

地すべり対策集水ボーリング末端における閉塞の要因と対策

奥山武彦*・黒田清一郎**

目次

I 緒言	1	1 排除地下水の水量・水質	3
II 調査方法	1	2 延長パイプによる閉塞抑制効果	3
1 調査地区	1	IV 結言	5
2 調査方法	2	参考文献	5
III 調査結果と考察	3	Summary	6

I 緒言

地すべりは、「土地の一部が地下水等に起因してすべる現象又はこれに伴って移動する現象」と定義されている（地すべり等防止法第二条）ように、間隙水圧やブロックの荷重として地下水が大きく影響している。実際、新潟県下での地すべりの発生件数は融雪期である4月と梅雨期である7月に多い（古谷，1996）。地すべり対策は抑制工と抑止工に大別されるが、地すべりブロックへの地下水流入を減少させ、すべり面に作用する間隙水圧を低減させる目的で抑制工である排水ボーリング、集水井＋集水ボーリングなどの地下水排除工を施工することが多い。2004年の新潟県中越地震の後の調査では抑制工が施工された地すべりブロックが活動した事例が少なかったことが報告されている（池田ら，2006）。

還元状態で地中にあった地下水が地下水排除工によって大気に触れると、溶存物質が化学変化を起こすことがある。排水ボーリング末端にヘドロ状物質が生成して閉塞を生じ、排水を阻害するまでになることが珍しくない。この問題については多くの地すべり地を対象とした実態調査と分析が行われており（丸山ら，2003；小島ら，2004），閉塞物質は鉄細菌が関与して生成するものが主であるが、藻類などから構成されている場合もあることが報告されている（岸ら，2006）。地すべり防止施設は人里離れた山中に設置されることが多く、完成後に点検されることが少ないのが実情である。地すべり抑制機能を維持するためには閉塞等による排水機能の低下を防ぐことが必要である。

地形改変が行われた斜面における地すべり地に設置された集水井において排除地下水の水質と閉塞物質生成量の経時的調査を実施し、地すべりブロックの水利地質条件とあわせて閉塞要因の検討を行うとともに、簡易な閉塞対策の試みを行った。現地調査にあたって宮城県北部地方振興事務所栗原地域事務所に便宜を図っていただいたことに謝意を表す。

II 調査方法

1 調査地区

調査対象とした地すべり斜面は宮城県北部の栗原市内に位置し、南側と北側が川の侵食を受けたために東西に延びる標高約70mの尾根状丘陵地の南斜面にある。本地域の地質は下位から砂岩、シルト岩からなる新第三紀鮮新世小野田層、礫岩主体の第四紀更新世高清水層、軽石凝灰岩主体で細粒凝灰岩を伴う池月凝灰岩層とその上位の段丘堆積物層からなる。池月凝灰岩は鬼首火山を噴出源とし、年代は (0.25 ± 0.08) 百万年とされている（宮城県築館産業振興事務所・株式会社テクノ長谷，2003）。南斜面の平均傾斜は約10度であるが、1970年頃にひな壇状に造成された。盛土は凝灰岩質砂質土が用いられ、最大盛土厚さは10m余りと推定される。

2003年5月26日に宮城県沖深さ72kmを震源として発生したM7.1の地震の際に、標高50m付近を頂部として長さ約70m、幅約40m、移動土塊の厚さ3～5mの崩壊が発生した。原地形を重ねて見ると、Fig.1のように旧谷部に盛土された層の中で崩壊が発生したことがわかる。筆者らは同年11月に滑落崖の上方に間隙水圧計、雨量計、地表加速度計を設置して連続観測を開始するとともに、浸入能試験や自然電位探査などの調査を行ってきた（奥山ら，2006）。同ブロックでは2004年3月に地表排水路、集水井1基による対策工が完成した。集水井は深さ約7mであり、滑落後の地表から1.6mと5.5

* 企画管理部防災研究調整役

** 施設資源部基礎地盤研究室

平成20年12月10日受理

キーワード：地すべり対策，地下水排除，水質，水酸化鉄，

Eh - pH ダイアグラム

mにそれぞれ13本、17本の集水ボーリングが設けられている。集水ボーリングは長さ35～50mで、塩化ビニル管(VP40)が設置されている。集水管は4列0.1m間隔に直径5mmの吸水口を穿孔されており、管表面の開孔率は約0.5%である。対策工事によってすべり面に相当する深度6.1mの間隙水圧は1m以上低下したことが観測および実効雨量法による解析で確認されている(奥山・黒田, 2007)。2003年災害後に実施された調査ボーリング、スウェーデン式サウンディングの結果(宮城県・株式会社テクノ長谷, 2003)をもとに作成した、下段集水ボーリング深度における地層区分をFig.2に示す。西端の集水管をNo.1として番号をつけると、No.2～4はほとんど切盛土前の原表土と谷埋め盛土層の中にあり、北～東側のNo.9～17は基盤である凝灰岩層の中に位置している。

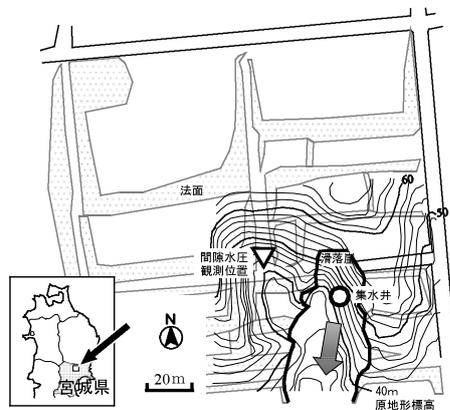


Fig.1 調査ブロック平面図
Location map of study site

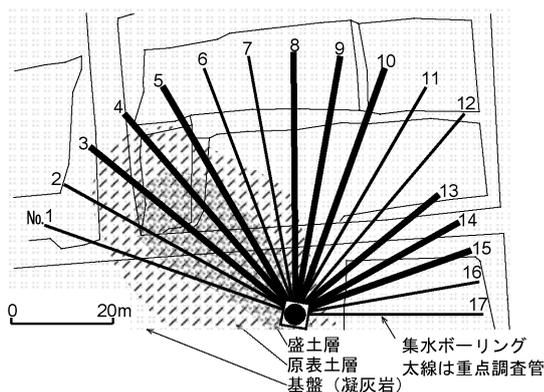


Fig.2 下段集水ボーリング深度の地層区分
Geological feature at the depth of lower drainage pipes

2 調査方法

a 集水ボーリング排水の水量・水質

常時排水がある下段集水ボーリングを対象として、2005年7月、2007年7月、9月、10月、2008年1月、10月に排水量と水質の調査を行った。排水量はメスシリンダーを使って測定し、水質は現場での携帯型測定器

Table 1 分析項目
Water quality analysis

場所	項目	分析方法
排除水	水温 電導度 (EC) pH 酸化還元電位 (Eh) 溶存酸素濃度 (DO)	携帯型電導度計 〃 携帯型 pH 計 〃 ポラログラフ式 溶存酸素計
	HCO ₃ ⁻ K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , 全鉄, Fe ²⁺ , その他 Na ⁺	pH4.8 滴定 吸光度計 イオンメータ
集水管内 空気	空気圧 酸素分圧	半導体ゲージ式 圧力センサ ポラログラフ式 溶存酸素計

による分析と実験室での吸光度法等による分析を行った。分析項目をTable 1に示す。

b 集水管末端閉塞状況と管内空気圧等の測定

集水管出口の付着による閉塞状況は写真撮影して岸ら(2006)の方法によってA(閉塞断面積率70%以上), B(50～70%), C(30～50%), D(10～30%), E(10%未満), F(閉塞なし)に分類した。集水管出口の付着物量は、付着物をヘラでかきとってポリ袋に採取し、実験室で炉乾後に秤量したが、集水管が集水井のライナープレートから突出する部分に取り付けられている保護用の太い塩化ビニル管と集水管との間の付着物は除外した。

17本の集水管のうち盛土層を貫通しているNo.3, 4, 5, 盛土層に覆れた基盤を貫通しているNo.8, 9, 10, 切土域にあるNo.13, 14, 15を重点調査管として、期間毎の付着物発生量の測定を行った。2007年9月に水中ポンプとブラシ付きホースを用いて集水管末端から10mまでの内部に水を噴射して簡易洗浄を行ってから試験を開始し、集水管出口の付着物採取を40日後(2007年10月)、それから99日後(2008年1月)、さらに282日後(2008年10月)に行った。

c 延長パイプによる閉塞抑制試験

通常、集水管は満流で流れることはないので、排除された地下水は管内の空気に触れながら流下する。水酸化鉄の生成が集水管末端に集中していることは、集水管末端で大気に触れて溶存鉄が酸化されることによると考え、Fig.3のように集水管に延長パイプを取り付けて排除水を大気に触れないまま集水井内に溜まっている水の中に直接放流する構造の適用を3本ずつの重点調査管群の中央の集水管No.4, 9, 14で試みた。延長パイプは2007年9月に管内洗浄を行った後に取り付けた。集水管末端に取り付ける硬質塩化ビニル製チーズ上端のふたを外して空気圧センサと溶存酸素濃度計を取り付け、集水管内

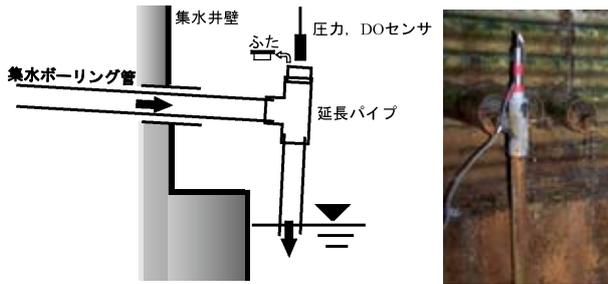


Fig.3 集水管末端の延長パイプと酸素濃度センサの取り付け状況

An additional pipe and oxygen sensor attached to the end of a drainage pipe

部の空気圧とその酸素濃度を測定できるようにした。

III 調査結果と考察

1 排除地下水の水量・水質

排水量は Fig.4 に示すように集水ボーリングによって大きく異なる。盛土層内を貫通している割合が高いNo.3, 4の排水量が少なく、ブロックの北東方を貫通しているNo.9～12の排水量が多い。自然電位探査によってブロック北東方の範囲が地下水の流出域と推定されている(奥山ら, 2006) ことと符合する。No.13～17の排水量

が少ないのは集水ボーリングの延長が短いことも一因であろう。2007年9月に管内簡易洗浄を行った9本については、洗浄直前の平均排水量が0.4L/min, 洗浄翌日が0.41L/min, 排水量が増えた管は4本で顕著な差はなかった。

集水ボーリング別排出水の電導度と溶存酸素濃度を Fig.5 に示す。電導度は原地形表土層, 盛土層内に位置する西側のNo.1～5が凝灰岩層を貫通するそれ以東の管より約2倍高く, 溶存酸素濃度はNo.10以東が高い値を示していることは, 地下水が盛土層の土壌を通過中に電解質が溶解するとともに微生物の活動等によって酸素を消費されるのに対し, 凝灰岩層では亀裂などを通る速い浸透が生じていることを反映していると考えられる。Fig.6の水質ヘキサダイアグラムにおいてNo.4は明瞭な重碳酸カルシウム型のパターンを示している。

2 延長パイプによる閉塞抑制効果

集水井建設後3.5年経過した2007年9月4日, 簡易洗浄を行った後(同月5日), 付着除去後282日経過した2008年10月31日の各集水管末端の状況写真を Fig.7 に示す。試験期間40日, 99日, 282日での付着物の炉乾質量は Fig.8 に示すように集水管No.3, 5で多い。282日で採取した付着物を土の粒度試験で砂分に相当する

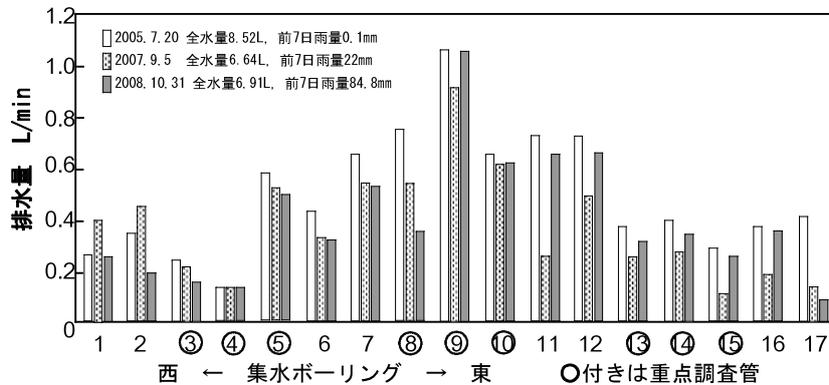


Fig.4 集水ボーリング別排水量
Discharge of drainage pipes

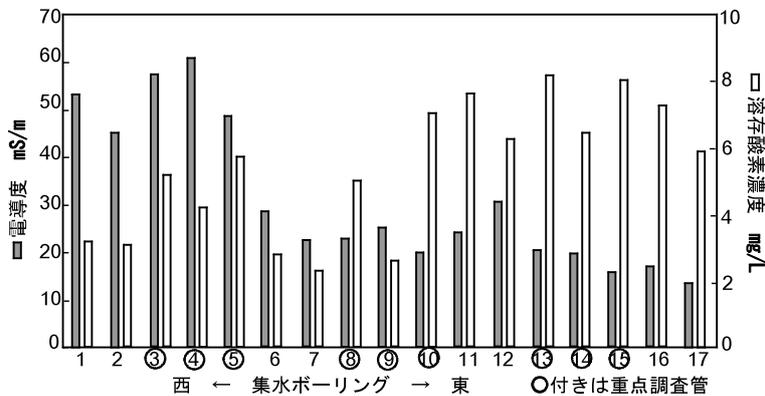


Fig.5 集水ボーリング別排出水の電導度と溶存酸素濃度 (2007.9.5)
Electric conductivity and dissolved oxygen of drained water

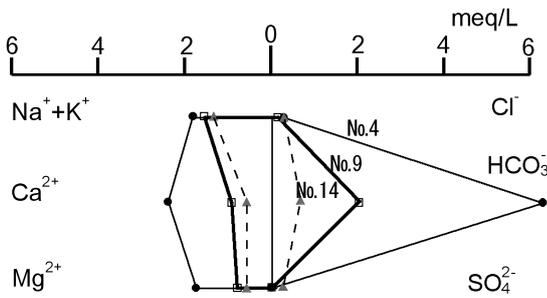


Fig.6 排水の水質
Hexadiagram of drained water quality

75 μ m のふるい分けしたところ、付着物が多いNo.3, 5でふるい残留分が多かった。盛土層の粒度組成は砂が60%前後を占めており(奥山ら, 2006), この試験期間中は大雨に伴って地下水排除量が大幅に増えた日があったので、地下水が表土層、盛土層中の集水ボーリングに流入する際に浸食した土が運ばれて捕捉されたものと考えられる。

簡易洗浄前の2007年9月4日の全管と2008年10月31日の重点調査管9本について集水管末端の付着度(前述)と排水量に全鉄濃度を乗じた全鉄流出量との関係をFig.9に示す。全鉄濃度は試水中の鉄を2価鉄に転化させてから1, 10フェナントロリン試薬による発色を吸

光光度計で測定した。両者には概ね相関傾向が見られ、全鉄流出量が5mg/min以上であると管断面の半分以上の閉塞を表す付着度ランクBになる傾向を示している。鉄はpH, 酸化還元電位が低い条件では2価の溶存状態になる。水のpHと酸化還元電位による鉄の存在形態を示すEh-pHダイアグラムに付着度を重ねたFig.10に示すように、排除水の酸化還元電位が低いほど、すなわち大気に触れる管末端で酸化されやすいほど付着度が高くなる。岸ら(2006)によると、 Fe^{2+} 安定領域では含鉄細菌タイプの生成物質が分布する傾向がある。

集水管No.4, 9, 14で2007年10月15日と2008年11月1日に測定した管内空気の圧力, 酸素分圧をTable 2に示す。管内は酸素分圧が大気の45~72%と低い空気がわずかながら大気より高い圧力で存在しており、排除水量が多い管ほど酸素分圧が低い傾向があった。すなわち、低酸素状態の集水管内を流下してきた2価鉄を含む地下水が末端で大気に触れると酸化して管出口に付着する付着物を生成する。末端に延長パイプを付加して排除水が大気に触れないようにしたNo.4はNo.3, 5に比較して酸化物を減少させる効果が現れた。No.9は酸素濃度が低い、重点調査管の中では全鉄流出量が高いレベルにあるために長期間には水酸化鉄の生成が徐々に進行したと考えられる。

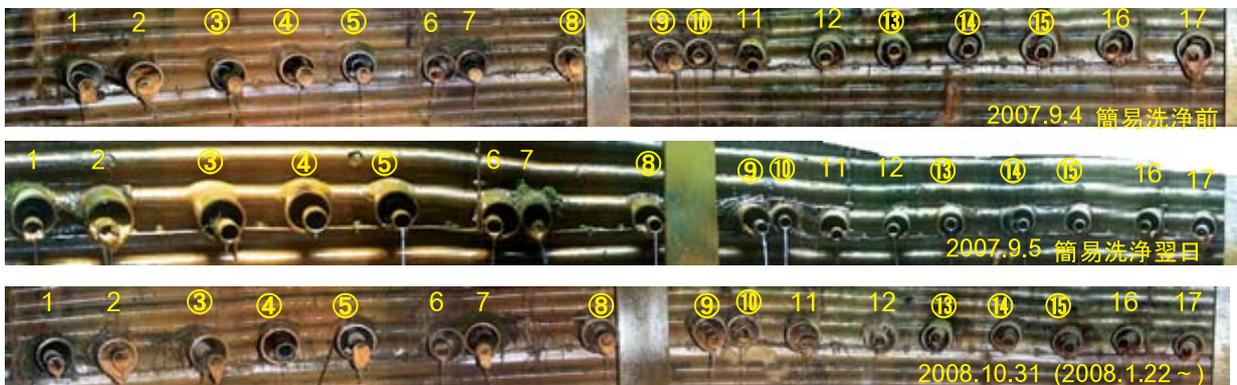


Fig.7 集水管末端のパノラマ写真
Blockage at the end of drainage pipes

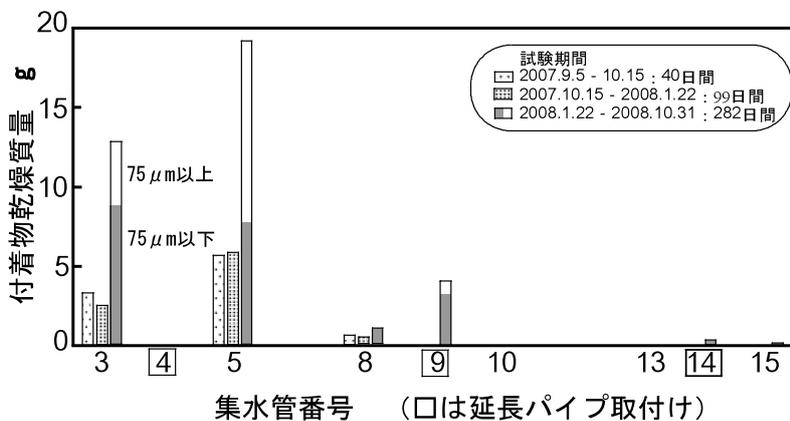


Fig.8 管末端の付着物量
Amount of blockage at the end of drainage pipes

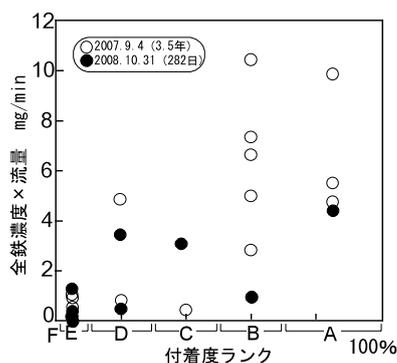


Fig.9 全鉄流出量と付着度ランク
Iron ion discharge and blockage level

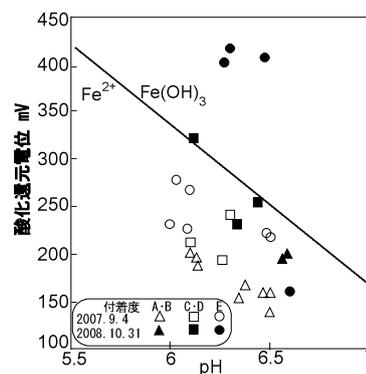


Fig.10 鉄の存在形態と付着度
Eh-pH diagram and blockage level

Table 2 集水管内空気の状態
Features of air in drainage pipes

集水管 No.	4		9		14		気中	
測定日	07.10.15	08.11.1	07.10.15	08.11.1	07.10.15	08.11.1	07.10.15	08.11.1
空気圧力 (Pa) *	40	18	0	18	0	15	0	0
酸素分圧 (%)	14.5	14.87	9.2	10.45	11.9	11.73	20.5	20.5
付着度	E	E	F	C	E	E		
排水量 (L/min)	0.14	0.145	0.74	1.06	0.24	0.355		

*1Pa ≒ 水柱 0.1 mm, 付着度 C : 閉塞断面積 30 ~ 50%, E : <10%, F : 0

IV 結言

地すべり頭部に設置された集水井の集水管末端における沈殿物発生状況の経年的調査を実施した。同一集水井の集水ボーリングでも集水量、水質に大きな違いがあることは谷埋め盛土を含む地すべりブロックの地層構成の複雑さを反映している。盛土部からの排水は量が少ないが電導度、イオン濃度が高かった。集水管末端の閉塞の原因となる水酸化鉄の付着状況も管によって大きな差異があった。付着は盛土層側で著しく、付着度は排除地下水の鉄排出量（鉄濃度×排水量）との相関が見られた。集水管内は酸素分圧が低い空気が微正圧で存在しているため、排除水に含まれる 2 価鉄が集水管末端で酸化されて水酸化鉄を生成し、流下してきた土粒子も捕捉して閉塞が進むと考えられる。

現地ですべて測定できる排除水の pH と酸化還元電位によって鉄の存在形態と酸化の可能性を推定し、閉塞対策の必要性を事前に評価することができる。排除地下水や管内空気には大気より割合は低いものの、酸素が存在しているため水酸化鉄の生成を完全に止めることはできないが、集水管末端に延長パイプを取り付けて集水管末端を大気から遮断する方法について、1 年余りの試験によって閉塞の抑制効果が確認できた。この構造は集水管内に排除水を滞留させないので流出土砂の堆積を引き起こすことがない。対策工として実施件数が多い地上の排水ボーリング工への本提案法の適用性について検討をす

すめたい。

参考文献

- 古谷尊彦 (1996) : ランドスライド, 古今書院, 46
- 池田伸俊・坂井俊介・新保直人 (2006) : 新潟県中越地震による地すべり防止施設の被災状況, 日本地すべり学会誌, 43(4), 16-24
- 岸 智・河野剛士・浅野将人・森田健太郎 (2006) : 北陸地方の地すべりに関する水抜きボーリング工の目詰まりの実態と要因, 日本地すべり学会誌, 43(4), 1-8
- 小嶋伸一・丸山清輝・佐藤宗吾・武士俊也 (2004) : 簡易な水質調査法による地下水排除施設へのスライム付着可能性調査, 日本地すべり学会誌, 41(4), 67-70
- 丸山清輝・安藤達弥・飯田正巳 (2003) : 地下水排除施設集水管の目詰まりに関する検討, 日本地すべり学会誌, 39(4), 23-29
- 宮城県築館産業振興事務所・株式会社テクノ長谷 (2003) : H15 館下地区地すべり調査測量業務報告書
- 奥山武彦・中里裕臣・黒田清一郎・有吉 充 (2006) : 2003 年宮城県沖地震で発生した地すべり地の水理地質特性, 日本地すべり学会誌, 42(5), 51-56
- 奥山武彦・黒田清一郎 (2007) : 地すべり対策集水井の排水状況調査事例, 第 4 回地盤工学会関東支部発表会講演集, 391-392

Factors of blockage at the end of groundwater drainage pipes for landslide mitigation and a countermeasure

OKUYAMA Takehiko and KURODA Seiichiro

Summary

Investigation of groundwater drainage conditions with a drainage well in the course of landslide mitigation was conducted in Miyagi Prefecture. Large differences in drainage rate and water quality of drained groundwater through the horizontal drain pipes installed in the same drainage well reflected a complex geological structure of the landslide block. As for drainage from the soil bank area, drainage rate was low, and electric conductivity and ion concentrations were high compared to another area.

Formation of iron hydroxide that caused blockage in the drainage pipes depended on the conditions of each pipe. Pipe end blockage was remarkable on the banked side, and a correlation was seen between the amount of iron discharged from the drained groundwater (iron concentration x drainage rate) and the blockage level. Concentration of Fe^{2+} in drained groundwater was as much as 3.94 mg/L. The low oxygen air controlled oxidation of Fe^{2+} in the drainage pipes. Iron hydroxide was formed by exposure to the atmosphere at the end of the drainage pipes. Soil particles trapped by iron oxide enlarged the blockage. Formation of iron oxide was not able to be completely stopped because some oxygen was dissolved in the groundwater. However, an extension pipe attached to the end of the drainage pipe isolated the drained water from the air and controlled formation of the blockage in our experiments. The possibility of a blockage can be easily estimated in the field by measuring the pH and oxidation-reduction potential (Eh) of the drain.

Keywords : landslide mitigation, groundwater drainage, water quality, iron hydroxide, oxidation-reduction potential

河川水中のラドン濃度測定による地下水湧出の推定

- 京都府亀岡盆地を例として -

石田 聡*・東 一樹**・土原健雄*・吉本周平*・今泉眞之***

目 次

I 緒 言	7	2 河川水のラドン濃度	11
II 調査地区の概要	8	V 考 察	12
1 地形・地質	8	1 地下水のラドン放射平衡濃度と かんがいの影響	12
2 地下水利用状況	8	2 河川中の地下水湧出地点の特定	13
III 調査方法	9	VI 結 言	13
1 河川水中のラドン濃度測定	9	参考文献	14
2 井戸・湧水におけるラドン濃度測定	10	Summary	15
IV 調査結果	10		
1 地下水・湧水のラドン濃度	10		

I 緒 言

湧水や湿原および周辺の生態系の保全、持続的な地下水資源の確保、地盤沈下問題の解決などのためには、土壌（涵養）→帯水層（流動）→河川・海（流出）までを一連の水移動機構として捉える必要がある。特に、浅層地下水利用が盛んな盆地においては、河川水が伏流水となって地下水として涵養され、下流で再び河川に湧出しており、地下水資源の保全を考える上では、河川と地下水の相互作用を明らかにすることは重要な課題である。

かんがい水や雨水が地下浸透して地下水に付加され、河川や海に流出する機構については、これまで環境同位体や染料をラベルとして地下水の降下浸透速度を明らかにする方法で検討がなされてきたが、既往の研究は表層土壌中の水分移動や、地下水に付加された後の帯水層内の挙動解明に集中している。河川と地下水の相互作用に関する研究については米田（2001）が概略を述べており、地下水中の農薬・リンなどによる河川水質汚染や、逆に河川水を起源とする地下水の有機物汚染などの研究例など、主に水質を指標として議論がなされている。

一方で、地下水資源の量的保全を考える上では、河川からの地下水かん養量と、河川への地下水湧出量を明ら

かにする必要があるが、地下水かん養と流出が同時に発生している湖沼の存在を明らかにした Born et al. (1979) の研究を参考にすれば、地下水が湧出する盆地末端部では、河川への地下水の湧出と、河川からの地下水かん養が同時に起こっている場合があり、その評価は容易ではない。

河川中の地下水湧出地点の特定については、濱田ら（1997）、米田（2001）などが、河川水中のラドン濃度を一定間隔で測定することにより、湧出点の存在を推定している。ラドンは地下水中には一定の濃度を保ち、地表水には殆ど含まれないことから、地下水を追跡する良い指標となる。今泉ら（2006）は水中のラドン濃度を指標としてため池の地下水流入・流出量を評価し、同一のため池で地下水の流入及び流出が同時に起こりうることを示している。これらの研究は地表水中に地下水が湧出しているポイントの特定に、ラドンが指標となることを示しているが、閉鎖的な地下水盆の末端部において、河川中の地下水湧出をラドン濃度を指標として特定した報告はこれまでに見られない。

このため本研究では、ラドン濃度測定により、盆地末端部における河川中の地下水湧出状況を明らかにすることを目的とし、京都府亀岡盆地をフィールドとする現地調査を行った。

本論文の一部は近畿農政局よりの受託研究の一部である。研究を進めるにあたっては近畿農政局農村計画部長江亮二地質官、窪田正和地質官（当時）、資源課各位のご指導、ご協力を頂いた。ここに、感謝の意を表する。

* 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム

** 近畿農政局農村計画部資源課

*** 農村環境部

*平成 20 年 11 月 6 日受理

キーワード：ラドン，地下水流出，河川水

II 調査地区の概要

1 地形・地質

調査地区である京都府亀岡盆地は京都府中部に位置し、一級河川淀川水系桂川の流域にひらけた盆地であり、東西約3～5km、南北約10km、面積約32km²の構造盆地である。盆地の標高は100m前後、盆地を囲む山地の標高は400～600mである。



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

盆地周辺の山地は中生層と花崗岩類から成る。盆地内の堆積物は第四紀層で最大層厚は約300mである(京都府2004, 近畿農政局2007)。盆地中央部の井戸柱状図によれば深度0～70mは主として砂礫層で、このうち深度15mまでは玉石混じり砂礫層で低位段丘に対比される。深度70～170mは粘土・砂・砂礫及び泥炭の互層である(近畿農政局1973)。

地質層序は下位より中生層、花崗岩類、大阪層群上部相当層、低位段丘堆積物、沖積層が分布している。中生層は砂岩、頁岩、チャート、緑色岩類からなり、これを白亜紀後期の花崗岩類が貫いている。れっか水として地下水は賦存するものの、その賦存量は少なく、第四紀層に対する難透水性の基盤と考えられる(近畿農政局1973, 近畿農政局1980, 近畿農政局2007)。

大阪層群上部相当層の上部は主に礫岩から成り、本地区では深井戸による地下水利用が行われている。上位に位置する沖積層、低位段丘堆積物との境界には、難透水性の粘土は連続して分布していない。透水係数は 8×10^{-4} m/sec程度である。低位段丘堆積物は主に礫層から成り、 2×10^{-3} m/sec程度の高い透水性を有する。盆地の上流部では豊富な伏流水が存在し、浅井戸による地下水利用が行われている。沖積層は桂川および他の小河川の氾濫原に分布する礫層であり、一部後背湿地には粘性土

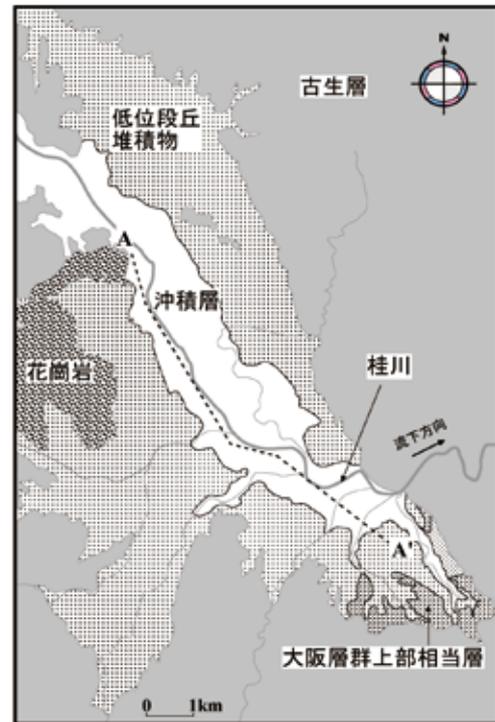


Fig.2 調査地周辺地質平面図(近畿農政局2007に加筆)
Geological map around study area

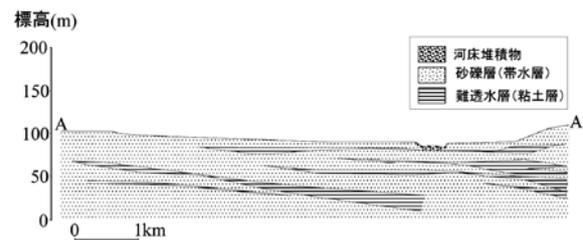


Fig.3 調査地周辺地質断面図(近畿農政局2007)
Geological section map of study area

が分布する。

2 地下水利用状況

亀岡盆地における降水量はおよそ1,200mm/年である。桂川の盆地流入口に位置する新町河川流量観測所における流域面積は540km²、年間平均流量は16.68m³/secであり、流出口に位置する保津峡河川流量観測所における流域面積は741km²、年間平均流量は21.88m³/secである。これより、亀岡盆地における流域面積は201km²、年間平均流出量は5.2m³/secとなり、蒸発散と地下水流出の和は降水量の34.3%と見積もられる。

亀岡盆地では古くから深度2～10mの浅井戸による不圧地下水の利用が行われており、主な用途は飲雑用水、灌漑用水である(清水ら1974)。かんがい用水は桂川からの取水で賄われているが、標高の高い農地などでは用水が不足する場合があります。深度60～80mの深井戸によって補給水が揚水されている。揚水量は2,000～

4,000m³/d 程度である。

本地区の地下水利用量は、農業用が約 4,400 千 m³/y、上水道用が約 11,000 千 m³/y、工業用が約 1,100 千 m³/y である（近畿農政局 2007）。

Ⅲ 調査方法

1 河川水中のラドン濃度測定

京都府亀岡市の桂川において、概ね 300m 間隔でラドン (²²²Rn) 濃度を測定した。盆地の規模を考えると、水田かんがい水が地下水としてかん養され、河川に流出するまでに時間を要すると考えられるため、測定は 2003 年のかんがい期の末期である 8 月 19～21 日に行った。近傍の園部観測所において、採水した月の採水日以前に 10mm 以上の日降水量を記録した日は 8 月 8,9,14,15,19 日であり、降水量はそれぞれ 24,29,64,27,66mm であり、

平時より河川流量は大きかった。また河川におけるサンプリングポイントによってラドン濃度が異なるかどうかを確認するため、前記した調査地点のうち 9 箇所においては河川の右岸、左岸について、それぞれラドン濃度を測定した。Fig.4 に調査地点位置図を示す。

ラドン濃度の測定にはトルエン抽出法を採用した。この方法はラドンが水よりもトルエンに溶解しやすい性質を利用した測定法であり、現地で 500mL の試料を採水し、40mL のトルエンを加えて攪拌、静置し、分離したトルエン 20mL をガラスバイアルに回収する（この時、空気に触れるとラドンが空気中に飛散するため、採水作業はなるべく空気に触れないように注意する）。トルエンを回収したバイアルは研究室に持ち帰り、液体シンチレーションカウンタ（パッカード社製 2250CA）で測定を行った。測定時間は 1 試料 50 分で、検出限界は約 0.037Bq/L である。測定誤差は高濃度の場合は小さく、低濃度の場

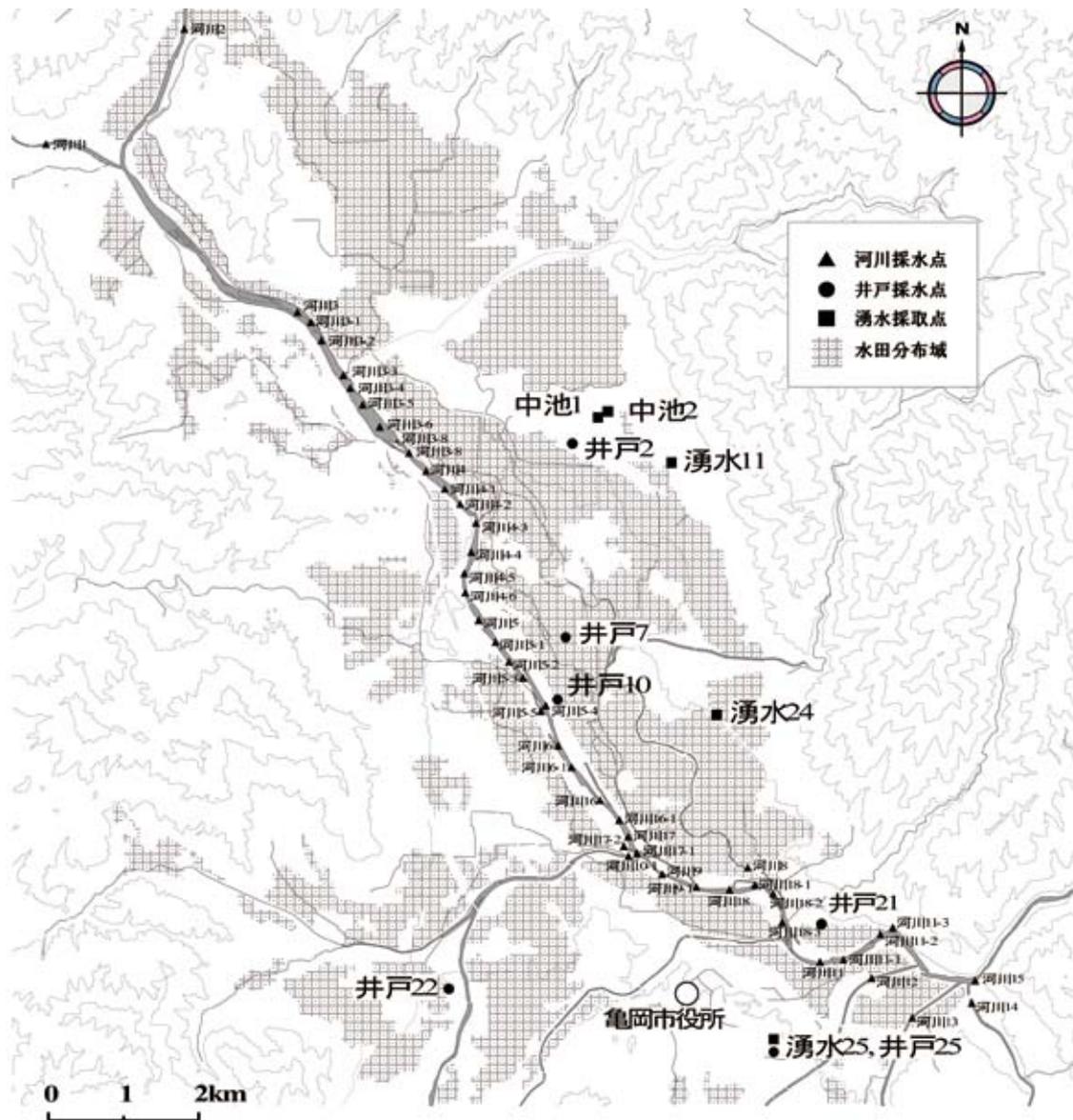


Fig. 4 調査地点位置図
Sampling points

Table1 ラドン濃度観測地点諸元 (井戸, 湧水)
Specifics of the sampling points (wells & springs)

地点名	名称	深度	口径	帯水層	ポンプ運転状況
井戸7	農業公園	100 m	15cm	a,lt,Ou(g)	通年運転
井戸10	堀越揚水機場	6.3 m	20 m	a	2003年は1日のみ運転
井戸21	八ノ坪揚水機場	40 m	30cm	a,lt,Ou(g)	灌漑期間運転
井戸22	穴太揚水機場	3.7 m	90cm	lt	2003年は1日のみ運転
井戸25	突抜	5.3 m	60cm	lt	毎日少量揚水
湧水24	七谷川扇状地端部			lt	
湧水25	わくわく湧水公園			lt	

a: 沖積層, lt: 低位段丘層, Ou(g): 大阪層群上部相当層上部

合は大きくなる。今回の調査では約3%であった。なお、本論文ではラドン濃度の単位にBq/Lを用いた。Bq (ベクレル) とは1秒間に1回の放射性壊変が起こる量を示し、Bq/Lは1Lの試料水中で、1秒間に1個ラドン原子がポロニウム原子に変わる事を表す。

2 井戸・湧水におけるラドン濃度測定

盆地内の地下水のラドン濃度を把握するため、井戸5地点、湧水2地点において定期的にラドン濃度を測定した(延べ261回)。Table1に観測井戸・湧水の諸元を示す。また上記7地点の他に、河川水採取時に盆地東部の湧水3箇所(中池1, 中池2, 湧水11)、井戸1箇所(井戸2)のラドン濃度を併せて測定した。

IV 調査結果

1 地下水・湧水のラドン濃度

Fig. 5に浅井戸において採水した地下水のラドン濃度の経時変化を示す。

井戸10は周辺に水田があり、沖積層中にスクリーン

が設置されている浅井戸で、今回定期観測を行った地点の中では最もラドン濃度が低かった。ラドン濃度は概ね10Bq/L前後を推移したが、かんがい期には低下し、5Bq/L以下の値を示す時期もあった。測定値は変動しているものの、周辺の水田の湛水期間に濃度が下がり、非湛水期間に濃度が10Bq/L程度の値を示す傾向にあった。また、中干し期間に濃度が上昇した。井戸22は周辺に水田があり、低位段丘層中にスクリーンが設置されている浅井戸である。ラドン濃度は概ね20Bq/L前後を推移したが、かんがい期には変動し、観測日によって値が大きく低下する場合があった。値が変動する期間はかんがい期間とほぼ一致しているが、井戸10の様に中干し期間にラドン濃度が上昇する傾向は見られなかった。10月以降のラドン濃度は変動幅が2Bq/L程度と小さくなり測定値は安定していた。ラドン濃度が低い時には、抽出時に水泡が多く発生する傾向にあった。井戸25は市街地の低位段丘層中にスクリーンが設置されている浅井戸である。ラドン濃度は15~25Bq/Lの範囲を推移したが、濃度とかんがい期間との間には特に関係はなかった。

Fig. 6に深井戸において採水した地下水のラドン濃度

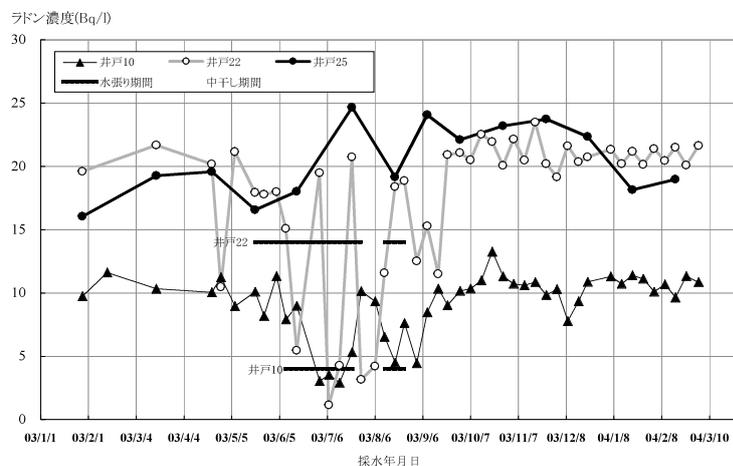


Fig. 5 地下水のラドン濃度の経時変化 (浅井戸)

Fluctuation of ^{222}Rn concentration (shallow wells)

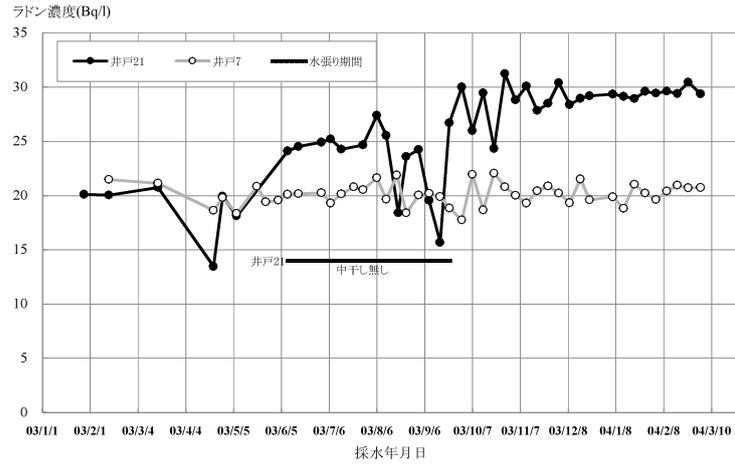


Fig. 6 地下水のラドン濃度の経時変化 (深井戸)
Fluctuation of ^{222}Rn concentration (deep wells)

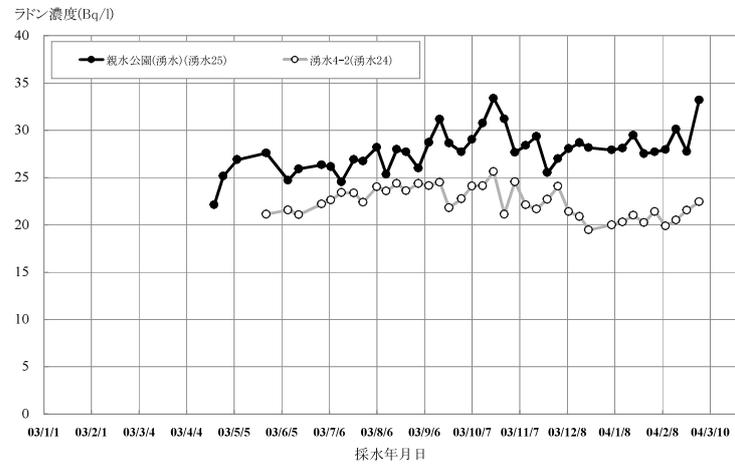


Fig. 7 湧水のラドン濃度の経時変化
Fluctuation of ^{222}Rn concentration (springs)

の経時変化を示す。

井戸 21 は周辺に水田があり、沖積層、低位段丘層、大阪層群上部相当層中にスクリーンが設置されている深井戸で、かんがい期間はポンプによる揚水が行われていた。ラドン濃度は概ね 20～30Bq/L と高い値を示した。かんがい期の末期に 2 度ほど 20Bq/L を下回った他は、季節変動は見られなかった。井戸 7 は沖積層、低位段丘層、大阪層群上部相当層中にスクリーンが設置されている深井戸で、ポンプによる揚水が通年で行われていた。ラドン濃度は概ね 20Bq/L 前後で安定しており、季節変動は見られなかった。

Fig. 7 に湧水のラドン濃度の経時変化を示す。

これらの湧水はいずれも低位段丘層中の地下水が湧出しているものである。湧水 24 におけるラドン濃度は概ね 20～25Bq/L の範囲を推移し、季節変動を示さなかった。湧水 25 におけるラドン濃度は概ね 25～30Bq/L の範囲を推移し、これも季節変動を示さなかった。

平成 15 年 8 月のみ測定を行った井戸・湧水は 4 箇所である。湧水 11、中池 -1、中池 -2 におけるラドン濃度

はそれぞれ 9.65Bq/L、60.38Bq/L、15.74Bq/L であった。特に中池 -1 における 60.38Bq/L は非常に高い値である。井戸 2 におけるラドン濃度は 4.78Bq/L であった。

2 河川水のラドン濃度

Fig.8 に桂川本川におけるラドン濃度測定結果を示す。図の横軸は河川 2 地点からの流下距離である。

河川のラドン濃度は 0.10～5.82Bq/L の範囲を推移した。上流の河川 2、河川 3 では 0.5Bq/L 未満の低い値を示した。河川 2 と河川 3 地点間で桂川に合流する支川（河川 1）におけるラドン濃度は 0.36～0.61Bq/L であった。河川 3～河川 4-1 にかけては、河川 3-2、河川 3-8、河川 4-1 で前後の観測点より高い値が観測された。河川 4-2 より下流では漸減傾向を示し河川 5-1 では 0.37Bq/L まで低下するが、河川 5-2～河川 5-4 では若干上昇して 0.67～1.18Bq/L の範囲を推移した。河川 6 では 5.82Bq/L と飛び抜けて高い値を示したが、直下の河川 6-1 では 0.92Bq/L に下がり、それ以降増減を繰り返しながらも漸増傾向を示し、最下流の観測地点である河川 15 では

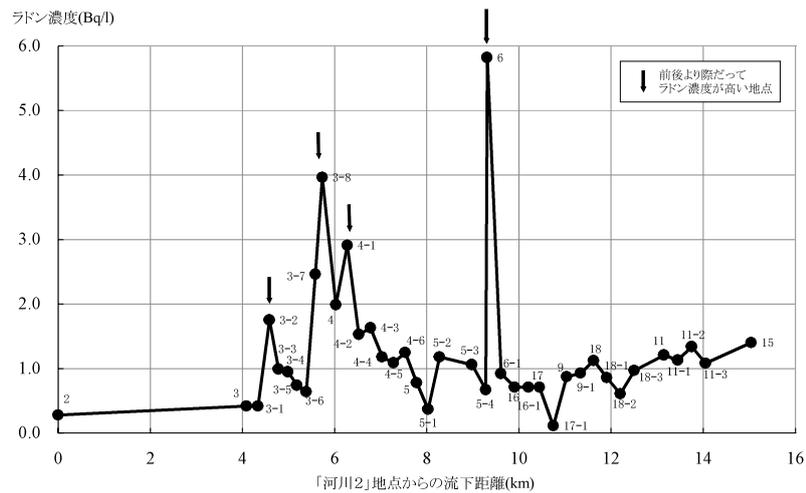


Fig. 8 桂川のラドン濃度
 ^{222}Rn concentration of Katsura river

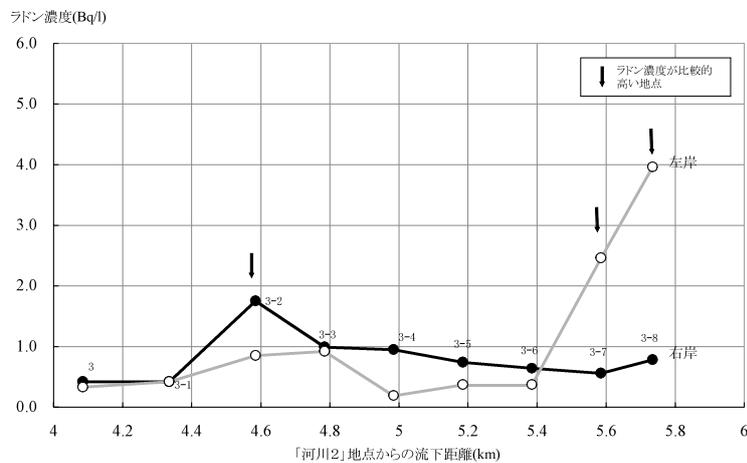


Fig. 9 右岸と左岸のラドン濃度の比較
 Comparison of ^{222}Rn concentration in right side and left side

