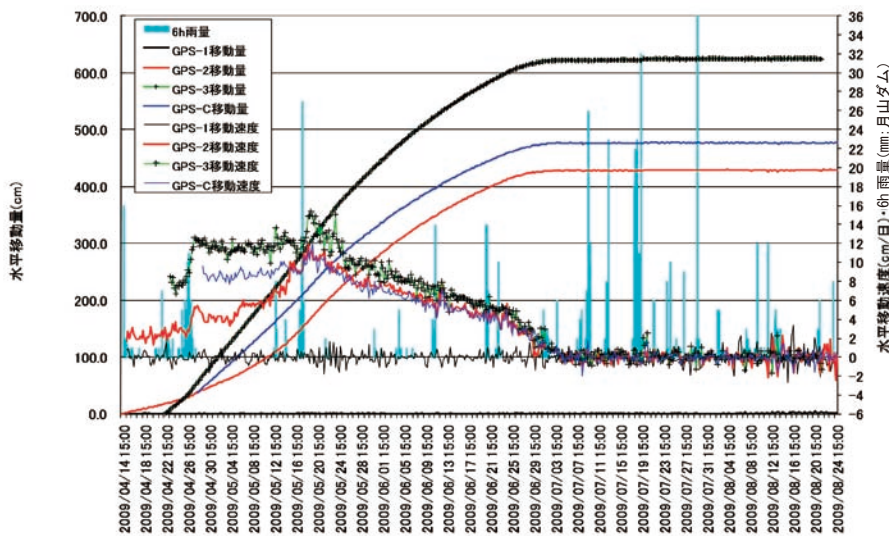
#### 1 施設資源部基礎地盤研究室 (派遣要請関係)

農林水産省東北農政局整備部より派遣要請のあった平成21年4月9日の翌日、現地において農工研施設資源部基礎地盤研究室長による状況把握が行われた。その後、4月14日に2箇所 (GPS-1 及び GPS-2) の GPS を設置して観測を開始し、4月22日に3箇所 (GPS-3, GPS-4 及び GPS-C) の GPS を追加設置した (計5箇所。Fig.1)。なお、GPS-2 および GPS-C については、観測期間中、設置位置を、当初設置した位置の直近に移設した。また、この GPS 設置において、小型 PC 等を利用した経済的な自動観測システムを構築した (Fig.2)。

当初、観測システムは GPS 受信機 (MG-2110) の内蔵メモリと外部電池によるオフライン観測とし、その後データ収録・通信装置を追加し、太陽電池を電源とするオンライン観測とした。観測当初地すべりが加速傾向にあり機材亡失のリスクがあったことから、オンライン観測制御に低価格ノート PC を用いた。本システムでは GPS 受信機以外の機材費を低減できるが、通信が不安



**Fig.2** 低価格小型 PC を用いる GPS 観測システム  
GPS survey system with low price and small PC



**Fig.3** GPS 累積水平累積移動量及び水平移動速度の変化  
History of the amount and speed of horizontal movement at GPS at observdion points

定になる場合があり、あくまで応急的な観測システムと位置づけられる。GPSによる観測結果はFig.3のとおりである(各GPSの動きはFig.1参照)。Fig.3に示すとおり、各GPSの移動速度は6月25日以降減速傾向が大きくなり、7月5日以降は誤差幅以内の変動となり、地すべりは沈静化状態にあることを示す。平成21年7月に地すべりの動きが沈静化したことについて、平成21年7月15日、農工研のHPにこのことを掲載した。平成21年7月以降は地すべりの動きが沈静化したため、平成21年10月23日にGPS-2、GPS-4及びGPS-Cを、同年12月10日にGPS-1及びGPS-3を、それぞれ撤収した。

## 2 農村総合研究部広域防災研究チーム(地すべり機構の解明及び技術支援関係)

平成21年11月11日に行われた七五三掛地区地すべり技術検討委員会において、委員より「資料を採取し、室内試験による安定解析を行うべきではないか」との指摘があったが、農工研独自の活動として、平成22年2月18日、農村総合研究部広域防災研究チーム長が試料採取を行い、当該試料のリング剪断試験等を行っている。