1.40Bq/Lを示した。また支川（犬飼川）との合流点である河川 17-1 のラドン濃度は前後の観測点より低くなっており、ラドン濃度が低い（地下水が湧出していない）犬飼川の水の影響を受けていると考えられる。

河川に流入している湧水（河川 5-5, 河川 11-1 右岸湧水, 河川 17-7）のラドン濃度はそれぞれ 11.71Bq/L, 15.84Bq/L, 6.70Bq/L と比較的高い値を示した。

桂川支流河川（河川 8, 河川 10-1, 河川 12, 河川 13, 河川 14）のラドン濃度は、それぞれ 1.4Bq/L, 0.05Bq/L, 0.21Bq/L, 0.34Bq/L, 0.69Bq/L であった。

Fig.9 に桂川本川の河川 3・河川 4 間において、右岸、左岸それぞれでラドン濃度を測定した結果を示す。ラドン濃度が低い箇所では河川の左岸、右岸でそれほど大きな差異はなかったが、ラドン濃度が高い箇所（河川 3-2, 河川 3-7, 河川 3-8）においては左右岸でラドン濃度は大きく異なった。河川 3-2 においては右岸側の方がラドン濃度が高く、河川 3-7, 河川 3-8 においては左岸側の方がラドン濃度が高かった。

V 考察

1 地下水のラドン放射平衡濃度とかがいの影響

Fig.5 より、浅層地下水中のラドン濃度はかがいの影響を受ける場合と、そうでない場合がある。濱田ら（1997）は水田の湛水により、近傍の浅井戸のラドン濃度が低下すること、湛水が行われぬ中干し期間には一時的にラドン濃度が上昇することを報告しており、周囲を水田に囲まれている井戸 10 のラドン濃度変化はこれと整合的である。一方で市街地の井戸 25 における地下水のラドン濃度は季節変動を示しておらず、水田から離れた箇所ではかがいによる影響が小さいと言える。また井戸 10 より井戸 22 の変動幅が大きいのは、井戸 22 の方が掘削深度が浅いため、よりかがい水の影響を受けやすくなっているためと考えられる。同様に、深井戸においても井戸 21 の方が井戸 7 よりかがい期のラドン濃度の変動が大きいのは、掘削深度が浅いためかがい水の浸透の影響を受けている可能性がある。

ただし、井戸 22 ではラドン採取時に水泡が見られた。

ラドン濃度が低い試料にみられることが多い水泡は浮遊物質（泥、藻類等）によって形成される。藻類等の有機物が地下水に混入していたとすると、その期間は水が汲み上げられていない可能性がある。その場合、井戸内でラドンは揮発および壊変し濃度が低下するので、今回の観測値が実際の地下水の値と異なっている可能性は否定できない。

また、Fig.6, Fig.7より、湧水、深層地下水ともラドン濃度は大きな季節変動を示していないことから、かんがいの影響を受けない（かん養後3週間以上が経過している）地下水であると考えられる。

以上より、調査地域の地下水の放射平衡濃度はかんがいによる影響を除けば10～30Bq/Lであると考えられる。

2 河川中の地下水湧出地点の特定

Fig.8より、前後の観測地点よりラドン濃度が際だって高い地点（河川3-2, 3-8, 4-1, 6の各点）においては、それぞれの地点と、直上流の観測地点との間に地下水湧出ポイントが存在することが示唆される。

特に河川3から4に掛けてはその右岸側に花崗岩が分布している。花崗岩は一般的にウラン含有量が比較的高いことから、地下水中のラドン濃度も高くなることが知られている。本地区ではその対岸でも高いラドン濃度の湧水が存在する（中池1）。この濃度は先に示した礫層における放射平衡濃度（10～30Bq/L）より高いことから、花崗岩起源の地下水が断層などを水みちとして左岸側に供給され、河川にも湧出していると考えられる。

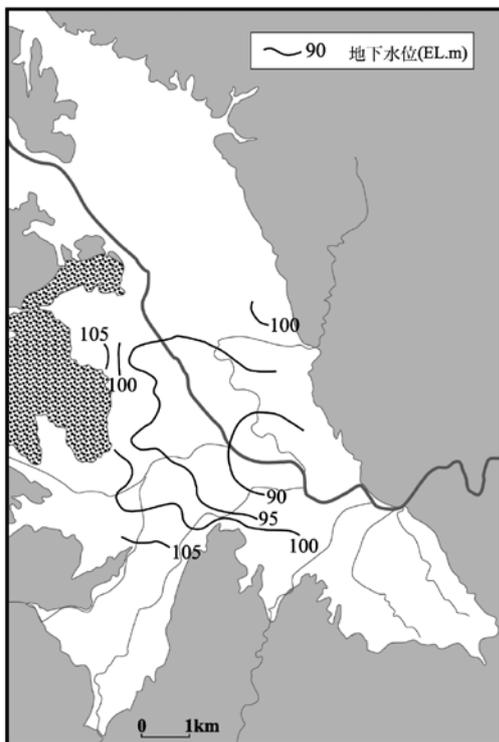


Fig. 10 地下水位等標高線図
Contour map of groundwater table

一方で、河川16から河川15までの地点に掛けてはラドン濃度が漸増し、最終的には2倍程度にまで増加している。この範囲は盆地の下流部にあたり、河川の水深が深く、また流量も大きいことから、河川3-2, 3-8, 4-1, 6のように特定の湧出点の兆候を捉えるには至らなかったが、護岸の割れ目から地下水の湧出が確認されたこともあり（河川11-1地点：ラドン濃度15.84Bq/L）、全体的にこの範囲に地下水の湧出があることが示唆される。

Fig.10に調査地における地下水等標高線図を示す。

河川16から河川15までの地点が位置する盆地下流部は、地下水位が河川水位より高くなっていることから、地下水の流出域にあたる。以上より、河川16から河川15までの地点に掛けてのラドン濃度の漸増は、河川への地下水の湧出によるものと考えられる。地下水の放射平衡濃度を25Bq/Lとし、この濃度の地下水が河床から湧出していたとし、濱田ら（2003）を参考に地下水流出量を解析すると、ラドン濃度を0.4Bq/L上昇させるためには、少なくとも河川総流量の1.6%（調査を行った月の河川平均流量62m³/sに対して地下水湧出量は1m³/s）の地下水が湧出する必要がある。ただし、本調査を行った月は、河川流量が年平均の3倍近くであり、降雨流出の影響を強く受けている。このため、平時における、河川流量に対する地下水湧出量の割合はこの数字より大きくなると考えられる。

以上の調査結果より、河川水中のラドン濃度測定によって盆地における河川への地下水流出状況を把握することが可能であることが示された。ただし、Fig.9に示すとおり、湧出点直下流と見られる地点では右岸と左岸の濃度に2倍以上の差がある。このような地点では、地下水は河床全体からではなく、限られた湧出口から河川に流出していることを示している。このため、断層などの水みち的な地下水流動の存在を把握するためには、右岸、左岸のそれぞれで観測を行うことが望ましい。

VI 結言

本研究では京都府亀岡盆地を調査地として、河川水及び地下水のラドン濃度測定を行い、河川への地下水流出状況を推定した。

一年間の定期的な地下水中のラドン濃度測定からは、浅層地下水、深層地下水の放射平衡濃度が10～30Bq/L程度であること、浅層地下水のラドン濃度は一部かんがいの影響を受けることが明らかになった。

一定間隔で河川水中のラドン濃度を測定した結果、前後の観測地点に比べて際だってラドン濃度が高い地点が存在することから、盆地内の河川中に複数の地下水湧出ポイントが存在し、その一部は近傍の花崗岩由来であることが示唆された。また、盆地末端部で河川水中のラドン濃度が下流に行くほど増加することが観測され、地下水位分布と照らし合わせ、地下水の湧出が盆地末端部で

起こっていることが推定された。

以上より、河川水中のラドン濃度測定は、河川中の地下水流出状況の把握に有効な手法であると言える。

今後はラドン濃度測定による地下水湧出ポイントの特定に留まらず、量的な議論が可能となるように、河川水の流下に伴うラドン濃度の低減を考慮した解析手法等を、引き続き検討すべきであると考え。

参考文献

- 1) Born, S.M., Smith, S.A. and Stephenson, D.A.,(1979) : Hydrogeology of glacial-terrain lakes, with management and planning applications. In:W. Back and D.A. Stephenson (Guest Editors), Contemporary Hydrogeology The George Burke Maxey Memorial Volume., J.Hydrol., 43, p.7-43
- 2) 濱田浩正, 岸 智 (2003) : ラドン収支と水収支による地下水浸入と流出の定量解析の小規模ため池への適用, 水文水資源学会誌, 16(4), p.325-330
- 3) 濱田浩正, 今泉真之, 小前隆美 (1997) : ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, 農工研所報, 36, p.17-50
- 4) 今泉真之, 石田 聡, 土原健雄, 吉迫 宏 (2006) : ため池周辺の地下水流入・流出量の評価－広島中央の谷ため池を例として－, 農工研技報, 204, p.157-174
- 5) 石田 聡, 東 一樹, 今泉真之, 土原健雄 (2005) : 亀岡盆地における河川へのラドンの湧出について, 第42回アイソトープ・放射線研究発表会, p.100
- 6) 近畿農政局計画部資源課 (1973) : 農業用地下水調査開発調査亀岡盆地地区調査報告書
- 7) 近畿農政局計画部 (1980) : 京都府水文地質図
- 8) 近畿農政局 (2007) : 亀岡盆地の地下水－農業用地下水調査保全調査亀岡盆地地区報告書－
- 9) 京都府 (2004) : 平成15年度京都府活断層調査(三峠・京都西山断層帯)業務委託報告書
- 10) 清水欣一, 黒川陸生 (1974) : 京都府亀岡盆地の水理地質について, 陸水誌, 35(2), p.82-87
- 11) 米田 稔(2001) : 地下水と地表水・海水との相互作用, 地下水学会誌, 43(2), p.89-100

Estimation of groundwater outflow by measurement of ^{222}Rn concentration in river water

– The Kameoka basin in Kyoto Prefecture as an example –

ISHIDA Satoshi, AZUMA Kazuki, TSUCHIHARA Takeo,
YOSHIMOTO Shuhei and IMAIZUMI Masayuki

Summary

For the purpose of estimation of springing point of groundwater in river, ^{222}Rn concentration in river water was measured at intervals of about 300m along Katsuragawa river in Kameoka basin, and also ^{222}Rn concentration in groundwater was measured at 2 deep wells, 3 shallow wells and 2 springs every two weeks for 1 year to know the radiation equilibrium concentration of aquifer. ^{222}Rn concentration in groundwater fluctuated within the range of 10-30 Bq/L at 1 shallow well, 2 deep wells and 2 springs. At the 2 shallow wells, the ^{222}Rn concentration in groundwater fluctuated largely at the period from June to August. In these points, it is estimated that the ^{222}Rn concentration lowered because of paddy field irrigation. It was estimated that the radiation equilibrium concentration of the aquifer in the Kameoka basin was 10-30 Bq/L excluding the influence of the paddy field irrigation. ^{222}Rn concentration in river water was as follows. 1) ^{222}Rn concentration in the river water was a range of 0.10-5.82Bq/L. 2) There were 4 observation points where ^{222}Rn concentration was much higher than that of forward observation point and backward observation point. 3) ^{222}Rn concentration of downstream were higher than that of upstream at the end of the basin. These results suggested that there were at least 4 point where groundwater sprang in the river, and groundwater seemed to spring widely in the river at the end of the basin. Therefore, the measurement of ^{222}Rn concentration in river water is an effective method to know the situation of groundwater outflow in river.

Keywords : ^{222}Rn , groundwater outflow, river water

農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法

本間新哉*・北村浩二*・加藤 敬**

目 次	
I 緒 言	17
II 健全度評価基準の設定と水路凹凸の測定法	18
1 これまでの現地調査の概要	18
2 算術平均粗さ (R_a) の測定と算定方法	18
3 供試体計測のための健全度評価基準の設定	19
III 供試体の作成と測定	19
1 供試体の作成	19
2 測定の方法	19
3 算術平均粗さ (R_a) の算定	21
4 凹凸容量の算定	21
IV 供試体を用いた算術平均粗さ (R_a) の特性分析	21
1 算術平均粗さ (R_a) と健全度及び最大骨材寸法	21
2 凹凸容量	21
3 計測間隔の検討	23
4 調査幅の検討	24
5 最大高さ (R_v) の評価指標性の検討	24
V 結 言	26
参考文献	26
Summary	27

I 緒 言

長い歴史の中で形成・維持されてきた農地・農業用水等の資源は、農業・農村の基盤を支える社会共通資本として、農業者のみならず地域住民等を含めた多様な主体の参加を得ながら、将来にわたって良好な状態で保管理することが課題となっている。一方、膨大な社会資本ストックを形成している農業水利施設の多くが初期建設から相当年数が経過し順次に更新時期を迎えつつある。しかしながら、補修・更新の時期の集中が予想されることから、これに的確に対応するには補修・更新費用の最小化・平準化を図っていく必要がある。このため、適時・適切な維持補修を実施することによって施設の長寿命化を図るとともに、施設の建設に要する経費に供用期間中の運転、補修等の管理に要する経費及び廃棄に要する経費を合計した金額であるライフサイクルコスト (LCC) の低減を図って行くことが強く求められている (美濃ら, 2005)。

施設の予防保全的な維持補修のためには、施設の点検時点の劣化状態を評価する健全度の把握だけでなく、将来の施設の劣化を予測することが重要であり、この劣化予測の精度や手法の良否が施設の長寿命化と LCC の最小化に大きく影響する。

農業水利分野のコンクリート構造物の中でも、現場打ち鉄筋コンクリート製農業用開水路 (以下「農業用水路 (RC)」とする) は長大な延長を有するという特徴をもつ。このため農業用水路 (RC) では、目視もしくは簡易な器具を用いた点検管理が主体となっている。

このような背景の下、筆者らは農業用水路 (RC) を対象とした目視による劣化状態を判定する健全度の評価基準の確立や、簡易な計測調査から求まる各種の劣化機構に対応した劣化予測の指標づくりの取り組みを進めている。

農業用水路 (RC) の診断においては水路構造物に特有の劣化現象 (水路壁面の凹凸や継目劣化) とコンクリート構造物全般における劣化機構 (中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応) が対象となる。筆者らは 2006 年に北陸地域の農業用水路 (RC) を対象とし、水路構造物に特有の劣化現象に着目した目視による施設の健全度の評価基準の設定と、診断結果等に基づく劣化予測に関する検討を行った (北村ら, 2007b)。農業用水路 (RC) の目視による劣化診断では、水路壁面の凹凸状態が構造物の劣化状態を判断する指標の一つと考えられるが、2006 年に実施された調査での目視の評価基準は定性的なものである。評価者が異なる場合、診断の熟練度の違いによって健全度評価が異なる可能性があることが指摘されている (北村ら, 2008c)。

定性的な健全度評価結果の相違を回避するためには、健全度評価の定量的な指標が必要とされる。水路壁面凹凸については型取りゲージを用いて凹凸を測定し、粗度係数を計算した例がある (日本水土総合研究所, 2006)。筆者らは、水路壁面凹凸の健全度評価の定量化と精度向上を目的とし

* 農村総合研究部地域資源保管理研究チーム

** 農村総合研究部上席研究員

平成 20 年 11 月 6 日受理

キーワード：農業用水路 (RC)、算術平均粗さ (R_a)、供試体、凹凸容量、健全度

て、簡易な計測器（型取りゲージ）を用い、水路壁面の凹凸計測を行うとともに、凹凸を数値表現するために算術平均粗さ（ Ra ）を用い、水路壁面の健全度評価への適用性の検討を行った（本間ら，2007a）。また北村ら（2008c）は、用水路の壁面の粗化（水路壁面の表面の粗化とは、摩耗などによって水路壁面の表面の凹凸が経年的に増大していくことと定義）により凹凸を型取りゲージを用いて数値化し、算術平均粗さ（ Ra ）を用いた定量化と供用年数との関係について提案している。そして水路壁面凹凸の健全度評価と構造的機能の関連については、流水等により水路壁面のコンクリート断面が減少した場合の構造的検討が行われている（本間ら，2008a）。

このように、算術平均粗さ（ Ra ）を用いて水路壁面凹凸を数値化し定量的に表現することが可能なことや、健全度評価基準への指標化の研究が進められている。しかし北陸地域以外の東北地域、近畿地域、中国地域において目視観察を行った水路では、コンクリート表面から骨材が剥離に至るまで劣化が進んだ水路壁面状態を確認できていない。また、目視で観察した水路の中には、地域においては表面露出骨材寸法が40mmに近いものもみられた。このようなことから算術平均粗さ（ Ra ）による、より精度の高い定量的な指標化のためには、コンクリートの骨材寸法の違いが算術平均粗さ（ Ra ）算定におよぼす影響や、粗骨材が剥離する直前までの状態と算術平均粗さ（ Ra ）の適用性について検証する必要が生じた。

しかし古い水路では必要な配合情報を得ることが困難な状況であることや、検討条件に合った水路を現地で見つけることは困難である。このため算術平均粗さ（ Ra ）を用いた評価手法の精度向上及び適用性の検証を目的として供試体を作成し、算術平均粗さ（ Ra ）を用いた凹凸評価手法について検討を行うこととした。

II 健全度評価基準の設定と水路凹凸の測定法

供試体を用いた検討では、健全度の評価基準の設定区分が重要となる。このため、これまでの劣化診断に関する現地調査で用いられた評価基準や、構造的検討結果を基に健全度評価基準の設定を行うこととした。

1 これまでの現地調査の概要

2006年に実施した調査地域は北陸の沖積平野に位置する約19000haの広さを持つ水田地帯であり、土地改良区が総延長約671kmにわたる用水路を長年管理し、供用期間が概ね10年から40年の異なる農業用水路（RC）が存在するという特徴を持っている。筆者らはこの農業用水路（RC）のうち、水路延長約12200m、総バレル数約1400（1バレルは継目から継目までの一区間）について水路構造物に特有の劣化現象を主たる対象とした目視による健全度調査を実施した。

その際の水路壁面凹凸の目視による健全度評価基準に

ついては、健全度5（コンクリートの表面が滑らかな状態）、健全度4（表面のセメントペースト分が流出し、ざらついている状態）、健全度3（表面の細骨材が流され、粗骨材が見え始めている状態）、健全度2（粗骨材の流出が半分程度露出している状態）、健全度1（粗骨材が剥離し、断面の減少がはっきりわかる状態）を基本とする5段階が設定されている（北村ら，2007b）（本間ら，2008b）。

なお、この調査では中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応については、目視による外観変状やひび割れ等は確認されていない。

2 算術平均粗さ（ Ra ）の測定と算定方法

算術平均粗さ（ Ra ）は、粗さ曲線からその平均線の方に基準長だけ抜き取り、この抜きとり部分の平均線の方にX軸を取り、縦倍率の方にY軸を取り、粗さ曲線を $y = f(x)$ で表した時に、式(1)で求められる値と定義され、この値が大きいほど粗いと判断される（Fig.1）。

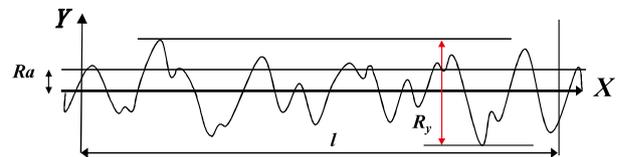


Fig.1 算術平均粗さ（ Ra ）イメージ
Image of arithmetical mean roughness (Ra)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad \dots (1)$$

水路壁面の凹凸の定量化に当たってはこの考え方を用い、算術平均粗さ（ Ra ）を近似的に求め、この値をあらためて算術平均粗さ（ Ra ）として用いることとした。実際の現場水路における水路壁面凹凸を算術平均粗さ（ Ra ）へ変換する流れは以下のとおりとなる。

最初に型取りゲージを水路壁面に押しあて壁面の凹凸を型取りゲージに写し取る。次に写し取った型取りゲージを方眼紙上に置き、デジタルカメラで撮影し、それをパソコンのプレゼンテーションソフト及び表計算ソフトを連携させ、型取りゲージの形状を方眼紙の目盛りを使って幅1mmピッチ、高さを0.1mm単位で読み取り、凹凸を数値化する（凹凸曲線の作成）。次に数値化された値の平均線を算出し、この平均線から凹凸曲線までの差の絶対値を合計し、これを幅（150mm）で割った値を算術平均粗さ（ Ra ）として求めた。

型取りゲージは、水平幅150mmの間に、直径0.8mmのステンレス針が185本ならんだ形で構成されている。具体的にはFig.2に示すように、型取りゲージの針は平坦な状態（a）から水路壁面の写し取り作業（b）を経て凹凸を写し取った形に変わる（c）。この凹凸をグラフの値として読み取り数値に変換する（凹凸曲線の作成）。



Fig.2 型取りゲージ
Profile Gauge

Table 1 健全度評価基準（水路壁面凹凸状態）
Health index evaluation standards (Canal Wear)

健全度	劣化の状況
5	セメントペーストの流出が開始しておらず、施工完了直後のようにコンクリートの表面が滑らかな状態
4	セメントペーストの流出が進行し、コンクリートの表面がざらついている状態
3	細骨材の流出が進行し、表面の細骨材が流され、粗骨材が見え始めている状態
2	細骨材の流出が進行し、表面の細骨材が流され、粗骨材の粒子が半分程度露出しているが、剥離していない状態
1	粗骨材がほとんど露出し、粗骨材の剥離が始まる状態

3 供試体計測のための健全度評価基準の設定

供試体の健全度評価基準の設定においては、これまでの現地調査では5段階を基本としている点や、小断面水路では水路内壁面厚が一様に22mm減少すると鉄筋の引張り許容応力度を満たさない条件に達する断面が現れるという報告（本間ら，2008a）を踏まえることが必要と考えた。そこで、これまでの評価段階や構造的な検討結果及び骨材寸法の条件を考慮した上で、粗さが最大と想定される状況を健全度1とする5段階の健全度評価基準を設定した（Table 1）。

III 供試体の作成と測定

1 供試体の作成

異なる健全度と最大骨材寸法（Gmax）の違いによる凹凸評価手法の検討を行うことを目的とし、異なる最大骨材寸法（4種類）毎に、5つの健全度を設定した計20種のコンクリート供試体を作成した。

設計強度は、鉄筋コンクリート水路打設で多く用いられると考えられる21（N/mm²）とした。作成した供試体の設計値をTable 2に示す。

Table 2 供試体の設計値
Design value of the test specimen

Gmax (mm)	部材厚 (mm)	設計強度 (N/mm ²)	設定健全度
20	100	21	1, 2, 3, 4, 5
25	130	21	1, 2, 3, 4, 5
30	150	21	1, 2, 3, 4, 5
40	180	21	1, 2, 3, 4, 5

供試体作成においてはコンクリートの壁面を想定し、コンクリート打設は型枠の上側から行い、測定面（250mm × 250mm）が壁面環境に近くなるように配慮した。また、部材厚については、最大骨材寸法の4～5倍程度になるように設定した（Fig.3, Fig.4）。

供試体は、コンクリートを型枠に打設した後、湿潤養生を行った。打設から概ね6時間後のまだ完全に固まっていない状態の時に測定面の型枠板を外し、測定面をブラシや水流を用いて、測定面がTable 1に示す各健全度の凹凸状態になるまで洗い出した。その後再度湿潤養生を行い完成させた（Fig.5）。

2 測定の方法

凹凸の測定には供試体の幅、計測の速さを考慮して、

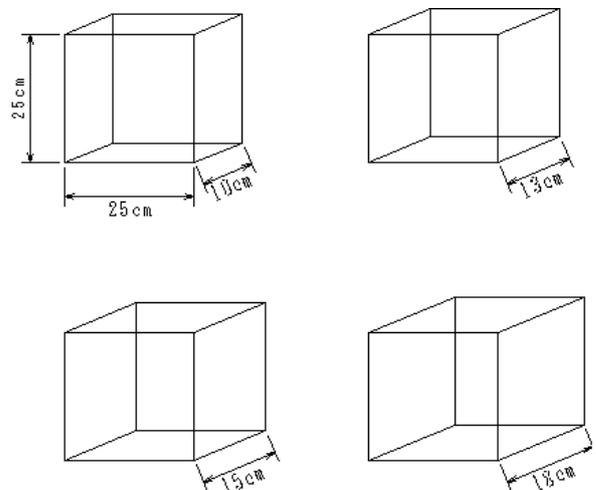


Fig.3 供試体の大きさ区分
Size of test specimen



Fig.4 供試体作成状況
Making situation of test specimen



健全度 5



健全度 4



健全度 3



健全度 2



健全度 1

Fig.5 健全度別供試体の表面状況 (Gmax25 の例)
Test specimen surface situation according to soundness index

農工研で開発された摩耗形状計測装置を使用した。この装置は測定ピッチ 1mm、高さ (凹凸) の測定が 0.1mm の精度で読み取れる。摩耗形状計測装置はレーザー変位計、データロガー、アンプと PC 上の計測ソフトが連結しており、測定値が直ちに PC 上に表示される。測定値は電圧 (V) でデータロガーに記録される。記録された値は 1.0V=50mm で換算する。

この装置を用いて 250mm × 250mm のコンクリート表面の凹凸を、10mm 間隔で設定されたライン上で測定した。

レーザー変位計はレールに固定されており、手動でレール上を移動させるとレーザー変位計が 1mm 移動する毎に変位計からコンクリート表面までの距離を測定する。**Fig.6** に供試体の測定箇所の模式図、**Fig.7** に摩耗形

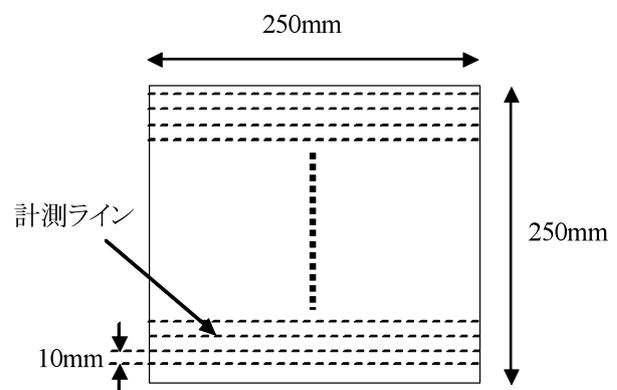


Fig.6 供試体の測定箇所の模式
Measurement points

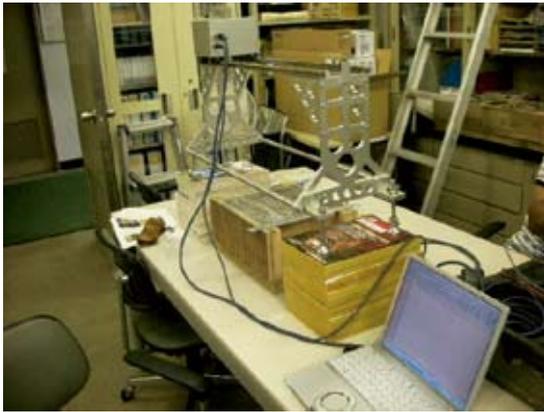
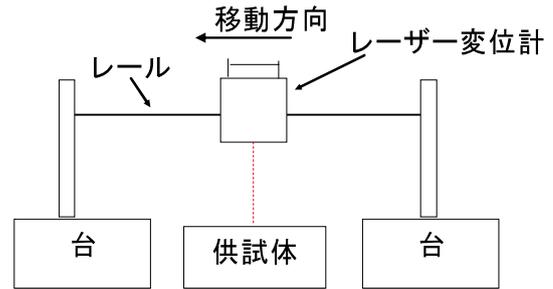


Fig.7 摩耗形状計測装置を用いた測定の様子及び模式図
State of measurement with a measurement device



状計測装置を用いた測定の様子及び模式図を示す。

3 算術平均粗さ (Ra) の算定

供試体の計測より求められた値を算術平均粗さ (Ra) に換算する考え方は、基本的には、II. 2 で示した算定方法と同じである。まず、一つのラインに対し、幅 1mm ピッチ、高さ 0.1mm 単位で測定移動方向に測定された値を mm 値に換算し、それらの値をラインの凹凸曲線とした。次に凹凸曲線の平均線を算出し、この平均線から凹凸曲線までの差の絶対値を合計し、これを幅 (250mm) で割った値をそのラインの算術平均粗さ (Ra) とした。

4 凹凸容量の算定

現場水路における劣化指標の検討として、当初のコンクリート表面から減少した容量 (凹凸容量) を算定した。現時点では劣化を表す指標として確立されていないが、将来的な活用を目的とし、供試体の測定結果を用いて凹凸容量の指標化の検討を行った。

レーザー変位計により測定された値を mm 単位に換算する。次に換算された値を基準面 (コンクリート打設面である枠の高さ) からの距離 y として求める。1mm ピッチで求められた距離 y を幅 1mm を代表する値として用い、 $y_1 \times 1\text{mm} + y_2 \times 1\text{mm} + \dots + y_{250} \times 1\text{mm} = 1$ 計測ラインの断面積 (A) として求めた。次にこの値をそのラインを中心とする直角方向 10mm 幅の平均断面とし、 $A_1 \times 15\text{mm} + A_2 \times 10\text{mm} + \dots + A_{23} \times 10\text{mm} + A_{24} \times 15\text{mm} = 1$ 供試体 (250mm \times 250mm の範囲) の凹凸容量として求めた。

なお、最初と最終のラインは 15mm \times 250mm 分を代表する断面積としている。Fig.8 に 1 ラインの凹凸断面計測の模式図を示す。

IV 供試体を用いた算術平均粗さ (Ra) の特性分析

1 算術平均粗さ (Ra) と健全度及び最大骨材寸法異なる最大骨材寸法 (4 種類) 毎に、5 つの健全度を

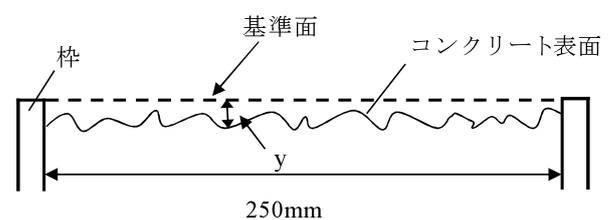


Fig.8 凹凸断面計測の模式図
Measurement of unevenness section

設定した計 20 種の供試体 (25cm \times 25cm) を作成した。それぞれの供試体につき 10mm ピッチで 24 のラインを設定し、1 供試体につき 24 個の算術平均粗さ (Ra) を求め、その平均を条件の異なる 1 供試体の代表値として検討を行った。

Fig.9 に、横軸に健全度、縦軸に算術平均粗さ (Ra) とした分布を示す。左図は最大骨材寸法別の回帰傾向を示し、右図は全データを対象とした場合の回帰傾向を示している。なお、健全度は離散値、算術平均粗さ (Ra) は連続値であるが、回帰分析手法を当てはめ検討を行った。

Fig.10 に、横軸に最大骨材寸法 (Gmax)、縦軸に算術平均粗さ (Ra) とした時の分布と回帰関係を示す。

Fig.9 からは、最大骨材寸法 (Gmax) 別の算術平均粗さ (Ra) と健全度においてリニアな相関があることが分かる。また、全データを用いた場合でも相関がよい (決定係数 $R^2=0.943$) ことが分かる。

一方、Fig.10 に示すように、健全度ごとの算術平均粗さ (Ra) は、Gmax の値によらずほぼ横ばいの傾向を示した。すなわち同じ健全度であれば、Gmax に関係なく算術平均粗さ (Ra) から健全度を判定できるものと考えられる。

供試体計測から求められた健全度に対する算術平均粗さ (Ra) の標準値を Table 3 に示す。

2 凹凸容量

供試体毎の凹凸容量 (250mm \times 250mm における容量)

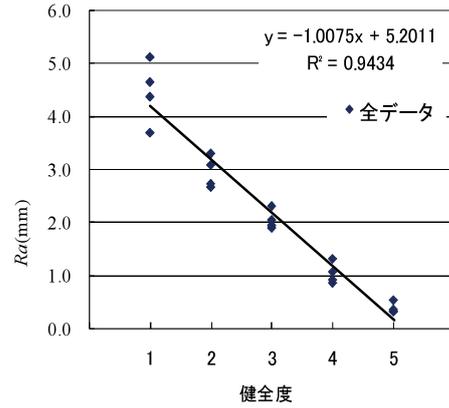
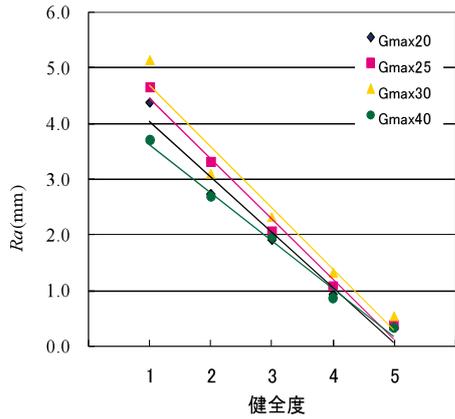


Fig.9 Ra と健全度の関係 (左: Gmax 別, 右: 全データ)
Relation between Ra and soundness index

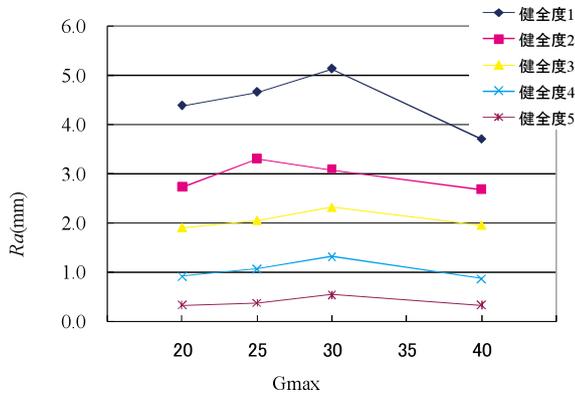


Table 3 供試体計測から求められた算術平均粗さ (Ra) の標準的な値
standard value of Ra

健全度	算術平均粗さ (Ra) (mm)
5	0.6 未満
4	0.6 ~ 1.7
3	1.7 ~ 2.7
2	2.7 ~ 3.7
1	3.7 以上

Fig.10 Gmax と Ra の関係 (健全度別)
Relation between Gmax and Ra

と健全度の関係を Fig.11 に示す。Fig.11 の左図は Gmax 毎の凹凸容量と健全度を表したものである。各 Gmax で、健全度と凹凸容量がリニアな関係にあることが分かる。Fig.11 の右図に示した全データを用いた健全度と凹凸容量の関係から、健全度と凹凸容量の傾向は強い相関関係

にあることが分かる。

Fig.12 に凹凸容量と算術平均粗さ (Ra) の関係を示す。各 Gmax 毎にリニアな関係にあり、全データを用いた凹凸容量と Ra の関係からは強い相関関係 (決定係数 $R^2=0.911$) があることが分かる。このことから算術平均粗さ (Ra) により、凹凸容量の推定が可能であると考えられる。

また、Fig.13 に示すように凹凸容量と Gmax の関係に

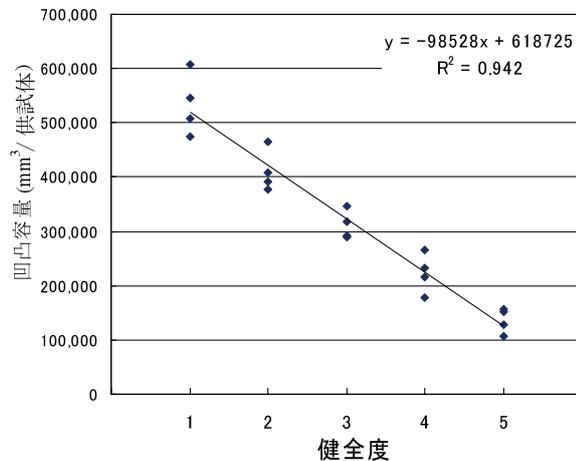
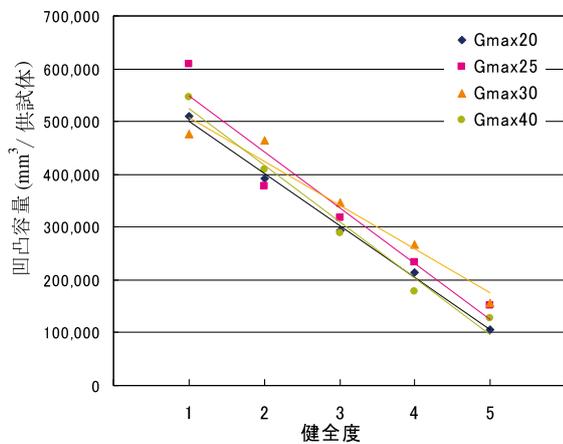


Fig.11 凹凸容量と健全度の関係 (左: Gmax 別, 右: 全データ)
Relation between quantity of unevenness and soundness index

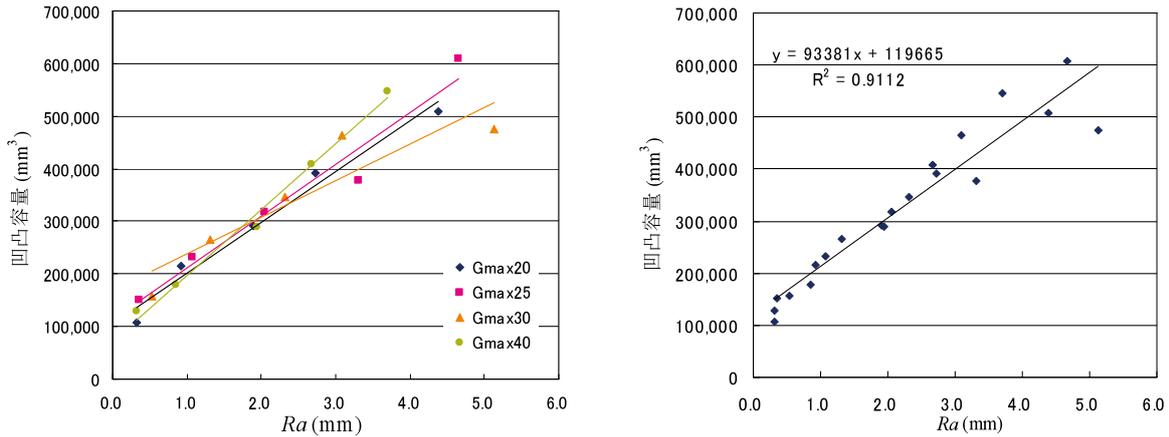


Fig.12 凹凸容量と Ra の関係 (左: Gmax 別, 右: 全データ)
Relation between quantity of unevenness and Ra

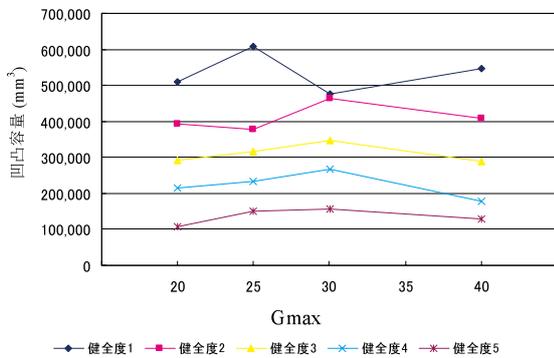


Fig.13 凹凸容量と Gmax の関係 (健全度別)
Relation between quantity of unevenness and Gmax

においては、どの健全度においても相関は見られなかった。凹凸容量が Gmax の大きさによらないで求まる量であると考えられる。

供試体計測から求められた健全度に対する、凹凸容量の標準値を Table 4 に示す。

Table 4 供試体から求められた標準的な値
standard value of quantity of unevenness

健全度	凹凸容量 (mm ³ /10cm ²)
5	28,000 未満
4	28,000 ~ 44,000
3	44,000 ~ 59,000
2	59,000 ~ 74,000
1	74,000 以上

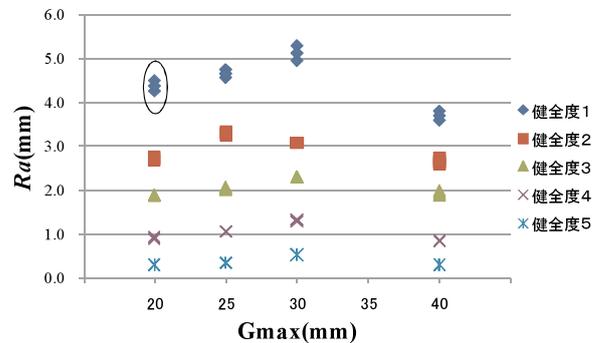


Fig.14 測定グループ別の Ra 分布
Ra distribution according to measurement group

3 計測間隔の検討

現場水路調査では、壁高約 1m の水路に対し 1cm ピッチで型取りゲージによる計測を行っているため、約 100 点もの計測データ収集が必要とされた。長大水路を対象にする場合、一か所の調査の迅速性及び効率化を図るためには、より少ないデータ数で一調査点の計測を行うことが求められる。このため計測間隔について検討を行った。

供試体を用いた解析では、1cm ピッチで測定しているため、一つの供試体につき 24 の測定ラインがある。この測定ラインを奇数ナンバーと偶数ナンバーの 2 つのグループ (以下奇数 G, 偶数 G とする) に分けた。Fig.14 に奇数 G, 偶数 G, 及び全データ (全 G とする) の健全度と Gmax 別の分布を示した。

例えば、Fig.14 中に楕円で囲んだ部分は、Gmax20 で健全度 1 の供試体の奇数 G, 偶数 G, 全 G の Ra 分布を示す。奇数 G, 偶数 G は 2cm 間隔でのデータ収集に相

当する。

これら 2 つの奇数 G と偶数 G のグループ間のデータ比較及びそれぞれのグループと全 G との比較を行った。比較には、等分散を仮定した 2 標本による検定 (*t* 検定) を用いた。

Gmax20 のグループで、奇数 G と偶数 G について *t* 検定を行った結果例を Table 5 に示す。*t* 検定は、奇数 G と偶数 G の組合せ、奇数 G と全 G の組合せ、偶数 G と全 G の組合せの 3 つの組合せで行った。この場合の帰無仮説は、例えば奇数 G の母平均と偶数 G の母平均は等しいであり、95% の信頼度の両側検定を行った。なお、別途等分散性の検定を実施し、グループ間の母分散は等しいとみなしてよいことを確認している。Table 5 に示

Table 5 *t* 検定例 (測定間隔)
T-test example (measurement interval)

G20 (12 データ比較) 健全度 1 t-検定: 等分散を仮定した2標本による 検定 奇数・偶数			G20 (12 & 24 比較) 健全度 1 t-検定: 等分散を仮定した2標本による 検定 奇数・全数			G20 (12 & 24 比較) 健全度 1 t-検定: 等分散を仮定した2標本による 検定 偶数・全数		
	変数 1	変数 2		変数 1	変数 2		変数 1	変数 2
平均	4.5027	4.2551	平均	4.5027	4.3789	平均	4.2551	4.3789
分散	0.4026	1.2095	分散	0.4026	0.7870	分散	1.2095	0.7870
観測数		12 12	観測数		12 24	観測数		12 24
プールされた分散	0.8061		プールされた分散	0.6627		プールされた分散	0.9237	
仮説平均との差異	0		仮説平均との差異	0		仮説平均との差異	0	
自由度	22		自由度	34		自由度	34	
t	0.6755		t	0.4301		t	-0.3643	
P (T<=t) 片側	0.2532		P (T<=t) 片側	0.3349		P (T<=t) 片側	0.3589	
t 境界値片側	1.7171		t 境界値片側	1.6909		t 境界値片側	1.6909	
P (T<=t) 両側	0.5064		P (T<=t) 両側	0.6698		P (T<=t) 両側	0.7179	
t 境界値両側	2.0739		t 境界値両側	2.3022		t 境界値両側	2.0322	

した結果としては、各パターンとも |*t* 値| (0.36 ~ 0.67) < *t* 境界値両側 (2.07 ~ 2.03) となり、帰無仮説は棄却されなかった。すなわち 2cm 間隔で調査した結果は、グループ間の母平均は等しいといえることができた。このような検定を各グループ間 40 ケースで行った結果、いずれも帰無仮説は棄却されない結果となり、2cm 間隔での調査が有効であることが示された。

4 調査幅の検討

現場で使用する型取りゲージ幅が 150mm であることから、250mm 幅で求めた算術平均粗さ (*Ra*) と 150mm 幅で求めた算術平均粗さ (*Ra*) の比較検討を行う。**Fig.15** に幅 250mm と幅 150mm で求めた供試体の平均算術平均粗さ (*Ra*) と健全度の関係を示す。比較のため、供試体で求めた 1 ラインデータ (250mm 幅) の中から、中間部のデータ (150mm) を抜き取り、等分散を仮定した 2 標本による検定 (*t* 検定) により比較検討を行った。

Fig.15 のデータを基にした *t* 検定により、幅 250mm

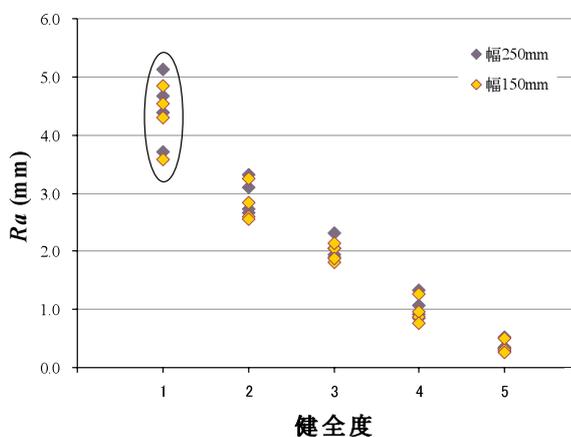


Fig.15 *Ra* と健全度の関係 (測定幅別)

Relation between *Ra* and soundness index (different measurement width)

のグループの母平均と幅 150mm のグループの母平均とは等しいとの帰無仮説のもと、95% の信頼度の両側検定を行った。なお、別途等分散性の検定を実施し、グループ間の母分散は等しいとみなして良いことを確認している。

Fig.15 中に楕円で囲んだデータを対象に、検討結果例を **Table 6** に示す。この結果からは、各パターンとも |*t* 値| (0.5128 ~ 1.7538) < *t* 境界値両側 (2.0129) となり帰無仮説は棄却されなかった。すなわち 150mm 幅で調査した母平均は、250mm 幅で測定した母平均と等しいといえる。このような検定を各グループ間 20 ケースで行ったところ、全て帰無仮説は棄却されない結果となり、150mm 幅で十分な調査結果が得られる有効性が示された。

5 最大高さ (*Ry*) の評価指標性の検討

粗さを表す値として、最大高さ (*Ry*) がある。これは粗さ曲線の山頂部と谷底線の間隔を粗さ曲線の縦倍率の方向に測定したものと定義される (**Fig.1**)。

Fig.16 に供試体の平均値より求められた最大高さ (*Ry*) と健全度 (*Gmax* 別) 及び最大高さ (*Ry*) と健全度 (全データ) との相関を示す。これから最大高さ (*Ry*) は、健全度とリニアな関係であるとともに、強い相関関係を示している (決定係数 $R^2=0.891$) ことが分かった。

次に最大高さ (*Ry*) の評価指標としての適性の検討を行った。検討には、算術平均粗さ (*Ra*) の調査幅の検討で用いたものと同様の手法を用いた。すなわち、供試体で求めた 1 ラインデータ (250mm 幅) の中から、中間部のデータ (150mm) を抜き取り、*t* 検定 (等分散を仮定した 2 標本による検定) により比較検討を行った。**Fig.17** に幅 250mm と幅 150mm で求めた供試体の最大高さ (*Ry*) と健全度の関係を示す。

20 のケースで分析を行った結果、14 のケースで帰無

Table 6 t 検定例 (測定間隔)
t-test example (measurement interval)

t- 検定：等分散を仮定した 2 標本による検定 G20-1			t- 検定：等分散を仮定した 2 標本による検定 G25-1		
	変数 1	変数 2		変数 1	変数 2
平均	4.3789	4.5296	平均	4.6565	4.2963
分散	0.7870	0.7578	分散	0.3623	0.6498
観測数	24	24	観測数	24	24
プールされた分散	0.7724		プールされた分散	0.5061	
仮説平均との差異	0		仮説平均との差異	0	
自由度	46		自由度	46	
t	-0.5942		t	1.7538	
P (T<=t) 片側	0.2776		P (T<=t) 片側	0.0431	
t 境界値片側	1.6787		t 境界値片側	1.6787	
P (T<=t) 両側	0.5553		P (T<=t) 両側	0.0861	
t 境界値両側	2.0129		t 境界値両側	2.0129	

t- 検定：等分散を仮定した 2 標本による検定 G30-1			t- 検定：等分散を仮定した 2 標本による検定 G40-1		
	変数 1	変数 2		変数 1	変数 2
平均	5.1283	4.8525	平均	3.6992	3.5891
分散	0.3756	0.6484	分散	0.4473	0.6587
観測数	24	24	観測数	24	24
プールされた分散	0.5120		プールされた分散	0.5530	
仮説平均との差異	0		仮説平均との差異	0	
自由度	46		自由度	46	
t	1.3353		t	0.5128	
P (T<=t) 片側	0.0942		P (T<=t) 片側	0.3053	
t 境界値片側	1.6787		t 境界値片側	1.6787	
P (T<=t) 両側	0.1883		P (T<=t) 両側	0.6105	
t 境界値両側	2.0129		t 境界値両側	2.0129	

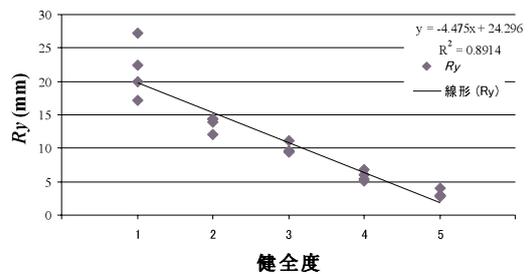
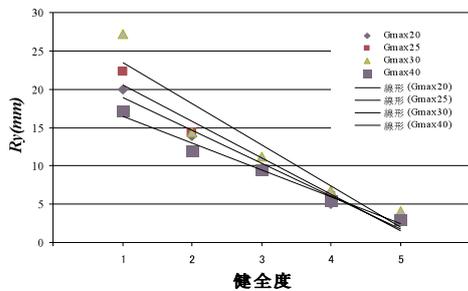


Fig.16 Ry と健全度の関係 (左：Gmax 右：全データ)
Relation between Ry and soundness index

仮説が棄却された。すなわち、多くのケースで、150mm 幅で調査した母平均と 250mm 幅で測定した母平均が等しいといえることができないと判断された。これは最大高さ (Ry) の定義が凹凸の最小値と最大値の幅という点から、測定区間内の一地点で大きな凹凸が測定されることにより最大高さ (Ry) の値が大きく変動する特徴を持つという点からも理解される。

すなわち供試体を用いた健全度と最大高さ (Ry) の t 検定結果からは、Ry は測定幅の違いにより異なる値を示す傾向が強いことが分かった。このため、現場で用いる指標としての適性を考えた場合、測定幅の違いにより同程度の

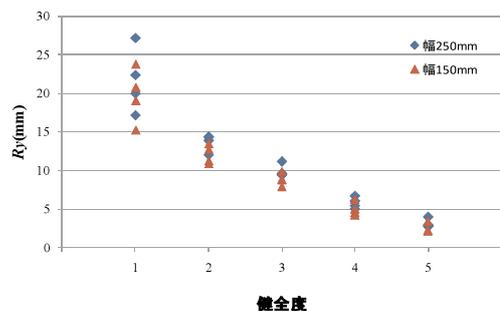


Fig.17 Ry と健全度の関係 (測定幅別)
Relation between Ry and soundness index (different measurement width)

傾向を示せないことから、 R_y は算術平均粗さ (R_a) に比べ評価指標としての安定性が劣っていると判断された。このため現場で使用する際には、調査地点の選定において制約があることが確認された。

V 結 言

供試体を用いた算術平均粗さ (R_a) の特性について明らかになった点を整理する。水路壁面の凹凸を評価する場合、算術平均粗さ (R_a) と健全度評価や凹凸容量は供試体を用いた検討でもリニアな関係にあることが示された。一方、供試体を用いた分析結果からは、算術平均粗さ (R_a) は測定幅や骨材寸法 (G_{max}) の大きさに左右されずに値を求められることが分かった。このことは、150mm幅で計測すれば調査対象水路の骨材寸法によらず算術平均粗さ (R_a) が適用可能であることを示すものである。更に基準断面 (水路新設時の表面) が不明である水路の凹凸容量 (すり減り量) についての推定を可能にするものと考えられる。

この評価手法を用いることにより、健全度評価者の熟練度の違いから生ずる評価結果のばらつきを極力小さくすることが可能となるとともに、異なった地域間での水路壁面凹凸評価を定量的に比較することが可能となる。

以上のように、壁面の凹凸を定量的に評価する手法は、型取りゲージを用いた簡易な壁面診断手法でも有効と考えられる。目視調査と重要ポイントで行う算術平均粗さ (R_a) を用いた定量的な評価を組み合わせることにより、迅速かつ高精度な壁面の凹凸の評価ができるものと考えられる。すなわち改修等が必要となる以前の段階で、水路壁面の凹凸状況を簡単にかつ実用的な精度で定量的に評価し、健全度を判定することができる。また長大水路の区間ごとあるいは局所のすり減り状態も把握できることから、定期的な調査により劣化の進行度が定量的に把握できる。

農業用水路 (RC) における壁面診断の場で活用されることを期待する。

参考文献

- 1) 土木学会 (2007) : コンクリート標準示方書 (維持管理編), p.1-228
- 2) 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之, 加藤 敬 (2007a) : 農業用鉄筋コンクリート製開水路の壁面の凹凸評価手法, H19 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.312-313
- 3) 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之, 加藤 敬 (2007b) : 農業用水路における劣化予測手法について, ARIC 情報 86 号, p.20-26
- 4) 本間新哉, 北村浩二, 加藤 敬 (2008a) : 水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察, 農工研技報 207, p.1-11
- 5) 本間新哉, 北村浩二, 加藤 敬 (2008b) : 農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法 H20 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.202-203
- 6) 石村貞夫 (1998) : 統計解析のはなし, 東京図書, p.1-340
- 7) 石村貞夫 (1999) : すぐわかる統計解析, 東京図書, p.1-204
- 8) 加藤 敬, 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之 (2008) : 開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み, 農工研技報 (技術資料), p.183-193
- 9) 北村浩二, 本間新哉, 今泉眞之, 加藤 敬 (2007a) : インフラ資産のアセットマネジメントに関する研究レビューと農業水利施設を対象とした研究の方向性, 農村工学研究所技報 第206号, p.83-104
- 10) 北村浩二, 本間新哉, 今泉眞之, 加藤 敬 (2007b) : 農業用水路 (RC) の劣化予測曲線と LCC 算定システムの構築, H19 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p.314-315
- 11) 北村浩二, 本間新哉, 加藤 敬 (2008a) : 農業水利施設へのインフラ会計導入の必要性と諸課題, 農工研技報 207, P.13-23
- 12) 北村浩二, 本間新哉, 今泉眞之, 加藤 敬 (2008b) : 農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測, 農業農村工学会論文集 254, p.39-50
- 13) 北村浩二, 本間新哉, 加藤 敬 (2008c) : 農業用水路における壁面粗化による劣化予測の定量的評価, 農業農村工学会誌 76 (9), p.35-40
- 14) 美濃眞一郎, 大内 毅 (2005) : 今後の農業水利施設の維持管理の方向, 農土誌 73 (10), p.19-22
- 15) 森 丈久, 森 充広, 渡嘉敷勝, 中矢哲郎 (2008) : 農業水利施設の構造機能診断のための調査手法, 農業農村工学会誌 76 (3), p.19-22
- 16) 長束 勇, 石神暁郎, 石村英明, 渡嘉敷勝, 森 充広 (2004) : コンクリート構造物の補修技術の現状と農業水利分野に適用する際の留意点, 農工研技報 202, p.183-196
- 17) 財)日本水土総合研究所 (2006) : 水利施設の機能評価, 「水土の知」を語る (性能設計を考える その3), p.95-116
- 18) 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, p.1-86
- 19) 高橋順二 (2006) : IT を活用した農業水利システムの高付加価値化, JACEM43, p.5-12

Evaluation technique about the unevenness of open canal wall surface made by steel reinforced concrete for agriculture

HONMA Shinya, KITAMURA Koji, and KATO Takashi

Summary

The main objective of this paper is to clarify characteristics of arithmetical mean roughness (Ra) evaluating of canal wall surface with test specimen.

The points that became clear were shown below.

- (1) The result of this analysis indicates that the soundness index evaluation had a linear relation with arithmetical mean roughness (Ra).
- (2) It was shown that the quantity of unevenness had a linear relation with arithmetical mean roughness (Ra).
- (3) It was indicated that the arithmetical mean roughness (Ra) was not affected by the greatest dimension of the aggregate.
- (4) It was suggested that the estimate of the quantity of unevenness of the canal wall surface was possible in arithmetical mean roughness (Ra).

It was shown that this evaluation technique reduced the dispersion of rated results of open canal wall surface.

Keywords : agriculture irrigation canal (RC), arithmetical mean roughness (Ra), test specimen, quantity of unevenness, soundness index

資源作物生産特性データベースの整備

清水夏樹*・柚山義人*・中村真人*

目 次	
I 緒 言	29
II データベースの作成方法	30
1 対象作物	30
2 データベースの設計	30
3 データソース	30
III 各資源作物の生産特性データベース	30
1 サトウキビ	30
2 テンサイ	31
3 ばれいしょ	32
4 かんしょ	32
5 飼料用トウモロコシ	33
6 飼料稲	34
7 飼料米	34
8 ソルガム	36
9 ナタネ	36
10 ヒマワリ	38
11 大豆	39
IV データベースの活用例	40
1 資源作物生産の評価視点	40
2 飼料稲栽培の経済性の試算	41
3 飼料稲栽培のエネルギー収支の試算	41
V 結 言	41
参考文献	42
Summary	44
Appendix	45

I 緒 言

バイオエタノールやバイオディーゼル燃料（以下、まとめてバイオ燃料という）の原料となる資源作物の生産は、耕地の有効活用や新産業の創出など農村地域の活性化の観点からも期待され、各地で栽培試験が進められつつある。資源作物には、バイオ燃料の原料として利用可能な成分の含有量や含有形態、作物の高収量性に加えて、省力かつ低コスト、低環境負荷で生産可能なことが要求される。これまで各方面で培われてきた栽培技術体系を活かし、これらの要求項目を満たした資源作物の栽培が望まれるが、国内での資源作物の生産特性についての情報の蓄積は十分ではない。

ここでいう生産特性とは、ある栽培技術体系のもとで作物を生産した場合の生産性や経済性、環境への影響等をいう。本報では、作物栽培時に投入された資材の量や燃料、労力、収穫物量・成分等を把握することにより、バイオ燃料の原料としての生産性（収穫部分が食用と異なる場合もある）や、生産コストと販売収入、生産に必要な労力を、国内で生産可能と考えられる資源作物についてデータベース化した。作物の生産性においては、圃

場や栽培施設、農業機械等の物理的なインフラも重要な要件であるが、本報ではこれらのインフラについては作物生産の現場にあるという前提の下、流動的に生産に投入される資材や燃料についてのデータを収集した。また、販売収入については、現時点ではバイオ燃料の原料としての価格が設定されていないため、食飼料用作物としての価格のデータを求めた。本データベースは、将来、バイオ燃料の原料としての資源作物の栽培を農業経営の中で検討する際に、生産ポテンシャルや経営収支、設備・施設等の整備の必要性を検討する基礎資料とすることができる。

一般的な作物については、土地生産性や労働生産性の向上などについて作物ごとに多くの情報が蓄積されてきている。また、昭和53年度から農林水産技術会議事務局において実施された「農林水産業における自然エネルギーの効率的利用技術に関する総合研究（グリーンエネルギー計画）」（例えば、農林水産技術会議事務局（1990）など）や、農林水産技術情報協会（1996a～h）の高効率な農業経営におけるエネルギー消費の適正化に向けた調査において、主要な作物、生産技術体系における必要エネルギー量の調査が実施されてきた経緯がある。さらに近年では、上田・天野（2006）及び上田（2008）が資源作物の生産・利用について試算を行っており、本報でも同じデータソースを用いているものもある。上田（2008）と異なる本報のねらいは、資源作物の生産特性データベースの整備方法や情報源情報を詳細に示すことにより、生産者等が資源作物の生産を検討する際に、用

* 農村総合研究部資源循環システム研究チーム

平成20年11月5日受理

キーワード: バイオ燃料, 資源作物, データベース, 農業生産資材, 農業機械

いるデータを自分で判断できることにある。部分的にでも現場のデータを用いることができれば、より実態に近い予測と検討が可能となる。

本報では、国内で生産可能な10種類の資源作物についてデータベースを整備した。作物別のデータベースは、単位面積当たりの栽培に係る農業生産資材（種、苗、肥料、農薬等）投入量、営農に要する労力、作業に必要とされる農業機械燃料等、収穫物量・成分に関する情報をとりまとめ、Appendixに掲載した。

本研究は、文部科学省の平成17～19年度科学技術振興調整費による「バイオマス利活用システムの設計・評価手法」の一環として実施した。

II データベースの作成方法

1 対象作物

対象とした資源作物は、サトウキビ、テンサイ、ばれいしょ、かんしょ（でんぷん原料用）、飼料用トウモロコシ、イネ、ソルガム（以上、バイオエタノール用）、ナタネ、ヒマワリ、大豆（以上、バイオディーゼル燃料用）である。このうちイネは、わら部分の収量が高く地上部全体の飼料化を目的とする品種（以下、飼料稲）と、特に籾（子実部分）の収量が高く籾の飼料化を前提とした品種（以下、飼料米）とに分けて整理した。

2 データベースの設計

データベースは、①資源作物生産におけるINPUT、②資源作物生産におけるOUTPUT、③資源作物生産の農業経営情報に分けて構築した。①は、作物を生産するために投入された農業生産資材、農業機械による消費燃料のデータである。②は、バイオ燃料の原料としての収穫物の量と成分のデータである。③は、バイオ燃料としての資源作物の生産を農業経営面からみた情報であり、1年間（1作）にかかる必要労力、想定される販売収入及び費用のデータである。以下に詳細を述べる。

a 資源作物生産におけるINPUT

1ha当たりの資源作物生産1作に投入される農業生産資材について、種類別にまとめて投入量及び各資材の単価を整理した。また、文献及び調査結果に基づいて、作物栽培に係る各作業で使用了農業機械の燃料（ガソリン、軽油、灯油、電力等）消費量を積算した。燃料の価格については、平成18年12月の全国平均値（農林水産省大臣官房統計部、2007c）に統一した。生産におけるINPUTに示されているデータは、生産に係るエネルギー収支の算出に用いやすいように1作当たりに投入される個々の生産資材について算出しており、経営全体としての経済性を検討する目的で利用する場合は、農業経営情報に示した生産に係る費用のデータを参照されたい。また、前述したように、圃場や栽培施設、農業機械等の物理的なインフラ整備に係る初期投入は所与の条件とした。

b 資源作物生産におけるOUTPUT

1ha当たりの湿潤（生）収量及び乾物率と収穫物の成分である。作物の成分は、バイオエタノール化を想定した作物については、糖またはでんぷんまたはセルロースとヘミセルロースの含率、バイオディーゼル燃料化を想定した作物については油脂含率を示した。また、作物生産における物質循環の観点から資源作物生産による環境への影響を評価できるように、炭素（以下、Cと記す）、窒素（以下、N）、リン（以下、P）、カリウム（以下、K）の乾物当たり含有率を調査・整理した。飼料稲については籾部分と稲わら、飼料米については玄米、稲わら、もみ殻に分けてデータを整備した。また、各作物の単価は、食用（飼料用）作物として利用されている作物（部分）について、食用（飼料用）としての現時点での価格とした。

c 資源作物生産の農業経営情報

資源作物生産の農業経営情報として、各資源作物の栽培1ha当たりの延べ労働時間、収穫物の販売収入、及び生産に係る費用について統計資料及び調査値から整理した。ほとんどの資源作物の作付け・収穫は、国内では年1回と考えられるため、データは年を単位とし、参考のため栽培日数を記した。延べ労働時間は、1作当たり、1haの栽培で実施された各作業に要する時間を積み上げ、「時間人」で表した。収穫物の販売収入は、②で求めた収量に作物単価を乗じて求めた。生産に係る費用については、農林水産省大臣官房統計部による農業経営統計調査（生産費）の物財費の費用区分に従い、種苗費、肥料費、農業薬剤費、光熱動力費、その他の諸材料費、土地改良及び水利費、賃借料及び料金、物件税及び公課諸負担、建物費、自動車費、農機具費、生産管理費のデータとした。これらのうち、建物費、自動車費、農機具費については、それぞれ建物や土地改良設備、軽トラック等の自動車、トラクター・コンバイン等の大農機具の減価償却費と修繕費の合計値であり、物理的なインフラ設備のランニングコストとして示した。労働費については延べ労働時間との関連性を把握するため、作物別の賃金単価を農業経営統計調査から算出し、延べ労働時間に乘じた値を労働費とした。

3 データソース

データは主として文献からの引用により入手した。次章では、作物別に引用元及び算出根拠を詳述した。飼料米及びソルガムについては、2007年に千葉県内において実施した資源作物としての栽培実証試験の値をデータとして示した。

III 各資源作物の生産特性データベース

1 サトウキビ

a 生産におけるINPUT

サトウキビは、国内では沖縄県（全生産量の56%）

及び鹿児島県（全生産量の44%）の2県のみで生産されており、平成17年度の生産面積は21,300ha、収穫量は1,214,000tである（平成17年産作物統計）。サトウキビの作型は、夏植え（沖縄県：7～8月植え付け、翌々年1～3月収穫）、春植え（同：1～2月植え付け、翌々年1～3月収穫）、株出し（同：収穫後→翌年1～3月収穫）に分けられ、地域の栽培環境（土壌・気候・水利条件等）に応じて異なった作型が採用されている。全国平均の単収は、農林水産省大臣官房統計部（2007a）で、夏植えが6,950kg/10a、春植えが5,290kg/10a、株出しが5,460kg/10aとなっており、夏植えが最も高い。そこで本データベースでは、沖縄県の夏植えを対象にデータを収集した。

サトウキビ（夏植え）の生産に係る農業生産資材の投入（使用）量、農業機械の燃料消費量は、農林水産技術情報協会（1996a）をもとに算出した。算出対象とした作業は、耕起－砕土－採苗－調苗－植え付け－施肥－土壌害虫防除－除草－培土（追肥）－防除－培土（追肥）－防除－収穫である。収穫物は圃場内の道路側に集積され、製糖会社の責任において工場まで運搬されるので圃場から工場までの収穫物運搬に係る燃料等は計上していない。

また、農業生産資材の単価は、サトウキビ苗については農林水産省大臣官房統計部（2007b）の種苗費を投入重量で除した値とした。肥料、農薬の単価については、農林水産省大臣官房統計部（2007c）及び沖永良部さとうきび栽培暦（知名町ら、2006）に示された値を引用した。

b 生産における OUTPUT

農作物としてのサトウキビ茎の収量は、上述の6,950kg/10aを1haあたりに換算した。乾物率、乾物重量当たりのC、N、P、K含率は、収穫されたサトウキビ茎部分の実測値である。また、バイオ燃料への変換対象物質は糖とし、茎中に15%前後のショ糖を含む（日本エネルギー学会編、2002）ことから乾物重量当たりの糖含有率を53.0%とした。サトウキビでは、廃糖蜜からエタノールを生産すると仮定したため、生産物の単価は砂糖原料としての原料価格である。よって生産物単価は、農家が製糖工場に持ち込んだ工場買い取り価格（農林水産省農産園芸局、2000）とした。

c 資源作物生産の農業経営情報

延べ労働時間は、農林水産技術情報協会（1996a）より、「さとうきび（沖縄・夏植え）」の作業体系調査から、耕起－砕土－採苗－調苗－植え付け－施肥－土壌害虫防除－除草－培土（追肥）－防除－培土（追肥）－防除－収穫に係る労働時間を積算した。

栽培日数は、沖縄県サトウキビ栽培指針（沖縄県農林水産部、2006）より、栽培日数525日～600日の中間値とした。

製品販売収入は砂糖原料としての収入と同じであり、収量に工場買い取り価格を乗じて求めた。生産に係る

費用は農業経営統計調査（農林水産省大臣官房統計部、2007b）より引用し、労働費については、同統計調査より賃金単価を1,128円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

2 テンサイ

a 生産における INPUT

テンサイは、国内では北海道のみで生産されており、平成17年度の作付面積は67,500ha、収穫量は4,201,000tである（平成17年産作物統計）。

テンサイの生産に係る農業生産資材の投入（使用）量、農業機械の燃料消費量は、農林水産技術情報協会（1996b）をもとに算出した。引用元のデータは、北海道道東、十勝平野の大規模畑作地帯を対象とした調査結果である。算出対象とした作業は、播種－間引き－苗床管理（温度・水管理、床ずらし、防除）－堆肥散布（運搬・積込・散布）－融雪促進－耕起－砕土－整地－施肥（運搬・作業）－定植（運搬・作業）－雑草防除（運搬・作業）－中耕－手取り除草－病害虫防除（運搬・作業）－収穫（茎葉処理・収穫作業）である。実際の生産現場では、圃場までの距離が多様であると考えられるため、輸送に係るものは含めなかった。

また、農業生産資材の単価は主に農林水産省大臣官房統計部（2007c）から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格を単価とした。コーティング種子については該当する消費財がなかったため、北海道農政部農業改良課（2000）の種苗費20,774円/haの値を用いた。また、堆肥価格については、農林水産省大臣官房統計部（2007f）より「たい肥きゅう肥評価額」1,967円/10aを1haあたりの投入量で除して重量当たりの単価とした。

b 生産における OUTPUT

テンサイの収量は、農林水産省大臣官房統計部（2007d）より引用した。乾物率は、財団法人十勝圏振興機構（2005）より引用し23.0%とした。乾物重量当たりのC含率は、農業技術研究機構編（2001）の値から中村・柚山（2005）の簡易計算法を用いて算出した。N、P、K含率は、尾和（1996）より引用した。また、バイオ燃料への変換対象物質は糖とし、収穫物（生）の糖度17.1度（品目横断的経営安定対策におけるテンサイの糖度基準値）を平均値と見なして乾物重量当たりの糖含有率を74.4%とした。

生産物単価は、現時点では、糖作物のエタノール原料としての価格は設定されておらず、また、糖原料価格と同水準でなければエタノール原料としての生産・利用は難しいことから、糖原料としての価格（農林水産省大臣官房統計部、2007f）を引用した。財団法人十勝圏振興機構（2005）でも、テンサイをエタノール原料とした運搬・エタノール変換の事業化を試算・検討しており、エタノール原料としてのテンサイ価格は製糖工場の買い取

り価格と同様としている。

c 資源作物生産の農業経営情報

テンサイ栽培に係る延べ労働時間は、農林水産技術情報協会(1996b)より、耕起-砕土-整地-施肥-植付(運搬・作業)-雑草防除-中耕-中耕培土-病虫害防除-茎葉処理-収穫に係る作業に要した時間を積算し、また、播種以降は肥料や農薬の運搬作業時間も含む。また、栽培日数は、北海道立道南農業試験場(2002)より播種から収穫までの日数(239~250日)の中間値とした。製品販売収入は、収量に製糖工場の買い取り単価を乗じて引用した。

テンサイの生産に係る費用は、農林水産省大臣官房統計部(2007e)から引用した。労働費については、同統計調査より賃金単価を1,544円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

3 ばれいしょ

a 生産における INPUT

国内のばれいしょ生産量のうち、その78%が北海道で生産されている。そのため、ばれいしょの生産に係る農業生産資材の投入(使用)量、農業機械の燃料消費量は、農林水産技術情報協会(1996c)より、北海道道東、十勝平野の大規模畑作地帯の調査結果を引用した。この調査対象とされたばれいしょは、でんぷん原料用のばれいしょ(品種名:トヨシロ)である。算出対象とした作業は、耕起-砕土-整地-施肥-植付(運搬・作業)-雑草防除-中耕-中耕培土-病虫害防除-茎葉処理-収穫である。この中で、種芋運搬、種芋消毒、浴光育芽、種芋切断及び収穫物運搬は除外している。

また、農業生産資材の単価は、主に農林水産省大臣官房統計部(2007c)から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格を単価とした。

b 生産における OUTPUT

原料用ばれいしょの収量は、農林水産省大臣官房統計部(2007g)より引用した。乾物率は、香川(2003)の「じゃがいも 塊茎、生」の水分値から算出した。乾物重量当たりのC、N、P、K含率は、尾和(1996)より引用した。また、バイオ燃料への変換対象物質はでんぷんとし、収穫物(生)に含まれるでんぷん含有率17.4%(品目横断的経営安定対策におけるばれいしょでんぷん含有率基準値)を平均値と見なして乾物重量当たりのでんぷん含有率を86.1%とした。生産物単価は、テンサイと同様、エタノール原料としての価格は設定されていないこと、また現在のデンプン原料としての価格と同程度でなければ農業経営面でエタノール原料生産は難しいと考えられることから、平成17年10月に農林水産省生産局から発表された「でん粉原料用ばれいしょ」の原料基準価格13,580円/t(平成18年産)を単価として仮定した。

c 資源作物生産の農業経営情報

ばれいしょ生産に係る延べ労働時間は、農林水産技術

情報協会(1996c)より、耕起から収穫までの作業を対象として積算したものである。また、肥料や農薬の運搬作業時間を含む。栽培日数についても、同文献の耕起(4月下旬)から収穫(9月上旬~10月上旬)の日数を引用した。

製品販売収入は、上記で仮定した単価に1ha当たりの収量を乗じて求めた。

ばれいしょ生産に係る費用は、農林水産省大臣官房統計部(2007g)によった。この調査値は、野菜としてのばれいしょではなくデンプン原料用ばれいしょについて整理されたものである。労働費は、同統計調査値から賃金単価を1,584円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

4 かんしょ

a 生産における INPUT

かんしょは、平成17年産の作付面積が全国で40,800ha、収穫量は1,053,000tであり、収穫量の約40%が鹿児島県で生産されている。そのため、かんしょの生産に係る農業生産資材の投入(使用)量、農業機械の燃料消費量は、農林水産技術情報協会(1996d)より、九州南部の原料用かんしょの調査値を基にデータを整理した。算出対象とした作業は、苗床作業(堆肥運搬、苗床づくり、種いも運搬、種いも伏込、苗床管理)-石灰運搬・散布-堆肥運搬・散布-施肥-耕耘-作畦-採苗-移植-雑草防除-追肥-中耕・培土-病虫害防除-つる処理-掘り取り-収集・積載である。収穫後、工場まで運搬するための燃料は含んでいない。

また、農業生産資材等の単価は、主に農林水産省大臣官房統計部(2007c)から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格を引用した。堆肥については、農林水産省大臣官房統計部(2007f)から、の「たい肥きゅう肥評価額」885円/10aから算出した。種いもについても同統計から「種苗評価額」3,087円/10aとして単価を算出した。

b 生産における OUTPUT

原料用かんしょの収量は、農林水産省大臣官房統計部(2007h)より引用した。乾物率は、香川(2003)の「さつまいも 塊根、生」の水分値から算出した。乾物重量当たりのC含率は、中村・柚山(2005)より、N、P、K含率は、尾和(1996)より引用した。バイオ燃料への変換対象物質はでんぷんとし、収穫物(生)中のでんぷん含有率を24.3%(日本エネルギー学会編、2002)として乾物重量当たりのでんぷん含有率を71.7%とした。生産物単価は、ばれいしょと同様の考え方にに基づき、平成17年10月に農林水産省生産局から発表された「でん粉原料用かんしょ」の取引指導価格31,030円/t(平成18年産)を単価として仮定した。

c 資源作物生産の農業経営情報

かんしょ生産に係る延べ労働時間は、農林水産技術情

報協会（1996d）の苗床作業（苗づくり等）から収穫・積載までの作業に要した時間を積算した。しかし、農林水産省大臣官房統計部（2007h）では57.1時間/10aとされており大きな差があることから、データを利用する際には実態に即した値を確認する必要がある。

栽培日数は、農林水産技術情報協会（1996d）より、移植（5月上旬～6月中旬）から収穫（10月下旬～11月下旬）の中間的な日数とした。

製品販売収入は、上記で設定した単価に1ha当たりの収量を乗じて求めた。

かんしょの生産に係る費用は、農林水産省大臣官房統計部（2007h）によった。労働費は、同統計調査値から賃金単価を1,268円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

5 飼料用トウモロコシ

a 生産における INPUT

トウモロコシから生産されるコーンスターチ（でんぷん）は、繊維工業・製紙工業・鋳造工業で使われる他、食品工業・製薬工業等でも用いられている。また、副産物であるグルテンミール・グルテンフィード・ドライジャーム・コーンスチープリカーは、家畜飼料配合原料、肥料原料、食用油原料、また、抗生物質やイーストなど発酵生産物用の培地原料として使用用途は広い。しかし、工業用トウモロコシは国内ではほとんど生産されておらず（平成16年度版食料需給表によれば生産量は0である）、今後も資源作物としての生産は見込めないと考えられる。そこでデータベースには、飼料用（青刈り）トウモロコシの値を用いた。飼料用トウモロコシは、生食・加工用品種に比べ、約1.3倍の播種密度で栽培可能で多収である。また、有効積算温度約2,000℃で二期作が可能であり、倒伏に強いいため機械化体系に適している、施肥量は50%程度で十分な収量が得られる、などの特性を持つ。国内では、酪農経営の中で、作物全体（ホールクロップ）を収穫したものをサイレージ化して保存・利用することが一般的であることから、生産に係る農業生産資材の投入（使用）量、農業機械の燃料消費は、農林水産技術情報協会（1996e）より、とうもろこし（北海道・耕地型酪農）をもとに算出した。本文の調査対象は、北海道十勝、網走地方の畑作・酪農地帯で、飼養頭数50頭の比較的規模の大きい経営をモデルとしている。算出対象とした作業は、石灰・過リン酸石灰運搬－石灰散布－堆肥積み込み・運搬・散布－耕起－砕土－鎮圧－施肥・播種（運搬・作業）－除草剤散布－収穫である。また、農業生産資材の単価は、農林水産省大臣官房統計部（2007c）から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格を単価とした。また、堆肥、種子の単価は、農林水産省大臣官房統計部（2006a）に示されている10a当たりのきゅう肥、種子の価格をそれぞれ投入量から換算して求めた。

b 生産における OUTPUT

子実だけでなくホールクロップを利用する飼料用トウモロコシの収量は、北海道農政部農業改良課（2000）より引用した。乾物率は、農業技術研究機構編（2001）より糊熟期の飼料用トウモロコシの値を引用した。また、乾物重量当たりのC、N含率は、農業技術研究機構編（2001）の値から中村・柚山（2005）の簡易計算法を用いて算出した。P、K含率は、尾和（1996）より引用した。バイオ燃料への変換対象物質は、飼料用トウモロコシから得られる成分として子実部分からでんぷんが、また茎部分からセルロースとヘミセルロースが考えられる。飼料用トウモロコシの品種によって収穫対象や得られる成分は異なるが、データベースには両成分の含率を示した。でんぷんの含率は、農業技術研究機構編（2001）の可溶性無窒素物の値とした。セルロースの含率は、中村・柚山（2005）をもとに農業技術研究機構編（2001）に記載されている粗繊維と同量とした。また、ヘミセルロースについても同様に、農業技術研究機構編（2001）に記載されているNDF（中性デタージェント繊維）からADF（酸性デタージェント繊維）を減じた量として算出し、乾物重量当たりのセルロース・ヘミセルロースの合計含率を45.6%とした。いずれの成分も、飼料用トウモロコシの品種によって値が異なることが考えられるため、注意が必要である。生産物の単価については、農林水産省大臣官房統計部（2007c）に記載されている「飼料 とうもろこし」の全国平均価格（バラ1t当たり43,700円）から、サイレージ化の費用を控除するため、飼料用トウモロコシ（黄熟期）の乾物中TDN含有量を70.5%（農業技術研究機構編，2001）として算出した。

c 資源作物生産の農業経営情報

飼料用トウモロコシ栽培に係る延べ労働時間は、農林水産技術情報協会（1996e）より、石灰・過リン酸石灰運搬・散布から収穫までに係る作業に要した時間を積算した。ここには、肥料等の運搬時間は含むが、飼料として収穫物を運搬しサイロ詰めする労働時間は含んでいない。また、栽培日数は、北海道農政部農業改良課（2000）より、「サイレージ用とうもろこし（一般栽培）」の堆肥散布（4月下旬～5月中旬）～収穫（調製のぞく）（9月下旬～10月上旬）の日数の中間値とした。製品販売収入は、上記で計算した乾物1kg当たりの価格に収量を乗じて求めた。

飼料用トウモロコシの生産に係る費用は、北海道農政部農業改良課（2000）を中心として引用した。本文では、建物費、自動車費や農機具費については調査対象から除外しているため、これらの減価償却費は不明である。また、土地改良及び水利費、賃借料及び料金、物件税及び公課諸負担、生産管理費についてもデータがなかった。労働費については、農林水産省大臣官房統計部（2006a）から賃金単価を1,685円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

6 飼料稲

a 生産における INPUT

近年、ホールクロップサイレージ（稲発酵粗飼料）用に省力・低コストで高い収量を得るための稲品種が開発されてきており、わが国の飼料自給率を高めるため、転作田・休耕田での栽培が推奨されている。本節では、ホールクロップサイレージ用に地上部全体を収穫することを前提としたわら収量の高い品種の稲を「飼料稲」として取りあげる。

飼料稲の作付面積は、平成11年から平成15年まで拡大してきており、全国で5,000haを上回ったが、平成16年には転作制度の見直し等により、4,375haとなった。

飼料稲の生産に係る農業生産資材の投入（使用）量、農業機械の燃料消費量は、通常の食用稲生産のデータの中から高効率・省力化を前提とした湛水直播による栽培のデータを引用した。すなわち、農林水産技術情報協会（1997）より、水稻（東北・湛水直播・集団経営）をもとに算出、引用した。本文献のデータは、東北地方の水田単作地帯での移植と湛水直播を組み合わせた栽培体系であるが、この中から移植に係る農業生産資材、燃料等を除外し、また、収穫、飼料としての調製は、稲を購入する畜産農家が行うと仮定した。算出対象とした作業は、種子予措－施肥－耕起－コーティング代かき－播種（直播）－雑草防除－病虫害防除－水管理－秋耕である。

各作業で投入（使用）された農業生産資材の単価は、主に農林水産省大臣官房統計部（2007c）から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格とした。種子（籾）は、農林水産省大臣官房統計部（2006b）から、種籾（自給）全国平均評価額である167円/10aを1ha当たりの生産に投入した籾の量に換算して、重量当たりの単価を求めた。塩水選用の食塩は、市場価格を参考に設定した。直播用の籾コーティング用薬剤は、大分県農業技術センター（2002）から1kg当たりの価格を算出した。

b 生産における OUTPUT

飼料稲の収量は、ホールクロップサイレージ専用品種として近年育成された品種（全国飼料増産行動会議ら、2006）から、「クサホナミ」の値を引用した（農研機構作物研究所、2002）。また、収量、乾物率、生産物成分は、籾部分（籾付きの玄米）と稲わらをそれぞれ別に求めた。稲わらは、クサホナミの風乾全重2,140kg/10aから玄米重量及びバイオマス情報ヘッドクォーター（東大総研、2004）で公開されている換算率0.323を玄米収量に乗じて算出したもみ殻・くず米の重量を除いた重量とした。籾部分の乾物率は、香川（2003）から玄米の値を用いた。稲わらの乾物率は、農業技術研究機構編（2001）から引用した。籾部分のC含率は、農業技術研究機構編（2001）の玄米組成量を基に中村・柚山（2005）の簡易計算法で

算出した。N、P、K含率は、尾和（1996）から引用した。稲わらのC、N、P、K含率は、中村・柚山（2005）から引用した。バイオ燃料への変換対象物質は、籾部分ではでんぷんとし、香川（2003）から湿潤重量当たりの含有量を乾物重量当たりに換算してデンプン含率を求めた。稲わらに含まれる変換対象物質はセルロースとヘミセルロースとし、各成分の含有量を実測し合計して含率を求めた。生産物単価は、湛水直播によるホールクロップサイレージ用稲の生産事例を調査した既往研究（土田、2005）より、1kg当たり17円とした。また、稲わらの価格は、農林水産省大臣官房統計部（2007c）から全国平均価格とした。しかし、稲わらに含まれるセルロースからのエタノール生産については世界中で高収率化に向けた研究が進められており、稲わら価格は向上する可能性がある。

c 資源作物生産の農業経営情報

飼料稲の栽培に係る延べ労働時間は、農林水産技術情報協会（1997）より該当する作業に係る労働時間を積算した。栽培日数も同資料より、種子予措（3月～4月）～収穫時期（9月）の日数の中間的な日数とした。製品販売収入は、上記で引用した玄米及び価格に1ha当たりの収量を乗じて求めた。生産に係る費用は、湛水直播によるホールクロップサイレージ用稲の生産事例を調査した既往研究（土田、2005）より、入手できた費目についてのみ記載した。本文献では、種苗費、肥料費等については変動費としてまとめられていたため、これらの費目の合計値を示した。建物費、自動車費等についても同様であるが、建物農機具の減価償却費と修繕費とは分けて記載されていたため、参考のために掲載した。労働費については、延べ労働時間に農林水産省大臣官房統計部（2007i）から得られた賃金単価1,621円/時間人乗じて求めた。

7 飼料米

a 栽培試験の概要

現在、セルロース系原料からのバイオエタノール変換技術の開発が進められているものの、直近にバイオエタノール原料となりうるのはでんぷん資源である。そこで、特に籾（子実）部分の生産量が高いが食味等の観点から主食用とは区別される飼料米を取りあげ、生産特性データベースを整備した。資源作物としての多収量品種の生産例はないため、2007年に千葉県北東部の20aの圃場において飼料米を試験栽培し、栽培期間中に実施した作業ごとに、投入した農業生産資材（種、苗、肥料、農薬、土壌改良材、被覆資材等）の種類・量・価格、農業機械種類・使用時間・消費燃料、作業人員数・作業時間を調査した。これらの作業は、一般的な農業機械・技術体系を採用して実施した。

登熟後、圃場全体を収穫して乾燥・調製（脱穀・籾すり）した玄米の重量を記録し、一部は成分分析、もみ殻・

稲わらを含めた地上部全体の収量調査のためにサンプリングし、分析に供した。

栽培対象とした飼料米は、多収量であること、耐倒伏性に優れていること、耐病害性に優れていること、栽培試験地の条件（気候・土壌・作付体系等）に適していること、を条件として、農研機構作物研究所において育成開発されたモミロマン（旧系統名：関東飼 226 号）を選定した。Fig.1 に、飼料米栽培に係る作業の種類と実施時期を示す。栽培に係る作業は、①耕うん～稲刈り・脱穀の本田作業、②もみ消毒～育苗管理の苗準備作業、③収穫後の籾の乾燥・籾すり作業の3つに分けられる。本栽培試験の特徴は、粗放的で低コストな栽培を想定したため施肥は元肥のみであること、防除は最低限の回数・薬品散布量としたこと、元肥として山田バイオマスプラントで生産したメタン発酵消化液（農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」, 2007）を用いたことである。

b 生産における INPUT

2007 年の栽培試験の記録を基に、飼料米の生産に係る農業生産資材の投入（使用）量、農業機械の燃料消費を 1ha 当りに換算してデータを整備した。また、農業生産資材の単価は、農家が購入したときの価格を投入単位当たりとしたものである。種子（籾）は、試験研究機関から譲渡されたものであるため実質価格がないが、今後一般的に流通することを想定し、飼料稲と同様、農林水産省大臣官房統計部（2006b）から、種籾（自給）全国平均評価額である 167 円/10a を 1ha 当たりの生産に投入した籾の量に換算して、重量当たりの単価を求めた。また、メタン発酵消化液については、現在は無料であることから単価は設定していない。ヘリコプターによる防除で空中散布に用いられた農薬の価格については、液剤（カスミンバリダシン）については、千葉県農林水産航空事業対策協議会（1997）から農家売り渡し価格 20L につき 76,280 円の価格を参考に単価を設定した。また、空中散布に用いられた粉剤（MR. ジョーカー粉剤 DL）については、2006 年度に同様の栽培記録調査（ただし作物は異なる）を実施した際に、同粉剤の価格を 1,008

円/3kg と調査していたため、その値を単価として引用した。軽油、ガソリン等の燃料は、他の作物と同様、農林水産省大臣官房統計部（2007c）から引用した。

c 生産における OUTPUT

飼料米の収量は、坪刈りによる収量調査結果を基にした。玄米収量は、屑米を含めたものとした。また、風乾後の稲わら、もみ殻の収量も調査した。これらの収穫物のそれぞれについて、乾物率と C, N, P, K の含量を分析し、データを整備した。また、バイオ燃料への変換対象物質は、玄米はでんぷんとし、香川（2003）から湿潤重量当たりの含有量を乾物重量当たりに換算して求めた。稲わら、もみ殻に含まれる変換対象物質はセルロースとヘミセルロースとし、各成分の含有量（乾物重量当たり）を実測し合計した。生産物単価は、千葉県内でのヒアリング結果から 1kg 当たり 70 円（補助金等は含まない実質価格）とした。

d 資源作物生産の農業経営情報

飼料米の栽培に係る延べ労働時間は、各作業における作業時間×組作業人員で調査・記録した。10a 当たりの労力は、①耕うん～稲刈り・脱穀の本田作業では 46.1 時間人、②もみ消毒～育苗管理の苗準備作業では 5.3 時間人、③収穫後の籾の乾燥・籾すり作業では 5.0 時間人であり、合計で 56.4 時間人/10a となったことから、1ha 当りに換算して引用した。

①の本田作業のうち、施肥（消化液のポンプによる散布）作業については、実験的に行った作業であり、作業用機器が不備であることや作業者に経験がないことから多くの労力を要した結果となった。また、稲刈り・脱穀については、台風で倒伏した部分があったため、倒伏修正に 4 名×2 時間の計 8 時間人の労力を要した。以上の 2 点については、通常の栽培において抑制できる労力である。本データについては、単年度の試験成績によるものであるため、延べ労働時間は想定していたよりも大きな値となった。栽培日数は、栽培試験の田植えから収穫までの日数とした。

製品販売収入は、調査結果から得られた収量に、飼料としての価格を乗じて求めた。生産に係る費用は、各農

前年	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
		①本田作業								
9月 秋耕	上旬 田起こし	3/2 畦塗り 3/15,16 3/19,20 元肥施用	3/26 粗起こし	4/4 耕耘・碎土	4/15 代かき	4/26 田植え	5/7 防除（除草剤）	7/24 畦畔除草（草刈機） ヘリによる防除	畦畔除草（草刈機）	10/6 収穫・脱穀
		3/10 種子消毒 3/12 漬種	3/28 播種	育苗			水管理			
		②苗準備作業								
									③乾燥・籾すり	

Fig.1 飼料米栽培に係る作業の種類と実施時期
Schedule of operation for Feed Grain Rice Cultivation

業生産資材、燃料の価格から算出した。そのため、生産費調査からデータを引用した他の作物と比較する際には、注意する必要がある。その他の諸材料費は育苗培土、被覆培土の合計購入金額(1ha当たり)、土地改良及び水利費は、灌漑用水費用として10a当たり2,878円を土地改良区に、維持管理費用として10a当たり700円を地区の水田管理委員会に支払っていることから、この合計金額を1ha当りに換算した。賃借料及び料金は、航空防除負担金の1,600円/10aである。人件費は、延べ労働時間に農林水産省大臣官房統計部(2007i)から得られた賃金単価1,621円/時間人を乗じて求めた。

8 ソルガム

a 栽培試験の概要

国内のほとんどの地域で栽培可能な飼料作物であるソルガムは、高いバイオマス生産量が得られること、また、茎中に含まれる糖分量が多い品種があることなどバイオエタノールの原料として適していると考えられる。そこで、特に糖含量の高い品種のソルガムを2007年に千葉県北東部の16aの圃場において試験栽培し、生産特性データベースを整備した。栽培対象としたソルガムは、①資源作物として有用であること、②栽培試験地の条件(気候・土壌・作付体系等)に適していることの2点を前提とし、③糖分含量(ブリックス)が高いソルゴー型ソルガムであること、④収量が安定していること、⑤病害虫に耐性があり倒伏しにくいこと、といった条件を加えいくつかの品種を候補とした。その中から、栽培試験地である千葉県において奨励品種であることから、雪印種苗の高糖分ソルゴー(FS501)を選択した。千葉県内では、飼料用トウモロコシとの混播をして8月中旬に1番草(トウモロコシが主)を収穫、11月に2番草としてソルガムを収穫する体系が一般的であるが、本栽培試験では、ソルガムの単播とした。

試験対象圃場では、2006年12月に前作のハウレンソウを収穫した後に耕起、播種前に再度耕起がなされており、2007年5月にソルガムの播種を行った。7月に、展開葉数6~8葉に生育したところで、圃場の南側のみ、山田バイオマスプラントで生成したメタン発酵消化液を追肥として施用した。8月、9月に圃場周辺の草刈りをした以外は粗放栽培としたため、防除・灌水ならびに見回りは行っていない。2007年11月に完熟期と判断し、収量調査を行った。栽培期間中、各実施作業で投入した農業生産資材(種、苗、肥料、農薬等)の種類・量・価格、農業機械種類・使用時間・消費燃料、作業員数・作業時間を調査した。

b 生産における INPUT

2007年の栽培試験の記録を基に、ソルガムの生産に係る農業生産資材の投入(使用)量、農業機械の燃料消費を1ha当りに換算してデータを整備した。メタン発酵消化液については、現在は無料であることから単価は

0円とした。軽油、ガソリン等の燃料は、他の作物と同様、農林水産省大臣官房統計部(2007c)から引用した。消化液の運搬に利用した車両の燃料の一部にバイオガスが利用されているが、山田バイオマスプラントで生産したガスであるため価格は設定されていない。

c 生産における OUTPUT

ソルガムは、播種後、生長ステージに応じてサンプリングを行い、資源作物として最適な収穫ステージを模索した。その結果、完熟期(2007年では播種後172日)の乾物収量と糖度が共に高かったため、生産特性データベースには、完熟期の収量調査及び成分分析結果をデータとして引用した。ただし、P、Kの含率については、中村・柚山(2005)から引用した。バイオ燃料への変換対象物質として、糖(グルコース)およびセルロースとヘミセルロースの2つの成分を取りあげ、データベースに記載した。いずれも各成分の含有量を実測し、セルロースとヘミセルロースについては含有量を合計して乾物重量当たりの含率を示した。

生産物単価は、飼料用トウモロコシと同等と考え、ソルガム(乳熟期)の乾物中TDN含量を56.3%(農業技術研究機構編, 2001)として粗飼料原料としての価格を算出した。

d 資源作物生産の農業経営情報

ソルガムの栽培に係る延べ労働時間は、各作業における作業時間×組作業員で調査・記録した。ソルガムの播種から収穫までに係る労力は、合計で12.8時間人/10aであったが、この他に、メタン発酵消化液の追肥準備(運搬用コンテナ洗浄、消化液の夾雑物除去、コンテナへの充填作業)及び片付け(追肥作業に用いたポンプ、機械の洗浄)に係る労力(3.2時間人)が含まれる。栽培日数は、播種から完熟期の収穫までの日数とした。製品販売収入は、調査結果から得られた1ha当たりの収量に、粗飼料原料としての価格を乗じて求めた。

生産に係る費用は、各農業生産資材、燃料の価格及び賃金から把握できたものを記載した。例えば、1ha当たりの種子代金、各農業機械が消費した燃料費の合計値を求めた。人件費は、延べ労働時間に、栽培試験を実施した地域の農家に対するヒアリング調査から平均的な賃金単価1,500円を乗じて求めた。ソルガムについても飼料米同様、生産費調査結果からデータを引用した他の作物と比較する際には注意する必要がある。

9 ナタネ

a 生産における INPUT

ナタネは油脂資源として古くから各地で作付されてきたが、農産物自由化と畑作生産衰退の傾向により栽培は急速に減退した。収益性がやや低いことから、二毛作や2年3作の形で栽培されてきた例が多く、栽培的意義として、①冬作のため、裏作に入れて二毛作ができる、②落花・落葉により土地が肥沃になる、③土壌が団粒、膨

軟化される、④密植栽培により雑草が抑制されるなどの効果がある。近年では、景観作物として、また食の安全・健康志向が高まる中で国産・契約栽培による食用油への需要が見られることなどから、なたね栽培への期待が高まっている。