平成22年4月1日に着手された直轄地すべり対策事業では、主要工事の1つとして排水トンネル工が計画されている。排水トンネル工の施工に当たり、排水トンネル設置周辺の土質の性状の把握及びすべり面の位置の把握が必要になる。広域防災研究チーム長は、現地にて採取したすべり面部の試料に対し、土質の性状を分析する

ため土質試験を実施し、その解析結果を、東北農政局庄内あさひ農地保全事業所に提供するとともに、関連する種々の技術的な相談に応じている。

## 3 施設資源部構造研究室及び基礎地盤研究室(地すべり機構の解明及び技術開発関係)

ディープウェル設置等の対策工を実施した効果により、平成21年7月以降のBブロックの動きは沈静化しているが、ボーリング孔(番号:BV20-1、Fig.4参照)で平成20年11月28日から平成21年3月20日に行われた調査において、深度51m及び85mにすべり面があることが確認されており、幅1.5km、長さ1.5kmに及ぶ巨大地すべりブロックが融雪期を中心に年間数cmの移動を示していることが把握されている。しかしながら、当該深層すべり面の挙動については、浅層すべり面の動きが激しかったため、既存の観測設備(孔内傾斜計)が観測孔深度51mで屈曲されており、地すべりの安定度に大きく影響するそれぞれのすべり面に作用する間隙水圧変化について対策事業計画に有用なデータが得られない状態となっていた。地上とセンサー間に信号ケーブルが必要な従来の間隙水圧観測手法では浅層地すべりの影響を受けずにより深層のデータを取得することは不可能である。農工研が設置したGPSの観測結果より、緊急対策の手法を指摘し、その実施により地すべりの沈静化に効果はあったものの、地表に置かれたGPSのデータは、各層の地すべりの動きの総和であり、深度51m及

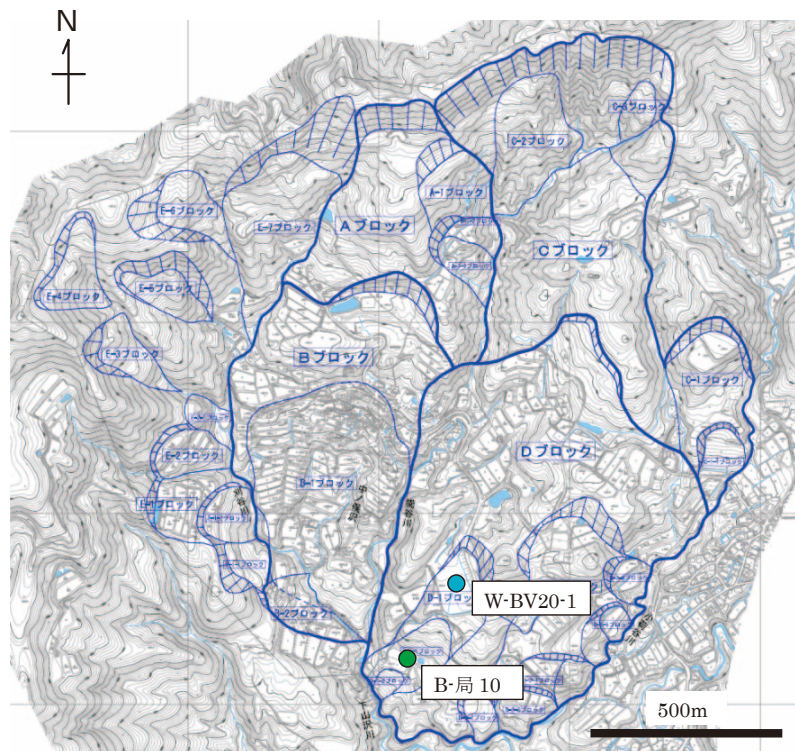


Fig.4 地中変位計等観測機材設置位置図\*

Survey points at SHIMEKAKE landslide area

\*ワイヤレス地中変位計: B・局 10 孔, ワイヤレス間隙水圧計: W-BV20-1 孔

び85mのすべり面の個々の動きがどう影響しているのかはわからない。このような深層すべりはより浅層の地すべりの安定度を損なっている可能性があり、この深層のすべり面対策を行うため、深度51m及び85mのすべり面のデータを取得する必要がある。