品種は、在来種から各地で改良された品種まで多様であるが、近年注目されているのは、多量摂取により心機能に障害を引き起こすとされるエルシン酸を低減させた品種である。無エルシン酸品種として開発されたアサコなたね（南東北向け）やキザキノなたね（北東北向け）、ななしきぶ（西日本向け）があるが、さらに、ダブルローと呼ばれる無エルシン酸、低グルコシノレート品種のキラリボシが東北農業研究センターによって育成されている。一方、エネルギー作物としての多収品種については、国内では育種研究例は見られなかった。多収のための栽培技術としては、追肥の効果について明らかになっているが、大幅な多収に結びつく要素は見られず、遺伝子組み換えによる品種開発も求められると考えられる。

なたねの生産に係る農業生産資材や機械の利用については、いくつかの地域で施肥基準等は示されているものの、作業体系全体をまとめたデータはない。そのため、いくつかの資料をもとに、肥料投入量や作業に使用する農業機械を仮定し、モデルとなる作業体系を作成した。

Table 1 は、なたねの栽培に係る各作業（堆肥散布から収穫まで）の時期、農業生産資材、組入人員数及び労働時間、使用農業機械（大きさ・性能・作業能率から燃料消費量を算出）を示している。堆肥及び播種時の肥料、追肥の量は青森県農業生産対策推進本部（1999）に記載されている標準施肥量から算出した。播種量は、青森県横浜町農業協同組合（2006）の値を引用した。各作業で使用する農業機械の多くは作業内容から判断して農林水産技術情報協会（1996f）の小麦（北海道・秋まき）を参考に設定し、60PS及び20PSのトラクタを用いることを仮定した。ただし、堆肥散布（運搬）・（積込）については、農林水産技術情報協会（1996b）の同作業の値を用いた。また、施肥・播種及び収穫については、北海道

Table 1 なたね栽培における作業体系モデル
Model of Operation Sequence for Rapeseed Cultivation

作業名	堆肥散布 (運搬)	堆肥散布 (積込)	堆肥散布 (作業)	耕起	砕土・整地	施肥・播種	中耕・除草	追肥	収穫
作業内容、圃場までの距離等主な前提条件と資材量	畜産農家から圃場へ往復 40km (4 往復), 堆肥散布量 15t/ha					化成肥料 (4-12-8) 1000kg, 種子 8kg/ha	2 回	硫安 (21% N) 460kg	
作業実施時期	8 月下旬	8 月下旬	8 月下旬	9 月上旬	9 月上旬	9 月上旬	4 月および 7 月	4 月	7 月上旬
組作業人員 (人)	1	1	1	1	1	1	1 × 2	2	2
使用トラクタ (ps)		60	60	60	60	60	20	20	60
作業機	ダンプ トラック 4t	フロント ローダ	マニユア スプレッダ 3t	ボトムプラウ 18inch × 2 連	ディスク ハロー 20inch × 26	ベルト式 点播機	ロータリ カルチベータ 2 畦	ブロード キャスト 200L	汎用コンバイン CA700 (ローク ロップヘッド)
作業幅 (m)			2.40	1.38	2.30	2.40	1.20	6.00	2.00
作業速度 (m/S)			1.38	1.24	1.38	0.90	0.97	1.38	0.83
機械燃費 (L/h)			3.50	9.00	9.00	9.80	3.00	2.00	10.00
作業能率	0.20L/km	5.4L/h	71.9a/h	31.5a/h	93.4a/h	70a/h	31.5a/h	163.9a/h	39a/h
機械利用時間 (h/ha)		1.65	1.39	3.17	1.07	1.43	3.17	0.61	2.56
延べ労働時間 (h/ha)	1.65	1.65	1.39	3.17	1.07	1.40	6.34	1.20	5.12
燃料消費量 (L/ha) ※軽油のみ	-	8.90	4.87	28.53	9.63	13.72	19.02	1.20	25.60
データ根拠	作業能率は A より、機械 利用時間は B より引用		作業幅～延べ 労働時間は、 D よりマニユ アスプレッダ (横ピタ 3t) の値を引用	作業幅～延 べ労働時間 は、D より ボトムプラウ (18 × 2) の値を引用	作業幅～延 べ労働時間 は、D より ディスクハ ロー (20 × 26) の値を 引用	作業幅～延 べ労働時間 は C より引用、た だし機械燃費 は D よりロー タリーシー ター直装 10 条の値を引用	作業幅～延 べ労働時間 は D より中 耕・管理機 (ロータリー カルチベータ ・2 条) の 値を引用	作業幅～延 べ労働時間 は、D よりブ ロードキャ スタ (遠心 直装 200L) の値を引用	作業幅～延 べ労働時間 は、D より引 用、ただし 作業速度は C より汎用コ ンバインの 値を引用

注) 表中のデータ引用元は以下のとおりである。

A：農林水産技術情報協会（1996b）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月）p.69-77

B：農林水産技術情報協会（1996f）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.45-50

C：北海道立中央農業試験場農業機械部機械科（1996）：なたねの品種選定・栽培法と機械化体系に関する試験成績概要書（平成 8 年 1 月）

D：農研機構中央農業総合研究センター作業技術研究部（1996）：農業機械農作業データベース、

<http://www2.fm.a-u-tokyo.ac.jp/sakugi/noritu/>,（最終確認日 2008 年 10 月 30 日）

立中央農業試験場農業機械部機械科(1996)から、ナタネに適した機械を想定し、機械燃費等不明な数値については農研機構中央農業総合研究センター作業技術研究部(1996)を参考に作業幅や作業速度、作業能率から延べ労働時間、燃料消費量を算出した。

この表を基に、ナタネの生産に係る農業生産資材の投入(使用)量、農業機械の燃料消費量を算出した。算出対象とした作業は、堆肥散布(運搬・積込・散布作業)－耕起－碎土・整地－施肥・播種－中耕・除草－追肥－収穫である。各作業で投入(使用)された農業生産資材・燃料の単価は、主に農林水産省大臣官房統計部(2007c)から種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格とした。堆肥価格は、米生産に用いられるものと同様と仮定し、農林水産省大臣官房統計部(2006b)の「たい肥・きゅう肥評価額」(投入原単位10a当たり42.1kg, 評価額210円)より算出した。種子価格は、ナタネの生産が盛んな青森県横浜町農業協同組合(2006)の単価を引用した。

b 生産における OUTPUT

青森県横浜町農業協同組合(2006)より収量を10a当たり300kgとした。乾物率は、上田・天野(2006)より、乾物収量2.7t/ha、生重量3.1t/haから算出して87.1%としたが、C含率については調べることができなかった。N, P, K含率については、尾和(1996)から引用した。また、バイオ燃料への変換対象物質は油脂とし、奥山ら(1994)より引用した子実の含率から、乾物重量当たりの含率を算出した。生産物単価は、青森県横浜町の農業協同組合において設定された食用油原料としての買い取り価格(平成13年産)とした(青森県横浜町農業協同組合, 2006)。

c 資源作物生産の農業経営情報

ナタネ生産に係る延べ労働時間は、青森県農業生産対策推進本部(1999)のデータを引用した。北海道立中央農業試験場農業機械部機械科(1996)では19.1時間人/ha, また、Table 1からは23.0時間人/haと算出できたが、栽培面積や技術体系により異なることが推測されることから、入手した値の最大値とした。栽培日数は、青森県農業生産対策推進本部(1999)の耕起・播種(9月上旬)～収穫(7月下旬)から日数を求めた。製品販売収入は、上記で引用した生産物単価に収量を乗じて求めた。

ナタネの生産に係る費用は、入力項目全てに対するデータがないため、青森県横浜町農業協同組合(2006)を参照するとともに、青森県横浜町において農業協同組合及び生産者に対してヒアリング調査を実施し、計上可能なものについてのみ記載した。種苗費は、種子代金が10a当たり304円、肥料費は、肥料代金が10a当たり3,294円であることから、1ha当たりの費用を算出した。農業薬剤費については、病虫害防除の登録薬剤がないため防除を実施していないため計上されていない。光熱動力費は、参照した資料中に記載されていた農機具費(油代、

その他)の値とした。その他の諸材料費、土地改良及び水利費についてはデータがなかった。賃借料及び料金には、乾燥調整料金(4,800円/10a)、紙袋代・保管料、手数料などの出荷経費(6,888円/10a)を計上した。横浜町では、収穫を農業機械銀行のオペレータ委託により実施している農家もあり、コンバイン利用・運搬料を含めた収穫作業委託料金は8,500円/10aである。この料金を含めると、1ha当たりの賃借料及び料金は201,880円となり、収穫に要する労働時間(5.1時間人)を減ずることができる。また、収穫作業に用いる汎用コンバインの軽油消費量25.6Lも生産におけるINPUTから減ずることができる。さらに今回データを入手することができなかったが、作業委託することにより、作付農家においては、自動車、農機具費についても低コスト化できることになる。労働費は、賃金単価を大豆と同等とみなし、農林水産省大臣官房統計部(2007j)から1,469円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

10 ヒマワリ

a 生産における INPUT

ヒマワリは、種子から得られる油糧を目的にロシア等ヨーロッパを中心に栽培されてきた。国内では油脂原料としての栽培はほとんど行われていないが、景観作物としても人気が高いことから地域活性化と結びつけた特産物として島根県斐川町等で栽培されつつある。しかし、ヒマワリの生産に係る農業生産資材や農業機械の利用については、作業体系全体についてまとめられたデータが存在しないため、北海道農政部農業改良課(2000)を基に、不明な値については他の資料を参照して作業体系のモデルを作成した(Table 2)。

Table 2のうち、堆肥散布量については農山漁村文化協会編(2001)から投入量を算出した。播種量については複数の資料に共通する目標値7,000本/10aに対して2粒ずつ播種すると仮定して140,000粒/haとし、農山漁村文化協会編(2001)よりヒマワリ品種の一つである「サンホワイト101」の千粒重(46.8g)を基に必要な種子重量を算出した。また播種時に施肥基準より算出した化成肥料(N:P:K=6:10:10)を1t施用すると仮定した。

この表をもとに、ヒマワリの生産に係る農業生産資材の投入(使用)量、農業機械の燃料消費量を算出した。算出対象とした作業は、堆肥散布－耕起－碎土・整地－施肥・播種－中耕・除草(3回)－除草・間引き－収穫・運搬－茎処理である。各作業で投入(使用)された農業生産資材・燃料の単価は、主に農林水産省大臣官房統計部(2007c)から種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格とした。堆肥価格は、農林水産省大臣官房統計部(2006b)から、たい肥・きゅう肥評価額(投入原単位10a当たり42.1kg, 評価額210円)より算出した。種子価格は、北海道農政部農業改良課(2000)の収支総括表(油用ひまわり)より種苗費の

Table 2 ヒマワリ栽培における作業体系モデル
Model of Operation Sequence for Sunflower Seed Cultivation

作業名	堆肥散布		耕起	砕土・整地	施肥・播種	中耕・除草			除草・間引き	収穫・運搬	茎秆処理
作業内容、主な前提条件と資材量	全面散布 堆肥 30t		耕深 20cm	2 回かけ	種子 6,552kg 普通化成肥料 1t	3 回			手取り		裁断拡散
作業実施時期	前年秋		5月上旬～ 5月中旬	5月上旬～ 5月中旬	5月上旬～5月 中旬	5月下旬, 6月上旬 及び中旬			6月下旬～ 7月上旬	9月上旬～中旬	9月中下旬
組作業人員 (人)	1		1	1	2	1	1	1	2	2	1
使用トラクタ (PS)	80	70	80～	80	50	50				自走	60
作業機	フロント ローダ	マニユアス プレッダ 5t	リバーシブル プラウ 16inch × 3 連	ロータリー ハロー 2.6m	真空播種機 4 条 4t トラック (肥料運搬)	カルチベータ 4 畦				汎用コンバイン ひまわり用ヘッド 装着, 収穫子 実運搬トラック	チョップ
作業幅 (m)	3.0		1.2	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6		2.0	2.1
作業速度 (km/h)	4.0		6.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0		2.0	6.0
機械燃費 (L/h)	9.0	8.0	15.0	15.0	6.0	5.8	5.8	5.8		8.0	8.6
機械利用時間 (h/ha)	0.2	2.1	1.70	2.20	1.50	0.83	0.83	0.83		3.60	0.90
延べ労働時間 (人時間/ha)	2.3		1.70	2.20	3.10	0.83	0.83	0.83	30.0	4.10	0.9
燃料消費量 (L/ha) ※軽油のみ	1.80	16.80	25.50	33.00	9.00	4.83	4.83	4.83	0.00	28.80	7.74
データ根拠	作業幅～延べ労働時間は A より, 堆肥施用量は B より引用		作業幅～延べ労働時間は A より引用。ただし機械燃費は B の値を参考に算出	作業幅～延べ労働時間は A より引用。ただし機械燃費は B の値を参考に算出	作業幅～延べ労働時間は A より引用	作業幅～延べ労働時間は A より引用			延べ労働時間は A より引用	作業幅～延べ労働時間は A より引用	作業幅～延べ労働時間は A より引用

注) 表中のデータ引用元は以下のとおりである。

A: 北海道農政部農業改良課 (2000): 北海道農業生産技術体系第2版 (平成12年12月), p.64-65

B: 農山漁村文化協会編 (2001): ヒマワリの機械化栽培作業技術体系, 転作全書・3 雑穀, p.932-939, 農山漁村文化協会, 東京

値を基に算出した。

b 生産における OUTPUT

ヒマワリ子実の収量は、北海道農政部農業改良課 (2000) より、乾物率は北海道立中央農業試験場 (1986) より引用した。C, N, P, K 含率についてはデータが記載された文献を調査できなかった。また、バイオ燃料への変換対象物質は油脂とし、日本エネルギー学会編 (2002) より子実の含油率を引用し、乾物重量当たりの含有率を算出した。生産物単価は、北海道農政部農業改良課 (2000) より産地事例価格を引用した。

c 資源作物生産の農業経営情報

ヒマワリ生産に係る延べ労働時間は、北海道農政部農業改良課 (2000) より収穫作業を含んだ延べ労働時間を引用した。Table 2 は同資料に基づいて作成しているため、延べ労働時間は同値である。栽培日数については、Table 2 に示した耕起 (5月上旬～中旬) から茎秆処理 (9月中下旬) までの日数とした。製品販売収入は、上記で引用した生産物単価に収量を乗じて求めた。

ヒマワリの生産に係る費用は、入力項目全てに対するデータがないため、北海道農政部農業改良課 (2000) より把握できるもののみ記載した。労働費は、賃金単価を大豆と同等とみなし、農林水産省大臣官房統計部 (2007j) から 1,469 円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

11 大豆

a 生産における INPUT

農林水産省生産局生産流通振興課 (2005) によれば、平成17年度概算の大豆の国内生産量は 22 万 5,000 t であり、輸入される 418 万 1,000 t に比して非常に少なく、また国内産で製油用に消費される大豆はほとんどない。よって、本報で引用したデータは、豆腐や納豆、味噌、醤油等の食品用として生産された大豆生産に係るものであることに留意する必要がある。

国内で生産される大豆の約 4 分の 1 は北海道で生産される。しかし本報では、国内の多くの地域を対象とした大豆生産の可能性を検討するため、大豆の生産に係る農業生産資材の投入 (使用) 量、農業機械の燃料消費量については、農林水産技術情報協会 (1996g) より、関東以西の個別経営の作業体系をもとに算出した。本調査で対象とされたモデルは、関東以西の平坦地から中山間に位置し、稲・麦 2 毛作体系が可能な地域であり、区画整備 (20～30a) された圃場を想定している。算出対象とした作業は、肥料散布-耕うん-種子消毒-播種-除草剤散布-中耕・培土-病虫害防除-収穫-乾燥-脱粒であり、収穫物の運搬及び選別・袋詰めは算出対象外とした。

農業生産資材等の単価は、主に農林水産省大臣官房統

計部 (2007c) から、種類や商品名を基に該当する成分に最も近いものの全国平均価格を引用した。

b 生産における OUTPUT

大豆の収量は、農林水産省大臣官房統計部 (2007j) より、171kg/10a を 1ha 当りに換算した。乾物率は、香川 (2003) の「だいで全粒・国産、乾」の水分値から算出した。乾物重量当たりの C, N 含率は、中村・柚山 (2005) の実測値から、P, K 含率は、尾和 (1996) から引用した。また、バイオ燃料への変換対象物質は油脂とし、日本エネルギー学会編 (2002) より大豆子実の含油率を引用し、乾物重量当たりの含有率を算出した。

生産物単価は、農林水産省大臣官房統計部 (2007j) の 10a 当たり粗収益と 10a 当たり収量から算出した。本節の冒頭でも述べたとおり、国内産の大豆が油糧原料として用いられることはほとんどない。油糧原料としての大豆価格は食品用よりも低く、またバイオ燃料の原料用としての単価はさらに抑えられる必要があると考えられる。

c 資源作物生産の農業経営情報

大豆生産に係る延べ労働時間は、農林水産技術情報協会 (1996g) より、肥料散布から乾燥、脱粒までの作業を対象として積算した。栽培日数も同作業の実施時期 (肥料散布 (6月10日～6月25日)～収穫・乾燥・脱粒 (10月下旬～11月上旬)) の日数とした。

製品販売収入は、上記で求めた生産物単価に収量を乗じて求めた。

大豆生産に係る費用は、農林水産省大臣官房統計部 (2007j) によった。労働費は、同統計調査値から賃金単価を 1,469 円/時間人とし、延べ労働時間を乗じて求めた。

IV データベースの活用例

1 資源作物生産の評価視点

資源作物の生産を検討する際には、農業経営の観点から生産性、経済性が重視される。また、環境への影響の観点からエネルギー消費や投入資材についても考慮すべきである (清水・柚山, 2007)。さらに、地域内に賦存する有機性資源を資源作物生産に必要な肥料やエネルギーとして利用していくことが望まれるが、農地や水域等を含めた物質循環の観点から検討する必要がある (農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」, 2006)。

経済性に立脚した場合、農業経営者にとっては、資源作物の販売収入が資源作物生産に係る費用を上回らなければ、経営は成り立たず、持続的な生産は不可能である。ただし、資源作物をバイオ燃料の原料として利用する立場 (燃料変換に係る事業者等) からみれば、原料としての価格はより低いことが望まれる。既に述べたとおり現時点では、バイオ燃料の原料としての市場価格は国内で

は設定されていない。

また、資源作物の栽培は、エネルギー収支においてプラスでなければならない。資源作物の生産に投入されるエネルギー消費量を算出するとき、農業機械燃料などの直接エネルギー消費量に加えて、農業生産資材等の生産に係る間接エネルギー消費量も算出する必要がある。間接エネルギー消費量は、産業連関表による資材等価格当たりのエネルギー原単位を用いることにより算出することができるが、対象となる産業連関表の年次や価格、生産加工 (廃棄) 工程によりエネルギー原単位が異なる場合もある。本報では、生産資材名、使用量、価格を示しているため、目的に応じて適当なエネルギー原単位を参照できるように、Table 3 及び Table 4 に、資源作物生産に関連したエネルギー原単位の算出例を既往研究から引用し、整理した。Table 3 は、農林水産技術情報協会 (1996h) において「平成4年延長産業連関表」より試算された生産資材別エネルギー原単位 (1990年基準) である (原表の kcal/円を MJ/円に換算)。また、Table 4 は、佐賀ら (2008) による生産資材別エネルギー原単位である (原

Table 3 農業生産に要する生産資材別エネルギー原単位
(農林水産技術情報協会, 1996h より換算)
Embodied Energy Intensity of Materials for Agricultural Production
(Agriculture, Forestry and Fisheries Technical Information Society, 1996h)

品目	エネルギー 原単位 (MJ/円)
種苗	0.026
石灰など土石製品	0.108
有機質肥料	0.049
化学肥料	0.138
農薬	0.098
紙加工品	0.059
プラスチック製品	0.104

Table 4 農業生産における生産費項目別エネルギー原単位
(佐賀ら, 2008 より換算)
Embodied Energy Intensity of Production Cost for Agricultural Production
(Saga et al, 2008)

生産費項目	エネルギー 原単位 (MJ/円)
種苗	0.016
肥料	0.084
農業薬剤	0.070
その他の諸材料	0.042
土地改良及び水利	0.044
貸借料及び料金	0.046
建物	0.038
自動車	0.040
農機具	0.044
生産管理	0.012

表の kJ/円を MJ/円に換算)。

直接・間接エネルギー消費量の合計量は、資源作物から生み出されるバイオ燃料のエネルギー生産量よりも小さくなければ、資源作物生産によってさらにエネルギー消費が増加することになり、環境に負荷を与えることになる。また、生産時に投入される資材の種類や農業機械の利用方法によっては、生産性の向上や労力低減に資することになって、逆に環境負荷を増大する可能性もある。

以下では、本報で整備したデータベースの活用例として、飼料稲をバイオ燃料の原料として生産した場合の単位面積当たりの経済性とエネルギー収支を試算した。

2 飼料稲栽培の経済性の試算

本報では、経済性については農業経営情報として農業経営統計調査の各作物の生産費から検討できるようデータを取りまとめた。飼料稲栽培について整理し得た生産費用は、年間合計で 371,375 円/ha である。しかし、賃借料及び料金、物件税及び公課諸負担、生産管理費についてはデータが収集できなかったため、これらの費用を食用米と同等と仮定し、賃借料及び料金 133,530 円/ha、物件税及び公課諸負担 26,480 円/ha、生産管理費 3,090 円/ha を合算すると、生産費用は 534,475 円/ha/年となる。一方、データベースに記載したホールクロップサイレージ原料としての飼料稲の価格は、1ha 当たり 398,595 円であり、販売収入は生産費用を下回る。また、全農営農総合対策部(2006)では、稲を原料としたエタノール生産事業の採算性を検討し、エタノール原料稲の価格を 20 円/kg としている。また、バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議で目標とされるバイオエタノールの生産価格 100 円/L に見合う稲わらの価格は、5 円/kg 以下と見積もられている(五十嵐・斉木, 2008)。これらから予測されるバイオエタノール原料としての飼料稲の販売価格は、196,546 円/ha となり、飼料としての価格よりもさらに大きく生産費用を下回る。バイオ燃料原料としての玄米及び稲わらの価格が向上することは予想し難いため、生産費用を低減できるような栽培技術体系を検討する必要があることがわかる。

3 飼料稲栽培のエネルギー収支の試算

飼料稲栽培に係る直接エネルギー消費量は、農業機械で使用した燃料(軽油、ガソリン、混合油、灯油、電力)の消費量別に標準発熱量を乗じた合計値とした。標準発熱量は、経済産業省資源エネルギー庁(2007)より、軽油 1L 当たり 37.7MJ、ガソリン(混合油も同じとみなした) 1L 当たり 34.6MJ、灯油 1L 当たり 36.7MJ、電力 1kWh 当たり 3.6MJ を引用し、直接エネルギー消費量は合計で 2,194.4MJ となった。

また、間接エネルギー消費量は、Table 3 に示した生産資材別エネルギー原単位を用いて、資材投入量に単

価を乗じた投入資材価格から求めた。その結果、1ha の飼料稲栽培における間接エネルギー消費量は合計で 11,197.9MJ となった。

直接及び間接エネルギー消費量合計値 13,392.3MJ に対し、1ha 当たり収穫できる玄米及び稲わらからエタノールを生産したと想定し、エネルギー生産量を試算した。エタノール生産量は、生産特性データベースから、玄米はでんぷんの含有量を、稲わらはセルロースとヘミセルロースの含有量を基にそれぞれエタノール収率の理論値(大聖・三井物産編, 2004)を乗じて 95% vol エタノールとして求めた。その結果、玄米から 3,370L、稲わらから 2,805L、合計で 6,173L のエタノールが理論上生産できると算出できた。経済産業省資源エネルギー庁(2007)より、エタノールの熱量を 1L 当たり 23.9MJ (ただし、純エタノール)とすると、生産できるエネルギーは 147,534.7MJ となり、単純にエネルギー収支をみれば、飼料稲栽培に要するエネルギーの約 11 倍のエネルギーが生産できたことになる。しかし、ここではエタノール生産量の算出に当たり理論値を用いていることに留意する必要がある。

V 結言

本報では、国内で生産可能と考えられる資源作物について、作物栽培に必要な農業生産資材や農業機械燃料、労力等の INPUT についてデータを収集・整理するとともに、単位面積当たりの収量や収穫物成分、生産に係る費用についてとりまとめた。本データベースは、資源作物の土地生産性、労働生産性を比較する際にも利用することができる(清水ら, 2008)。ただし、引用したデータは公表済みであることを条件に可能な限り最新のものをを用いたものの、農業生産資材、燃料等の価格は経済状況により上下することが考えられる。農業物価指数及び各作物の生産費については、農林水産省大臣官房統計部より毎年調査結果が公表されているので、該当部分は最新のデータを参照することができる。また、農業機械の性能も年々向上していることから、データベースの活用にあたっては現状に即したデータを用いるよう留意されたい。

また、本報では、データベースの活用方法の一例として、資源作物生産における INPUT のデータから生産に係る直接エネルギーと間接エネルギーを、OUTPUT のデータから燃料生産可能量を把握し、エネルギー収支を試算した。資源作物のバイオ燃料としての利用については、作物生産だけでなく、燃料変換プラントまでの輸送や貯蔵、燃料への変換や利用までを含めたライフサイクルで費用や環境負荷を評価する必要がある。システム境界を適切に設定することによって、地域を対象とした資源作物の生産、利用に係るシステム全体の評価につなげることができる。

ただし、農作物の生産は、作目、地域条件、季節によって限定される項目も多く、さらには圃場条件や栽培体系による生産性の違いや気候等の影響による年変動も生じることには留意する必要がある。この点については、本報で取りまとめたデータベースの考え方にに基づき、現場での創意工夫によって資源作物の栽培時に投入される資材や労力をどれくらい低減できるか、といった効果を試算することも可能である。また、高収量性や特定成分含有率の高い作物の開発や粗放的・低環境負荷な栽培技術体系に向けた改良も進められていることから、今後、さらなるデータの蓄積・整備を進め、より利用しやすいデータベースとして改良していく予定である。

参考文献

- 1) 青森県農業生産対策推進本部 (1999) : 畑作物生産指導要領, p.72-78
- 2) 青森県横浜町農業協同組合 (2006) : 横浜町農業機械銀行視察資料
- 3) 千葉県農林水産航空事業対策協議会 (1997) : 平成9年度千葉県農林水産航空事業対策協議会資料 (平成9年5月27日自治体職員福祉センター), <http://www.ne.jp/asahi/nicelife/nife/nodaten/kuusan/chibanet/H9kyogi.htm>, (最終確認日: 2008年10月28日)
- 4) 知名町・知名町糖業振興会・沖永良部さとうきび生産対策本部・沖永良部農業改良普及センター(2006) : 沖永良部さとうきび栽培暦
- 5) 大聖泰弘・三井物産編 (2004) : バイオエタノール最前線, 工業調査会, 東京
- 6) 北海道農政部農業改良課 (2000) : 北海道農業生産技術体系第2版 (平成12年12月)
- 7) 北海道立中央農業試験場 (1986) : ひまわりの標準栽培法
- 8) 北海道立中央農業試験場農業機械部機械科 (1996) : なたねの品種選定・栽培法と機械化体系に関する試験成績概要書 (平成8年1月)
- 9) 北海道立道南農業試験場 (2002) : WEB版道南畑作物栽培の手引 (2004.3.18公開), http://www.agri.pref.hokkaido.jp/dounan/gijutu/hatasaku_tebiki/cover/cover.html, (最終確認日: 2008年10月30日)
- 10) 五十嵐泰夫・斉木隆監修 (2008) : 稲わら等バイオマスからのエタノール生産, 地域資源循環技術センター, 東京
- 11) 香川芳子 (2003) : 五訂食品成分表2003, 女子栄養大学出版部, 東京
- 12) 経済産業省資源エネルギー庁 (2007) : エネルギー源別標準発熱量一覧表 (総発熱量), 2005年度以降適用する標準発熱量の検討結果と改定値について (平成19年5月), p.1-29
- 13) 中村真人・柚山義人 (2005) : 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, No.203, p.57-80
- 14) 日本エネルギー学会編 (2002) : バイオマスハンドブック, オーム社, 東京
- 15) 農業技術研究機構編 (2001) : 日本標準飼料成分表 (2001年版), 社団法人中央畜産会, 東京
- 16) 農研機構中央農業総合研究センター作業技術研究部 (1996) : 農業機械農作業データベース, <http://www2.fm.a.u-tokyo.ac.jp/sakugi/noritu/>, (最終確認日 2008年10月30日)
- 17) 農研機構作物研究所 (2002) : イネ品種・特性データベース検索システム, <http://ineweb.narcc.affrc.go.jp/index.html>, (最終確認日 2008年10月30日)
- 18) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007) : アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, 農研機構農村工学研究所, 茨城
- 19) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006) : バイオマス利活用システムの設計と評価, 農業工学研究所, 茨城
- 20) 農林水産技術会議事務局 (1990) : 農業・農村におけるエネルギーの利用, グリーンエナジー計画成果シリーズI系 (エネルギーの分布と利用) No.11, 平成2年3月
- 21) 農林水産省大臣官房統計部 (2006a) : 農業経営統計調査平成18年牛乳生産費・牧草 (飼料作物) デントコーン費用価 (平成18年11月8日公表)
- 22) 農林水産省大臣官房統計部 (2006b) : 農業経営統計調査平成17年米生産費 (平成18年8月11日公表)
- 23) 農林水産省大臣官房統計部 (2007a) : 平成18年産さとうきびの収穫面積及び収穫量 (平成19年6月20日公表)
- 24) 農林水産省大臣官房統計部 (2007b) : 農業経営統計調査平成18年産さとうきび生産費 (平成19年9月14日公表)
- 25) 農林水産省大臣官房統計部 (2007c) : 農作物価指数 (平成18年12月)
- 26) 農林水産省大臣官房統計部 (2007d) : 平成18年産てんさいの収穫面積及び収穫量 (平成19年2月8日公表)
- 27) 農林水産省大臣官房統計部 (2007e) : 農業経営統計調査平成18年産てんさい生産費 (平成19年8月10日公表)
- 28) 農林水産省大臣官房統計部 (2007f) : 平成17年産工芸農作物等の生産費 (原料用かんしょ・原料用ばれいしょ・てんさい生産費・10a当たり主要費目の評価額)
- 29) 農林水産省大臣官房統計部 (2007g) : 農業経営統計調査平成18年産原料用ばれいしょ生産費 (平成19年8月10日公表)
- 30) 農林水産省大臣官房統計部 (2007h) : 農業経営統計

- 調査平成 18 年産原料用かんしょ生産費（平成 19 年 9 月 14 日公表）
- 31) 農林水産省大臣官房統計部（2007i）：農業経営統計調査平成 18 年産米生産費（平成 19 年 8 月 10 日公表）
- 32) 農林水産省大臣官房統計部（2007j）：農業経営統計調査平成 18 年産大豆生産費（平成 19 年 8 月 10 日公表）
- 33) 農林水産技術情報協会（1996a）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.105-121
- 34) 農林水産技術情報協会（1996b）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.69-77
- 35) 農林水産技術情報協会（1996c）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.79-83
- 36) 農林水産技術情報協会（1996d）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.99-104
- 37) 農林水産技術情報協会（1996e）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.361-365
- 38) 農林水産技術情報協会（1996f）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.45-50
- 39) 農林水産技術情報協会（1996g）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.63-67
- 40) 農林水産技術情報協会（1996h）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.425
- 41) 農林水産技術情報協会（1997）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（「新政策」を踏まえた作業体系におけるエネルギー消費見通し・平成 9 年 3 月），p.21-25
- 42) 農林水産省農産園芸局（2000）：甘味資源作物に関する資料（平成 12 年 3 月），p.8
- 43) 農林水産省生産局生産流通振興課（2005）：大豆関連データファイル，
<http://www.maff.go.jp/soshiki/nousan/hatashin/daizu/siryu/index.html>，（最終確認日 2008 年 10 月 30 日）
- 44) 農山漁村文化協会編（2001）：ヒマワリの機械化栽培作業技術体系，転作全書・3 雑穀，p.932-939，農山漁村文化協会，東京
- 45) 大分県農業技術センター（2002）：代かき同時湛水土中点播直播栽培マニュアル
- 46) 沖縄県農林水産部（2006）：さとうきび栽培指針（平成 18 年 3 月）
- 47) 奥山善直，柴田悖次，遠藤武男，菅原剛，平岩進，金子一郎（1994）：ナタネ無エルシン酸新品種「キザキノナタネ」の育成，東北農試研報，No.88，p.1-13
- 48) 尾和尚人（1996）：わが国の農作物の養分収支，養分の効率的利用技術の新たな動向（平成 8 年 9 月），農業研究センター
- 49) 佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司（2008）：稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析，エネルギー・資源学会論文誌，vol.29，No.1，p.30-35
- 50) 清水夏樹・柚山義人（2007）：バイオマス利活用における資源作物生産の評価視点，農業土木学会資源循環研究部会論文集，vol.2，103-113
- 51) 清水夏樹・柚山義人・山岡賢・中村真人（2008）：資源作物の生産特性の比較，平成 20 年度農業農村工学会大会講演要旨集（秋田県立大学），p.292-293
- 52) 東大総研（2004）：バイオマス情報ヘッドクォーター，<http://www.biomass-hq.jp/index.html>，（最終確認日 2008 年 10 月 30 日）
- 53) 十勝圏振興機構（2005）：北海道十勝地域の規格外農産物及び農産加工残渣物利用におけるバイオエタノール変換システムに関する事業化可能性調査報告書
- 54) 土田志郎（2005）：北陸地域における飼料イネ生産の収益性の現状と課題，農業経営通信，No.224，p.6-9
- 55) 上田達己（2008）：国産バイオエネルギー生産システムの効率性・コストに関する予備的調査，農業・食品産業技術総合研究機構総合企画調整部研究調査チーム研究調査室小論集，第 12 号，p.1-26
- 56) 上田達己・天野哲郎（2006）：バイオマス燃料生産システムの効率性・コスト試算，農業・食品産業技術総合研究機構総合企画調整部研究調査チーム研究調査室報告，No.6，p.31-53
- 57) 全国飼料増産行動会議・社団法人日本草地畜産種子協会（2006）：稲発酵粗飼料生産・給与技術マニュアル，平成 18 年 3 月
- 58) 全農営農総合対策部（2006）：コメを原料とするバイオエタノール製造・利用等に関する調査事業報告（環境省エコ燃料利用推進会議資料・平成 18 年 5 月）

Arrangement of Database for Energy Crop Productivity

SHIMIZU Natsuki, YUYAMA Yoshito and NAKAMURA Masato

Summary

Energy crops production is required, high-yield, low-input (labor and cost) and low-environmental impacts. According to expectations of biofuel use, trials of energy crop cultivation have been implemented in many places. However, accumulation of data for energy crop productivity in Japan is not sufficient.

We chose 10 kinds of energy crops that can be cultivated in Japan and compiled data such as input of agricultural production materials, machinery fuel and labor that are necessary for energy crop production, and yields and composition of harvested crops. Then, the data collected were arranged as a database of energy crop productivity from several aspects; namely, productivity of land, cost and income, and productivity of labor. This database is expected to be used for estimations of productivity potential and possibility of energy crop planting businesses.

Keywords : biofuel, energy crops, database, agricultural production materials, agricultural machinery

Appendix

1. サトウキビ Sugar cane

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	農業 生産 資材 等	名称	サトウキビ苗		
		投入量	kg/ha	5,700.0	A
		単価	円/kg	11	D
		名称	化成肥料		A より, 高度化成 804
		投入量	kg/ha	1,520.0	A より元肥 1 回, 追肥 2 回分を合計
		単価	円/kg	111	B
		名称	農薬①		A より, アドバンテージ粒剤 (ハリガネムシ対策)
		投入量	kg/ha	75.0	A
		単価	円/kg	700	C
		名称	除草剤①		A より, DCMU 水和剤
		投入量	kg/ha	2.5	A
		単価	円/kg	6,333	C
	名称	除草剤②		A より, アージラン液剤	
	投入量	L/ha	10.0		
	単価	円/L	2,800	C	
	名称	農薬②		A より, スミチオン乳剤 (2 回に分けて散布)	
	投入量	L/ha	4.0	A	
	単価	円/L	2,600	C	
燃料	名称	軽油			
	消費量	L/ha	428.7	A	
	単価	円/L	112	B	
生産における OUTPUT	名称		サトウキビ茎		
	収量	kg/ha	68,200.0	E	
	乾物率	wt%	28.3	※	
	C 含率	乾物 %	46.10	※	
	N 含率	乾物 %	0.99	※	
	P 含率	乾物 %	0.10	※	
	K 含率	乾物 %	1.20	※	
	変換対象成分名称		糖		
	対象成分含率	乾物 %	53.0	※	
単価	円/kg	20.4	F		
資源作物生産の農業 経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	141.8	A	
	栽培日数	日	562	※	
	製品販売収入	円/年/ha	1,393,326	D, F	
	種苗費	円/年/ha	63,590	D	
	肥料費	円/年/ha	115,650	D	
	農業薬剤費	円/年/ha	45,360	D	
	光熱動力費	円/年/ha	34,330	D	
	その他の諸材料費	円/年/ha	4,000	D	
	土地改良及び水利費	円/年/ha	6,360	D	
	賃借料及び料金	円/年/ha	184,580	D	
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	14,280	D	
	建物費	円/年/ha	16,060	D	
	自動車費	円/年/ha	19,270	D	
	農機具費	円/年/ha	68,470	D	
生産管理費	円/年/ha	1,100	D		
労働費	円/年/ha	160,007	A, D		

主なデータ引用元

- A：農林水産技術情報協会（1996a）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成 8 年 3 月），p.105-121
 - B：農林水産省大臣官房統計部（2007c）：農業物価指数（平成 18 年 12 月）
 - C：知名町・知名町糖業振興会・沖永良部さとうきび生産対策本部・沖永良部農業改良普及センター（2006）：沖永良部さとうきび栽培暦
 - D：農林水産省大臣官房統計部（2007b）：農業経営統計調査平成 18 年産さとうきび生産費（平成 19 年 9 月 14 日公表）
 - E：農林水産省大臣官房統計部（2007a）：平成 18 年産さとうきびの収穫面積及び収穫量（平成 19 年 6 月 20 日公表）
 - F：農林水産省農産園芸局（2000）：甘味資源作物に関する資料（平成 12 年 3 月），p.8
- ※本文参照

2. テンサイ Beet

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	名称		コーティング種子		
	投入量	kg/ha	1.2	A	
	単価	円/kg	17,312	B	
	名称		ペーパーポット		
	投入量	冊/日	60.0	A	
	単価	円/冊	302	C	
	名称		農薬①	Aよりタチガレン 60mL/ha, バリダシン 340mL/ha, オルトラン 60mL/ha, モンセレン 600mL/ha	
	投入量	kg/ha	1.1	上記4種類の合計量(重量換算)	
	単価	円/kg	6,414	C	
	名称		堆肥		
	投入量	t/ha	30.0	A	
	単価	円/t	656	D	
	名称		融雪剤		
	投入量	kg/ha	300.0	Aより, 融雪タンカル	
	単価	円/kg	17	C	
	名称		化成肥料	Aより, 農配ビート2号	
	投入量	kg/ha	1,700.0	A	
	単価	円/kg	79	C	
	名称		除草剤	Aよりベタナール 6000mL/ha, ナブ乳剤 2000mL/ha	
	投入量	L/ha	8.0	上記2種類の薬剤合計量	
	単価	円/L	6,348	Cより除草剤の全国平均値×1.5倍(乳剤は少し高価なため)	
	名称		農薬②	Aよりトクチオン 2000ml/ha, オルトラン 2000g/ha, ジマンダイセン 4000g/ha, カスミンボルド 2500g/ha, モンセレン 4000g/ha	
	投入量	kg/ha	12.5	上記4種類の薬剤合計量(重量換算)	
	単価	円/kg	6,414	C	
	燃料	名称		軽油	
		消費量	L/ha	250.7	A
		単価	円/L	112	C
名称			ガソリン		
消費量		L/ha	1.3	A	
単価	円/L	133	C		
生産における OUTPUT	名称		てんさい(根)		
	収量	kg/ha	58,200.0	H	
	乾物率	wt%	23.0	※	
	C含率	乾物%	41.46	E, F	
	N含率	乾物%	0.62	G	
	P含率	乾物%	0.27	G	
	K含率	乾物%	0.98	G	
	変換対象成分名称		糖		
対象成分含率	乾物%	74.4	※		
単価	円/kg	16.2	D		
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	150.2	A	
	栽培日数	日	245	I	
	製品販売収入	円/年/ha	942,840	D, H	
	種苗費	円/年/ha	25,530	D	
	肥料費	円/年/ha	186,480	D	
	農業薬剤費	円/年/ha	98,200	D	
	光熱動力費	円/年/ha	35,490	D	
	その他の諸材料費	円/年/ha	44,440	D	
	土地改良及び水利費	円/年/ha	3,740	D	
	賃借料及び料金	円/年/ha	34,260	D	
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	17,560	D	
	建物費	円/年/ha	19,400	D	
	自動車費	円/年/ha	21,440	D	
	農機具費	円/年/ha	12,030	D	
	生産管理費	円/年/ha	4,220	D	
労働費	円/年/ha	231,879	A, D		

主なデータ引用元

- A: 農林水産技術情報協会 (1996b): 主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位 (平成8年3月), p.69-77
 B: 北海道農政部農業改良課 (2000): 北海道農業生産技術体系第2版 (平成12年12月) 収支総括表 (テンサイ・移植栽培)
 C: 農林水産省大臣官房統計部 (2007c): 農業物価指数 (平成18年12月)
 D: 農林水産省大臣官房統計部 (2007e): 農業経営統計調査平成18年産てんさい生産費 (平成19年8月10日公表)
 E: 農業技術研究機構編 (2001): 日本標準飼料成分表 (2001年版), 社団法人中央畜産会, 東京
 F: 中村真人・柚山義人 (2005): 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, No.203, p.57-80
 G: 尾和尚人 (1996): わが国の農作物の養分収支, 養分の効率的利用技術の新たな動向 (平成8年9月), 農業研究センター
 H: 農林水産省大臣官房統計部 (2007d): 平成18年産てんさいの収穫面積及び収穫量 (平成19年2月8日公表)
 I: 北海道立道南農業試験場 (2002): WEB版道南畑作物栽培の手引 (2004.3.18公開)

http://www.agri.pref.hokkaido.jp/dounan/gijutu/hatasaku_tebiki/cover/cover.html, (最終確認日: 2008年10月30日)

※本文参照

3. ばれいしょ Potato

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考
生産における INPUT	名称		種芋	
	投入量	kg/ha	2,000.0	A
	単価	円/kg	209	Bより、種ばれいしょ全国平均価格 20kg4187円
	名称		化成肥料	Aより、BBS652
	投入量	kg/ha	1,000.0	A
	単価	円/kg	79	B
	名称		除草剤	Aより、ブリグロックスL
	投入量	L/ha	3.0	A
	単価	円/L	2,858	B
	名称		農薬①	Aより、ルビトックス、エカチン
	投入量	L/ha	4.0	A
	単価	円/L	2,596	B
	名称		農薬②	Aより、デナボン、アグリマイシン
	投入量	kg/ha	5.0	A
	単価	円/kg	6,414	B
	名称		農薬③	Aより、グリーンMダイファー
	投入量	kg/ha	14.0	A
	単価	円/kg	1,602	B
	名称		農薬④茎葉処理剤	Aより、レグロックス
	投入量	L/ha	3.0	A
単価	円/L	2,858	B	
燃料	名称		軽油	A
	消費量	L/ha	187.6	A
	単価	円/L	112	B
生産における OUTPUT	名称		ばれいしょ(塊茎)	
	収量	kg/ha	40,930.0	C
	乾物率	wt%	20.2	D
	C 含率	乾物 %	42.48	E
	N 含率	乾物 %	0.96	E
	P 含率	乾物 %	0.19	E
	K 含率	乾物 %	2.02	E
	変換対象成分名称		でんぷん	
対象成分含率	乾物 %	86.1	※	
単価	円/kg	13.6	※	
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	84.6	A
	栽培日数	日	148	A
	製品販売収入	円/年/ha	555,829	※、C
	種苗費	円/年/ha	121,260	D
	肥料費	円/年/ha	79,340	D
	農業薬剤費	円/年/ha	69,130	D
	光熱動力費	円/年/ha	29,670	D
	その他の諸材料費	円/年/ha	2,960	D
	土地改良及び水利費	円/年/ha	1,160	D
	賃借料及び料金	円/年/ha	10,420	D
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	16,960	D
	建物費	円/年/ha	9,770	D
	自動車費	円/年/ha	18,770	D
	農機具費	円/年/ha	92,020	D
生産管理費	円/年/ha	3,820	D	
労働費	円/年/ha	134,023	A, C	

主なデータ引用元

- A：農林水産技術情報協会（1996c）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成8年3月），p.79-83
 - B：農林水産省大臣官房統計部（2007c）：農業物価指数（平成18年12月）
 - C：農林水産省大臣官房統計部（2007g）：農業経営統計調査平成18年産原料用ばれいしょ生産費（平成19年8月10日公表）
 - D：香川芳子（2003）：五訂食品成分表2003，女子栄養大学出版社，東京
 - E：尾和尚人（1996）：わが国の農作物の養分収支，養分の効率的利用技術の新たな動向（平成8年9月），農業研究センター
- ※本文参照

4. かんしょ Sweet potato

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	名称		堆肥		
	投入量	t/ha	23.0	Aより、3回に分けて投入した合計量	
	単価	円/t	385	D	
	名称		化成肥料	Aより、BB化成820(8-12-20)	
	投入量	kg/ha	770.0	Aより、2回に分けて投入した合計量	
	単価	円/kg	111	C	
	名称		種いも		
	投入量	kg/ha	1,000.0	A	
	単価	円/kg	31	D	
	名称		殺菌剤	Aより、ベンレート	
	投入量	kg/ha	0.5	A	
	単価	円/kg	2,374	C	
	名称		無機質肥料(硫安)		
	投入量	kg/ha	105.0	Aより、2回に分けて投入した合計量	
	単価	円/kg	39	C	
	名称		無機質肥料(苦土石灰)		
	投入量	kg/ha	1,000.0	A	
	単価	円/kg	17	C	
	名称		除草剤	Aより、トレファノサイド(粒)	
	投入量	kg/ha	30.0	A	
	単価	円/kg	476	C	
	名称		農薬	Aより、ディブテックス(粉)	
	投入量	kg/ha	30.0	A	
	単価	円/kg	373	C	
	燃料	名称		軽油	
		消費量	L/ha	103.7	A
		単価	円/L	112	C
		名称		ガソリン	
消費量		L/ha	8.6	A	
単価		円/L	133	C	
名称			混合油		
消費量		L/ha	1.0	A	
単価		円/L	133	Cより、ガソリンと同じとみなした	
生産における OUTPUT	名称		かんしょ(塊根)		
	収量	kg/ha	31,390.0	B	
	乾物率	wt%	33.9	E	
	C含率	乾物%	42.75	F	
	N含率	乾物%	0.61	G	
	P含率	乾物%	0.12	G	
	K含率	乾物%	0.89	G	
	変換対象成分名称		でんぷん		
対象成分含率	乾物%	71.7	※		
単価	円/kg	31.0	※		
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	254.5	A, ※	
	栽培日数	日	164	A	
	製品販売収入	円/年/ha	97,403	B, ※	
	種苗費	円/年/ha	30,870	B	
	肥料費	円/年/ha	93,860	B	
	農業薬剤費	円/年/ha	57,820	B	
	光熱動力費	円/年/ha	31,980	B	
	その他の諸材料費	円/年/ha	25,120	B	
	土地改良及び水利費	円/年/ha	2,370	B	
	賃借料及び料金	円/年/ha	20,350	B	
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	13,050	B	
	建物費	円/年/ha	14,670	B	
	自動車費	円/年/ha	16,640	B	
	農機具費	円/年/ha	71,160	B	
生産管理費	円/年/ha	2,880	B		
労働費	円/年/ha	322,808	A, B		

主なデータ引用元

A: 農林水産技術情報協会(1996d): 主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位(平成8年3月), p.99-104

B: 農林水産省大臣官房統計部(2007h): 農業経営統計調査平成18年産原料用かんしょ生産費(平成19年9月14日公表)

C: 農林水産省大臣官房統計部(2007c): 農作物価指数(平成18年12月)

D: 農林水産省大臣官房統計部(2007f): 平成17年産工業農作物等の生産費(原料用かんしょ・原料用ばれいしょ・てんさい生産費・10a当たり主要費目の評価額)

E: 香川芳子(2003): 五訂食品成分表2003, 女子栄養大学出版部, 東京

F: 中村真人・柚山義人(2005): 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, No.203, p.57-80

G: 尾和尙人(1996): わが国の農作物の養分収支, 養分の効率的利用技術の新たな動向(平成8年9月), 農業研究センター

※本文参照

5. 飼料用トウモロコシ Corn

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考
生産における INPUT	名称		石灰	
	投入量	kg/ha	3,000.0	A
	単価	円/kg	31	C
	名称		過リン酸石灰	
	投入量	kg/ha	600.0	A
	単価	円/kg	52	C
	名称		堆肥	
	投入量	t/ha	30.0	A
	単価	円/t	1,778	B
	名称		種子	
	投入量	kg/ha	25.0	A
	単価	円/kg	1,497	B
	名称		化成肥料	
	投入量	kg/ha	400.0	A
	単価	円/kg	79	C
	名称		除草剤①	A より, ゲザブリン
	投入量	kg/ha	1.5	A
	単価	円/kg	778	C
	名称		除草剤②	A より, ラッソー
	投入量	L/ha	2.5	A
単価	円/L	2,858	C	
燃料	名称		軽油	
	消費量	L/ha	130.1	A
	単価	円/L	112	C
生産における OUTPUT	名称		飼料用とうもろこし	
	収量	kg/ha	51,500.0	D
	乾物率	wt%	27.1	E
	C 含率	乾物 %	42.71	E, F
	N 含率	乾物 %	1.53	E, F
	P 含率	乾物 %	0.13	G
	K 含率	乾物 %	0.92	G
	変換対象成分名称(1)		でんぷん	
	対象成分含率	乾物 %	57.1	E
	変換対象成分名称(2)		セルロース・ヘミセルロース	
対象成分含率	乾物 %	45.6	E, F	
単価	円/kg	30.8	C, ※	
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	16.3	A
	栽培日数	日	153	D
	製品販売収入	円/年/ha	1,586,638	D, ※
	種苗費	円/年/ha	35,000	D
	肥料費	円/年/ha	65,800	D
	農業薬剤費	円/年/ha	12,650	D
	光熱動力費	円/年/ha	82,390	D
	その他の諸材料費	円/年/ha	60,150	D
	土地改良及び水利費	円/年/ha	-	データなし
	賃借料及び料金	円/年/ha	-	データなし
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	-	データなし
	建物費	円/年/ha	-	データなし
	自動車費	円/年/ha	-	データなし
	農機具費	円/年/ha	-	データなし
生産管理費	円/年/ha	-	データなし	
労働費	円/年/ha	27,429	A, B	

主なデータ引用元

A：農林水産技術情報協会（1996e）：主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位（平成8年3月），p.361-365

B：農林水産省大臣官房統計部（2006a）：農業経営統計調査平成18年牛乳生産費・牧草（飼料作物）デントコーン費用価（平成18年11月8日公表）

C：農林水産省大臣官房統計部（2007c）：農業物価指数（平成18年12月）

D：北海道農政課農業改良課（2000）：北海道農業生産技術体系第2版（平成12年12月）

E：農業技術研究機構編（2001）：日本標準飼料成分表（2001年版），社団法人中央畜産会，東京

F：中村真人・柚山義人（2005）：各種バイオマス成分のデータベース整備，農工研技報，No.203，p.57-80

G：尾和尚人（1996）：わが国の農作物の養分収支，養分の効率的利用技術の新たな動向（平成8年9月），農業研究センター

※本文参照

6. 飼料稲 Rice for Whole Crop Silage

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	農業生産資材等	名称	化学肥料		
		投入量	kg/ha	500.0	A
		単価	円/kg	79	B
		名称	種子(粃)		
		投入量	kg/ha	30.0	A
		単価	円/kg	334	C
		名称	食塩(塩水選別)		
		投入量	kg/ha	3.0	A
		単価	円/kg	100	市場価格調べ
		名称	珪コーティング用薬剤		
		投入量	kg/ha	50.0	A
		単価	円/kg	153	D
	名称	除草剤		Aより, サターンM粒剤, パサグラン粒剤	
	投入量	kg/ha	60.0	A	
	単価	円/kg	778	B	
	名称	農薬			
	投入量	L/ha	2.0	A	
	単価	円/L	373	B	
	燃料	名称	軽油		
		消費量	L/ha	35.8	A
		単価	円/L	112	B
		名称	ガソリン		
		消費量	L/ha	9.2	A
		単価	円/L	133	B
名称		混合油			
消費量		L/ha	15.1	A	
単価		円/L	133	Bより, ガソリンと同じとみなした	
名称		電力			
消費量		kWh/ha	0.4	A	
単価		円/kWh	47	B	
生産における OUTPUT	名称	玄米			
	収量	kg/ha	6,690.0	E	
	乾物量	wt%	84.5	F	
	C含率	乾物%	44.58	G, H	
	N含率	乾物%	1.18	I	
	P含率	乾物%	0.26	I	
	K含率	乾物%	0.36	I	
	変換対象成分名称		でんぷん		
	対象成分含率	乾物%	87.3	F, ※	
	単価	円/kg	17	※	
	名称	稲わら			
	収量	kg/ha	12,549.1	※	
	乾物量	wt%	91.5	H	
	C含率	乾物%	37.40	H	
	N含率	乾物%	0.53	H	
	P含率	乾物%	0.06	H	
	K含率	乾物%	1.80	H	
	変換対象成分名称		セルロース・ヘミセルロース		
対象成分含率	乾物%	46.8	※		
単価	円/kg	23	B		
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	55.1	A	
	栽培日数	日	183	A	
	製品販売収入	円/年/ha	398,595	※	
	種苗費	円/年/ha			
	肥料費	円/年/ha			
	農業薬剤費	円/年/ha	132,990	※	
	光熱動力費	円/年/ha			
	その他の諸材料費	円/年/ha			
	土地改良及び水利費	円/年/ha	11,130	※	
	賃借料及び料金	円/年/ha	-	データなし	
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	-	データなし	
	建物費	円/年/ha			
	自動車費	円/年/ha	137,930	※, ただし, 建物農機具費減価償却費は10a当たり9,855円, 建物農機具修繕費は10a当たり3,942円	
	農機具費	円/年/ha			
生産管理費	円/年/ha	-	データなし		
労働費	円/年/ha	89,285	※		

主なデータ引用元

A: 農林水産技術情報協会 (1997): 主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位 (「新政策」を踏まえた作業体系におけるエネルギー消費見直し・平成9年3月), p.21-25

B: 農林水産省大臣官房統計部 (2007c): 農業物価指数 (平成18年12月)

C: 農林水産省大臣官房統計部 (2006b): 農業経営統計調査平成17年米生産費 (平成18年8月11日公表)

D: 大分県農業技術センター (2002): 代かき同時湛水土中点播直播栽培マニュアル

E: 農研機構作物研究所 (2001): イネ品種・特性データベース検索システム (<http://ineweb.narcc.affrc.go.jp/index.html>)

F: 香川芳子 (2003): 五訂食品成分表2003, 女子栄養大学出版社, 東京

G: 農業技術研究機構編 (2001): 日本標準飼料成分表 (2001年版), 社団法人中央畜産会, 東京

H: 中村真人・柚山義人 (2005): 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, No.203, p.57-80

I: 尾和尚人 (1996): わが国の農作物の養分収支, 養分の効率的利用技術の新たな動向 (平成8年9月), 農業研究センター

※本文参照

7. 飼料米 Feed Grain Rice

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	名称		種籾		
	投入量	kg/ha	35.0	A	
	単価	円/kg	334	※, B	
	名称		消毒剤	A より, 昭和酵素 Hi-S	
	投入量	kg/ha	1.5	A	
	単価	円/kg	1,575	A	
	名称		殺菌剤	A より, フタバロン A 粉剤	
	投入量	kg/ha	1.3	A	
	単価	円/kg	2,096	A	
	名称		育苗培土	A より, 苗っこパワー (アイアグリ)	
	投入量	L/ha	840.0	A	
	単価	円/L	17	A	
	名称		被覆培土	A より, フクド専用培土 (アイアグリ)	
	投入量	kg/ha	100.0	A	
	単価	円/kg	15	A	
	名称		消化液		
	投入量	L/ha	85,000.0	A	
	単価	円/L	0	A より, 山田バイオマスプラントで生産した消化液	
	名称		殺虫剤	A より, 日産プリンス粒剤	
	投入量	kg/ha	10.0	A	
	単価	円/kg	1,429	A	
	名称		除草剤		
	投入量	L/ha	5.0	A	
	単価	円/L	5,010	A	
	名称		農業 (ヘリ防除)	A より, カスミンバリダシン	
	投入量	L/ha	0.03		
	単価	円/L	3,814	※	
	名称		農業 (ヘリ防除)	A より, MR ジョーカー粉剤 DL	
	投入量	kg/ha	0.56	A	
	単価	円/kg	336	※	
	名称		軽油		
	消費量	L/ha	482.5	A	
	単価	円/L	112	B	
	名称		ガソリン		
	消費量	L/ha	187.7	A	
	単価	円/L	133	B	
	名称		混合油		
	消費量	L/ha	2.0	A	
	単価	円/L	133	B より, ガソリンと同じとみなした	
	名称		電力		
	消費量	kWh/ha	30.4	A	
	単価	円/kWh	47.2	B	
名称		灯油			
消費量	L/ha	125.0	A		
単価	円/L	77	B		
生産における OUTPUT	名称		玄米		
	収量	kg/ha	7,840.0	A	
	生産物成分	乾物率	wt%	86.2	平成 19 年度収穫物分析結果
		C 含率	乾物%	43.81	平成 19 年度収穫物分析結果
		N 含率	乾物%	1.33	平成 19 年度収穫物分析結果
		P 含率	乾物%	0.36	平成 19 年度収穫物分析結果
		K 含率	乾物%	0.29	平成 19 年度収穫物分析結果
		変換対象成分名称		でんぷん	
		対象成分含率	乾物%	85.6	※
		単価	円/kg	70	※
	名称	(テキスト)	稲わら		
	収量	kg/ha	10,114.0	A	
	生産物成分	乾物率	wt%	91.1	平成 19 年度収穫物分析結果
		C 含率	乾物%	36.65	平成 19 年度収穫物分析結果
		N 含率	乾物%	0.76	平成 19 年度収穫物分析結果
		P 含率	乾物%	0.05	平成 19 年度収穫物分析結果
		K 含率	乾物%	0.21	平成 19 年度収穫物分析結果
		変換対象成分名称		セルロース・ヘミセルロース	
		対象成分含率	乾物%	46.8	※
		単価	円/kg	23	※
	名称	(テキスト)	もみ殻		
	収量	kg/ha	4,237.0	A	
	生産物成分	乾物率	wt%	90.5	平成 19 年度収穫物分析結果
		C 含率	乾物%	38.28	平成 19 年度収穫物分析結果
		N 含率	乾物%	0.45	平成 19 年度収穫物分析結果
		P 含率	乾物%	0.07	平成 19 年度収穫物分析結果
		K 含率	乾物%	1.59	平成 19 年度収穫物分析結果
変換対象成分名称			セルロース・ヘミセルロース		
対象成分含率		乾物%	46.8	※	
単価		円/kg	0	※	

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	564.1	A	
	栽培日数	日	164	A	
	製品販売収入	円/年/ha	778,388	※	
	生産費用	種苗費	円/年/ha	11,690	A, B
		肥料費	円/年/ha	0	A
		農業薬剤費	円/年/ha	19,273	A
		光熱動力費	円/年/ha	99,030	A
		その他の諸材料費	円/年/ha	15,417	A
		土地改良及び水利費	円/年/ha	35,780	A
		賃借料及び料金	円/年/ha	16,000	A
		物件税及び公課諸負担	円/年/ha	-	データなし
		建物費	円/年/ha	-	データなし
		自動車費	円/年/ha	-	データなし
		農機具費	円/年/ha	-	データなし
		生産管理費	円/年/ha	-	データなし
労働費		円/年/ha	914,410	A, C	

主なデータ引用元

A : 2007年試験栽培記録より

B : 農林水産省大臣官房統計部 (2007c) : 農作物価指数 (平成18年12月)

C : 農林水産省大臣官房統計部 (2007i) : 農業経営統計調査平成18年産米生産費 (平成19年8月10日公表)

※本文参照

8. ソルガム Sorghum

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考
生産における INPUT	農業生産資材等	名称	種子	
		投入量	kg/ha	11.9 A
		単価	円/kg	1,120 A
		名称	消化液	
		投入量	L/ha	12,500.0 A
		単価	円/L	0 A より、山田バイオマスプラントで生産した消化液
	燃料	名称	軽油	
		消費量	L/ha	205.2 A
		単価	円/L	112 B
		名称	ガソリン	
		消費量	L/ha	59.7 A
		単価	円/L	133 B
		名称	混合油	
		消費量	L/ha	2.0 A
		単価	円/L	133 B より、ガソリンと同じとみなした
		名称	電力	
		消費量	kWh/ha	8.7 A
		単価	円/kWh	47 B
		名称	バイオガス	
		消費量	m ³ /ha	6.7 A
単価	円/m ³	0 山田バイオマスプラントで生産		
生産における OUTPUT	名称		ソルガム	
	収量	kg/ha	97,412.2 A	
	生産物成分	乾物率	wt%	25.3 A
		C 含率	乾物 %	43.37 A
		N 含率	乾物 %	0.55 A
		P 含率	乾物 %	0.13 C
		K 含率	乾物 %	0.92 C
		変換対象成分名称(1)		糖 (グルコース)
		対象成分含率(1)	乾物 %	6.7 ※
		変換対象成分名称(2)		セルロース・ヘミセルロース
	対象成分含率(2)	乾物 %	60.7 ※	
単価	円/kg	25 ※		
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	159.9 A	
	栽培日数	日	172 A	
	製品販売収入	円/年/ha	2,396,642 ※	
	生産費用	種苗費	円/年/ha	13,330 A より、種子購入費
		肥料費	円/年/ha	0 A
		農業薬剤費	円/年/ha	0 A
		光熱動力費	円/年/ha	21,950 A
		その他の諸材料費	円/年/ha	0 A
		土地改良及び水利費	円/年/ha	- データなし
		賃借料及び料金	円/年/ha	- データなし
		物件税及び公課諸負担	円/年/ha	- データなし
		建物費	円/年/ha	- データなし
		自動車費	円/年/ha	- データなし
		農機具費	円/年/ha	- データなし
	生産管理費	円/年/ha	- データなし	
労働費	円/年/ha	239,510 A より賃金単価を 1,500 円/時間人とした		

主なデータ引用元

A：2007 年試験栽培記録より

B：農林水産省大臣官房統計部（2007c）：農作物価指数（平成 18 年 12 月）

C：中村真人・柚山義人（2005）：各種バイオマス成分のデータベース整備，農工研技報，No.203，p.57-80

※本文参照

9. ナタネ Rapeseed

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考
生産における INPUT	農業生産資材等	名称	堆肥	
		投入量	t/ha	15.0 ※
		単価	円/t	4,988 A
		名称	ナタネ種子	
		投入量	kg/ha	8.0 B
		単価	円/kg	385 B
		名称	化成肥料	
		投入量	kg/ha	1,000.0 ※
		単価	円/kg	79 C
		名称	無機質肥料(硫安)	
		投入量	kg/ha	460.0 ※
		単価	円/kg	39 C
		燃料	名称	軽油
		消費量	L/ha	111.5 ※
	単価	円/L	112 C	
生産における OUTPUT	名称	ナタネ(子実)		
	収量	kg/ha	3,000.0 B	
	生産物成分	乾物率	wt%	87.1 D
		C 含率	乾物%	- データなし
		N 含率	乾物%	4.05 E
		P 含率	乾物%	1.51 E
		K 含率	乾物%	0.97 E
	変換対象成分名称	油脂		
	対象成分含率	乾物%	52.6 ※	
単価	円/kg	100 B		
資源作物生産の 農業経営情報	生産費用	延べ労働時間	時間人/ha	43.0 F
		栽培日数	日	313 F
		製品販売収入	円/年/ha	300,000 B
	生産費用	種苗費	円/年/ha	3,040 B, ※
		肥料費	円/年/ha	32,940 B, ※
		農業薬剤費	円/年/ha	0 ※
		光熱動力費	円/年/ha	30,000 *農機具費(油代その他)とあったため、燃料費とみなした
		その他の諸材料費	円/年/ha	- データなし
		土地改良及び水利費	円/年/ha	- データなし
		賃借料及び料金	円/年/ha	116,880 ※
		物件税及び公課諸負担	円/年/ha	- データなし
		建物費	円/年/ha	- データなし
		自動車費	円/年/ha	- データなし
		農機具費	円/年/ha	- データなし
		生産管理費	円/年/ha	- データなし
労働費	円/年/ha	63,184 F, ※		

主なデータ引用元

A: 農林水産省大臣官房統計部 (2006b): 農業経営統計調査平成17年米生産費(平成18年8月11日公表)

B: 青森県横浜町農業協同組合 (2006): 横浜町農業機械銀行視察資料

C: 農林水産省大臣官房統計部 (2007c): 農業物価指数(平成18年12月)

D: 上田達己・天野哲郎 (2006): バイオマス燃料生産システムの効率性・コスト試算, 農業・食品産業技術総合研究機構総合企画調整部研究調査チーム研究調査室報告, No.6, p.31-53

E: 尾和尚人 (1996): わが国の農作物の養分収支, 養分の効率的利用技術の新たな動向(平成8年9月), 農業研究センター

F: 青森県農業生産対策推進本部 (1999): 畑作物生産指導要領, p.72-78

※本文参照

10. ヒマワリ Sunflower Seed

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考
生産における INPUT	名称		堆肥	
	投入量	t/ha	30.0	A
	単価	円/t	4,988	B
	名称		種子	
	投入量	kg/ha	6,552.0	※
	単価	円/kg	2	A
	名称		化成肥料	
	投入量	kg/ha	1,000.0	※
	単価	円/kg	111	C
	名称		軽油	
	消費量	L/ha	137.1	※
単価	円/L	133	C	
生産における OUTPUT	名称		ヒマワリ子実	
	収量	kg/ha	1,800.0	A
	乾物率	wt%	70.0	D
	C 含率	乾物 %	-	データなし
	N 含率	乾物 %	-	データなし
	P 含率	乾物 %	-	データなし
	K 含率	乾物 %	-	データなし
	変換対象成分名称		油脂	
対象成分含率	乾物 %	50.0	※	
単価	円/kg	280	A	
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	46.8	A
	栽培日数	日	132	A
	製品販売収入	円/年/ha	504,000	A
	種苗費	円/年/ha	12,600	A
	肥料費	円/年/ha	80,925	A
	農業薬剤費	円/年/ha	0	A
	光熱動力費	円/年/ha	4,537	A
	その他の諸材料費	円/年/ha	0	A
	土地改良及び水利費	円/年/ha	-	データなし
	賃借料及び料金	円/年/ha	156,000	A
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	-	データなし
	建物費	円/年/ha	-	データなし
	自動車費	円/年/ha	-	データなし
	農機具費	円/年/ha	-	データなし
生産管理費	円/年/ha	-	データなし	
労働費	円/年/ha	68,768	A, ※	

主なデータ引用元

- A：北海道農政庁農業改良課（2000）：北海道農業生産技術体系第2版（平成12年12月），p.64-65
 - B：農林水産省大臣官房統計部（2006b）：農業経営統計調査平成17年米生産費（平成18年8月11日公表）
 - C：農林水産省大臣官房統計部（2007c）：農作物価指数（平成18年12月）
 - D：北海道立中央農業試験場（1986）：ひまわりの標準栽培法
- ※本文参照

11. 大豆 Soybean

項目		単位	入力データ	データ引用元・備考	
生産における INPUT	名称		無機質肥料 (苦土石灰)		
	投入量	kg/ha	1,000.0	A	
	単価	円/kg	17	B	
	名称		化成肥料	Aより, 大豆化成	
	投入量	kg/ha	400.0	A	
	単価	円/kg	79	B	
	名称		殺菌剤	Aより, ベンレートT水和剤	
	投入量	kg/ha	0.15	A	
	単価	円/kg	2,374	B	
	名称		種子		
	投入量	kg/ha	50.0	A	
	単価	円/kg	484	C	
	名称		除草剤	Aより, クリアチーン乳剤	
	投入量	L/ha	8.0	A	
	単価	円/kg	2,858	B	
	名称		農薬	Aより, スミチオン乳剤, トップジン水和剤	
	投入量	L/ha	6.0	Aより, 2種類の農業の合計量	
	単価	円/kg	2,596	B	
	燃料	名称		軽油	
		消費量	L/ha	37.4	A
単価		円/L	112	B	
名称			ガソリン		
消費量		L/ha	45.7	A	
単価		円/L	77	B	
	名称		電力		
	消費量	kWh/ha	8.0	A	
	単価	円/kWh	47	B	
生産における OUTPUT	名称		大豆 (子実)		
	収量	kg/ha	1,710.0	C	
	乾物率	wt%	87.5	D	
	C含率	乾物%	49.40	E	
	N含率	乾物%	7.44	E	
	P含率	乾物%	0.64	F	
	K含率	乾物%	1.79	F	
	変換対象成分名称		油脂		
対象成分含率	乾物%	19.4	※		
単価	円/kg	238	C		
資源作物生産の 農業経営情報	延べ労働時間	時間人/ha	89.3	A	
	栽培日数	日	135	A	
	製品販売収入	円/年/ha	406,980	C	
	種苗費	円/年/ha	24,200	C	
	肥料費	円/年/ha	36,850	C	
	農業薬剤費	円/年/ha	34,560	C	
	光熱動力費	円/年/ha	15,660	C	
	その他の諸材料費	円/年/ha	1,360	C	
	土地改良及び水利費	円/年/ha	19,360	C	
	賃借料及び料金	円/年/ha	101,380	C	
	物件税及び公課諸負担	円/年/ha	9,530	C	
	建物費	円/年/ha	8,950	C	
	自動車費	円/年/ha	10,300	C	
	農機具費	円/年/ha	56,560	C	
	生産管理費	円/年/ha	1,770	C	
労働費	円/年/ha	131,217	A, C		

主なデータ引用元

A: 農林水産技術情報協会 (1996g): 主要作物の作業体系におけるエネルギー消費原単位 (平成8年3月), p.63-67

B: 農林水産省大臣官房統計部 (2007c): 農業物価指数 (平成18年12月)

C: 農林水産省大臣官房統計部 (2007j): 農業経営統計調査平成18年産大豆生産費 (平成19年8月10日公表)

D: 香川芳子 (2003): 五訂食品成分表2003, 女子栄養大学出版部, 東京

E: 中村真人・柚山義人 (2005): 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, No.203, p.57-80

F: 尾和尚人 (1996): わが国の農作物の養分収支, 養分の効率的利用技術の新たな動向 (平成8年9月), 農業研究センター

※本文参照

農業水利施設の共同管理の支援に対する評価指標の開発方向

鬼丸竜治*

目次	
I 緒言	57
II 共同管理支援事業の実施状況	58
1 代表的な事業	58
2 事業の実施状況	60
3 自立発展性とフィードバックの観点の 必要性	61
III 評価手法の現状と将来構想	61
1 農地・水・環境保全向上対策	61
2 技術協力プロジェクト	62
IV 評価指標の開発方向	63
1 自立発展性の観点から備えるべき条件	63
2 フィードバックの観点から備えるべき条件	64
3 評価指標の開発に向けた検討事例	65
V 結言	70
参考文献	70
Summary	72

I 緒言

わが国の農業水利施設は、上位の組織である土地改良区から最末端の組織である集落等まで、重層的に構成された農業水利組織によって管理されてきた（岡本，2003）。しかし、過疎化・高齢化・混住化等の進行に伴う集落機能の低下により、農業用水や農業水利施設の適切な保全・管理が困難となってきた（農林水産省，2005a）。そのため、政府はこれまで集落等が管理してきた農地周辺の末端水路等を、農業者だけでなく地域住民等も含めた新たな組織が管理することを支援する「農地・水・環境保全向上対策」を開始した。そして、最終年度の2011年度までに施策評価を行うこととしている。しかし、新たな施策であることから、その効果の定量的な把握と定性的評価手法の確立が必要とされている（農村振興局，2008a）。

一方、国外に目を向けると、世界人口の約8割を占める開発途上国の農業水利施設は、これまで主に政府によって管理されてきた。しかし、そのような施設では、農民による勝手な操作や破壊によって、不平等な水配分による灌漑効率の低下と施設の急速な劣化が発生した。そのため、わが国を含む国際社会は、受益者である農民が新たに組織を設立し、末端水路の管理を中心に灌漑事業に参加する「参加型水管理（Participatory Irrigation Management, PIM）」の実現を支援している（石井・佐藤，2003）。なお、世界銀行（World Bank, 2008）によれば、

PIMとは「灌漑水利用者が水管理におけるあらゆるレベル、あらゆる側面に関わることをいう。」とされ、あらゆる側面とは、施設の管理のみならず計画の立案、設計、施工等を含むとされる。しかし、支援した地区では実現事例が見られる一方で、設立した農民水利組織による活動が支援終了後数年で衰退した事例も見られる（JICA, 2006）。この問題を評価の側面から見ると、支援終了後に農民水利組織による施設の管理等が持続していないことから、自立発展性の観点からの評価と評価結果に基づく対策が、適切に講じられなかったことが考えられる。ここで、自立発展性とは、支援の終了時における支援の便益の持続性をいう（OECD, 2002）。

このように国内・国外において、同じ日本国政府が、農業者等が新たに組織を設立して末端水路等の農業水利施設を共同で管理することを支援する施策（以下「共同管理支援事業」という。）を展開している（Fig.1, Fig.2）。また、この施策は、国内・国外において評価という同じ範疇の課題を有している。しかし、両者の間で評価手法や評価結果を共有しようという動きは見られない。

一般に、事業を効果的・効率的に実施するためには、受益者のニーズに応じた事業を行うことに加え、どのような効果をあげたのかを評価し、得られた教訓・提言を今後の事業の改善に反映させていくことが重要であるといわれている（国際協力機構企画・調整部事業評価グループ，2004）。

そこで、共同管理支援事業を効果的・効率的に実施するためには、他の事業での問題解決方法といった経験と知見を活用できることから、まずは事業間で支援方法に関する情報を共有することが重要である。また、農業水利施設の管理は、それに要する人的財政的負担が恒久的

* 農村計画部事業評価研究室

平成20年10月29日受理

キーワード：農業水利施設，管理，評価，自立発展性，フィードバック，指標



Fig.1 農地・水・環境保全向上対策による水路の泥上げ
(高槻地域みどり会, 山形県)

Dredging canal by the Measures to Conserve and Improve Land,
Water and Environment
(Takadama Chiiki Midori Kai in Yamagata)



Fig.2 PIM 実現を支援する日本の技術協力プロジェクトによる
水路の泥上げ (水管理システム近代化計画, タイ国)

Dredging canal by the PIM project assisted by Japan
(The Modernization of Water Management System Project in Thailand)

に必要とされるとともに、受益者負担の原則という議論が存在する(美濃・大内, 2005)ことから、II 1 aで後述する農業水利施設の管理を国が支援する施策の創設・拡充状況を見ても、末端水路の管理を国が恒久的に支援していくことは現実的に困難である。そのため、支援の効果ができるだけ長く持続するように、評価の結果得られた自立発展性に関する教訓・提言を、実施中の事業の改善や同種事業の計画立案、新たな施策立案にフィードバックすることが重要である。

これまで国内において、農業水利施設のような地域資源の共同管理に関する要因の因果関係が、市町村レベルでモデル化されている(國光, 2007)。また、特定の事例地域を対象に、非農家世帯員による農業用水路の維持管理作業への参加行動に影響を与える個人・世帯特性が明らかにされている(合崎ら, 2006)。一方、PIMの効果発現要因の分析と実現方法の提案が、複数の研究者により行われている(例えば佐藤ら, 2007)。また、PIMを含む参加型アプローチの効果を経済的に定量化する方法論が示されている(国際協力銀行開発金融研究所, 2003)。しかし、いずれも自立発展性の評価に着目したものではない。

これらの先行研究の結果を踏まえ、本報では、適切な評価と評価結果のフィードバックは、効果の持続性がより高い事業計画や施策の立案に役立つことから、共同管理支援事業の自立発展性評価手法の改善方を検討することを目的とする。具体的には、始めに国内外の代表的な事業の実施状況および評価手法の現状と将来構想を整理する。その上で、自立発展性の評価の第一段階はその発現度合いの測定であり、その手段が指標であることから、指標が自立発展性およびフィードバックの観点から備えるべき条件を検討し、国際的にも適用可能性が高い指標の開発方向を示す。

II 共同管理支援事業の実施状況

1 代表的な事業

a 日本国内

わが国の農業用水や農業水利施設は、1949年の土地改良法制定以来、土地改良区と集落等が共同で管理することを基本としてきた。その大宗を担っている土地改良区は、現在、組合員である農家の高齢化・減少等の社会経済情勢の変化により、その管理体制が脆弱化しつつある。このような状況を踏まえ、農業水利施設の管理に関する国の施策は、昭和35年の直轄管理事業の創設を始めとして、数次の制度創設・拡充を経て充実してきた(美濃・大内, 2005)。

2008年度当初時点における、農業水利施設の管理を国が支援する施策をTable 1に示す。ここで「管理」とは、操作、維持管理、組織・財政管理とする。この中で、農業者等が「新たに組織を設立して」末端水路等の農業水利施設を共同で管理する場合に該当するのは、①中山間地域等直接支払交付金の集落協定参加者による共同取組活動、②農地・水・環境保全向上対策の活動組織による共同活動、の二つである。新たに土地改良区が設立される場合もあり得るが、近年は更新事業が中心であり例外的な事例となるため省略する。

中山間地域等直接支払交付金は、その趣旨から対象地域が特定農山村地域等の9地域に、また、対象農用地が急傾斜農用地等に限定されている(農林水産省, 2005b)。これに対し、農地・水・環境保全向上対策は、対象地域の指定はなく、対象農用地も「農用地区域内に存する一団の農用地」と規定され一般的である(農林水産省, 2008a)。

そこで、本報では、日本国内における代表的な共同管理支援事業として、対象農用地が一般的で、かつ、II 2 aで後述するように、最新の食料・農業・農村基本計画

Table 1 農業水利施設の管理を国が支援する施策の概要
Outline of the government policy for supporting operation and maintenance of irrigation/drainage facilities in Japan

施策名（創設年度）	主な事業実施主体					支援の概要
	国・地方公共団体			左記以外		
	国	都道府県	市町村	土地改良区	全土連 ^{注1)}	
直轄管理事業（S35）	○					国による管理
広域農業水利施設総合管理事業（H元）	○					国による管理（同一水系複数事業）
国営造成施設県管理費補助事業（S37）		○				都道府県による管理
基幹水利施設管理事業（H8）			○			市町村による管理
国営造成水利施設保全対策指導事業（H15）	○					国による機能診断等
基幹水利施設ストックマネジメント事業（H19）		○	○	○		機能診断，予防保全対策工事
国営造成施設管理体制整備促進事業（管理体制整備型）（H12）		○	○			改良区の管理体制整備計画策定
国営造成施設管理体制整備促進事業（操作体制整備型）（H4）				○		水管理制御施設の操作技術取得
土地改良施設維持管理適正化事業（S52）				○	○ ^{注2)}	施設の整備補修とその資金造成
土地改良施設安全管理推進事業（H5）					○	事故防止等安全管理の啓発指導
基幹水利施設管理技術者育成支援事業（H15）					○ ^{注3)}	改良区の管理技術者への研修
水土保全強化対策事業（H17）					○ ^{注3)}	施設管理等の専門指導員の育成
新農業水利システム保全対策事業（H16）		○	○	○		農地集積促進のための施設改修等
土地改良区組織運営基盤強化対策（H16）		○	○	○		改良区の維持管理計画策定
地域用水機能増進事業（H10）		○	○	○		地域用水機能増進のための配水操作，補完するための施設改修
中山間地域等直接支払交付金（H17）		○	○			集落協定参加者による共同取組活動
農地・水・環境保全向上対策（H19）		○	○			活動組織による共同活動

注1) 「全土連」は，全国土地改良事業団体連合会の略称

注2) この事業では，事業実施主体ではなく資金造成主体

注3) 都道府県土地改良事業団体連合会を含む

注4) 全国農業会議所，都道府県農業会議

注5) 都道府県土地改良事業団体連合会，民間団体等

注6) 地域協議会

注7) 上表には国自ら実施する施策を含む。上表の他に，農業水利施設の管理を国が支援する施策として地方交付税措置がある。

注8) 上表は，農村振興局（2008b），農業土木機械化協会（2007），農村振興局土地改良企画課（2007），全国農村振興技術連盟（2006）をもとに作成した。

を受けて進められている末端水路の管理等に関する主要な施策であることから，農地・水・環境保全向上対策を対象とする。

b 開発途上国

開発途上国で第二次世界大戦後に建設された農業水利施設は，主に政府によって発案，建設され，政府によって管理されてきた。現在，受益農民が新たに農業水利組織を設立して末端水路等の管理や計画立案，設計，施工等に関わるPIMの実現を目指して，わが国は二国間の政府開発援助（Official Development Assistance, ODA）による支援を行っている。この支援は，援助形態から技術協力プロジェクト，円借款事業（有償資金協力），無償資金協力の3つに区分される。

このうち技術協力プロジェクトでは，国際協力機構（Japan International Cooperation Agency, JICA）が農林水

産省等の関係省庁と協力し，研修員受入と機材供与に加え，日本人専門家を相手国に派遣して直接PIMの実現を支援している。また，円借款事業では，相手国政府に貸与した資金により農業水利施設の建設を中心に行い，それに付随してPIMの実現も支援している。これまで，円借款事業は国際協力銀行（Japan Bank for International Cooperation, JBIC）が関係省庁と協力して実施していたが，2008年10月にJBICの円借款部門がJICAと統合され，技術協力プロジェクトと同じくJICAが実施機関となった。また，無償資金協力では，円借款事業と類似の支援が行われているものの，2005年度から開始されたプロジェクト・レベル事後評価の対象とされているPIM案件は2件のみである。

そこで，本報では，開発途上国における代表的な共同管理支援事業として，PIMの実現支援が主目的ではない円借款事業や，検討対象となる案件数がほとんどない無

償資金協力ではなく、直接 PIM の実現支援を目的としている技術協力プロジェクトを対象とする。

2 事業の実施状況

a 農地・水・環境保全向上対策

2005年3月に閣議決定された最新の食料・農業・農村基本計画の中で、「農地・農業用水等の資源の保全管理施策の構築」が位置付けられた。これを受けて農村振興局は、2005年度に全国415地区で農地・農業用水等の資源の保全活動取組状況の実態を調査した。2006年度には、実態調査に基づき具体化した基本スキームにより、全国568地区で、共同活動へのモデル的な支援を通じて施策の有効性、実効性の検証を行った。そして、2007年度から農地・水・環境保全向上対策を開始した。

本対策では、農業者だけでなく、地域住民、自治会等が幅広く参加する「活動組織」を新たに設立する。そして、5年以上継続して農業水利施設の機能点検や補修を含む共同活動を行う活動組織に対して、共同活動支援交付金を交付する。交付金の額は、対象となる農用地の地目や所在地等の条件により異なる。地目が田（たん水するための畦畔および灌漑機能を有している土地）で、所在地区分が都府県の場合の基礎支援に係る交付単価は、10アール当たり4,400円（国と地方公共団体の交付金の計）である。

本対策の実施期間は2011年度までの5年間と定められ、2008年7月時点で全国に18,813の活動組織が設立され、取り組み面積は1,355千ha、日本の耕地面積の約

3割に上る（農林水産省、2008b）。

活動組織が農業水利施設を管理している事例について、例えば、筆者が2008年7月に現地調査を実施した山形県天童市の三郷堰（さんごうぜき）土地改良区管内にある活動組織「高揃（たかだま）地域みどり会」では、農業者170名、町内会、JA、NPO等が構成員である。そして、約60haの水田に係る25kmの開水路（用水路、排水路）を対象に、施設の機能診断、目地詰め、通水試験、きめ細かな雑草対策等を実施している（高揃地域みどり会、2008）。

b 技術協力プロジェクト

技術協力プロジェクトは、専門家派遣、研修員受入、機材供与の三つの投入を一つの協力事業として一定期間実施するプロジェクト方式技術協力として、1957年に開始された。その後、開発途上国のニーズが従来にも増して多様化している状況を踏まえ、2002年度より、投入要素の組み合わせや投入規模、協力期間を事業の目的、成果に応じて柔軟に選択できる技術協力プロジェクトとして再構築された（外務省、2008）。

現在、協力期間が2002年度以降におよぶプロジェクトの概要を網羅したデータベースが、JICAにより公表されている。2008年度当初時点で、17プロジェクトがPIMの支援をプロジェクトの目標等に位置付けており、そのうち8プロジェクトが実施中である（Table 2）。

支援内容はプロジェクトにより異なるが、例えば、フィリピンで2007年から2010年まで実施されている「水利

Table 2 PIM支援がプロジェクト目標等に位置付けられている技術協力プロジェクト（協力期間が2002年度以降におよぶ案件）
JICA technical cooperation projects for PIM after 2002 JFY

国名	プロジェクト名	協力期間
フィリピン	ボホール総合農業振興計画	1996.11.11 ~ 2001.11.10 (F/U: 2001.11.11 ~ 2003.11.10)
ガーナ	灌漑小規模農業振興計画	1997.8.1 ~ 2002.7.31 (F/U: 2002.8.1 ~ 2004.7.31)
タイ	水管理システム近代化計画	1999.4.1 ~ 2004.3.31 (延長 2004.4.1 ~ 2005.9.30)
エジプト	ナイルデルタ水管理改善計画	2000.3.1 ~ 2005.2.28 (延長 2005.3.1 ~ 2007.2.28)
ケニア	農村社会における小規模灌漑振興	2000.8.15 ~ 2003.8.14
カンボジア	灌漑技術センター計画	2001.1.10 ~ 2006.1.9
ドミニカ共和国	灌漑農業技術改善計画	2001.3.1 ~ 2006.2.28
インドネシア	水利組合強化計画	2004.4.1 ~ 2007.3.31
ガーナ	農民参加型灌漑管理体制整備計画	2004.10.1 ~ 2006.9.30
東ティモール	マナット県灌漑稲作プロジェクト	2005.6.1 ~ 2010.3.31 [実施中]
ベトナム	農業生産性向上のための参加型水管理推進プロジェクト	2005.6.30 ~ 2010.6.29 [実施中]
エチオピア	灌漑農業改善プロジェクト	2005.9.27 ~ 2008.9.26 [実施中]
ケニア	中南部持続的小規模灌漑開発・管理プロジェクト	2005.12.8 ~ 2010.12.7 [実施中]
カンボジア	灌漑技術センター計画フェーズ2	2006.1.10 ~ 2009.7.9 [実施中]
モザンビーク	ショクエ灌漑スキーム小規模農家総合農業開発プロジェクト	2007.3.17 ~ 2010.3.31 [実施中]
スリランカ	乾燥地域の灌漑農業における総合的管理能力向上計画	2007.6.1 ~ 2011.5.31 [実施中]
フィリピン	水利組合強化支援プロジェクト	2007.10.1 ~ 2010.12.31 [実施中]

注) F/U: フォローアップ（追加的な協力）

組合強化支援プロジェクト」では、水管理や研修計画等を専門とする日本人専門家3名が現地に派遣されている。そして、フィリピン国の国家灌漑庁職員とともに、「パイロットサイトにおいて、水利組合を主体とした灌漑施設の適切な維持管理・運用の下、効率的な水配分が実施される。」というプロジェクト目標の実現を目指し、水利組合の組織見直しや再編成等の活動を行っている。

3 自立発展性とフィードバックの観点の必要性

I 緒言で述べたとおり、末端水路の管理を国が恒久的に支援していくことは現実的に困難である。そのため、共同管理支援事業では、その評価において、新たに設立された組織による農業水利施設の管理が支援終了後も持続する見込み、すなわち、自立発展性の発現度合いを適切に測定し、支援の効果ができるだけ長く持続するように、評価結果に基づく対策を講じる必要がある。

一方、フィードバックとは、評価プロセスを通じて得られた評価結果を関係者に伝達することをいい、結論、提言、教訓の収集および普及が含まれることもある(OECD, 2002)。上記のとおり、末端水路の管理を国が恒久的に支援していくことは現実的に困難である。そのため、効果の持続性がより高い事業計画や施策の検討に役立つことから、評価の結果得られた自立発展性に関する教訓・提言を、実施中の事業の改善はもとより、同種事業の計画立案、新たな施策立案にフィードバックすることが必要である。

このように、末端水路の管理に着目した場合の農地・水・環境保全向上対策や、PIM 実現支援を目的とした技術協力プロジェクト、といった共同管理支援事業の評価では、国内、国外を問わず、自立発展性とフィードバックの観点が必要であるという共通点がある。

III 評価手法の現状と将来構想

1 農地・水・環境保全向上対策

a 評価手法の現状

本対策は2007年度に開始されたことから、その評価手法はまだ確立されていない(農村振興局, 2008a)。

農村振興局は、有識者による農地・水・環境保全向上対策の有効性、実効性の検証を含む多角的な議論の結果を、「農地・農業用水等の資源保全施策検討会とりまとめ報告」として2007年に公表した。これによれば、評価の基本的な考え方は次のとおりである(農村振興局, 2007a)。

評価の対象は、本施策の直接的な効果である、①農地・農業用水等の適切な保全(農地・水の視点)と、②生態系や景観等の農村環境の保全(農村環境の視点)とし、③ステップアップ(活動組織の体制強化等)のための支援や活動参加者の多様化等による自律的な成長・発展の促進についても併せて評価を行う。その上で、農地・水・

環境保全向上の活動が地域に定着し、持続的に発展していくための呼び水としての役割を担う観点を踏まえ、④本施策の実施による地域社会機能の強化の観点(地域社会の視点)からも実施する。

評価の方法は、評価項目の達成度を、活動項目の増加量等の把握による定量的評価と、アンケート調査によって把握する定性的評価を組み合わせる。国は、都道府県と協力して、活動組織から提出される実施状況を基に定量的評価を行う(原則として毎年実施)とともに、活動組織の代表者に対するアンケート調査(原則として対策期間の中間年と最終年の2回)により、施策効果の定性的な把握に努めることとして、さらに具体的な方法の検討を進める。その際、客観性、透明性の確保、評価結果の活動組織へのフィードバックに特に留意する。

報告に至る議論を受けて2007年3月に施行された本対策の実施要綱には、交付金の効果の評価等を行うため国に第三者機関を設置することや、活動組織の取組の評価等を行うため都道府県に第三者機関を設置することが規定された。

国に設置された農地・水・環境保全向上対策第三者委員会は、2008年3月に第1回委員会を開催した。評価については、ソーシャル・キャピタルが1つの指標になるのではないかな等の意見が出され、検討を進めることとなった(農村振興局, 2008c)。なお、同年7月に開催された第2回委員会では、対策の実施状況に関する現地調査等が行われた。

上記以外にも、2006年度に、農村振興局から委託を受けた日本水土総合研究所が施策評価手法の検討を行い、指標と指標入手手段に相当する評価方法の考え方を示した(Table 3)。あわせて、ソーシャル・キャピタルの観点から見た評価手法検討の一環として、アンケート票案の作成を行った(日本水土総合研究所, 2007a)。

b 将来構想

農村振興局は、2011年度の施策評価に向け、全国の活動状況等に関するデータを整理・分析するとともに、対策の定量的・定性的な効果を把握する手法を検討するため、2008年度から新規事業「農地・水・環境保全向上対策の評価に関する検討調査委託事業」を開始した(農村振興局, 2007b)。

2008年度は、対策の目的、活動内容、実績報告データ等から、評価の視点、評価項目、評価指標を検討することとしている(農村振興局, 2008c)。

また、上記aで述べた農地・水・環境保全向上対策第三者委員会は、この委託事業で作成された基礎資料をもとに、今後、2011年度までに現地調査を含め年2～3回程度開催し、①同対策の効果の評価手法の検討、②評価結果の検証、③評価結果を踏まえた同対策の効果的実施についての助言を行うこととしている(農村振興局, 2008d)。

Table 3 農地・水・環境保全向上対策の評価指標と指標入手手段の一覧

Ideas of the evaluation indicators and the means of verification of the measures to conserve and improve land, water and environment

評価区分	指 標	入手手段
定量的評価	保管理不良な遊休農地の発生地区数	実 績：交付金返還地区における要因分析
	耕作放棄地の発生率	対策前：活動計画, 実績：実施状況報告
	農地・水向上活動の実施活動項目数	対策前：活動計画, 実績：実施状況報告
	農村環境向上活動の実施活動項目数	対策前：活動計画, 実績：実施状況報告
	学校教育と連携する地区数	対策前：活動計画, 実績：実施状況報告
	ステップアップに取り組む地区数	実 績：実施状況報告
	活動参加者数（農業者と非農業者に区分）	実 績：実施状況報告
定性的評価	活動の参加度（地域住民の意識の変化）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	水路の機能の発揮状況（維持管理の促進）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	農業用水の水質（農村環境の状況）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	農業用水の多面的機能の発揮状況（多面的機能）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	話し合いやイベントの頻度（地域力の向上）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	人材育成や教育（地域の発展・活性化の可能性）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）
	地域の問題解決力（地域の信頼, 互酬性）	アンケート調査（対策前後で回答を比較）

注) 日本水士総合研究所 (2007a) をもとに作成

2 技術協力プロジェクト

a 評価手法の現状

わが国の ODA 評価は、主に外務省と実施機関である JICA および JBIC によって実施されてきた。その中で、個々のプロジェクトの評価は実施機関が、共通の目的を持った複数のプロジェクトの集合であるプログラムや、さらに上位の政策を対象とした評価は外務省が重点的に行ってきた（外務省国際協力局評価室, 2008）。

国際協力機構企画・調整部事業評価グループ (2004) によれば、JICA による技術協力プロジェクトの評価は、①プロジェクトを取り巻く現状を把握・検証し、②それを評価 5 項目という 5 つの判断基準から価値判断し、③さらに提言・教訓を次の段階へフィードバックする、という 3 つの枠組みで構成されている。

プロジェクトの現状把握と検証では、実績の検証、実施プロセスの検証、因果関係の検証が行われる。

評価 5 項目による価値判断では、現状把握・検証の結果を基にデータを解釈し、評価 5 項目と呼ばれる基準に沿って価値判断を行う。評価 5 項目とは、1991 年に経済協力開発機構 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) の開発援助委員会 (Development Assistance Committee, DAC) で提唱された開発援助事業の評価基準であり、妥当性、有効性、効率性、インパクト、自立発展性の 5 項目である。妥当性はプロジェクトの正当性や必要性を、有効性はプロジェクトの効果を、効率性はプロジェクトのコストと効果の関係を、インパクトはプロジェクトによる波及効果を、自立発展性は持続可能性とも呼ばれ、支援が終了しても効果が持続するかを問う視点である。

そして、最後に、評価 5 項目ごとの評価結果を受け具

体的な提言や教訓を導きだし、関係者へフィードバックする。提言は、評価対象プロジェクトに関して関係者が取るべき具体的な措置、提案、助言である。これに対し教訓は、評価対象プロジェクトの経験から導き出されるもので、実施中の同種プロジェクトや将来開始される同種プロジェクトの参考となる事柄である。

この評価の枠組みの中で特徴的なのが、プロジェクトの運営管理ツールであるロジカル・フレームワーク (Logical Framework) の一形式「プロジェクト・デザイン・マトリックス (Project Design Matrix, PDM)」の活用である。PDM は、上位目標、プロジェクト目標、成果、活動、投入等のプロジェクトの構成要因を論理的に示した枠組みである。また、「指標 (Objectively Verifiable Indicators)」として、上位目標、プロジェクト目標、成果それぞれの達成度を具体的に示す基準 (目標値等) が設定されている (Table 4)。技術協力プロジェクトでは、計画段階で PDM を作成し、実施期間中は PDM に基づいてプロジェクトの進捗管理を行っている。

技術協力プロジェクトの評価は、事前評価、中間評価、終了時評価、事後評価の 4 種類あり、事前・中間・終了時評価は相手国と合同で実施される。中間評価以降は、PDM に記載された項目を活用し、評価グリッドと呼ばれる評価調査の計画表が作成される。例えば、評価の判断基準、判断方法、データとしては、PDM の指標がそのまま使用できるかどうか検討され、使用できない場合に新たな評価指標が追加される。

b 将来構想

JICA は、技術協力プロジェクトの評価の質を高めるために、次の事項等を留意点として評価の改善を進めて

Table 4 PDMとその中の指標の例
Example of PDM and Objectively Verifiable Indicators

	指標	入手手段	外部条件
<u>上位目標</u>			
X 地域の作物生産の増大	米の生産高が A トン以上	統計資料	農業政策が維持される
<u>プロジェクト目標</u>			
X 地域内の Y 地区における灌漑効率の向上	乾期灌漑面積が B ヘクタール以上	実測調査	作物の市場価格が暴落しない
<u>成果（アウトプット）</u>			
1. 水利組合による配水計画の策定・実行	1. 計画値と実測値の差が C%以下	1. 聞き取り調査	災害によって施設が壊滅的被害を受けない
2. 水利組合による継続的な施設の管理	2. 水利費徴収率が D%以上	2. 水利組合の記録	
<u>活動</u>		<u>投入</u>	農民が水利組合を辞めない
1-1. 水利組合の設立	日本側	相手国側	<u>前提条件</u> 農民が参加する
1-2. 配水計画策定の研修	長期専門家	カウンターパート	
...	機材	建物・施設	
2-1. 施設管理指針の作成	研修員受入	運営費	
2-2. 施設補修の研修			
...			