この課題に対応するため、これまでフィルダム等を対象に開発されてきたワイヤレスセンサ技術(官民連携新技術研究開発事業「地中無線通信型ダム用埋設計器の研究開発」(平成13~15年度。共同開発者:農工研施設資源部構造研究室,坂田電気(株),東京電力(株))を応用し、変位量と変位方向の両方を観測可能で、浅層の地すべり活動による信号線破断の影響を受けないワイヤレス地中変位計を開発し、七五三掛地区に設置するとともに、複数のすべり面を観測対象とするワイヤレス間隙水圧計を設置した。ボーリング孔掘削については、東北農政局に実施していただき、観測機器の開発及び設置を農工研が行った。平成22年2月より観測を開始した。

今回開発したワイヤレス地中変位計は、変位量を検知する埋設型のすべり面変位計(伸縮計)とすべり面位置および変位方向を検知するための歪み計を組み合わせ、これにデータ伝送用のワイヤレス地中通信システムを加えたものである(Fig.5)。設置場所は、動作確認を主眼として設置の確実性が高く、すべり面深度の比較的浅い地点としてB-局10孔とした(Fig.4)。ワイヤレス間隙水圧計設置孔は、2層のすべり面が確認されたBV20-1孔の5m横とし、それぞれのすべり面の上下にセンサーを配置し、最上部の有線センサー以外をワイヤレス間隙水圧計とした(Fig.4, Fig.6)。各センサーの上下はベントナイトペレットにより遮水し、センサー間はセメント

ベントナイトで充填した。また、深部センサー受信用に深度21.2mに受信アンテナを設置した(注)。

ワイヤレスセンサのデータ回収は、月に1回程度ポータブル受信機により地表からオフラインで行っている。回収したデータ及び分析結果については、東北農政局庄内さひ農地保全事業所に提供するとともに、関連する種々の技術的な相談に応じている。

注:共同研究「老朽化フィルダムの挙動監視システム開発に関する研究」(平成20~22年度。共同研究実施者:農工研施設資源部構造研究室,坂田電気(株),川崎地質(株),計測ネットサービス(株),(株)トブコン)と連携して実施された。

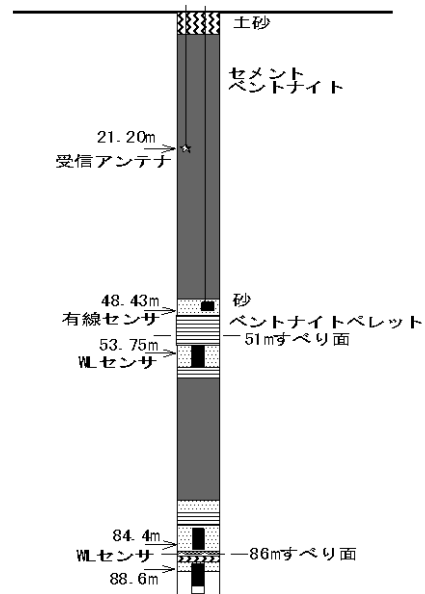


Fig.6 ワイヤレス間隙水圧計構造図  
Section of a wireless underground piezo meter

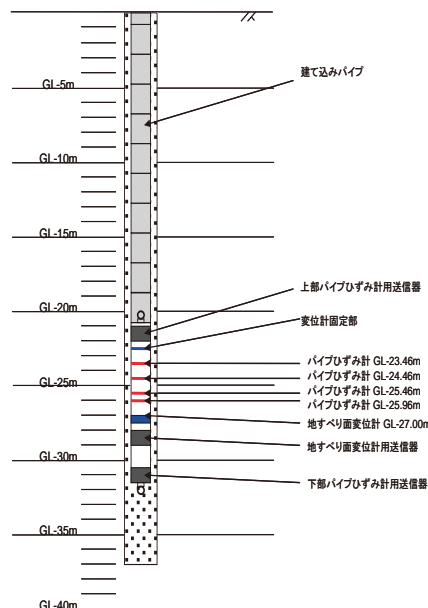


Fig.5 ワイヤレス地中変位計構造図  
Section of wireless underground strain meter

#### IV 結 言

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構(以下「農研機構」という)は、災害対策基本法(昭和36年法律第223号)に基づく指定公共機関として、災害応急対策等のための要請に対し、著しい支障のない限り職員を派遣する義務を負う(同法第31条)。また、農研機構防災業務計画において、農地・農業用施設に係る災害対応は農工研が中心となっていくことを定めている。