注) 国際開発高等教育機構 (2007) をもとに作成

いる (国際協力機構, 2008)。

- ① PDM の作成に関しては、成果からプロジェクト目標・上位目標に至る因果関係や各指標を明確にすること、活動や目標と対応する適切な指標を設定すること、目標値を設定し結果の客観性を確保すること。
- ② 提言・教訓に関しては、阻害要因等から十分に提言・教訓を抽出し、提言では改善方策を活用できるようにすること、また、教訓においては類似案件での活用可能性を念頭に置いて具体的な形で提示すること。
- ③ 指標の入手手段に関しては、PDM に記載されている手段では不可能な場合は代替手段によって情報を入手するように努めること、評価の客観性を高めるために情報収集の対象範囲を広くすること。

また、2008 年 10 月に JBIC の円借款部門が JICA と統合され、技術協力、円借款事業、無償資金協力の 3 つの援助手法を一元的に実施する援助機関が発足した。そのため、評価についても国民に対するアカウンタビリティを十分に確保し、3 つの援助手法の特性に留意しつつ、全体として整合性があり、かつ相乗効果を発揮できる包括的な評価体制、評価制度の構築を目指して検討が進められている (国際協力銀行, 2008)。

IV 評価指標の開発方向

評価の定義は様々であるが、国際的にも適用可能性が高い指標の開発方向を検討する観点から、わが国も加盟

する OECD の定義をみると、「現在実施中、あるいは既に終了したプロジェクト、プログラム、政策およびその計画、実施、結果についての体系的かつ客観的な査定」(外務省ら訳)とされている (OECD, 2002)。

また、評価における指標の定義は、「量的または質的な要素または変数のことであり、これによってインターベンション (ドナーおよび非ドナーが支援を行うための手段) の達成度を測定するため、支援によって生じた変化を明示するため、または開発関係者の実績を査定する手助けとなるための簡潔かつ信頼できる手段がもたらされる」(外務省ら訳)とされている (OECD, 2002)。

国際的な評価や指標を国内にも適用できることから、本報ではこれらに従う。

1 自立発展性の観点から備えるべき条件

a 自立発展性の観点の明確化

共同管理支援事業のうち技術協力プロジェクトでは、III 2 a 評価手法の現状で述べたとおり、評価 5 項目の一つとして自立発展性の観点から評価することが基本となっている。

一方、評価の視点や指標を検討中の農地・水・環境保全向上対策では、効果の評価等を行うため国に設置された第三者委員会の第 1 回委員会の中で、「活動組織の最大の問題は、組織設立当初は活動が活発であるが年が進むにつれてマンネリ化してくること」という意見が出された (農村振興局, 2008c)。また、農村振興局は、ステップアップ支援と呼ばれる、活動組織の特定非営利活動法

人化や自立的活動実施に対する追加の支援（促進費の交付）と、活動組織による体制整備構想の取りまとめを同対策に導入し、これらも評価することとしている（農村振興局，2007a）。

一般に、農林水産省が行う政策評価は、必要性、効率性、有効性の観点を中心に、必要に応じて公平性、優先性の観点から評価を行うことを基本として、政策の特性、評価方式等に応じた適切な観点を選択することとしている（農林水産省，2008c）。しかし、農地・水・環境保全向上対策は、実施期間が5年間と定められ、かつ、「活動が地域に定着し、持続的に発展していくための呼び水としての役割を担う」（農村振興局，2007a）とされていることから、実施期間内に自立発展性（効果の持続性）の観点を明確に区分して漏れなく評価し、評価結果に基づいて実施期間終了後の施策立案の要否・内容を判断する必要がある。

b 自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因の分析と指標化

自立発展性の発現度合いを測定するために、「活動参加者数」という指標を設定した場合を想定する。

一般に、支援開始時点の参加者よりも終了時点の方が相当数多ければ、支援を受けた結果活動が盛んになり今後も持続する見込みがあると判断される。しかし、それは活動のリーダーがメンバーの不満を抑え込んでいたり、メンバーが支援を得られる間だけは協力しようと考えたりした結果達成された数値かもしれない。その場合、支援終了後に活動が持続する見込みは低い。

このことから、自立発展性の発現度合いを測定するには、定量的に把握できる現象を観測することに加え、その現象が成立している理由、言い換えれば自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因を分析することが必要である。

貢献要因と阻害要因の分析は、地域特性があることから全地区で行うことが望ましい。しかし、分析に必要な追加データの収集等の評価に伴う過重な負担や、十分な分析能力を有した評価者の確保に伴う負担を避ける観点から、すべての地区で等しく高い水準の要因分析を行うことは非現実的である。

そこで、既に自立発展性の観点から評価が行われている共同管理支援事業の評価結果をもとに、自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因を分析し、得られた結果に基づいて指標を開発することが考えられる。これは、「評価指標の確認」が、すなわち「要因の確認」となり、また、要因分析が評価者の偏向（特性）に左右されにくくなるという理由からである。

この指標を使用すれば、他の地区でも評価に関する基本的な知識と経験だけで、一定水準の要因分析が可能になる。また、農業者等が新たに組織を設立して末端水路等を共同で管理することを評価する、という共通点があ

ることから、一般的に共同管理支援事業で活用できる可能性がある。

なお、分析の対象とする範囲が広域化するほど条件は平均化され、真に効果的な方策を見つけ出すための分析結果は得られなくなる（橋詰，2003）ことから、要因分析の対象は集落程度の規模を持った地区とすることが望ましい。

c 要因分析への利用可能性

上記bの「活動参加者数」という指標の中の「活動」という用語は、水路の維持管理や配水操作、組織運営等、さまざまな活動を含むことが一般的である。

このような、幾つかの現象を総合的に表す指標は、指標の総数を減らし評価に伴う負担を軽くする利点がある。一方、その指標を構成する個々の現象も測定し結果を記録するという負担をしない限りは、現象の成立に対する貢献要因と阻害要因の分析に利用することは難しいという欠点がある。

2 フィードバックの観点から備えるべき条件

a 自立発展性の要因分析結果のフィードバック

農地・水・環境保全向上対策では、Ⅲ1 a 評価手法の現状で述べたように、「評価結果の活動組織へのフィードバックに特に留意する」とされている（農村振興局，2007a）。

ここでいうフィードバックには、①評価対象活動組織自体の活動の効率性・有効性を高めるため、関係者に対して具体的な提案・助言や改善措置を行うことを目的とする場合と、②評価対象活動組織から得られた教訓を全国に約2万ある他の活動組織の活動の改善に反映させることを目的とする場合の2種類ある。これに加えて、同対策終了後の新たな支援施策の効果の継続性を高めるために役立つことから、その施策の検討に、評価結果、特に自立発展性の要因分析の結果をフィードバックする必要がある。

さらに、Ⅳ1 b 自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因の分析と指標化で述べたように、自立発展性に関する要因を指標化することによって、その後実施されるすべての地区で一定水準の要因分析が可能になることから、事業参加者は自立発展性の貢献要因と阻害要因を知ることができるようになる。その結果、事業参加者の自立発展性に関する共通認識が形成され、教訓・提言のフィードバックが円滑に行われることにつながる。

b 直接性、具体性を持った指標と指標相互の関係

国内外を問わず、優良事例と呼ばれる先行する地区の成功に至る経験や知見が、後発地区では「自分の地区とは前提条件が異なる。具体的に何を参考にすれば良いのか分からない」という理由から、必ずしも活用されない事例が聞かれる。先行する地区の経験や知見が後発地区に適切に反映されていれば、このような話は聞かれない

ことから、この原因の一つとして、先行事業の経験や知見をどのようにフィードバックするかという問題が適切に取り扱われていないことが考えられる。

そのため、自立発展性の要因分析の結果をフィードバックする際には、後発地区の事業参加者が結果について共通認識を形成できることから、個々の要因をわかりやすく表現し、かつ要因相互の関係も含めて（ストーリー性を持たせて）フィードバックする必要がある。これを、IV 1 b 自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因の分析と指標化で述べた内容から言い換えれば、わかりやすい指標を指標相互の関係も含めて開発する必要がある。

わかりやすい指標について検討するため、共同管理支援事業の目標が、「地域の農業者だけでなく地域住民等の参画を得て、水路の適切な管理を行う」とされている場合を想定する。「水路の適切な管理を行う」という現象を測定する場合、水路の点検、草刈り、目地詰め等の標準的な管理に必要な活動項目を指標とし、実施した項目数が目標値を超えた場合に適切と判断する考え方がある。一方、「雑草や土砂堆積により水路の通水障害が発生したという報告件数」、「水路の損傷箇所の発見から補修完了までの日数」等の直接的かつ具体的な指標を設定して判断する考え方もある。

フィードバックの観点からは、厳密性では劣るものの、後者の指標の方が直接的・具体的であることから、水路が適切に管理されているか否かについて事業参加者が共通認識を形成しやすい。

また、指標相互の関係という点から、「活動参加者数」、「活動の実施項目数」、「話し合いやイベントの頻度」という指標が設定されている事業を想定する。例えば、「活動参加者数」という指標の目標値を達成しようとして、活動のリーダーがメンバーの不満を抑え込んで参加を促した場合、メンバーが反発し、その後の新たな活動項目の開始に非協力的になったり、話し合いに来なくなったりすることが想定される。その結果、「活動の実施項目数」、「話し合いやイベントの頻度」という指標の目標値の達成は困難になる。

このように、ある指標の達成を過度に優先させて行動すると、別の指標の達成に意図せず悪影響を及ぼす可能性があることから、事業参加者が共通認識を形成できるように、指標を設定する際には相互の関係も明示する必要がある。

3 評価指標の開発に向けた検討事例

技術協力プロジェクトは、評価手法が普及し結果も公表されている。また、指標の設定から評価に至るまで、相手国との合同評価を基本としている。

そこで、農業水利施設の管理に関して、多様な国に適用可能な多数の指標を開発・使用してきた技術協力プロジェクトを事例として、主に自立発展性とフィードバ

ックの観点から実際に使われている指標の課題を明らかにする。さらに、上記の「1 自立発展性の観点から備えるべき条件」、「2 フィードバックの観点から備えるべき条件」を備えた新たな指標を検討する。

この検討結果は、自立発展性とフィードバックの観点が必要という共通点、農業者等が新たに組織を設立して末端水路等を共同で管理することを評価するという共通点の2つの共通点があることから、農地・水・環境保全向上対策等の他の共同管理支援事業の評価手法の検討においても活用できる。

a 課題

I 緒言で述べたとおり、本報では、共同管理支援事業（国内・国外において、農業者等が新たに組織を設立して末端水路等の農業水利施設を共同で管理することを支援する施策）の自立発展性評価手法の改善方策を検討することを目的としている。この目的に合致したプロジェクトが課題抽出の対象となることから、Table 2 に示した17プロジェクトのうち、①水管理の前提条件となる気象条件等が日本と類似のアジアモンスーン地域で実施されている（残りは、気象条件等が日本とは異なるアフリカと中南米であり、直接参考にならないことから除外）、②農民に対するPIM実現支援がPDMのプロジェクト目標や成果に明記されている（残りは、政府職員のみに対する支援であるため参考にならないことから除外）、という2つの条件を満たす8プロジェクトを対象とする。

Table 5 に、対象プロジェクトのPDMから抜き出した、上位目標、プロジェクト目標、成果それぞれの指標（PIM実現支援に直接関係しない流通、専ら栽培・施設建設・研修実施等に関する成果の指標を除く）を示す。PDMに記載された指標は一つ以上の文で表現されていることから、原指標を要約して整理した。

抽出・整理した指標の内容を見たところ、「作付面積」と「作付率」、「生産量」と「収量」等、内容が類似のもの同士に区分することができた。さらに、「作付面積・率」と「生産量・収量」は、より大きな概念である「生産に関するもの」として区分することができた。同じように、他の指標も幾つかの概念にまとめることができた。そこで、指標一つずつよりも分析に要する労力が少なくなるとともに、指標全体の概観を理解し、特徴を捉えやすくなることから、表の右側の上段に「類型化区分」、中段に左から「所得」、「生産」、「受益」、「水管理」、「その他」、下段により詳細な区分を記載し、類型化区分した。

(1) 自立発展性に関する指標の不足

農民が灌漑施設を管理する「技術」、管理を担う受け皿としての「組織運営」、その組織運営に使う「財政」のうち一つでも欠けると、物理的に管理を持続することはできない。このように、技術、組織運営、財政は灌漑施設の管理に最低限必要な側面であることから、Table 5 の成果の指標をこれらの側面から分析する。

Table 5 PIM実現支援に関する技術協力プロジェクトの主な指標 (協力期間が2002年度以降におよぶ案件)
Major objectively verifiable indicators of JICA technical cooperation projects for PIM after 2002JFY

プロジェクト名 (仮称)	要約した指標 (△は上位目標の指標、 ●はプロジェクト目標の指標、 それ以外は成果の指標)	類型化区分													
		所 得	生産			受益		水 管 理						そ の 他	
			作 付 面 積 ・ 率	生 産 量 ・ 収 量	単 収 他	面 積 他	操 作	維 持 管 理	組織・財政管理				水 管 理 / P I M		
									組 合 (員) の 数	会 合 へ の 出 席	会 合 開 催	組 合 規 則 制 定			水 利 費 徴 収 率
No.1 Ph1996	△米の生産量、貧困発生率 ●灌漑地域における平均単収	○	○	○											
	水利組合活動に関する会合の出席率 水利費徴収率 水利組合の定期的に適切に記帳された会計帳簿									○			○		
No.2 Th1999	△農業所得、持続的営農システム ●乾期畑作物の栽培面積 ●(政府管理の)支線水路の配水計画が策定・実行	○	○		○										
	設立された水利組合(連合)数 政府と水利組合連合が配水計画を協力して決定 計画に基づき政府が施設を操作 計画に基づき施設を操作・管理する組合割合									○					
No.3 In2004	△(組合強化)指針案の取り組みを開始する組合割合 ●乾期灌漑水稲の作付面積割合 ●水利組合強化指針案の策定		○												○
	水利組合役員(組合員)の総会出席率 水利費徴収率の増加割合 組合の自主的な水利調整による水配分実績値 組合が管理する水路延長 組合策定の作付スケジュールに沿った作付面積割合 乾期水稲の収量			○							○				○
No.4 Ti2005	△農家所得、事業の成果が他地区で適用 ●米の生産量	○		○											○
	営農計画に従って適切に水配分 水利組合規則が制定 組合の会合が定期的に開催 組合の予算と収支が農民に開示 農民が堆砂取りや草刈り等の組合の活動に参加									○					○
No.5 Vi2005	△作付率と収量の増加、灌漑費用・生産費用の削減 ●畑作物の作付率の増加割合 ●畑作物の単収の増加割合 ●灌漑用ポンプの運転時間の減少割合	○	○		○										
	(PIMに関する)ガイドライン、マニュアルの作成 PIMを実践した研修受講済み技術者の割合 PIMに参加した研修受講済み農民リーダーの人数 水配分計画の実行 操作マニュアルの実行 施設の維持・補修ガイドラインの実行 政府と農民組織等との(水管理の)話し合いの場の設置														○ ○ ○ ○

(Table 5 続き)
Table 5 continued

プロジェクト名 (仮称)	要約した指標 (△は上位目標の指標, ●はプロジェクト目標の指標, それ以外は成果の指標)	類型化区分																		
		所 得	生産			受益		水 管 理						そ の 他						
			作 付 面 積 ・ 収 量	単 収	そ の 他	面 積	そ の 他	操 作	維 持 管 理	組織・財政管理					水 管 理 / P I M					
										組 合 (員) の 数	会 合 へ の 出 席	会 合 開 催	組 合 規 則 制 定			水 利 費 徴 収 率	そ の 他			
No.6 Ca2006	△灌漑面積, 米の単収, 農家の生計 ●研修目標を達成した技術者の割合 ●研修管理システムに満足した技術者の割合 ●(農民による) 効率的な水管理が実現した末端水路延長 ●学習した水管理を開始した農民数	○		○	○													○	○	
	草刈り, 土砂上げ, 打合せ等の水管理が開始																	○		
No.7 Sr2007	△農業所得, 農業生産性 ●一連の研修の開催数 ●農民の研修・普及に対する満足度の増加率 ●農民組合の能力評価の増加率 ●研修アドバイザー委員会の継続的な開催	○			○														○	○
	農民組合の組合員数の増加率 総会・定期会合への組合員参加数の増加率 農民組合内の部会設立数 修得した技術・手法を实践した研修受講職員割合 組合が灌漑スケジュールを作成・利用 組合が灌漑スケジュールに基づく適切な水管理を実施										○		○				○		○	○
No.8 Ph2007	△近隣地区を含め実施した方策を採用した水利組合数 ●作付率が向上した組合数 ●灌漑面積の計画と実績の差が減った組合数 ●水配分に関する組合員の満足度が向上した組合数		○																	○
	操作・管理の規約が存在する組合の増加数 理事会(総会)出席率が基準値以上の組合の増加数 操作・管理への出席率が基準値以上の組合の増加数 正式登録された組合の増加数 水配分計画/作付計画を遵守している組合の増加数 政府・組合間で合意された水配分計画/作付計画 政府・組合間の(水配分)調整会議の実施回数 水配分計画/作付計画策定会議への組合からの出席率 モニタリングレポートの提出期限を遵守した事務所数									○	○								○	○

注) 各プロジェクトのPDMをもとに作成

技術に関する指標は、操作、維持管理、水管理/PIMに類型化区分されたものがプロジェクト名No.1を除く7つのプロジェクトで設定されている。

組織運営に関する指標は、組合(員)の数(プロジェクト名No.2, 7, 8。以下同様に表記)、会合への出席(No.1, 3, 7, 8)、会合開催(No.4)、組合規則制定(No.4)に類型化区分されたものが設定されているが、2つのプロジェクト(No.5, 6)では設定されていない。

財政に関する指標は、水利費徴収率(No.1, 3)に類型化区分されたものと、その他に類型化区分された「水利組合の定期的に適切に記載された会計帳簿」(No.1)、「組合の予算と収支が農民に開示」(No.4)が設定されているが、5つのプロジェクト(No.2, 5, 6, 7, 8)では設定されていない。

また、先行研究によれば、水管理組織の持続的な活動を実現するためには、組織運営の透明性、農民への説明責任、農民間の公平性の実現等が必要であるとされている(佐藤・佐藤, 2006)。この観点からTable 5の組織・財政管理に類型化区分された指標を見ると、透明性、説明責任、公平性に関する指標は、「組合の予算と収支が農民に開示」(No.4)とした1つのみである。

このように、現在は自立発展性の観点、特に組織運営、財政に関する指標が少ない。

(2) 指標相互の関係に関する視点の欠如

Table 4のPDMと其中的指標の例から明らかなように、PDMには指標相互の関係に関する情報は直接記載されていない。

指標相互の関係を検討するため、例えばTable 5のプロジェクト名No.3の成果の指標のうち、水管理に類型化区分された「水利費徴収率の増加割合」という指標を取り上げる。この指標の目標値を達成しようとして、水利組合の役員、もしくは、それを支援する政府職員が徴収を強行した場合、組合員は反発することから、その後の組合の会合や水路の維持管理作業に参加しなくなることが想定される。その結果、「水利組合員の総会出席率」、「組合が管理する水路延長」という別の指標の目標値の達成は困難になる。

このように、指標相互の関係が示されていないと、ある指標の達成を目指した行為が、別の指標の達成に意図せず悪影響を及ぼす可能性がある。

(3) 総合的な指標の存在

Table 5の成果の指標のうち水管理に類型化区分されたものをみると、「水管理」や「PIM」という用語を使って総合的に(一括りに)示されている場合(No.5, 6, 7)と、操作、維持管理、組織・財政管理という水管理を構成する要素に分けて示されている場合(No.1, 2, 3, 4, 5, 7, 8)がある。

また、プロジェクト名No.1とNo.3で使用されている「水利費徴収率」という指標は、直接的には組織・財政管理や施設の維持管理が良好に行われる必要条件である

収入確保の状態を表す。同時に、水利費の負担者である農民は、施設の操作、その結果としての配水状況に満足しなければ金は払わないので、間接的には操作に対する農民の満足度も表しているといえる。

IV 1 c 要因分析への利用可能性で述べたとおり、このような総合的な指標は、指標の総数を減らし評価に伴う負担を軽くする利点がある。しかし、これらの指標から、指標に含まれるどの要素が目標値の達成に貢献したのかを知ることはできない。

さらに、対象とする事業地区の農家所得が総じて低い場合、「水利費徴収率」は豊凶や市場価格の変動による所得の多寡等の外部要因に影響されることがあることから、PIMの指標として単独で使用することは不適切である。

(4) 抽象的な指標の存在

Table 5の指標の中には、「効率的な水管理が実現」(No.6)、「適切な水管理を実施」(No.7)、という抽象的な表現が見られる。このような抽象的な指標は、評価者とそれ以外の者や、先行地区と後発地区の事業参加者の間で認識の相違を発生させる原因となることから、不適切である。

(5) 多様な指標の存在

Table 5の全プロジェクトで、生産に類型化区分された指標が設定されている。灌漑施設整備と水管理改善における基本目標として最大収量の実現を目指すことは適切であり、この認識が関係者の間で共有されていると言える。

一方、PIMの大きな目的とされる「灌漑効率の向上」と「灌漑施設の持続性確保」(日本水土総合研究所, 2007b)の観点から、水管理に区分された指標を見る。上位目標とプロジェクト目標の指標に限定しても、次のとおり、水管理に関する指標が設定されている7プロジェクトすべてで異なる指標が設定されている。

- No.2 (政府管理の)支線用水路の配水計画が策定・実行
- No.3 (組合強化)指針案の取り組みを開始する組合割合。水利組合強化指針案の策定
- No.4 事業の成果が他地区で適用
- No.5 灌漑用ポンプの運転時間の減少割合
- No.6 (農民による)効率的な水管理が実現した末端水路延長。学習した水管理を開始した農民数
- No.7 農民組合の能力評価の増加率
- No.8 近隣地区を含め実施した方策を採用した水利組合数。水配分に関する組合員の満足度が向上した組合数

開発途上国では経済・社会・文化等の条件の違いから、国や地域によって、求められる施設の整備水準や管理水準が異なる。そのため、必ずしも指標の種類を限定する必要はなく、各地区の条件に合わせた指標を設定することは適切である。

その一方で、結果として存在する多様な指標は多様な認識を生むことから、PIM 実現支援という同じ目的を持つ事業にもかかわらず、その達成度について事業参加者の共通認識の形成を阻害し、先行事業の教訓を後発事業の改善にフィードバックさせることを難しくしている一因と考える。

b 新たな指標の開発方向

(1) 自立発展性に関する評価指標の開発

Table 5 のプロジェクト名 No.1 では、会合出席率、水利費徴収率、組合の会計帳簿の3つを PIM に関する指標として、2001 年に終了時評価が行われた。その結果、「水利組合の運営・管理等に係る自立発展性については不十分な点が認められた」(国際協力事業団農業開発協力部, 2001) と評価されたことから、追加的な協力である「フォローアップ」が 2003 年まで行われ、プロジェクトは終了した。

その後、2005 年に行われた事後評価では、「2003 年のプロジェクト終了後、本プロジェクトの下で活動が活性化され、強化された 4 つの水利組合の組織活動は、2004 年の水不足により灌漑サービスが停止したこと、国家灌漑庁が対象地域にフルタイムの組織強化担当者を派遣できなかったことにより衰退した。」とされた (JICA, 2006)。

終了時評価の中で自立発展性が適切に評価され、評価結果に基づいて必要なフォローアップが行われていれば、このようにわずか 2 年では「衰退」しないことから、評価結果をフォローアップへどのようにフィードバックするかという問題が適切に取り扱われなかった可能性がある。

このような事態の発生を防止する方法として、IV 1 b 自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因の分析と指標化で述べた、貢献要因と阻害要因の指標化を提案する。

具体的には、PIM の効果発現要因の分析と実現方法の提案を行った先行研究の成果を基に、支援事例の現地調査や農民からのアンケート調査を行い、農民組織による水管理の実現に関する要因の因果関係を共分散構造分析等の統計手法によりモデル化する。なお、共分散構造分析とは、因果関係があると想定される複数の要因を変数とし、それらの要因に関するアンケート調査結果等を入力データとして、変数相互の関係の強さを示す係数を計算し、因果関係の有無を検証 (係数が大きい変数と変数、すなわち要因と要因は因果関係が強いと判断) する手法である。そして、モデルを分析し、要因の中から自立発展性と因果関係が強いものを抽出する。それらの要因を評価指標とし、要因相互の因果関係を基に評価指標相互の関係の有無も明示する。

新規プロジェクトの開始に際しては、それらの評価指標の中から地域特性等の条件に合わせて選定したものを

設定することを基本とし、必要に応じて他の観点からの指標を追加する。

この結果、自立発展性に関する複数の指標が設定され、指標相互の関係も明らかにされることから、評価の質の向上はもとより、開発された指標を事業実施期間中のモニタリングにも使用することにより、自立発展性の向上に直結する活動を的確に推進することが期待できる。

(2) 補完的指標の開発

IV 3 a (3) 総合的な指標の存在で述べたとおり、水管理、PIM、水利費徴収率という総合的な指標は、要因分析に利用しにくい欠点がある。

これを改善する方法として、例えば「水管理」という用語を使用した指標を設定する場合には、指標に含まれるどの要素が目標値の達成に貢献したのかを知ることができるようになることから、水管理の構成要素とされる操作、維持管理、組織・財政管理それぞれに関する指標を補完的に設定することが有効である。

また、IV 3 a (4) 抽象的な指標の存在で述べた、「効率的な」、「適切な」等の抽象的な表現の指標は、評価者とそれ以外の者や、先行事業と後発事業の事業参加者の間で共通認識が形成され、評価や評価結果のフィードバックが円滑に進むことから、ブレークダウンして具体的に定義する必要がある。

(3) 最小限の共通指標の導入

開発途上国では、国や地域によって、求められる施設の整備水準や管理水準が異なる。そのため、IV 3 a (5) 多様な指標の存在で述べたように、多様な指標が設定され、結果的に先行事業の教訓が後発事業の改善にフィードバックされにくくなっている。

この問題を解決するためには、各事業で同じ指標を使って評価をすれば、異なる指標を使っている場合に比べて事業参加者が評価結果について共通認識を形成し易くなることから、国や地域を問わずに成果や目標の達成度を示すことができる最小限の共通指標を、先行・後発事業双方に導入することが有効である。

例えば、事業に参加した農民の満足度は、事業の成否の状態を相対的に比較することができることから、共通指標の一つになり得ると考える。

また、「栽培面積」(Table 5 の No.2) と「作付面積」(同 No.3) のように、PIM 実現支援の評価に関しては差異が少ない用語を、先行・後発事業で統一することも、同じ用語になることから共通認識の形成に有効である。

(4) 指標設定理由の明示

III 2 a 評価手法の現状で述べたように、技術協力プロジェクトでは、運営管理ツールである PDM に記載された指標を、事業実施期間中のモニタリングのみならず、終了時評価の指標としても使用している。

一方、事業実施期間中に最終的な評価の指標が設定されていると、事業参加者は良い評価を得ようとして、指

標の目標値の達成自体を目的化することがある。

これを避けるためには、事業参加者以外の者による重複確認や複数の指標による重複確認を行うことにより、事業参加者による目標値の達成自体の目的化を抑制することができることから、指標を設定した理由を明示し評価時点まで事業関係者が共有することや、相互補完的な複数の指標を設定することが有効と考える。

V 結 言

適切な評価と評価結果のフィードバックは、効果の持続性がより高い事業計画や施策の立案に役立つことから、本報では、共同管理支援事業の自立発展性評価手法の改善方策を検討した。その結果、評価において目標の達成度の測定や支援による変化を明示する手段である指標の開発方向として、①自立発展性の発現に対する貢献要因と阻害要因を分析し、それらの要因と要因相互の因果関係をもとに、指標相互の関係も明示した、直接性、具体性を持った評価指標を開発すること、②総合的指標の要因分析への利用可能性を向上させるため、その構成要素に関する補完的指標を開発すること、③最小限の共通指標の導入や指標設定理由の明示を行うこと、を示した。

参考文献

- 1) 合崎英男・土屋慶年・近藤 巧・長南史男 (2006) : 非農家世帯員の協力による農業用水路の維持管理の条件－宮城県亘理町を事例として－, 農業経営研究, 44(2), 1-11
- 2) 外務省 (2008) : 政府開発援助 (ODA) 白書 2007 年版 / 日本の国際協力 資料編, 外務省ホームページ http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/shiryo/hakusyo/07_hakusho_sh/index.html, 72-75
- 3) 外務省国際協力局評価室 (2008) : ODA 評価ガイドライン第4版, 4-5, 28-29
- 4) 橋詰 登 (2003) : 農山村地域の活性化状況と市町村の活力診断－地域活性化指標による市町村活性化度の比較－, 農村経済活性化プロジェクト研究資料第4号, 農林水産政策研究所, 1-34
- 5) 石井 敦・佐藤政良 (2003) : 「PIM」, 農村計画学会誌, 22(3), 239-240
- 6) JICA (2006) : *Ex-post Evaluation Study of the Bohol Integrated Agriculture Promotion Project (Project-type Technical Cooperation): Final Report*, iii, 7-11
- 7) 国際開発高等教育機構 (2007) : PCM 開発援助のためのプロジェクト・サイクル・マネジメント 参加型計画編, 改訂第7版, 1-53, 国際開発高等教育機構, 東京
- 8) 国際協力銀行 (2008) : 円借款事業評価報告書 2007, 11-12, 32-34
- 9) 国際協力銀行開発金融研究所 (2003) : 参加型アプローチの費用便益分析－概念整理と推計の枠組み－, JBICI Research Paper No.21, 1-46
- 10) 国際協力事業団農業開発協力部 (2001) : フィリピン共和国ボホール総合農業振興計画終了時評価報告書, 5, 48-50
- 11) 国際協力機構 (2008) : 事業評価年次報告書 2007, 10-19, 81-83
- 12) 国際協力機構企画・調整部事業評価グループ (2004) : プロジェクト評価の実践的手法 JICA 事業評価ガイドライン改訂版, 19, 31-41, 国際協力出版会, 東京
- 13) 國光洋二 (2007) : 地域活性化を通じた農村振興施策の効果に関する分析－共分散構造分析による接近－, 農村計画学会誌, 25(4), 533-543
- 14) 美濃眞一郎・大内 毅 (2005) : 今後の農業水利施設の維持管理の方向, 農土誌, 73(10), 881-884
- 15) 日本水土総合研究所 (2007a) : 平成 18 年度農地・水・農村環境保全向上手法確立調査委託事業報告書 (1/2), 529-543
- 16) ————— (2007b) : アジアモンsoon地域における農民参加型末端整備・水管理指針, 初版, 13-17, 日本水土総合研究所, 東京
- 17) 農業土木機械化協会 (2007) : 平成 19 年度農業農村整備事業等便覧, 1-700, 農業土木機械化協会, 東京
- 18) 農林水産省 (2005a) : 食料・農業・農村基本計画, 48
- 19) ————— (2005b) : 中山間地域等直接支払交付金実施要領, 1-10
- 20) ————— (2008a) : 農地・水・環境保全向上対策実施要綱, 1-22
- 21) ————— (2008b) : 農地・水・環境保全向上対策の取組状況 (平成 20 年度 (7 月 15 日現在)), 農林水産省ホームページ http://www.maff.go.jp/nouti_mizu/sinsei_joukyo.pdf
- 22) ————— (2008c) : 農林水産省政策評価基本計画, 1-23
- 23) 農村振興局 (2007a) : 農地・農業用水等の資源保全施策検討会とりまとめ報告, 1-16
- 24) ————— (2007b) : 平成 20 年度農村振興局予算概算決定の重点事項, 2
- 25) ————— (2008a) : 平成 20 年度農地・水・環境保全向上対策の評価に関する検討調査委託事業応募要領, 1-5
- 26) ————— (2008b) : 平成 20 年補助事業等農村振興局, 農林水産省ホームページ <http://www.maff.go.jp/j/aid/hozyo/2008/nousin/index.html>
- 27) ————— (2008c) : 第 1 回農地・水・環境保全向上対策第三者委員会議事概要, 農林水産省

- ホームページ http://www.maff.go.jp/nouti_mizu/sansya_iinkai/01/pdf/gaiyou.pdf
- 28) —————(2008d)：「農地・水・環境保全向上対策第三者委員会」について，農林水産省ホームページ http://www.maff.go.jp/nouti_mizu/sansya_iinkai/01/pdf/data1.pdf
- 29) 農村振興局土地改良企画課（2007）：土地改良区の現状（図表に見る土地改良区），42-43
- 30) OECD（2002）：*Evaluation and Aid Effectiveness No. 6 – Glossary of Key Terms in Evaluation and Results Based Management*, 7-12, 20
- 31) 岡本雅美（2003）：現代日本の農業水利組織と地域住民，*農村計画学会誌*，22(3)，183-187
- 32) 佐藤勝正・佐藤政良（2006）：ガーナ国における灌漑事業地区の水利費管理の比較分析，*農土論集*，242，75-83
- 33) 佐藤政良・河野 賢・タッサニーウンウィット・石井 敦（2007）：農民参加型水管理の原理と実現方策，*農土誌*，75(7)，615-620
- 34) 高嶺地域みどり会（2008）：平成19年度農地・水・環境保全向上対策（共同活動支援交付金）に係る実施状況報告書
- 35) World Bank（2008）：*Electronic Learning Guidebook on Participatory Irrigation Management*，世界銀行ホームページ <http://www.worldbank.org/wbi/pimelg/index.htm>
- 36) 全国農村振興技術連盟（2006）：新しい農業農村整備のあらまし－2005年度版－，485-512，全国農村振興技術連盟，東京

Developing Indicators to Evaluate Assistance Given to Residents for Joint Irrigation/Drainage Management

ONIMARU Tatsuji

Summary

In Monsoon Asian countries including Japan, the functions of existent water user organizations that operate and maintain irrigation/drainage facilities in paddy field agriculture are deteriorating. Thereof, the government has started projects to assist farmers, including non-farmers in Japan, in rural communities to jointly operate and maintain facilities.

In order to effectively and efficiently implement the projects, it is important to evaluate not only the benefits of each project but also the sustainability of those projects. Also, it is important to provide other similar projects and policy makers with feedback on lessons learnt through the evaluation of those projects.

In this paper, I focus on evaluation indicators that measure the achievements reflected in the changes connected to the assistance, and analyze the present methods and future designs of the projects evaluation. I propose the following characteristics for development of good evaluation indicators: (1) to make indicators for both the positive and negative factors of sustainability; (2) to be indicators useful for analyzing factors; (3) to be indicators having directness, concreteness and relationship.

Based on the proposal, as a case study, I abstract problems with evaluation indicators from 8 JICA (Japan International Cooperation Agency) technical cooperation projects for participatory irrigation management in Monsoon Asian countries. Then, I show directions in developing evaluation indicators for the JICA projects: (1) to develop indicators from sustainable factors; (2) to develop complementary indicators; (3) to set the same minimum indicators in both a precedent project and a follow-up project; (4) to show the reason why the indicators were set.

Keywords : irrigation/drainage facilities, operation and maintenance, evaluation, sustainability, feedback, indicators

プラスチックシンチレータ検出器による放射能探査法の開発

今泉眞之*・土原健雄**・吉本周平**・石田 聡**・内山貞幸***・結城洋一****

目 次	
I 緒言	73
II 断層と地下水	74
1 断層破碎帯の形態	74
2 亀裂岩盤における地下水の賦存形態と断層の役割	74
3 物理探査による地下水調査	76
III 放射能探査法による断層探査の原理	77
1 断層と核種の関係の研究史	77
2 γ 線スペクトロメトリーによる ²¹⁴ Biの計数率の意義	79
IV 断層指標としての核種	79
1 ダムサイト断層の γ 線放射能探査	79
2 埋没断層位置の指標	80
V γ 線放射能探査装置	80
1 γ 線測定器	80
2 NaI検出器による γ 線スペクトル	81
VI γ 線放射能探査装置の発達史	84
VII プラスチックシンチレータ検出器の開発	85
1 新たな検出器の開発の必要性	85
2 PS検出器	87
3 PS検出器の開発の課題	87
1) ゲイン変動の監視法の開発	87
2) 放射能探査に最適なPSの選定	88
3) ライトガイドの形態	88
4) 中性子と γ 線とを弁別するための装置	88
5) γ 線スペクトルを解析する技術開発	89
4 開発の方法	89
5 PS検出器の γ 線スペクトルの校正方法	89
6 放射能探査のためのPSの選定	90
1) PS検出器候補の選定	90
2) PS検出器の選定	90
7 PS検出器の γ 線スペクトル解析法の開発	92
1) コンプトン散乱法	92
2) 微分曲線面積法	93
3) 人工グロスカウント比法	93
8 放射能探査装置のシステム設計・試作	94
9 ライトガイドの形態	95
10 実証試験	96
1) 試作器	96
2) 実証試験の方法	96
3) 試験結果	97
VIII 結言	99
参考文献	102
Summary	104

I 緒 言

地球上に存在する約13億8600万km³の水のうち、97.5% (約13億5100万km³)は塩水で、残り2.5% (約3500万km³)が淡水であり、さらにそのうちの69.5% (約2440万km³)は氷河、雪、氷、そして永久凍土層に含まれており、人間には利用不可能である。人間に利用可能な淡水である残り30.5%のうち30.1% (約1050万km³)は地下水で、河川や湖沼などの地表に存在する淡水の利用可能量は全体の0.4% (約13.5万km³)である。世界気象機関によると、世界の水使用量の約19%は地下水で賄われていると推定されている。そのうちの約2割

は農業用水である⁽³³⁾。

世界人口が増え続けている現在の状況において食料の安定的な供給を図っていくためには、農業用水の確保が不可欠であり、貧困層の大半が暮らしている農村地域の持続的な発展を図るためにもその十分な量の確保が必要である⁽³³⁾。しかし、良好なダムサイト等の開発適地の多くで既に開発が行われてきた状況を踏まえると、新たな水源開発を得る方法としては、地下水開発が有望な方法の一つである。

水ストレスは、水の使用と水資源の間の不均衡から生じ、総再生可能資源に対する取水の割合で定義される。World Water Councilのウェブサイトの水ストレス図を見ると、高い水ストレスの地域は、米国、北アフリカ、中近東、中央アジアに分布している。特にアジア、アフリカでは、将来、水問題が地域発展の大きな制約となり、水供給を助けるなんらかの制度が必要になると予測されている⁽⁴⁰⁾。これらの地域の地質は、先カンブリア時代、

* 農村環境部, ** 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム,
*** クリアパルス株式会社, **** 応用地質株式会社

平成20年12月15日受理

キーワード: 地下水調査, 地下水資源, 埋没断層, 割れ目, γ 線

古生代の堆積岩、変成岩類で構成されており、地下水はこれらの岩盤の亀裂に胚胎していると考えられる。従って、地下水を開発するためには断層と関係する亀裂位置の調査が最も重要である。

γ 線放射能探査は、20世紀初頭にウラン探査のために開発された。ヘリコプターを用いたヘリボン放射能探査は、短時間で広域の核種分布を決定できる重要なツールであるので、断層調査のみならず、核施設からの放射性核種の漏洩モニタリング、核施設事故後の土壤汚染の広がり等の調査等でも利用されている^(41,47)。日本では1950年代後半から地下水を開発するための有力なツールとして利用されている。 γ 線放射能探査装置の発達史を概観すると(詳細はVIを参照)、検出器の大型化の歴史としてまとめられる。大型化の歴史は、ヘリコプターや軽飛行機で飛行しながら調査する空中探査「ヘリボン・エアボン」(以下、ヘリボン)が主流になっていることと関係している。今後の探査装置の開発では、無人ヘリコプターに搭載できる装置の開発も望まれている。この場合、単に検出器を大型化するのみならず、軽量化も求められる。

この報告では、地下水調査のツールとしての γ 線放射能探査の原理、発達史を整理するとともに、現在進行中のプラスチックシンチレータ検出器(以下、PS検出器)による放射能探査装置の開発状況を報告する。

II 断層と地下水

1 断層破碎帯の形態

断層は、「それを境として両側で変位が認められる単一割れ目もしくは複数の割れ目ゾーンで、変位を持つ面(Glossary of Geology)」として定義されている。地質図においては断層は線として示されるが、実体としては数条の破碎帯から構成される。露頭スケールの断層は、ほぼ平行に存在する2つの断層面があって、その間には、断層運動の摩擦破碎によって生じた断層粘土や断層角礫が断層内物質として挟まれる。

大規模なセン断破壊の場合、岩盤が相当な幅をもって圧碎され、角礫や粘土が入り交じった状態になる。これが断層破碎帯と呼ばれるものである。露頭スケールでの断層破碎帯は、細粒な断層粘土(ゴージ)を主体とするゾーン(粘土帯)と断層角礫を主体とするゾーン(角礫帯)が断層に沿って、縞状に分布する組織を示す⁽⁴³⁾。一般に、破碎帯の両側に粘土化帯が分布している。断層破碎帯の外側には、割れ目の多い岩盤があり、その割れ目も、断層破碎帯からある距離以上になると次第に減少して、正常な岩盤に漸移する(Fig.1)。

断層粘土は、母岩が破碎作用によって細粒化したものである。そのため、かならずしも全て粘土サイズではなく、小角礫などを含む。また、母岩の形態を残した粗粒な部分も認められる。粘土鉱物は、母岩の細粒化後に、

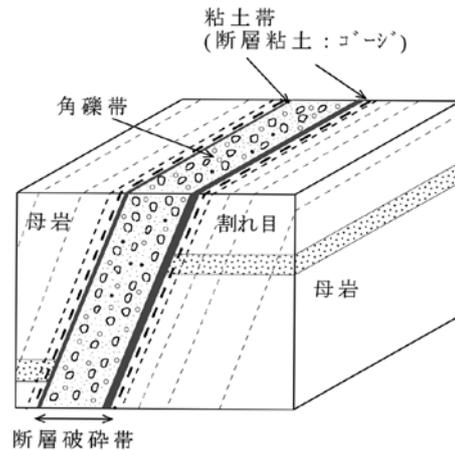


Fig.1 断層破碎帯の形態
Schematic figure of fault fracture zones.

地下水、熱水が関係した化学的風化や変質作用により形成されたものと考えられる⁽⁴³⁾。

2 亀裂岩盤における地下水の賦存形態と断層の役割

山地の地下水は、地形的条件で形成された場に存在する地下水(地形型地下水)と、地質的条件に規定された地下水(地質型地下水)に大別することができる⁽³⁴⁾。地形型地下水は、崖錐砂礫、土石流堆積物、崩積土、運積土などの谷底堆積層内に存在する。花崗岩山地では、地形型地下水は表層の深層風化部(マサ土帯)に層状水として存在する。地質型地下水は、亀裂性岩盤からなる山体内部に存在し、断層の影響を強く受ける。そのため、その分布は極めて複雑である⁽³⁴⁾。変成岩や古生層山地では、複雑な地質構造のため、地下水は著しい遍在性を示す。大規模な破碎帯が発達しているところでは、地表の水系を無視した地下水流動系が存在することがある。地下水の賦存量は、地形型地下水より地質型地下水の方が多いので、地下水開発では地質型地下水を対象とする。

亀裂性岩盤中では、連続する割れ目は地下水流動の主要な流路であり、母岩は流体を通さないものと考えられる⁽⁶⁾。水が充満する割れ目には、節理と層理面がある。節理は、岩石中の張力およびせん断による小さい割れ目で、断層付近に発達する傾向がある。

断層付近に地下水がどのように賦存するかを、岩盤分類の関係から検討する。岩盤分類は、サイト調査の地質調査において、混沌からある規則を作り出すために発達した。それは、風化の程度・岩塊の硬さ・節理の性状の三要素から岩盤マスを定式化し、同じ挙動のグループ(岩盤クラス)に分けることである。日本のトンネルやダムサイトの岩盤分類では、岩盤をA~Dの4つのランクに分け、CランクをCH, CM, CLに細分類する。AとBは亀裂の少ない硬岩、CH~CLは、亀裂のある中硬岩に相当する。亀裂密度は、CHからCLへ増加する。Dは著しく軟質化し、節理間粘着力がなく、僅かな打撃で崩れる状態である。剥離面には粘土が存在する。サイト

によっては、DをDHとDLに細分することがある。この場合は、DLはより粘土化が進んでいる状態を示す。

Fig.2に、下呂東断層や下呂西断層などを横切る中呂導水路トンネルの岩盤分類とトンネル湧水の関係を示す。下呂東断層付近の湧水分布を見ると、湧水はD級岩盤に分布するのではなく、その南西側（涵養域側）のCLとCM岩盤内に分布しているのがわかる。

Fig.3は、著者らが放射能探査を行ったFダムサイトの地質断面を示している。ダムサイトのあるM川の幅は約20mである。川の兩岸は傾斜30°程度の斜面で、その上には標高140m前後の台地が広範囲に分布している。台地は新第三紀の玄武岩類からなり、その下位には中生代の花崗閃緑岩が分布する。図中の波線はダム工事前の地形を示している。調査時には河床砂礫、河岸段丘、岩盤の風化部ははぎ取られ、新鮮な岩盤が露出していた。Fig.4に監査廊工事のための掘削面の岩盤分類と湧水の分布を示す。掘削面には、高角度のf1～f8の断層が分布していた。f1断層以外は、破碎帯幅0.3～0.5m

の小断層である。f1断層では、DL岩盤が幅0.5～2mで分布し、その西側には幅2m～5mのDH岩盤が分布していた。f1断層を5m離れると、亀裂は発達しているがCH～CM級の堅硬な岩盤が露出していた。台地で涵養された地下水はダムサイトに向かってFig.3の矢印のように流れていることが予想される。実際に掘削面には沢山の湧水が分布していたが、f1断層付近にはほとんど分布しなかった。湧水は、主に断層東側のCH岩盤の亀裂、CHとCM岩盤の境界亀裂に分布していた。個々の湧水口からの湧水量は数L/分であった。

Fig.2と4の例で示すように、亀裂性岩盤では、地下水は断層破碎で粘土状になった所（D岩盤）に分布しているのではなく、断層破碎帯の外側の亀裂の多いC岩盤に分布する傾向がある。C岩盤を直接探査することは困難であるので、物理探査で断層破碎帯（D岩盤）位置を明らかにし、その後、精査により地下水が賦存しているC岩盤を探査する手順で調査が行われる。

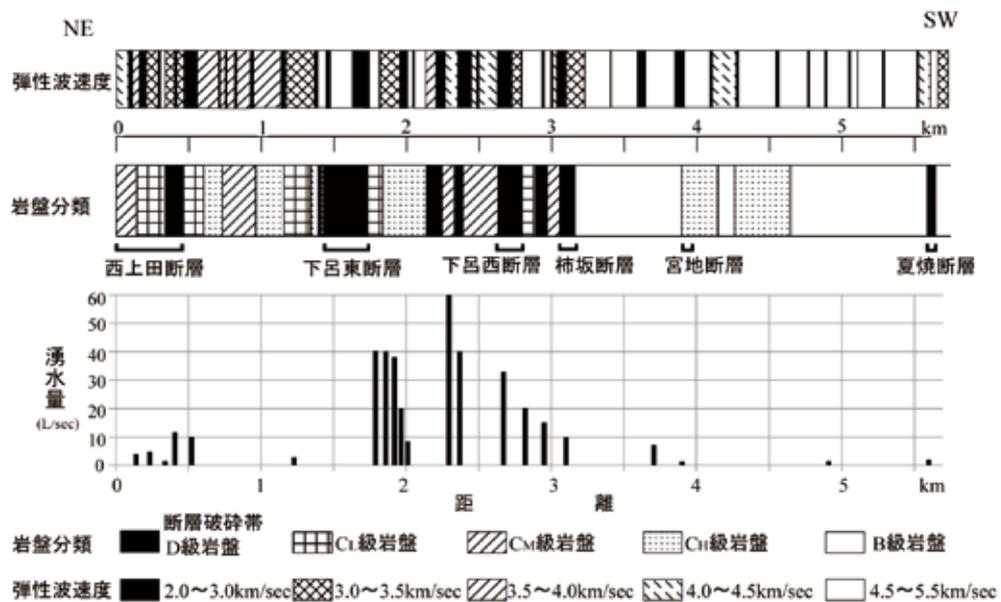


Fig.2 中呂導水路トンネルの岩盤分類と湧水の関係（神田（1979）のデータを基に作成。）
Relationship between rock classification and springs in the Chyyro-tunnel (Original data from Kanda (1979))

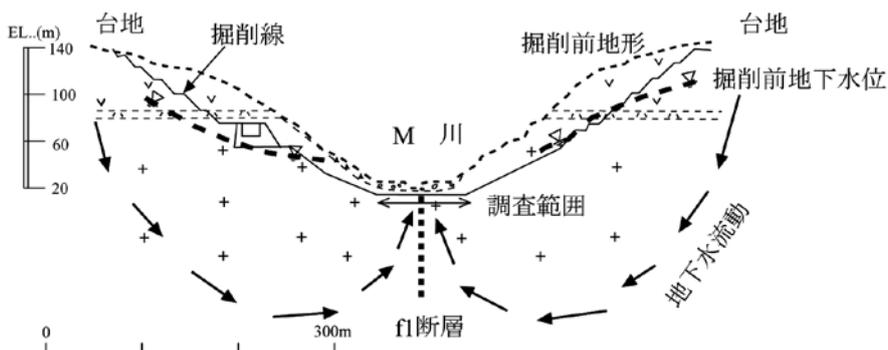


Fig.3 Fダムサイトの地質断面
Geological section of F dam site

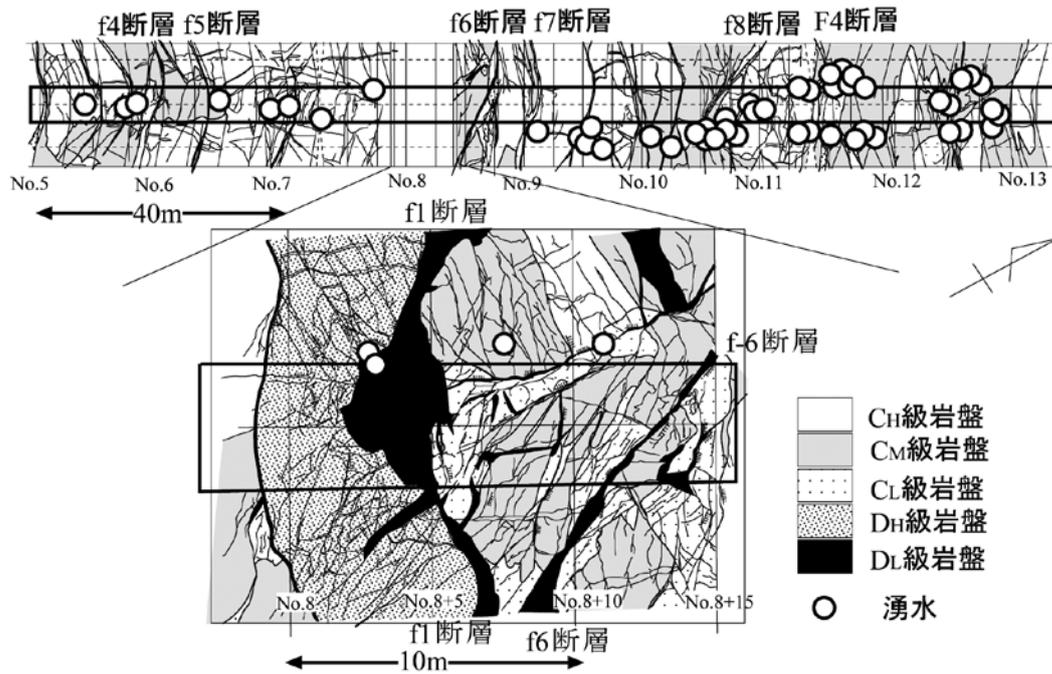


Fig.4 Fダムサイトの岩盤分類と湧水分布の関係
Relationship between rock classification and distribution of springs in F dam site

3 物理探査による地下水調査

Table 1 に地下水調査に使われる物理探査法の種類をまとめた。物理探査は、水理地質構造調査と地下水流動調査に使われる。水理地質構造調査は、探査装置からの信号の地盤の物性に対する応答を利用して、地質構造を探査する。地下水流動調査は、地盤中の地下水の存在状況によって、探査装置からの信号が変化することを利

用し、地下水の動きを探査する。電気、電磁、弾性波探査は、主に水理地質構造調査に利用されるが、繰り返し測定が可能な場合は、地下水流動調査にも利用される。放射能探査には、地層や土壤に含まれる天然放射性同位元素から放出される自然の放射線を検出する方法と、人工線源から放出される放射線の散乱・吸収などを測定する方法(検層)に大別される。前者は、水理地質構造調

Table 1 物理探査から得られる物性と地盤・地下水問題への適応の関係
Relationship between measured values of various geophysical prospecting and hydrogeological items

測定物性		探査法	地下水調査への適用	
電磁気特性探査	比抵抗・電気伝導率	電気・電磁探査	水理地質構造	
	分極率・充電率	IP法電気探査	地下水流動	
	比誘電率	電磁波トモグラフィー・電磁探査	地下水流動	
	電磁インピーダンス	地中レーダー探査	水理地質構造	
	帯磁率	磁気探査・電磁探査	水理地質構造	
弾性特性探査	弾性波速度 (P・S波)	高密度弾性波探査・VSP	水理地質構造	
	弾性波Q値	弾性波トモグラフィー・VSP	水理地質構造	
	音響インピーダンス	浅層反射法	水理地質構造	
熱特性探査	密度	重力探査	水理地質構造	
	地温	1m深地温探査	水理地質構造 (地下水流動脈)	
	熱伝導率	熱伝導率地盤探査	地下水流動	
放射能探査	自然放射	α 線	α トラック・活性炭法・電離箱・ZnSシンシレーション検出器	水理地質構造 (断層検出)
		γ 線	全 γ 線・ γ 線スペクトロメトリー	断層検出
	人工線源	γ 線	密度検層	水理地質構造
		中性子	水分検層・捕獲熱中性子検層	地下水流動(地下水涵養)・水理地質構造

査のうち、断層調査に特化して利用される。後者には、中性子線源を利用した水分測定、 γ 線々源を用いた密度測定などがあり、水理地質構造調査に利用される。中性子水分検層は、地下水流動調査のうち、不飽和帯の水移動の調査にも利用される。この論文では環境に存在する γ 線を測定する放射能探査法、特に γ 線スペクトロメトリーについて議論する。

γ 線スペクトロメトリーは、 γ 線スペクトルを測定し、それを分析することにより核種毎の強度（計数率）を測定する探査のことである。詳しくは、V章で説明される。 γ 線スペクトロメトリーは、弾性波探査、電気探査などの物理探査法の一つとして分類されているが、他の物理探査との決定的な違いは、他の物理探査法が地盤の物理的な性質を測定しているのに対し、放射能探査は化学的な性質を測定していることである。実験室レベルで行われている γ 線スペクトロメトリーは、原子吸光分析などの機械化学分析法の一つに位置づけられている。

Fig.5には、海外で地下調査をする場合の調査の流れを示している。予備調査では、気象、地形図、地質・水文情報の収集が行われる。概査では、航空写真の判読によりリニアメント分布図が作成され、開発有望地域を選定し、広域の地質調査が行われる。最近では、収集した情報は、GISでデータベース化され、解析されている。カーボンやヘリウムによる放射能探査は、この段階で行われる。精査では、有望地域から選定された開発候

補地で、物理探査により断層位置と規模が明らかにされる。マンボーンによる放射能探査は、この段階で行われる。井戸掘削地点は、調査結果を総合的に判定して決定される。

III 放射能探査法による断層探査の原理

1 断層と核種の関係の研究史

ウラン (^{238}U) とトリウム (^{232}Th) は、崩壊系列を作り、 α 、 β 、 γ などの放射壊変を行い、結局は鉛となって安定する (Fig.6)。崩壊系列において、親核種の半減期が娘核種の半減期に比較して十分長いとき、娘核種の半減期の7~10倍の時間を経過した後は親、娘核種の崩壊率は一定となり、両者の原子数の比も一定になる。この状態を放射平衡という。放射平衡の状態にある場合には、親核種の存在量は、娘核種から放出される γ 線の測定によって定量することができる。このことを利用して、 ^{214}Bi の測定値からウラン探査では ^{238}U 量を、断層調査では ^{222}Rn 量を評価している。同じように、 ^{208}Tl から ^{232}Th 量を評価している⁽³¹⁾。

各系列の中間にあるラドンは、不活性のガスで、狭義にはウラン系列のラドン (^{222}Rn :半減期3.83日)、トリウム系列のトロン (^{220}Rn :半減期50秒)がある。トロンは、大気中の放射能強度が低く、半減期が短いので、放射能探査では ^{222}Rn のみを考慮すればよいと考えられる。

ラドンは、ウラン系列の放射性核種では唯一の気体であるので、この性質が断層亀裂での移動性を推測させ、放射能探査による断層調査の根拠となると考えられている。そのため、全 γ 線放射能探査による埋没断層調査ではバックグラウンドの γ 線強度より高い値を示す箇所を異常点と解釈し、断層位置を推定している場合が多い (吉村・松本,1994)。埋没断層は、断層が表層土壤に被われて、直接、断層露頭を観察できない断層を言う。 γ 線スペクトロメトリーでは ^{214}Bi や $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ を指標として断層を探査している^(18,19)。落合⁽³⁸⁾は、 ^{214}Bi 以外に、トリウム系列の ^{228}Ac と ^{40}K も断層指標とならしている。

日本の多くの放射能探査の報告では、「移動しやすい不活性のラドンが、断層破碎帯の割れ目を通して地表付近に運ばれる」ことを前提とし、この仮定により、断層付近で放射能異常が検出されない場合、「割れ目は粘土等により充填され、閉塞している」といった議論を何のデータも示さずに行っている場合が見受けられる (例えば、落合 (1999)。一方では、異常点の分布は破碎帯の形態 (粘土化・開口亀裂等) には必ずしも依存するものでないということも指摘されており⁽⁵⁰⁾、断層調査への放射能探査の原理が、未だあいまいな状態にある。

ここでは、断層とラドンの関係を議論した研究史をまとめ、放射能探査による埋没断層調査の問題点を整理する。

放射能探査により、堆積物に被覆された断層と放射能

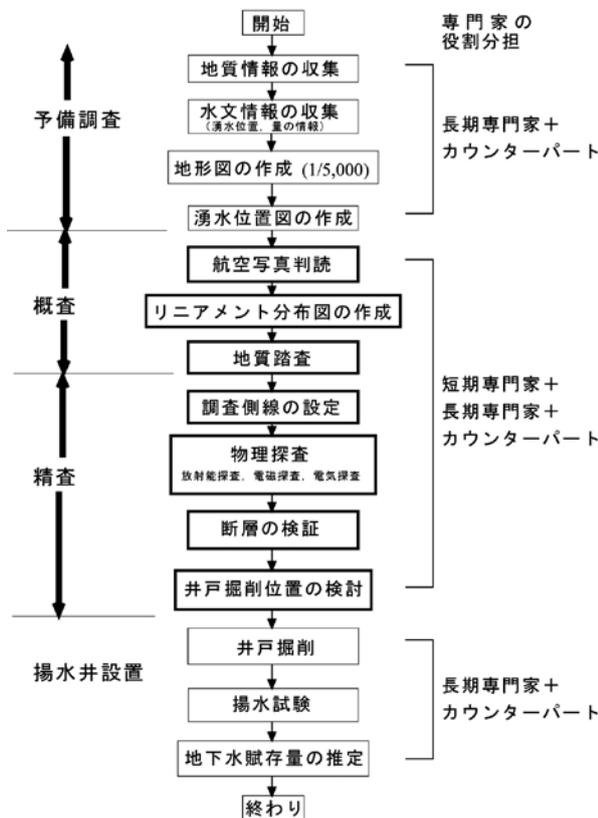


Fig.5 地下水資源開発調査の流れ
Flow chart of investigation stages for groundwater development

	^{238}U 系列					^{232}Th 系列				
Np										
U	^{238}U 4.49×10 ⁹ y		^{234}U 2.48×10 ⁵ y	核種 半減期						
Pa		^{234}Pa 1.18m								
Th	^{234}Th 24.1d		^{230}Th 7.52×10 ⁴ y			^{232}Th 1.39×10 ¹⁰ y		^{228}Th 1.90y		
Ac	⚡					^{228}Ac 6.13h				
Ra			^{226}Ra 1623y	⚡	α線崩壊	^{228}Ra 6.7y	⚡	^{224}Ra 3.64d		
Fr					β線崩壊					
Rn			^{222}Rn 3.83d		γ線崩壊			^{220}Rn 54.5s		
At										
Po			^{218}Po 3.05m			^{214}Po 1.6×10 ⁻⁴ s		^{210}Po 138d		^{216}Po 0.16s
Bi			^{214}Bi 19.7m			^{210}Bi 50d				^{212}Bi 60.5m
Pb			^{214}Pb 26.8m	⚡		^{210}Pb 22.2y		^{206}Pb Stable	⚡	^{212}Pb 10.6h
Tl				⚡						^{208}Tl 3.1m

Fig.6 ^{238}U , ^{232}Th の崩壊系列
Radioactive decay series of ^{238}U and ^{232}Th

の関係を初めて明らかにしたのは、Ambronn⁽²⁾である。彼は、断層上の土壤中でα線が顕著に増加し、γ線がわずかに増加することを見だし、この方法がウラン鉱物の探査のみでなく、断層位置を決定する方法として使えることを指摘した。日本では、Hatuda et al.⁽⁸⁾が、六甲断層上で、地中ガスの放射能を電離箱により測定し、放射能の急激な増加を認めた。Lane and Bennett (1934)は、井戸水中のラドンの濃度が既知の断層の指標となると考えた。当時、断層付近で放射能が増加する現象はウラン塩あるいはラジウム塩が断層破碎帯を上昇して地表付近の土壤中に沈積することと、ラドンが割れ目を上昇してくることの両方の原因が考えられていた⁽⁹⁾。

Israel and Bjornsson⁽¹⁴⁾は、既知の断層の上の土壤ガス中のラドン(^{222}Rn)とトロン(^{220}Rn)の含有量を測定し、断層の上の放射能異常に2つのタイプのあることを示した。一つはトロンの異常が伴わないタイプであり、他の一つはラドンとトロンの異常が同時に起こるタイプである。彼らは最初の異常タイプは断層に沿ってラドンが移動するタイプと考えた。

ラドンの移動メカニズムは拡散によるものと、移流により間隙の流体が移動するのにともない一緒に運ばれるものがある⁽⁴⁵⁾。一般的には土壤中のガスの移動は拡散によるところが大きい。それは、土中気体の全圧の勾配が、通常の状態では、無視しうほど小さいからである⁽²⁸⁾。理想的な乾いた礫層では、ラドンの最大の拡散は10mである⁽⁴⁴⁾。実際の乾燥土壌においては、その拡

散移動は数mになり、高い水分量で小さい間隙率の土壌では、それはずっと短くなる。一般的な間隙率の土壌では約1mとされている⁽⁴⁴⁾。しかし、Kristiansson and Malmqvist⁽²⁰⁾は、地下100mにある鉛鉛床上の地表におけるラドンの測定で、岩石中の断層を通してラドンが100m以上の距離を移動してきた証拠を示した。多くの埋没断層調査では、地表と破碎帯の間に数10mの不飽和帯が存在することは希で、一般には地下水面が数m下にあるため、放射能異常を非拡散移動ラドンの濃集とすることには無理があると思われる。

マグマからの結晶した鉱物中で、 ^{238}U と ^{232}Th は4価の状態が存在する。 ^{238}U は容易に酸化して6価となり、ウラニルイオン(UO_2)²⁺を作り、さらに炭酸等と結合して錯イオンを作り、水に溶け出す。一方、 ^{232}Th は4価の状態でのみ存在し、風化による溶脱を受けない⁽¹⁷⁾。 ^{238}U は普通の地下水の酸化還元状態では溶脱するのみで、有機物や粘土鉱物(特に、モンモリロナイト)⁽¹⁷⁾への吸着以外、蓄積することはない。Lowson et al.⁽²⁵⁾は、地下水からのアモルファスFeが ^{238}U を供沈させることを示した。Latham and Schwarcz⁽²³⁾は、花崗岩の石切場の割れ目を調査し、Feと ^{238}U は、割れ目に向かって増大することを示している。一般に断層破碎帯では、 ^{238}U が流出するが、断層粘土部にモンモリロナイトが形成されているところでは、 ^{238}U が粘土に吸着されると考えられる。 ^{238}U の吸着濃集の程度は、移動しない ^{232}Th との比($^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$: $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$)で強調されることが推定される。

Tanner^(44,45) はラドンの移動に関する膨大な資料を総括し、次のようにまとめている。

- a. エマネーション法（土中ラドン濃度調査）は、ラドン移動を測る鋭敏な方法であるが、これによりラドンの（長距離）移動が測定されたとする、そのメカニズムはラドン（のみ）の移動でなく、その親核種の移動による。
- b. 地球物理学的な調査での（非拡散の）ラドン移動を明らかにした成功例は、実質的なラドンの移動が起こっていることを示していると思われる。しかし、いくつかの調査例では、ラドンの移動とその親核種の移動との区別がつかない。放射能異常の原因は²²²Rnのみによるのではなくウラン系列のなかで移動性の高い核種²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra も関係している。
- c. ウランとトリウム核種の非平衡の研究でも、ラドンの移動は、ウランとラジウムの移動に関係していることが示されている。

2 γ線スペクトロメトリーによる²¹⁴Biの計数率の意義

木村⁽¹⁸⁾と木村ほか⁽¹⁹⁾は、γ線の物質による吸収を理論的に検討し、γ線検出器への影響範囲を明らかにしている。彼らの検討によれば、1.5g/m³の乾燥した土壌を仮定した場合、携帯用のγ線検出器の計数率の90%は、検出器周囲半径1m、深度30～45cmの逆三角錐内の土壌からのγ線の寄与による。

今泉他⁽¹¹⁾は、土壌粒子から間隙に放出された²²²Rnと地下から地表へ放出する²²²Rnの²¹⁴Biの計数率への寄与を理論的に計算した。²¹⁴Biの計数率は、①検出器下の三角錐内の土壌の²²⁶Ra起源の²¹⁴Bi、②土壌粒子から間隙に放出された²²²Rn起源の²¹⁴Bi、③地下から地表へ放出する²²²Rn起源²¹⁴Bi、④検出器周辺からの散乱²¹⁴Biの4つの成分から構成されている。各成分の寄与率を計算するためには、土壌の密度と間隙率の他、土壌粒子の²²⁶Ra含有量と間隙の²²²Rn濃度分布の情報が必要である。

今泉他⁽¹¹⁾は、これらのデータが揃っているニューメキシコ鉱物技術研究所のキャンパスの実験サイトの礫混じり砂質ローム⁽⁴²⁾の以下の条件で計算を行った。

- a. 地表の平均時間フラックス密度は、0.85～0.11pCi/m²s⁻¹ (31.45～4.07mBqm⁻²s⁻¹),
- b. 土壌ガス中のラドン濃度は、深度2m以深では、1.4pCi/m³ (51.8mBqm⁻³) (放出能38%)で、深度0～60cmでは、Fig.7のように変化する⁽⁴²⁾。図の2本の線は大気圧の高い時と低い時を示している。計算には中間の線を使った⁽¹¹⁾。

計算を簡単にするために、④の散乱線の影響と土壌粒子の自己吸収は無視した。計算の結果、土壌粒子の²¹⁴Biは423,900pCi (15684.3Bq) (寄与率：98.5%)、土壌間隙のラドンガスからの²¹⁴Biは約6,500pCi (240.5Bq) (1.5%)、地表の空気中の²²²Rn放出からの²¹⁴Biは約3pCi (111Bq) (0%)であった。土壌ガス中のラドンの影響が、1.5%しかないことは注目に値する。このことは、ラドン濃度が断層を上昇したラドン成分により10数倍（測線Aの最大ラドンガス濃度/低濃度部分の平均値）に変化しても、γ線の計数率は15%程度の増加としか現れないことを意味する。検出器の効率や測定誤差を考えると、増加率は更に低くなり、バックグラウンドの変動内に隠されてしまうものと考えられる。従って、²¹⁴Biの変動は主に土壌粒子のウラン含有量を示しているのが妥当である⁽¹¹⁾。

IV 断層指標としての核種

1 ダムサイト断層のγ線放射能探査

Fig.4に示したf1断層を中心に、50mの測線を設定し、5m間隔で携帯用放射能探査装置によるγ線スペクトロメトリーと土中ラドン濃度調査を行った。放射能探査装置は、クリアパルス社製8675型である。測定時間は300秒である。土中ラドン濃度調査は活性炭法で行った⁽²⁹⁾。活性炭法には、ピコラッド・ラドン(²²²Rn)検出器（米国Accustar Labs社製）が使用された。Fig.8

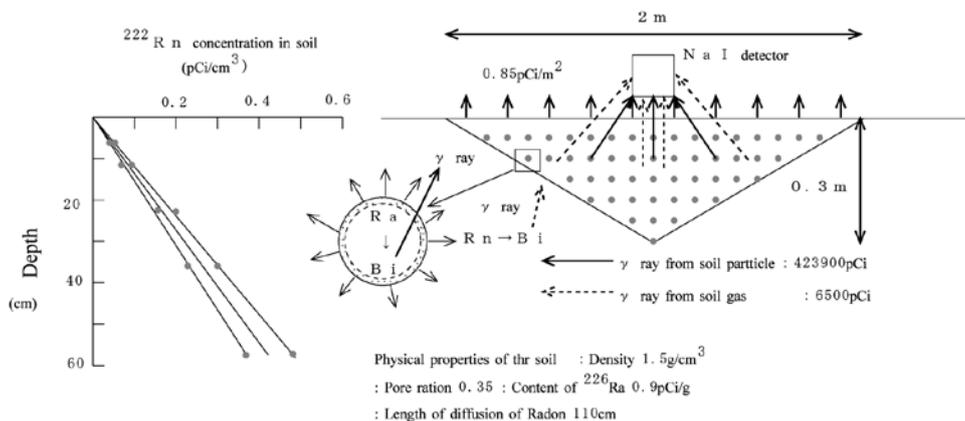


Fig.7 ニューメキシコ鉱物技術研究所内の土壌中のラドン濃度分布図（今泉他（1993）による）
Physical properties of the soil in the New Mexico Mineral Technological Laboratory (From Imaizumi et al. (1993))

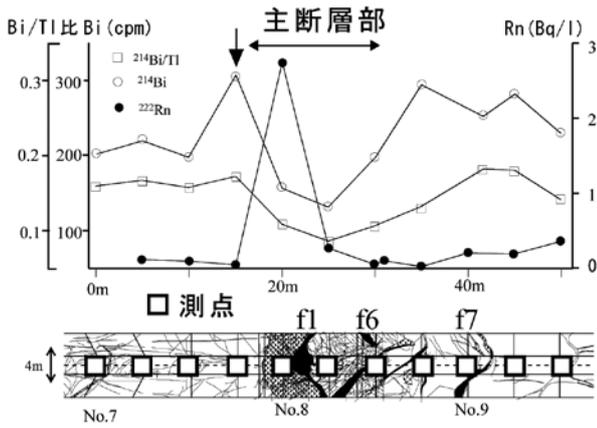


Fig.8 Fダムサイトの放射能と割れ目の関係
Relationship between radioactivity and fissure in F dam site

上段の図は、²¹⁴Bi、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl、²²²Rn ガス濃度の変化を示す。Fig.8 下段の図は、Fig.4 から D 岩盤と亀裂を抽出した図である。白塗り部分は CL 以上の岩盤を示す。f1 から f6 断層までの亀裂密集部（主断層部）では、²¹⁴Bi と ²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl が低くなっている。これらの低下は ²³⁸U の溶脱により生じていると思われる。主要断層部の両側には、²¹⁴Bi の比較的大きなピークと ²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl 比の小さいピークがある。特に、図左側 ²¹⁴Bi ピーク（↓）は平均値より 30% 以上増加している。は f1 断層左側のピークは、断層から 10m 程度離れている。一方、²²²Rn ガスの変化は f1 付近に約 3Bq/L のピークを形成している。図から f1 付近のラドン濃度のピークは、²¹⁴Bi 分布に影響を与えていないことは明らかであり、今泉他⁽¹¹⁾の計算結果を支持する。

2 埋没断層位置の指標

Fig.9 は、断層位置が文献等から明らかな断層周辺で

の ²¹⁴Bi、²⁰⁸Tl、⁴⁰K、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl の変動パターンを示している⁽²⁹⁾。□は極大パターンを、Uは極小パターン、斜め下向きの矢印は減少パターンを示している。5 調査地域の核種の変動パターンでは、断層付近に ²¹⁴Bi と ²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl の極大があり、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl の極大位置は公表されている断層位置から 0 ~ 30m 離れている。表で「階段状変化」とは、断層付近で核種の計数が階段状に変化していることを示している。断層からの距離は、0 ~ 100m である。この現象は、異なる地層が断層を境界として接している場合に生じる。しかし、阿寺断層の花崗閃緑岩と花崗岩の境界では検出されなかった。断層が同じ核種濃度の地層で生じている場合は、階段状変化の指標は使えないことに注意が必要である。F ダムサイト調査と同じ活性炭法による ²²²Rn ガス濃度異常は、光市断層では検出されなかった。ピーク位置は、断層位置から 0 ~ 180m 離れている。また、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl の極大位置とは、30m ~ 160m 離れている。限られた例からの結論ではあるが、²¹⁴Bi と ²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl の指標とし、その極大位置を探索することにより、数十 m の誤差で埋没断層位置を探索することは可能であると思われる。

V γ線放射能探査装置

1 γ線測定器

環境中には、Table 2 に示すような γ線放出核種が存在する。主要な天然の核種は、²³⁸U 及び ²³²Th 系列の核種であり、系列を作らない ⁴⁰K や陽電子の崩壊による放射線等がある。核実験等のフォールアウトの ¹³⁷Cs からの γ線、原子力施設周辺での平常時・異常時の計測では、施設起因の放射性 ⁸⁵Kr、¹³⁵Xe、⁴¹Ar 等の希ガス、放射性ヨウ素等からの γ線がある。

γ線を測定する方法は、電離作用を利用した電離箱、

断層名	地質	Bi	Tl	K	Bi/Tl	階段状変化	ラドン濃度異常	Bi/Tl異常点とラドン濃度異常点の距離
阿寺断層	花崗閃緑岩	□	U	U	□ 20 m	×	○ 60 m	80 m
	花崗岩	□	U	U	□ 20 m	×	○ 60 m	80 m
網走湖東岸断層群	火山岩類	□	↘	↘	□ 20 m	○ 100 m	○ 180 m	160 m
	火山岩類	□	↘	↘	□ 20 m	○ 0 m	○ 120 m	40 m
本宮断層	第三紀 頁岩	□	U	U	□ 0 m	○ 0 m	○ 10 m	10 m
棚倉破砕帯断層	花崗岩	□	U	U	□ 30 m	○ 0 m	○ 0 m	30 m
	マイロナイト	□	U	U	□ 30 m	○ 0 m	○ 0 m	30 m
光市断層	花崗閃緑岩	□	U	U	□ 0 m	○ 40 m	×	
	花崗閃緑岩	□	U	U	□ 0 m	○ 0 m	×	
変成岩	変成岩	□	U	U	□ 0 m	○ 0 m	×	
	変成岩	□	U	U	□ 0 m	○ 0 m	×	

□：極大 U：極小 ↘：減少 ○：有り ×：検出されず
数字は公表されている断層位置からの距離を示す

Fig.9 既知断層周辺の放射の核種の変動パターン
Radioactive anomaly patterns over already known faults

Table 2 環境中に存在する γ 線放出核種とそのエネルギー
Gamma ray emitted nuclides and their energy.

Isotope	Energy (KeV)	Isotope	Energy (KeV)
Ux-rays	13.0,13.3	¹³⁷ Cs	661.6
²³¹ U	25.6	²¹⁴ Bi	727.2
¹³⁷ Cs	31.8,32.2,36.4	^{234m} Pa	766.6
²¹⁰ Pb	46.5	²²⁸ Ac	911
²³⁴ Th	63.3	²²⁸ Ac	969
²³⁴ Th	92.6	^{234m} Pa	1001
²³⁵ U, ²²⁶ Ra	185.7,186.2	²¹⁴ Bi	1120.3
²¹² Pb	238.6	⁶⁰ Co	1173
²¹⁴ Pb	295.5	²¹⁴ Bi	1238
²¹⁴ Pb	351.9	⁶⁰ Co	1332.5
宇宙線	511	⁴⁰ K	1460.8
²⁰⁸ Tl	583.1	²¹⁴ Bi	1764.5
²¹⁴ Bi	609.3	²⁰⁸ Tl	2614.5

GM 計数管, 半導体検出器, 蛍光作用を利用した NaI (TI) シンチレーション検出器 (以下, 「NaI 検出器」と称する), 熱蛍光線量計 (TLD), 蛍光ガラス線量計, 写真作用を利用するフィルムバッジがある (Table 3)。これらのうち, γ 線のエネルギー (γ 線スペクトル) を測定できるのは, NaI 検出器と半導体検出器 (Ge (Li) 検出器等) である。半導体検出器は, エネルギー分解能が高く, 環境に存在する放射性核種の同定と定量に適しているが, 測定中, 液体チッ素で検出器を冷却しなければならないなど現場での取扱に細心の注意が必要である。また, 検出効率が低く, 測定に時間がかかるなどの欠点がある。半導体検出器による野外調査例としては, 落合⁽³⁸⁾が断層調査に, Winkelmann et al.⁽⁴⁷⁾が, 核施設からの放射性核種の漏洩のモニタリングに使用しているが, 放射能探査で半導体検出器が用いられることは希である。

NaI 検出器でも, サーバーメータとして使われる簡易な測定器では, ノイズレベル以上の全エネルギーを測定

していて, 核種を特定できない。この論文では, γ 線のエネルギー (γ 線スペクトル) を測定 (弁別) できるものを γ 線スペクトロメータと呼び, γ 線スペクトロメータによって得られるパルス波高分布のことを γ 線スペクトルといい, γ 線スペクトル測定技術および γ 線スペクトルのデータ解析を総称して γ 線スペクトロメトリーと呼ぶ。 γ 線スペクトロメトリーは広い分野において種々の目的で用いられているが, この論文では γ 線パルス波高分析を行う放射能探査法に対して使う。これに対しノイズレベル以上の γ 線全エネルギーを測定する放射能探査を全 γ 線放射能探査と呼ぶ。

2 NaI 検出器による γ 線スペクトル

スペクトルの例として, Ge(Li) 半導体検出器と NaI 検出器で測定したつくば市の土壌の γ 線スペクトルを Fig.10 に示す。半導体検出器では, 後述するフォトピークは極めてシャープで, 線スペクトルとして検出されている。これより ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²⁰⁸Tl, ²¹⁴Bi, ²²⁸Ac, ⁴⁰K が含まれていることがわかる。一方, NaI 検出器では核種のピークは広がりをもっていて, 近接したピークは重ね合わさってしまう。1 核種として同定できるのは ²¹⁴Bi, ⁴⁰K, ²⁰⁸Tl に限られる。

NaI 検出器は, 半導体検出器に較べてエネルギー分解能が劣るが, 常温で測定ができ, 環境 γ 線のスペクトルとエネルギー別の線量寄与の測定や線源核種のおよその同定が可能である。NaI 検出器は, 現状では野外の厳しい環境で放射能探査のための γ 線スペクトルを測定できる唯一の検出器と考えられている。

γ 線が NaI 検出器に入射した際に, 両者の相互作用 (光電効果, コンプトン散乱, 電子対生成) によって発生した二次電子が NaI 結晶物質を励起し, この励起から定常状態に戻る際に, 分子がシンチレーションと呼ばれる光を発生する。NaI 検出器は, このことを利用した測定法である。光電効果と電子-陽電子対生成は, γ 線の全エネルギー E_γ が電子 (および陽電子) に移行するので,

Table 3 一般的な放射線の検出方法と検出器
Typical measurement methods of radiations and detectors

検出方法	検出器名	主な測定対象放射線	
電離作用を利用するもの	気体	電離箱	α 線, β 線, γ 線
		GM計数管	β 線, γ 線
		比例計数管	中性子線
		ガスフロー型計数管	α 線, β 線
	固体	半導体検出器	α 線, γ (X) 線
励起作用 (蛍光) を利用する物	NaI (TI) シンチレーション検出器	γ 線	
	ZnS (Ag) シンチレーション検出器	α 線	
	プラスチックシンチレーション検出器	β 線, 中性子	
	熱蛍光線量計 (TLD)	γ (X) 線	
	蛍光ガラス線量計	γ (X) 線, β 線, 中性子線	
写真作用を利用する	フィルムバッジ	γ (X線), β 線, 中性子線	

エネルギー、Er (MeV) は γ 線のエネルギーである。

コンプトン散乱に基づくブロードな領域には、理論的な X 線に基づくピーク、後方散乱に基づくピーク、escape peak が存在するが、NaI 検出器では識別が困難である。

Table 4 は、単一エネルギーの γ 線核種のコンプトンエッジのエネルギーを示すものである。実際には、一回のコンプトン散乱で γ 線が検出器から逃げてしまわずに、多重コンプトン散乱 (multi-Compton scattering) を検出器内で起すことがあり、フォトピークとコンプトンエッジとの間にも連続的な分布が見られ、統計的なゆらぎ等により、ピークとコンプトン連続部の両方をブロードにしている (Fig.11(b))。

野外の一般環境での γ 線計測では、天然核種 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K からの多数の γ 線と、場合によっては核実験等のフォールアウトの ^{137}Cs からの 0.662MeV の γ 線が重なって観測される。NaI 検出器においては、ピーク領域が明確でないので、放出 γ 線のそれぞれのエネルギーに対応したピークをひろい出すことは一般に容易でない。そのため、スペクトル分析は、比較的単純な γ 線を放出する、限られた数の核種の存在にのみ適用される。一般には、特別のピークに着目するよりも、全波高分布を入射スペクトルに引き戻し、いくつかのチャンネルをひとまとめにしたエネルギーブロックごとに扱うことが多い⁽²⁶⁾。放射能探査での標準的な測定では、 ^{40}K = 1.37 ~ 1.57MeV (^{40}K の 1.46MeV のピーク), ^{238}U または ^{222}Rn = 1.66 ~ 1.86MeV (^{214}Bi の 1.76MeV のピーク), Th = 2.42 ~ 2.81MeV (^{208}Tl の 2.62MeV のピーク) を測定する。落合⁽³⁸⁾ は、断層破碎帯の γ 線探査では、ウラン系列の ^{214}Pb , ^{214}Bi からの γ 線, トリウム系列の ^{228}Ac , ^{208}Tl からの γ 線を指標とすることを提案している。Table 5 に落合⁽³⁸⁾ が測定しているエネルギー領域を示す。彼の方法では、以下に述べるコンプトン補正を行っていない。

γ 線のスペクトルは、より高エネルギー核種からのコンプトン連続部と光電効果のピーク部から成る。ピーク位置 (ch: パルスの波高の階層) は、 γ 線エネルギーにほぼ比例しており、またピークの面積は γ 線強度に比例しているため、スペクトル解析は、光電効果のピークについて行われる。NaI スペクトルの解析方法は、予めエネルギー領域を広い範囲に定め、マトリックス解析やストリッピング法による解析を行うが (文部科学省, 1990), 放射能探査ではストリッピング法がもっぱら用いられている。

ストリッピング法は補正波高分布の高エネルギーチャンネルに対応する単一ピークのレスポンス関数を補正波高分布から差引き、高エネルギーチャンネルの値をほぼ 0 にするという操作を逐次低エネルギー側に適用する手法である。レスポンス関数は検出系と線源の配置に固有のものである。レスポンス関数を決定する方法には、1)

Table 4 コンプトンエッジのエネルギー
Energy of Compton edge from various nuclides emitted gamma ray

Type	E_{γ} , MeV	E_{Compton} , MeV
203Hg	0.279	0.146
22Na	0.511	0.341
137Cs	0.662	0.477
54Mn	0.835	0.639
88Y	0.898	0.699
65Zn	1.115	0.907
22Na	1.275	1.061
24Na	1.369	1.154
40K	1.461	1.244
88Y	1.836	1.612
208Tl	2.614	2.381
24Na	2.754	2.25

Table 5 落合(1999)のヘリボーンの測定エネルギー領域
Energy ranges of gamma ray prospecting by Heri-bone
(from Ochiai, 1999)

チャンネルNo	主な検出核種	検出エネルギー領域
SCA 1	^{214}Bi	609KeV \pm 100KeV
SCA 2	^{228}Ac	907KeV \pm 100KeV
SCA 3	40K	1461KeV \pm 100KeV
SCA B	エア ^{214}Bi	609KeV \pm 100KeV

実験的に決定する方法と、2) モンテカルロシミュレーションによる方法とがある⁽²⁶⁾。

Fig.12 は、実験的にレスポンス関数を決定した場合のストリッピング法の例を示す図である。コンプトン連続部のうち散乱した ^{208}Tl の放射線は低エネルギーの ^{214}Bi と ^{40}K のチャンネルのカウントに寄与する。散乱した ^{214}Bi は、 ^{40}K のチャンネルにのみ寄与する。

$$\text{Tl} = \text{Tl}_0 \quad \dots\dots (2)$$

$$\text{Bi} = \text{Bi}_0 - a \cdot \text{Tl}_0 \quad \dots\dots (3)$$

$$\text{K} = \text{K}_0 - \beta \cdot \text{Tl}_0 - \gamma \cdot \text{Bi} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、サフィックスのゼロは、ウインドウ (各核種ごとに設定したチャンネル (ch) の幅) の全計数率 (グロスカウント) を示す。a, β , γ はストリッピング係数と呼ばれ、ウインドウの幅、検出器の大きさ、数、配置に依存するので、装置毎に各核種の標準線源を用いて実験で求める。コンプトン散乱線の影響を除いた ^{214}Bi , ^{40}K を正味計数率 (ネットカウント) と呼ぶ (Fig.12)。

ストリッピング係数は、地質、地形等により変化するが、一般的には固定して使われるので誤差の原因となる。この誤差を補正するため今泉他⁽¹²⁾ は、Fig.13 に示す簡易コベル法を開発している。この方法は、 ^{214}Bi と ^{40}K のエネルギー範囲のチャンネルを固定 ($X_2 \sim X_1$) し、グロスカウント (T) を求める。コンプトン散乱部 (B) は、

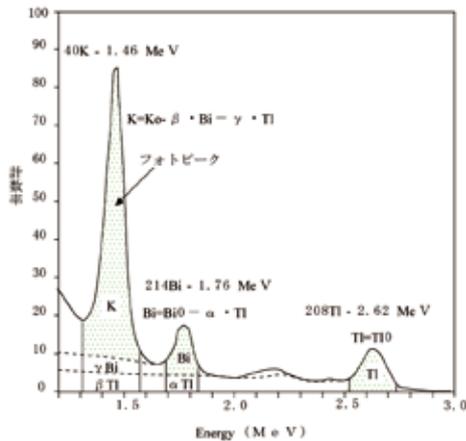


Fig.12 実験的にレスポンス関数を決定した場合のストリッピング法の例
Correction of the data by Stripping method. The stripping ratios are determined by experiment using standard nuclides.

それぞれの核種のピーク両裾野部 10Ch 区間の平均計数 (a と b) とチャンネル区間 (X₂ - X₁) から台形面積としてもとめ、ネットカウント (N) を N=T-B から計算する方法である。

VI γ線放射能探査装置の発達史

放射能探査の歴史を装置発達史から見ると、1940～1965年までの全γ線放射能探査装置の第Ⅰ期時代と、1966年以降のγ線スペクトロメータの第Ⅱ期時代に区分される⁵⁾。

放射能探査は、今世紀の初頭にドイツでウラン鉱床探査のために、電離箱を使って行われたのが最初である⁹⁾。1944年には、GM計数管のγ線放射能探査装置が開発され、エアボーンがカナダで初めて行われた⁵⁾。1950年には、カナダの物理探査学会は、径(φ)2インチ×高さ2インチ(0.1^{1/2})のNaI検出器を開発した。この検出器は、当時使われていたアントラセン検出器の3倍の効果(計数值)を示した。次に、φ4×2インチ(0.4^{1/2})のNaI検出器を開発し、光電子増倍管と結晶の接触部を改良したところ、従来の検出器より8倍の効果が得られた。この探査装置を航空機に搭載し、17300マイル調査し、55箇所γ線の異常増を発見したが、ウラン鉱床の発見にはいたらなかった⁵⁾。結局、1950年代のウラン開発のブームでは、エアボーンによる全γ線放射能探査は、大きなウラン鉱床の発見にほとんど寄与できなかった。そのため、ウラン探査ブームが終わったとき、エアボーン用の探査装置の開発がほとんど中止された⁵⁾。

1960年代初期に大気中で核実験が行われるようになると、核爆発によって作られた核分裂生成物の健康に対する影響を調べるためのエアボーンの放射能モニター装置の開発が求められた。これを受けて、エアボーン用のγ線スペクトロメータの開発が1966年に再び始まった。

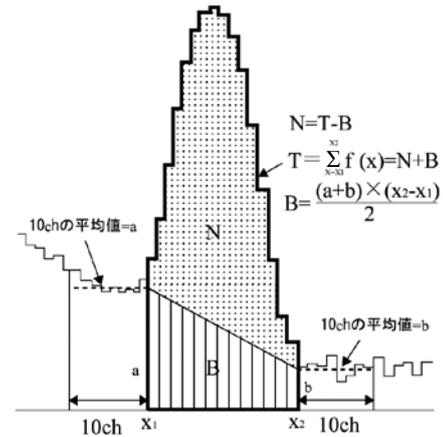


Fig.13 簡易コベレ法によるコンプトン散乱補正の例
Correction of the data by simplified Cobelet method

この時期、半導体が使えるようになったことが幸いして、エアボーンの振動に耐えられるγ線スペクトロメータの組み立てが可能になった。これが第Ⅱ期の始まりである(Darnly, 1972)。

その後、検出器の大型化と分析器の改良が進んだ。Winkelman et al.⁴⁷⁾は、12^{1/2}のNaI検出器によるエアボーンで、ドイツのウラン鉱山の粉碎処理地の空中測定を行い、²²⁶Ra、²²⁸Th、⁴⁰Kの放射能濃度分布を明らかにした。測定は100mの高度から、100km/時で飛行し、1秒毎に測定した。測定前に、大きい湖の上を飛行測定し、この測定値をバックグラウンド(以下BG)値とした。測定値を⁴⁰K、²²⁶Ra、²²⁸Thの放射能濃度に変換するために、カリウム、ウラン、トリウムの一定量を含む大型の較正パッドが開発され、この測定実験でストリッピング係数が決定された。Rybacha et al.⁴¹⁾は、16.7^{1/2}のNaI検出器と256チャンネルの分析装置で、スイスの原子力施設周辺の人工放射能の漏洩モニタリングをヘリボーンにより行っている。測定は90mの高度から、90km/時で飛行し、1秒毎に測定した。Winkelman et al.⁴⁷⁾と同じように、大きな湖上の測定からBG値と高度減衰係数を求め、空中測定結果を地表の放射能に変換した。彼らは、人工放射性物質の漏洩モニタリング指標として、人工グロスカウント比を提案している。これは、原子力発電所から発生する⁶⁰Co、¹³⁷Cs、²³⁸Uなどが、1.4MeV以下の低エネルギーであることを利用した方法で、人工グロスカウント比(V_{MMGC})は、以下の式で表現される。

$$V_{MMGC} = \frac{GC_1}{GC_2} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、

$$GC_1 = \sum_{400keV}^{1400keV} I_E (cps); \quad \dots \quad (6)$$

$$GC_2 = \sum_{1400\text{keV}}^{3000\text{keV}} I_E \text{ (cps)}; \quad \dots\dots (7)$$

である。

日本における放射能探査は、Hatuda et al.⁽⁸⁾が、六甲断層上で、地中ガスの放射能を電離箱により測定したことが始まりである。1955年度に地質調査所は、ウラン探査を目的として、エアボーンとカーボンによる全 γ 線放射能探査を開始した。エアボーンは1956年～1960年の間に17地区、61,000k m²の調査が実施された⁽¹⁵⁾。またカーボンは1956年～1965年の間に調査面積151,000k m²が実施された⁽¹⁰⁾。ここで用いられた装置は、 $\phi 5 \times 2$ インチ(1.9 $\frac{1}{2}$) NaI検出器で、50KeV以上の全エネルギーを測定している。

農業土木試験場(現在の農村工学研究所)では1956年から地下水開発のため埋没断層調査を目的として、放射能探査を開始した。初代の地下水資源研究室長(当時、土地改良第二研究室長)の落合は、最初に埋没断層を土中ガス中の放射能の測定で検出しようと試みた。次に、GM計数管やシンチレーションカウンタを地表面に置いたり、地中孔にいれて、一定時間計測する方法がとられるようになった⁽³⁵⁾。これらの方法で広域を調査することは困難であったので、落合⁽³⁵⁾は空間 γ 線を計測するシンチレーションカウンタを自動車に取り付けて、連続測定できる装置を開発した。最初は、3個の $\phi 5 \times 2$ インチ(1.9 $\frac{1}{2}$) NaI検出器を車載し、その合成値を計測していた。その後、5チャンネル γ 線スペクトロメータ⁽³⁵⁾により、大まかなエネルギー弁別が行われるようになった。これが日本での第2期の開始時期になる。この装置は4つのしきい値を設定し(Table 5)、しきい値間の差からエネルギー範囲を測定するもので、完全な γ 線スペクトロメータではない。落合は1947年～1981年まで農業土木試験場に在籍し、放射能を利用した様々な地下水調査法の開発を行った。

落合の後を引き継いだ木村⁽¹⁸⁾は、1024チャンネル(Ch)のスペクトロメータを開発し、コンプトン散乱線の補正にはストリップング法を採用した。断層指標核種として²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl, ²¹⁴Bi/⁴⁰Kの核種比を提案している。木村は、カーボーンで4km/時で走行中30秒間の空間 γ 線を測定するのに12個の $\phi 5 \times 5$ インチ NaI検出器(19.3 $\frac{1}{2}$)を利用した。その後、地下水資源研究室では、検出器を18個(28.9 $\frac{1}{2}$)まで増加させ、コンプトン散乱線の補正には簡易コベル法が使われている⁽¹²⁾。

落合は1981年から(株)エースヘリコプターの空中探査技術研究所へ所長で転任し、ヘリボーンのための放射能探査装置の開発を引き続き行った。彼は、Table 5のエネルギー領域を設定し、多くの調査例を報告している(例えば、落合、1992; 1999)。落合は、地表からの γ 線検出用として、10.3 $\frac{1}{2}$ のNaI検出器2台と、上空のラドンを測定するために10.3 $\frac{1}{2}$ のNaI検出器1台(エア²¹⁴Bi

検出器)を使用している。エア²¹⁴Bi検出器は、地表からの γ 線の影響を排除するために、検出器の下側は厚い鉛板で遮蔽している。

上述したように放射能探査装置の歴史を概観すると、NaI検出器の大型化の歴史として見る事ができる。当初は市販されている $\phi 2$ インチ、 $\phi 5$ インチの検出器が使われ、その後 $\phi 5 \times 5$ インチ(1.6 $\frac{1}{2}$)を並列させ、検出器の大型化が図られた。最近では、10 $\frac{1}{2}$ ～16 $\frac{1}{2}$ の特殊の大型検出器が用いられている。

Ⅶ プラスチックシンチレータ検出器の開発

1 新たな検出器の開発の必要性

NaI検出器の測定誤差を小さくするためには検出器を大きくし、計数率を高くしなければならない。Rybacha et al.⁽⁴¹⁾が使ったNaI検出器は、16.7 $\frac{1}{2}$ (密度3.67g/cm³とすると61.3kg)であり、周辺機器を含めた総重量は200kg以上になると思われる。落合⁽³⁸⁾のエアボーンでは、10.3 $\frac{1}{2}$ のNaI検出器3台を装備し、1台は地上からの γ 線を遮断するために鉛板を敷いている。この場合、総重量は数100kgになるであろう。このような巨大NaI検出器は、特殊仕様であるので高価で、手に入れにくい。

放射能探査は地表から放出される γ 線を測定しているので、同じ容量の検出器なら面積の広い板状の形態が有利である。一般に入手できるNaI結晶の寸法は $\phi 3$ インチ球または $\phi 2 \times 2$ インチ(0.1 $\frac{1}{2}$) $\phi 3 \times 3$ インチ(0.35 $\frac{1}{2}$)、 $\phi 5 \times 5$ インチ(1.6 $\frac{1}{2}$)である。NaIは結晶であるため、板状に加工することは技術的、経済的に困難である。

次の γ 線放射能探査装置に求められるのは、無人ヘリコプターに搭載できる装置の開発であろう。最も搭載量の大きい産業用無人ヘリコプターBの搭載量は60～80kgであるので、探査装置の軽量化が求められる。したがって、今後の放射能探査の検出器には、検出器の大型化と軽量化という、相反する要求が求められる。

Table 6に、よく用いられる無機シンチレータの特性を、Table 7に代表的有機シンチレータの特性を示す。アルカリハライドの比重は、NaIの3.67からCsI(Tl)の4.51までである。その他の無機質の検出器は、比重が4～8である。ガラスシンチレータは、2.64～3.03でやや軽い。一方、有機液体シンチレータ(NE213)の密度は0.867、有機結晶(アントラセン)で1.25であり、無機シンチレータに比較して1/3～1/4の密度である。

有機液体シンチレータは、 γ 線を伴う放射線場での中性子の計測に1960年代から用いられている。有機液体シンチレータでは、Nuclear Enterprise社のNE-213^(注)が特に γ 線弁別性能が優れており、標準的な中性子検出器として使われている⁽¹⁾。しかし、液体シンチレータを野外で使用する場合、その毒性とほぼ室温に近い引火点⁽¹⁾の問題がある。また、シンチレータ容器として、一般に、