農工研では、これまでに多くの職員を派遣し、災害発生後の支援要請に応じているが、本報告における平成21年4月9日及びそれ以降(一定期間内)の職員派遣もこれに該当する。今回のケースでは、派遣職員の「まずはデータを取得し、地すべりの原因を特定する必要がある」との判断によりいち早くGPSを設置し、それに

より得られたデータを解析し、地すべりを沈静化させるための適切な対策工法の提案に貢献した。

また、大きな地すべりの原因と見られる深さ25mのすべり面より深い位置のすべり面の観測は、従来の有線式観測機器では深さ25mのすべり面で有線部分が切断され継続した観測が行えないため、施設資源部構造研究室が共同開発したダム用のワイヤレスマルチセンサをベースにボーリング孔用の観測計器を開発し、それを現地に設置して観測を続けている。観測を続けることにより計器の信頼性を確認しているが、この観測により得られたデータ及びそれに基づく解析結果を提供することを通じ、農工研の技術支援が継続的に行われることが期待される。

今回のケースでは、災害派遣要請に基づき派遣された職員が適切にその要請に応えるとともに、既存の技術をベースとした新たな技術の開発が、災害現場における技術支援と密接に関連していることを示している。

農林水産省は、山形県からの支援要請（平成21年6月5日）を受け、6月8日に東北農政局整備部内に対策本部を、鶴岡市に現地対策室を設置した。6月15日以降、直轄地すべり災害関連緊急事業等による地すべり対策工事に着手した。平成21年度に農林水産省東北農政局が行った地すべり防止のための緊急対策工事は、ディープウェル工、水抜きボーリング工及び集水井工である。平成22年4月1日に東北農政局庄内あさひ農地保全事業

所を設置し、直轄地すべり対策事業「庄内あさひ地区」に着工した。

日本には多くの地すべり危険地があり、類似の災害が発生する可能性がある。七五三掛地区の地すべりが、農林水産省所管の国営事業により行われる対策工事により安定化することを望むとともに、今回開発した技術の適用性が確かめられ、多くの地すべり箇所でも有効に活用されることを期待したい。

## 参考文献

- 1) 中里 裕臣・木下 勝義・奥山 武彦・荒川 隆嗣、渡邊 史郎・三浦 智明・高見 智之(2009)：山形県鶴岡市七五三掛地区地すべり災害における応急対応，日本応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集，203-204
- 2) 中里 裕臣・田頭 秀和・木下 勝義・樋口 佳意、永江 祐，中山 健二(2010)：複数すべり面を持つ地すべりの長期観測のためのワイヤレスセンサの適用，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集，287-288
- 3) 川本 治・正田 大輔・寺田 剛(2010)：山形県七五三掛地区地すべりに関するすべり面強度，農業農村工学会東北支部第53回研究発表会講演要旨集，172-173

# **The Participation and Technological Development of NIRE in Disaster Controls for Landslide at Shimekake Area Occurred in 2009**

KINOSHITA Katsuyoshi, KAWAMOTO Osamu, SHODA Daikue, ISHIDA Satoshi,  
NAKAZATO Hiroomi and TAGASHIRA Hidekazu

## **Summary**

National Institute for Rural Engineering (NIRE) of National Agriculture and Food Research Organization (NARO) has a duty to send staffs to a disaster site when Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery (MAFF) or Prefectures and so on request it except the special case not to answer the request. NIRE has sent a lot of staffs to disaster sites by the request and contributed to solve problems at the site.

NIRE has been developing a lot of new technologies through solving the problems at disaster site based on the technologies developed by NIRE. This report shows the activity and the technical support of NIRE staff at a landslide disaster occurred in Shimekake, Tsuruoka City, Yamagata Prefecture, and this report also shows that there is a close relationship between technical support and developing new technology by the activity at disaster site.

**Keywords** : disaster site, technical support, landslide, wireless sensor