Table 6 よく用いられる無機シンチレータの特性⁽⁷⁾
Specifics of typical inorganic scintillators⁽⁷⁾

	比重	最高放出 波長 (nm)	屈折率	減衰時間 (μ s)	絶対光収率 (光子/MeV)	バイアルカリ光電 子増倍管による相 対的パルス波高	参考文献
アルカリハライド							
NaI (Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38000	1.00	
CsI (Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%) 3.34 (36%)	65000	0.49	78,90,91
CsI (Na)	4.51	420	1.84	046,418	39000	1.10	92
Lil (Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11000	0.23	
その他の遅い無機シンチレータ							
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200	0.13	
CdWO ₄	7.90	470	2.3	1.1 (40%) 14.5 (60%)	15000	0.4	98-100
ZnS (Ag) (多結晶)	4.09	450	2.36	0.2		1.3*	
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.47	0.9	24000	0.5	
活性化物質なしの高速無機シンチレータ							
BaF ₂ (高速成分)	4.89	220		0.0006	1400	na	107-109
BaF ₂ (遅発成分)	4.89	310	1.56	0.63	9500	0.2	107-109
CsI (高速成分)	4.51	305		0.002 (35%) 0.02 (65%)	2000	0.05	113-115
CsI (遅発成分)	4.51	450	1.80	数 μ sまで 多くの成分	多い	多い	114,115
CeF ₃	6.16	310,340	1.68	0.005,0.027	4400	0.04~0.05	76,116,117
Ce活性化高速無機シンチレータ							
GSO	6.71	440	1.85	0.056 (90%) 0.4 (10%)	9000	0.2	119-121
YAP	5.37	370	1.95	0.027	18000	0.45	78,125
YAG	4.56	550	1.82	0.088 (72%) 0.302 (28%)	17000	0.5	78,127
LSO	7.4	420	1.82	0.047	25000	0.75	130,131
LuAP	8.4	365	1.94	0.017	17000	0.3	134,136,138
ガラスシンチレータ							
Ce活性化Liガラス ^b	2.64	400	1.59	0.05~0.1	3500	0.09	77,145
Tb活性化ガラス ^b	3.03	550	1.5	~3000~5000	~50000	na	145
比較用、典型的な有機 (プラスチック) シンチレータ							
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	10000	0.25	

Table 7 代表的有機シンチレータの特性⁽⁷⁾
Specifics of typical organic scintillators⁽⁷⁾

物質	最大発光の波長 (nm)	相対シンチレーション 効率 (%)	減衰時間 (ns)	密度 (10 ³ kg/m ³)
アントラセン	454	100	~30	1.25
トランススチルベン	385	~60	4~8	1.16
NE102	350~450	~65	2	1.06
NE110	350~450	60	3	1.06
NE213 (液体)	350~450	~60	2	0.867
PILOT B	350~450	68	2	1.06
PILOT Y	350~450	64	~3	1.06

もろいガラスが使用されており、これも野外測定器としては問題である。容器を鉄鋼かアルミニウムの金属にすれば、高重量になる。これらの理由から、有機液体シンチレータを野外調査に利用することは困難であると思われる。

プラスチックシンチレータ（以後、PS と言う）は、有機シンチレータを溶媒に溶かした後、これを高分子化して固溶体としたものであり、液体シンチレータと同様の性質を示すが、液体に比べて容器を必要としないという利点がある。PS は細い線（fiber）から薄い板（sheet）まで任意の形状と寸法に加工できる。なにより材料は安価なので、大体積の固体シンチレータが必要な場合、PS 以外選択の余地がないことが多い⁷⁾。

これらのことから、検出器の大型化と軽量化するための素材としては PS が最も有望であると考えられる。PS は、速中性子の測定も可能であるので、PS 放射能探査器が開発されれば、原子力発電所のモニタリング器としての利用も見込まれる。

2 PS 検出器

ある種の有機物には、放射線が入射すると、単一分子のエネルギー準位間での遷移によって蛍光現象が生じる。これは分子の種類によって定まるもので、その物理的状态には依存しない⁷⁾。例えばアントラセンは固体の多結晶状態でも、気体でも、あるいは多くの成分から成る溶液の一部であっても蛍光が起きる。この性質は NaI のように規則的な結晶格子の無機結晶シンチレータとは著しく異なる⁷⁾。

PS 検出器は、ポリスチレンあるいはポリビニルトルエンなどの透明なプラスチックに有機シンチレータ等を溶かし込んだものである。有機シンチレータは、その成分が水素、炭素および酸素という原子番号（Z）の低い成分より成るため、 γ 線エネルギーに対する光電効果の断面積は事実上ほとんどゼロに等しい。その結果、 γ 線に対するスペクトルではフォトピークが表れず、コンプトン散乱による連続スペクトルだけを生じる⁷⁾。また、 γ 線の検出効率が低い（NaI 検出器の 1/3 ~ 1/4）。そのため、有機シンチレータは、これまでベータ線スペクトル測定と中性子測定用に用いられてきた（Table 3）。

近年、有機物のシンチレータで、中性子と γ 線とを識別できるものが見つかり、 γ 線と中性子との混合場での γ 線あるいは中性子の検出に用いられている。NE213 や BC501 などの液体シンチレータ検出器に関しては、中性子と γ 線の弁別法、中性子のエネルギーの測定法、 γ 線のエネルギーの測定法等に関してたくさんの研究がなされている。Akimov¹⁾は、有機液体シンチレータを使用する放射線検出方法をレビューしている。Nordell³²⁾と Coelho et al.⁴⁾は、NE-213 スペクトロメータを使った光中性子エネルギースペクトルの測定結果を報告している。工藤他²¹⁾は、熱中性子場で混在する γ 線のエネ

ルギー分布を正確に把握するために、天然の Li フィルターを外側に装着した NE-213 液体シンチレータを用いて、熱中性子場に混在する γ 線エネルギー分布を測定し、ライプタイムと波高分布の 2 パラメータ測定により γ 線信号に起因する波高分布だけを切り出し、波高分布を GRAVEL および MLEKE コード（HEPRO program package）でアンフォールディングすることにより、 γ 線のエネルギー分布を求めている。

PS に関する研究としては、Lipnik et al.²⁴⁾が高エネルギー中性子のための低コストプラスチック検出器について報告している。Pozzi et al.³⁹⁾は、プラスチック（BC-420）と液体（BC-501）シンチレータの比較分析を行っている。核燃料サイクル機構では、臨界事故の発生を検知し速やかに退避警報を発生させることを目的とする臨界検出器として、 γ 線を検出する PS と中性子を検出する減速材付き核分裂検出器を使用している。辻村ほか⁴⁶⁾は、中性子と γ 線とを単一の検出器で検出し、かつ、両者による合計の吸収線量を測定する臨界検出器を開発している。これは、PS と光電子増倍管からなる検出部とを、熱中性子捕獲線コンバータである Cd、さらに厚さ 5cm のポリエチレン減速材で覆うことによって検出器の外部から入射する γ 線だけでなく、Cd (n, γ) 反応を利用して間接的に中性子も検出することができる検出器である。ポリエチレン減速材の厚さを 50mm とし、厚さ 1mm の Cd を PS と減速材の境界面と減速材表面から深さ 35mm の二層に配置した構造である。しかしながら、著者らの知る限り、PS で γ 線のエネルギーを弁別した例はない。

3 PS 検出器の開発の課題

これまで PS 検出器が、環境 γ 線測定に利用されていない理由は、光電子増倍管（PMT）の動作の不安定性（ゲイン変動）が主因となって、信頼性の高い測定器になり得なかったためである⁴⁹⁾。PS 検出器を放射能探査装置の検出器とするための技術的課題は、以下のとおりである。

- 1) ゲイン変動の監視法の開発、
- 2) 放射能探査に最適な PS の選定、
- 3) ライトガイドの形態、
- 4) 中性子と γ 線とを弁別するための装置、
- 5) γ 線スペクトルを解析する技術開発

1) ゲイン変動の監視法の開発

検出器のゲインは高圧電源の変動、温度変化その他の影響で生じる。NaI 検出器では、数%から 10%まで変動する。後述するように、PS 検出器では、これらの影響は更に大きい。野外で長時間の環境 γ 線を測定するためには、ゲイン変動をモニタリングし、ゲインスタビライザーにより変動を自動調整する装置の開発が不可欠である。

NaI 検出器のゲイン監視法では、 ^{137}Cs 線源を検出器周辺に設置し、このフォトピーク位置を監視することにより、ゲイン変動を監視している。しかし、有機シンチレータ検出器では、スペクトルにフォトピークが生じないので、この方法が使えず、測定結果に高い精度を期待できない場合が少なくない⁽²⁷⁾。スペクトルのエネルギー校正を十分に高い精度でしかも手軽に行うことのできる方法は未だ確立されていない。

従来から、有機シンチレータ検出器に対して用いられている最も簡単なエネルギー校正法は、適切な RI 線源からの γ 線を外部照射して得られるコンプトン反跳電子スペクトルのコンプトンエッジをエネルギー尺度として利用するものである⁽²⁷⁾。しかしながら、実際に観測されるパルス波高スペクトルは分解能による広がりを含むために、スペクトル上でコンプトンエッジを識別することは一般に困難である⁽²⁷⁾。

スペクトル上のコンプトンエッジの位置を近似的に決定するための方法として、スペクトルの高さがピークに対して一定の比率となる位置を指定する方法がある。これは、スペクトルにおいて、スペクトルピークの高さ np の $0.5np$ から $0.9np$ となる位置がコンプトンエッジに良く対応するというものである。しかしながら、この方法がどの程度まで正しいものであるか判断する明確な根拠はない⁽²⁷⁾。門間ほか⁽²⁷⁾は、パーソナルコンピュータ上に作成したコンプトンスペクトルを対象に、データを

反復法と逐次近似法とによりデコンボリューションを行うことで、コンプトンエッジを抽出できることを示した。しかしながら、この検討は仮想的なノイズ発生器を利用した種々の異なるノイズ成分(統計的変動)をもつ擬似コンプトンスペクトルでの検討であり、実際の測定データに基づいていないこと、平滑化の係数はノイズの程度により変える必要があることなどの問題がある。

2) 放射能探査に最適な PS の選定

コンプトンエッジの正確な位置は、検出器の寸法、分解能等の種々の要因に依存する⁽⁴⁸⁾。そのため、現在市販されている PS (Table 8) から、中性子と γ 線とが検出可能な材料を選択する必要がある。PS で γ 線の相互作用を起こさせるためには、極端に薄い検出器を作ることとはできない。この厚さにより PS の重量がきまるため、プラスチックの質、シンチレータの種類が軽量化の重要なポイントである。

3) ライトガイドの形態

平板状の検出器では、シンチレータ検出部より小さい受光部の光電子増倍管を用いる必要がある。そのため、シンチレータと光電子増倍管との接合部のライトガイドをどのような形態にするかが重要である。

4) 中性子と γ 線とを弁別するための装置

有機液体シンチレータでは、発光の減衰時定数 (3.7ns 程度) がエネルギー付与の差によって異なることを利用して、光電増倍管出力回路での粒子の立ち上がり時間差

Table 8 市販のプラスチックシンチレータの特性⁽⁷⁾
Specifics of typical organic scintillators on the market⁽⁷⁾

Bicron社	光出力アン トラセンに 対する割合*	最高 放出 波長 (nm)	減衰 定数 (ns)	減衰距離 (cm)	屈折率	水素/ 炭素比	密度	軟らかくなる 温度または閃 光の出る温度 (°C)	用途
BC-400	65	423	2.4	250	1.581	1.103	1.032	70	汎用
BC-404	68	408	1.8	160	1.580	1.107	1.032	70	高速計数用
BC-408	64	425	2.1	380	1.580	1.104	1.032	70	大面積TOF用
BC-412	60	434	3.3	400	1.580	1.104	1.032	70	汎用, 大面積, 長尺
BC-416	38	434	4	400	1.580	1.110	1.032	70	
BC-420	64	391	1.5	110	1.580	1.100	1.032	70	超高速, シート
BC-422	55	370	1.4	8	1.580	1.102	1.032	70	非常に高速, 小形
BC-422Q	11	370	0.7	<8	1.580	1.102	1.032	70	超高速タイミングと計数
BC-428	36	480	12.5	150	1.580	1.103	1.032	70	光ダイオードやCCD用, ホスウィッチ検出器用
BC-430	45	580	16.8	NA	1.580	1.103	1.032	70	Si光ダイオード, 赤色光用光電子増倍管
BC-434	60	425	2.2	350	1.590	0.995	1.049	100	汎用
Bc-436	52	425	2.2	NA	1.610	0.960	1.130	90	薄い板
BC-444	41	428	285	180	1.580	1.109	1.032	70	dE/dx研究用ホスウィッチ検出器用
BC-452	32	424	2.1	150	1.580	1.134	1.080	60	100keV以下のX線量測定用
BC-454	48	425	2.1	120	1.580	1.169	1.026	60	中性子スペクトル測定用, 熱中性子用
BC-470	46	423	2.4	200	1.580	1.098	1.037	65	線量測定用
BC-490	55	425	2.3		1.580	1.107	1.030	70	汎用
Bc-498	65	423	2.4		1.580	1.103	1.032	70	β 線, γ 線用

を分析する粒子弁別が行われている。この方法は、パルス波形弁別 (pulse shape discrimination) と呼ばれ、中性子検出器から γ 線事象を取り除く方法として検討されている (グレン, 2001)。しかし、PS 検出器での有効な方法は開発されていない。

5) γ 線スペクトルを解析する技術開発

有機液体シンチレータで、 γ 線のエネルギーを弁別する一般的な方法は、スペクトルをモンテカルロ法によりアンフォールディングする方法があり、MATXUF, FERDOR/COOLC, SCINFUL-CG などの計算コードが開発されている。この方法は、検出器形状や測定条件の制約があり、室内の安定した状態での測定で使用されている。しかし、PS 検出器の γ 線エネルギーを弁別する簡易な方法は開発されていない。

4 開発の方法

開発しようとする装置は、飛行機、ヘリコプターなどを利用して、高空から遠隔で天然に存在する γ 線核種 (^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl)、原子力発電の過程で生成される人工 γ 線核種と中性子とを測定するための、軽量で、かつ、大型化が可能な PS 検出器および周辺装置 (測定値を補正等する演算回路等) からなる放射能探査装置である。

著者らは、中性子と γ 線とが異なる透過能を有することを利用して、中性子と γ 線とを弁別する方法を考案した。すなわち、第 1 の厚さを有する PS の中性子検出器 (1PS) と、第 2 の厚さを有する PS (2PS) の γ 線検出器と、2 つの PS 間に挟み込まれた中性子吸収部とを有する 3 層の構造の検出器を特徴とする放射能探査装置である。

この構造では、地上から中性子と γ 線が放出されている場において、中性子は 1PS に入射し、PS と相互作用を起こし、ほとんどのエネルギーを消費する。中性子検出器を通過した一部の中性子は、中性子吸収部で吸収される。 γ 線は 1PS と中性子吸収部とを通過し、2PS と相互作用を起こし、シンチレーションを発生する。中性子は、1PS と中性子吸収部でほとんど除去されるので、中性子フリーの γ 線のみが 2PS に到達するようにならなければならない。そのため、1PS の厚さは、前記中性子吸収部と協働して中性子を吸収する厚さ以上にシステムを設計する必要がある。

装置の開発は以下の手順で行った。

- 1) PS 検出器の γ 線スペクトルの校正方法
- 2) 市販の PS から 3 種類の PS を選択し、PS 検出回路の試作による測定結果から放射能探査用 PS の選定
- 4) PS 検出器スペクトルの解析法の開発
- 5) 測定システムの設計・試作
- 6) 実証試験

以下に、上記手順に従い、開発結果を記述する。

5 PS 検出器の γ 線スペクトルの校正方法

コンプトンエッジに注目し、以下に説明する方法 (「微分法」と称する。) でスペクトルを校正し、基準となる γ 線のコンプトンエッジ位置を追跡することによりゲイン変動を監視する。

Fig.14 に示す手続きにより微分曲線を求める。1 ~ 1024 チャンネル (ch) までの各計数データを入力して、

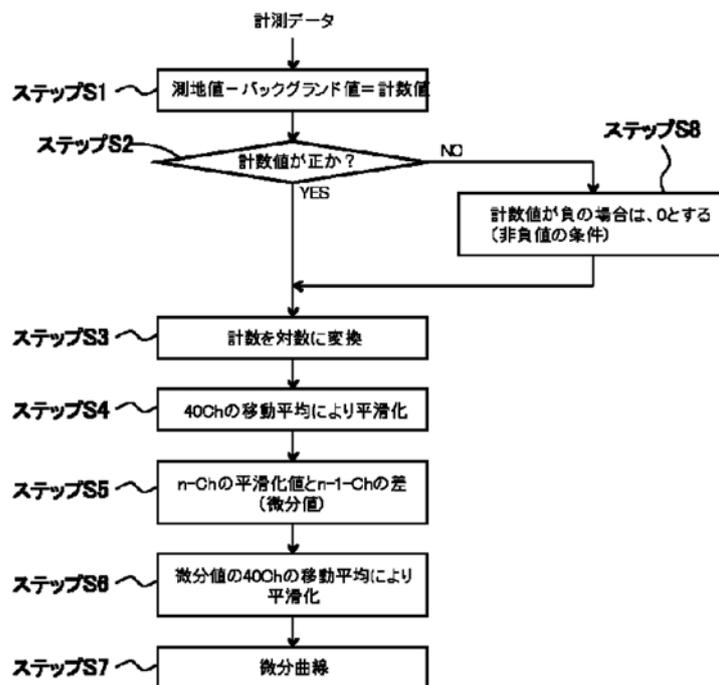


Fig.14 PS検出器の γ スペクトルから微分曲線作成する手順を示すフローチャート
Flow chart of procedures to make a differential curve of gamma ray spectrum by PS detector

まず、ステップ S1 において、1) 測定値 - BG 値 = 計数値を演算する。次いで、ステップ S2 において、2) 計数値が正か否かを判定する。ステップ S2 の判定結果が負及び 0 の場合には (No)、ステップ S8 に進み、計数値を 1 とし、ステップ S3 に進む(非負値の条件)。ステップ S2 で正の場合には (YES)、そのままステップ S3 に進む。ステップ S3 において、3) 計数値を対数に変換する。ステップ S4 において、4) ノイズ除去のために対数変換値の 40ch の移動平均により平滑化し、ステップ S5 において、5) n-ch の平滑化値と n-1-ch の平滑化値の差(微分値)を計算する。次いで、ステップ S6 において、6) 微分値の 40ch の移動平均により平滑化する。実際の測定では、測定器周辺に ⁴⁰K, ²¹⁴Bi, ²⁰⁸Tl の線源からの γ 線を外部照射し、常に 3 核種のコンプトンエッジを強調し、3 核種のコンプトンエッジエネルギーでエネルギー校正する。次いで、ステップ S7 で、微分法によるエネルギー校正を完了する。以上の処理手順により、PS のパルス波高のエネルギー校正を十分に高い精度でしかも手軽に行うことができる。実際の例は、Fig.17 に示した。

6 放射能探査のための PS の選定

1) PS 検出器候補の選定

シンチレータ中で荷電粒子が失った運動エネルギーのごく一部分が蛍光エネルギーに変換され、残りは光にならず熱の形で費やされる。放射能探査用の PS を選定する場合、光出力の高いシンチレータが適している。多種類の有機シンチレータにおいて、観測されるシンチレーション光のほとんどは即発蛍光である。しかし、多くの場合、遅発蛍光に対応する、より長寿命の成分が観測される。数 ns という即発減衰時間に比べて、この

遅い成分は通常数百 ns の減衰時間を持っている。放射能探査では γ 線と中性子を弁別し、2 成分の有用な情報を導くために、遅い成分を区分可能な減衰距離の長いシンチレータを選択する必要がある。Table 8 の市販の PS の特性一覧からこの条件に適合する PS 検出器候補を検討した結果、PS からの光出力が高く、減衰距離の長い BC-400 (NE-102), BC-408, BC-412 (NE-110) の 3 種類を候補として選定した。

2) PS 検出器の選定

BC-400, BC-408, BC-412 の γ 線に対する応答を発光量と減衰の観点から検討してみる。BC-400 は発光量であるアントラセン比: 0.65, 減衰量: 250cm (Table 8) からシンチレータの中心からライトガイドまでの長さ 125cm を考えて光電子増倍管の受け取る光量の相対値 X は、

$$BC-400 : X_{400} = 0.65 \times \exp(-125/250) = 0.395$$

である。同じように BC-408 と 412 とは、

$$BC-408 : X_{408} = 0.64 \times \exp(-125/380) = 0.461$$

$$BC-412 : X_{412} = 0.60 \times \exp(-125/400) = 0.439$$

となり、BC-408 と 412 とが、BC-400 より大きな光量を得られることが予想された。

次に、BC-400, BC-408, BC-412 の 3 種類のシンチレータを使った 25cm x 25cm x 5cm の検出部とライトガイドからなる検出器を試作し、 γ 線: ¹³⁷Cs (0.02MBq) と高速中性子: ²⁵²Cf 線源 (0.5MBq) の線源を測定し、測定結果と 3 インチ NaI 検出器のスペクトルの比較等から γ 線測定に関して有効な PS を検討した。また、²⁵²Cf 線源からの距離を変化させた測定から、中性子測定の精度を検討した。

Fig.15 は、PS の選定試験に使用した検出システム

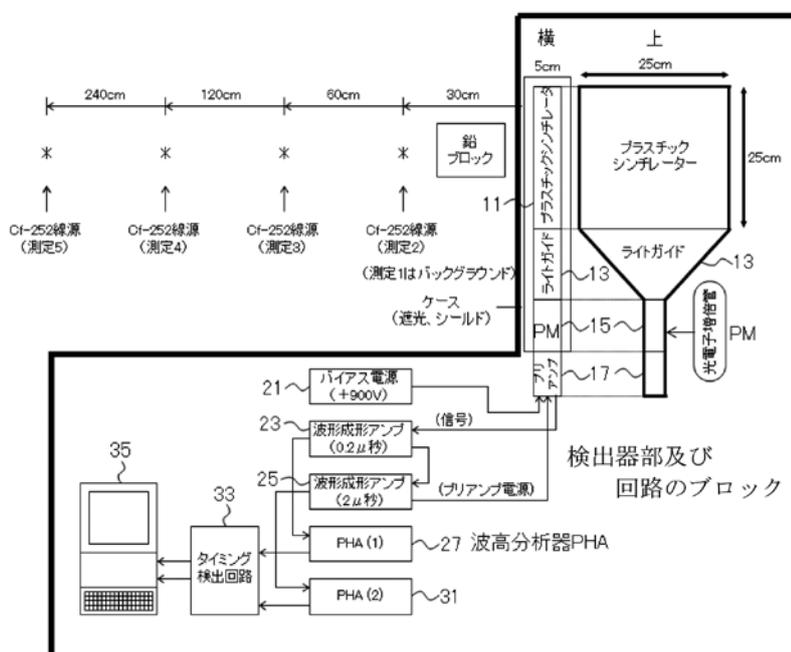


Fig.15 プラスチックシンチレータの選定試験の検出器と波高分析器の回路概略図
Block diagram of circuit with PS detector and pulse height analyzer for selection of PS materials

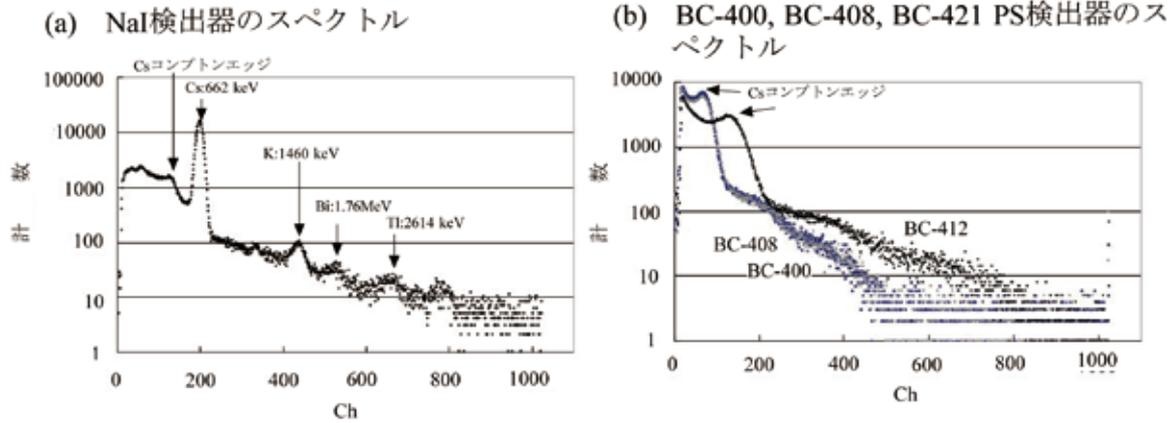


Fig.16 試作システムによる ^{137}Cs 線源の3インチNaI検出器 (a) とBC-400(NE-102), BC-408, BC-412(NE-110)プラスチック検出器 (b) の測定スペクトル例 (BC400とBC408のスペクトルはほとんど重なっている。)
Typical spectra obtained from a NaI detector (a) and from the PS detector (b). The spectra acquired from BC400 and BC408 were similar.

の概略図である。**Fig.15**の左側上の4つの“*”印は、 ^{252}Cf 線源を4つの位置に置いて測定したことを示している。回路のブロックは、それぞれ、PS11, ライトガイド13, 光電子増倍管15, プリアンプ17, バイアス電源21, 波形整形アンプ23・25, PHA (1) 27・(2) 31, タイミング検出回路33, データ収集・表示器 (パーソナルコンピュータ) 35 から構成されている。検出器部は、PS 検出器部とプリアンプ17からなる。

Fig.16は、NaI 検出器とPS 検出器とで ^{137}Cs 線源(0.02MBq)を測定した場合の、測定スペクトルデータの例である。これらのスペクトル図は、各チャンネル毎に検出されたデータ数を示す頻度分布図である。横軸はチャンネル(1024ch(1~3 MeV)), 縦軸は1000秒間の計数である。NaI 検出器のスペクトル (**Fig.16(a)**)では、 ^{137}Cs : 662keVのフォトピークが200chに、コンプトンエッジが130ch付近に現れている。 ^{137}Cs からの662keVのフォトピーク以外に、環境同位体である ^{40}K : 1461keV, ^{214}Bi : 1764keV, ^{208}Tl : 2615keVのフォトピークも、430ch, 520ch, 770chに現れている。

BC-412のPS 検出器のスペクトル (**Fig.16(b)**)では、130ch付近にコンプトンエッジのピークが存在する。BC-400とBC-408のPS 検出器のスペクトル (**Fig.16(b)**)は、ほぼ同じスペクトルを示し、コンプトンエッジが100ch付近に現れている。

Fig.17は、BC-400, BC-408, BC-412のPS 検出器のスペクトルを微分曲線に変換した例を示す。各PS 検出器の微分曲線では、 ^{137}Cs のコンプトンエッジが明瞭なピークとして抽出されている。また、環境同位体である ^{40}K , ^{208}Tl のコンプトンエッジも抽出できていることがわかる。特に、BC-412は、BC-400, BC-408よりも明瞭に ^{208}Tl のコンプトンエッジを抽出できている。

Fig.18は、BC-412の ^{137}Cs , ^{40}K , ^{208}Tl のコンプトンエッジのエネルギー(横軸)とチャンネル(ch)との校正結果を示す図である。BC-412プラスチック検出器のエネ

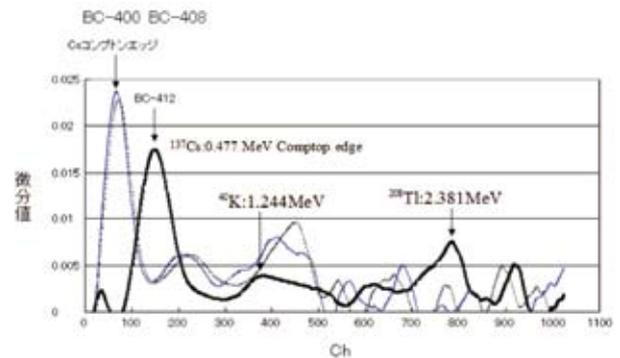


Fig.17 **Fig.14**の手続きによるPS検出器のスペクトルの微分曲線の例
Examples of differential curves obtained by means of the procedure outlined in Fig.14.

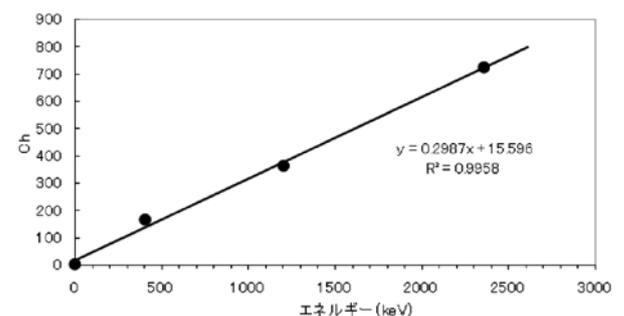


Fig.18 BC-412 検出器のエネルギー校正結果例
Examples of calibration of BC-412 detectors between energy of gamma ray and channels of pulse height analyzer

ルギー校正においては直線関係があり、例えば、図の場合 ch とエネルギーの関係式の決定係数は0.996であり、十分な精度を有している。従って、エネルギー弁別という観点からみた検出器としては、BC-412が適していると言える。

Fig.19は、BC-412 検出器に対し、 ^{252}Cf 線源を30cm, 90cm, 210cm, 450cm だけそれぞれ離れた場合の平滑

化したスペクトルの変化と、BGを除去した計数を示す図である。²⁵²Cf線源は、数MeVにピークを持つMaxwell型の幅広いエネルギースペクトルを有するので⁽³⁰⁾、0~3MeVのスペクトルではBGである自然の⁴⁰K:1461keV、²¹⁴Bi:1764keV、²⁰⁸Tl:2615keVのγ線スペクトルに隠れて明瞭なピークは示さない。中性子からの計数は以下の式(8)で示される。

$$^{252}\text{Cfの計数} = \sum_{\text{Ch}=f}^{\text{Ch}=1024} E(\text{Ch}) - \sum_{\text{Ch}=f}^{\text{Ch}=1024} \text{BG}(\text{Ch}) \dots (8)$$

ここで、fは、カットオフのチャンネルである。E(Ch)は、各チャンネルの計数、BG(Ch)はBGの各チャンネルの計数である。中性子からの計数はFig.19の棒グラフで示したように、距離と計数值との間には明瞭な関係があり、PS検出器で高速中性子が検出できているのがわかる。これらの実験から、検出器としてはBC-412が適していると判定した。

7 PC検出器のγ線スペクトル解析法の開発

PSは、γ線のフォトピークが形成されないので、プラスチック検出器の遠隔操作利用例としては、スイッチとしての利用(中性子やγ線が測定器に入射されたことを検知し、測定装置を起動させるなど)がある程度で、エネルギーを弁別する測定器として利用しようという発想はこれまでなかった。

微分法を使ったエネルギー校正結果に基づき、次の3

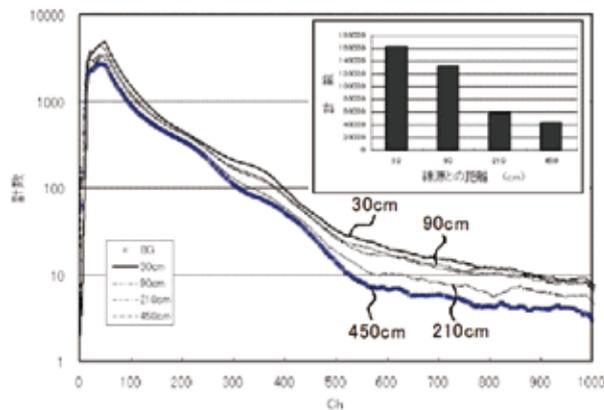


Fig.19 BC-412検出器の²⁵²Cf線源の距離と計数との関係
Relationship between distance from standard source of ²⁵²Cf and count rate of BC-412 detector.

つの方法: 1)コンプトン散乱法, 2)微分曲線面積法, 3)人工グロスカウント比(V_{MMGC})法でγ線のエネルギーを弁別する。

1) コンプトン散乱法

2 MeV以下のエネルギー領域のPS検出器のスペクトルは、様々な核種のコンプトン散乱スペクトルが重なって合成されたスペクトルになっている。Fig.20は、環境で測定できるγ線の核種¹³⁷Cs、⁴⁰K、²¹⁴Bi、²⁰⁸Tlのコンプトン散乱スペクトルとそれらの合成スペクトルの概念図である。横軸はチャンネル番号、縦軸は計数(n(C))である。環境で測定できるγ線の核種は、⁴⁰K、²¹⁴Bi、²⁰⁸Tlと、原子力施設周辺の¹³⁷Csで構成されていると仮定すると(Fig.20(a))、このパルス波形を核種毎に区分すると、Fig.20(b)のように弁別することができる。

Fig.21は、コンプトン散乱法を説明する概念図である。Fig.21(a)に示すように、1核種からのコンプトン散乱によるパルスは、コンプトンエッジを含む凸部(エッジ部)と、それより低エネルギー側のコンプトンプラトー(プラトー部)からなっている。合成されたスペクトルで(Fig.21(b))、aからfまでのチャンネル番号(ch位置)がわかれば、核種毎のコンプトン散乱計数を知ることができる。

ここで、aは²⁰⁸Tlのエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数をC(a)_{Tl}と書く。aチャンネル以上の高エネルギー部の計数は宇宙線からのγ線の影響である。bは²⁰⁸Tlのエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、²¹⁴Biのエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数をC(b)_{Tl}と書く。cは²¹⁴Biのエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、²⁴⁰Kのエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数をC(c)_{Bi}と書く。dは⁴⁰Kのエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、¹³⁷Csのエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数をC(d)_Kと書く。eは¹³⁷Csのエッジ部の低エネルギー側のチャンネルである。このチャンネルの計数をC(e)_{Cs}と書く。fはカットオフのチャンネルであり、これより下のチャンネル番号では、計数が急激に減少する。カットオフのチャンネルは測定器に固有のチャンネルである。

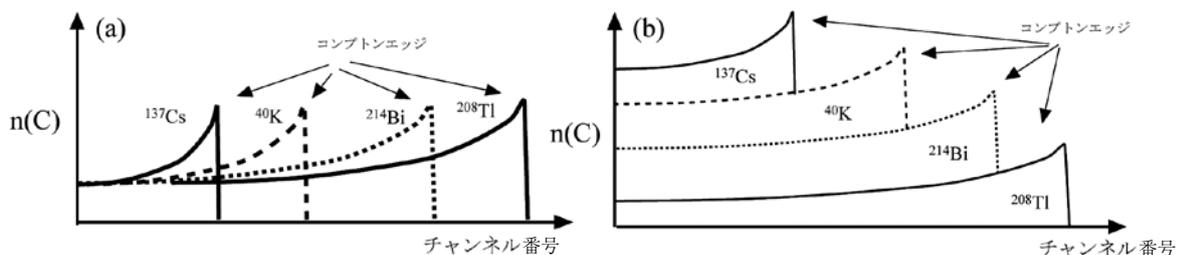


Fig.20 環境で測定できるγ線の核種¹³⁷Cs、⁴⁰K、²¹⁴Bi、²⁰⁸Tlのコンプトン散乱スペクトル (a) とそれらの合成スペクトル (b) の概念図
Schematic figures showing Compton scattering spectrums of environmental ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²¹⁴Bi and ²⁰⁸Tl (a) and compounded spectrum (b)

a～eのチャンネルは、スペクトルの微分曲線の谷の位置から決定する (Fig.21(a))。²⁰⁸Tl のコンプトンエッジ部の計数には、宇宙線からのγ線の影響 C(a)_{Tl} × (a-b)があるので、この影響を除去するために、計数から差し引く。²⁰⁸Tl のプラトー部分にも、宇宙線からのγ線の影響 C(a)_{Tl} × (b-f)があるので、これを差し引く。その結果、²⁰⁸Tl のみの計数は、下記の式(9)のように表せる。同じように、²¹⁴Bi, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs のネットの計数は、それらの核種より高エネルギーの影響を差し引くことにより、それぞれ、下記式(10)から式(12)のように表すことができる。

$$^{208}\text{Tl の計数} = \left\{ \sum_{Ch=b}^{Ch=a} E(Ch) - C(a)_{\text{Tl}} \times (a-b) \right\} \dots (9)$$

$$+ \{ (C(b)_{\text{Tl}} - C(a)_{\text{Tl}}) \times (b-f) \}$$

$$^{214}\text{Bi の計数} = \left\{ \sum_{Ch=c}^{Ch=b} E(Ch) - C(b)_{\text{Bi}} \times (b-c) \right\} \dots (10)$$

$$+ \{ (C(c)_{\text{Bi}} - C(b)_{\text{Bi}}) \times (c-f) \}$$

$$^{40}\text{K の計数} = \left\{ \sum_{Ch=d}^{Ch=c} E(Ch) - C(c)_{\text{K}} \times (c-d) \right\} \dots (11)$$

$$+ \{ (C(d)_{\text{K}} - C(c)_{\text{K}}) \times (d-f) \}$$

$$^{137}\text{Cs の計数} = \left\{ \sum_{Ch=e}^{Ch=d} E(Ch) - C(d)_{\text{Cs}} \times (d-e) \right\} \dots (12)$$

$$+ \{ (C(e)_{\text{Cs}} - C(d)_{\text{Cs}}) \times (e-f) \}$$

2) 微分曲線面積法

微分曲線面積法は、微分曲線によるエネルギー校正後の、コンプトンエッジ部分の微分曲線の面積を計測するものである (Fig.22(a)：微分曲線面積法の解析原理を示す概念図)。Fig.22(b)は、¹³⁷Cs 線源から1, 2, 3, 4, 5m だけ離れた場合の微分曲線を重ね合わせた例を示す図である。横軸はチャンネル数、縦軸は微分値である。¹³⁷Cs 線源からの線量は、Fig21 の d と e チャンネル間の微分曲線式 D(Ch)、d と e チャンネル間の BG の微分曲線式 BG(Ch)とすると、下記の式(13)で示される。

$$^{137}\text{Cs の線量} = \alpha \times \left(\int_c^d D(Ch) dCh - \int_e^d BG(Ch) dCh \right) \dots (13)$$

ここで、α は実験から求められる微分面積と線量の間の関係を示す係数である。

3) 人工グロスカウント比法

Rybacha et al. ⁽⁴¹⁾ は、スイスの原子力発電所の放射線漏洩のモニタリングのための指標として、人工グロスカウント比：V_{MMGC} を提案している。彼らはこの指標を NaI 検出器によるスペクトルに基づき、(5)～(7) 式のように定義している。V_{MMGC} の分子は、人工放射性同位体の低γ線エネルギーの範囲で、400keV～1400keV の計数の合計値である。分母は、⁴⁰K, ²¹⁴Bi, ²⁰⁸Tl と宇宙線からのγ線エネルギー区間 (1400keV～3000keV)

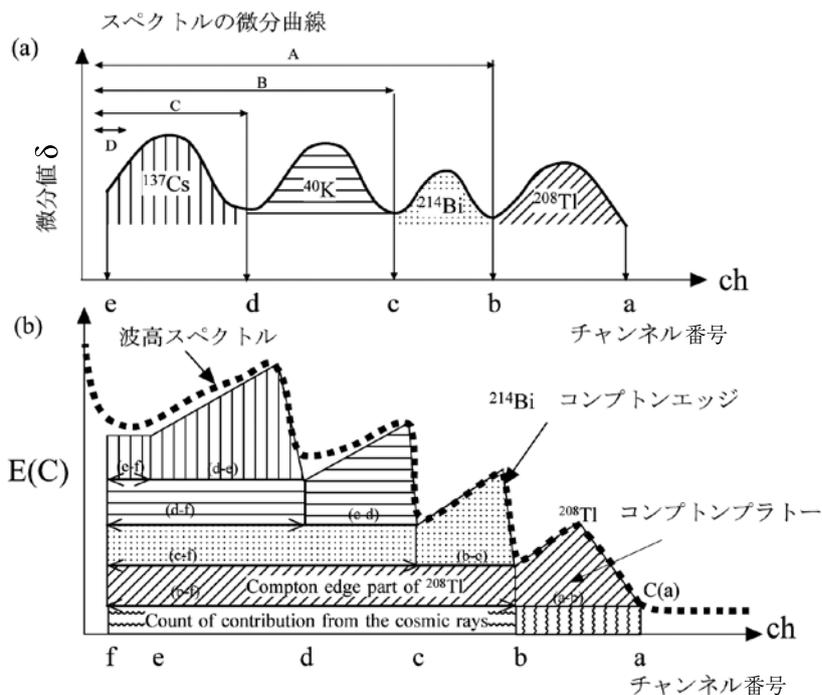


Fig.21 コンプトン散乱法を説明する環境γ線核種の微分曲線とPSスペクトルの概念図

Schematic figures showing the Compton scattering method using differential curves and PS spectrum calculated from environmental nuclides.

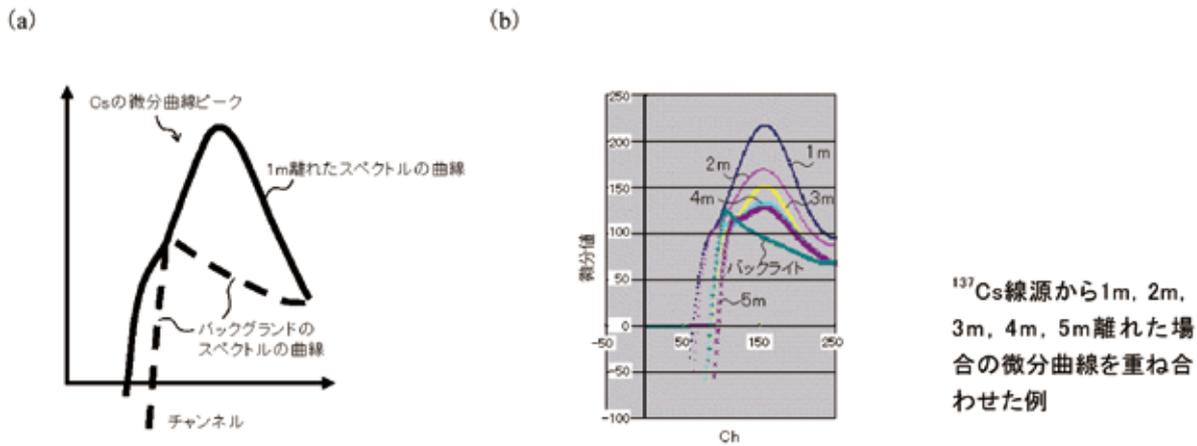


Fig.22 微分曲線面積法の概念図 (a) と解析例 (b)

Schematic figure showing the integral method of differential curve (a) and an example of analysis for differential curves (b).

の計数の合計値である。PS 検出器のスペクトルデータにおける人工グロスカウント比 (C_{MMGC}) は、次式で定義される。

$$C_{MMGC} = \frac{\sum_{Ch=d}^{Ch=f} E(Ch)}{\sum_{Ch=d}^{Ch=1024} E(Ch)} \dots \dots (14)$$

d は ^{40}K のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、 ^{137}Cs のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルで、これより低エネルギー側が人工放射同位体の低 γ 線エネルギーの範囲である。

8 放射能探査装置のシステム設計・試作

中性子と γ 線とを弁別するための装置のシステム構成として、1PS (薄い中性子検出用 PS) - 中性子吸収部 - 2PS (厚い γ 線検出用 PS) の3層構造の諸元を決定するために、PS および中性子吸収部の厚さと中性子の検出効率の関係を理論的に検討した。

プラスチックは、水素と炭素とを含んでいる。検出効率 ε は次の式で計算できる⁽⁷⁾：

$$\varepsilon = \frac{N_H \sigma_H}{N_H \sigma_H + N_C \sigma_C} \{1 - \exp(-(N_H \sigma_H + N_C \sigma_C) d)\} \dots (15)$$

ここで、添字 H および C はそれぞれ水素および炭素についての値であることを意味している。N は標的核の密度、 σ はこれらの原子核の散乱断面積、そして d は入射中性子が検出器を通過する長さである。

Fig.23 は、プラスチックが水素と炭素とから構成されているとし、H (水素) 断面積と C (炭素) 断面積とを、既存の文献⁽⁷⁾ から読みとり、計算した各部分の中性子エネルギーと吸収率との関係図である。プラスチックシンチレータの素材としては、スチレンを仮定した。スチレンは化学式 $\text{C}_6\text{H}_8\text{C}_2\text{H}_3$ で、密度 900kg/m^3 である。中性子吸収部にはパラフィン層を仮定した。パラフィンは化学式 CH_4 で、密度 745kg/m^3 である。PS の厚さは 5mm と

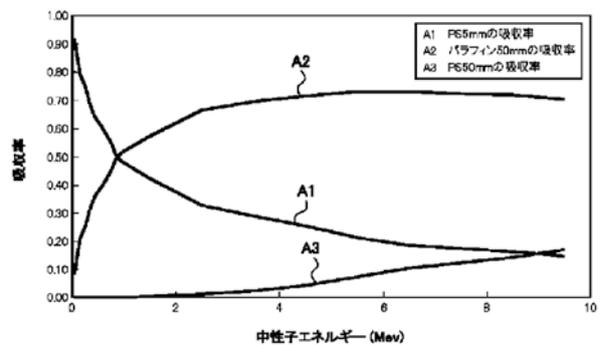


Fig.23 PS5mm厚、パラフィン50mm厚、PS50mm厚に対する中性子吸収計算結果

Calculation results of absorption rate of neutron to PS with 5 mm in thickness, paraffine layer with 50 mm in thickness and PS with 50 mm in thickness

50mm を仮定した。図から 4MeV 以下のエネルギーの中性子のほとんどは、5mm 厚の中性子検出器 (36 : Fig.24 中の数字を示す、以下同様) と中性子吸収部 (32) とで吸収され (A1・A2)、50mm の検出器 (31) には到達していない (A3) ことがわかる。この結果に基づき、中性子検出器として厚さ 5mm の BC-412PS、 γ 線検出器として厚さ 50mm の BC-412PS とした。中性子吸収部は、ホウ素含有パラフィン層とした。

中性子からの計数は下記の式に基づいて計算する。

$$^{252}\text{Cf} \text{ の計数} = \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} E(Ch) - \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} BG(Ch) \dots (16)$$

ここで、f はカットオフのチャンネルである。E(ch) は、各チャンネルの計数、BG(ch) はバックグラウンドの各チャンネルの計数である。

Fig.24 にシステムの構成を示す。Fig.24 に示す装置は、検出部と計測部との2つの構成に大別される。検出部は、中性子検出用 1PS (36) と γ 線検出用 2PS (31) の2検出器と、2検出器 (36・31) の間に中性子吸収部 (32) を挟み込む3層の構造である。Fig.24 の左上図は、検出

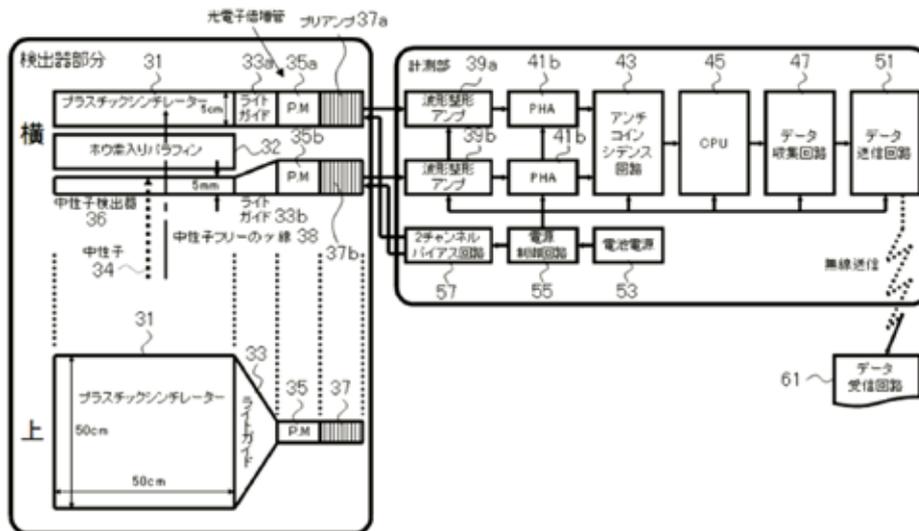


Fig.24 γ 線検出部、中性子吸収部、中性子検出部の3層構造の放射能探査装置のシステム構成図
Block diagram of three-layered PS detector for radioactivity prospecting.

部の側面図であり、左下図は、検出部を上から見た図である。右図は、制御回路（計測部）である。

検出部は、PS (31・36) と、ライトガイド (33a・33b) と、光電子増倍管 (PM: 35a・35b) と、プリアンプ部 (37a・37b) とからなる。PS (31・36) は、それぞれ γ 線と中性子とを光エネルギーに変換する。ライトガイド (33a・33b) は、検出された光を光電子増倍管 (35a・35b) へと導く機能を有する。光電子増倍管 (35a・35b) は、光信号を電気信号に変換する。プリアンプ部 (37a・37b) は、光電子増倍管 (35a・35b) の電気信号を増幅する機能を有する。ホウ素入りパラフィン (32) は、5mm 検出器 (36) を通過した中性子を吸収させる機能を有する。

計測部は、検出部側から順番に以下のように配置・構成されている。すなわち、計測部は、不必要なノイズ成分を除去し、以降の回路が信号処理可能になるように、例えば、約 2 μ 秒幅のパルスに整形する波形整形アンプ (39a・39b) で、プリアンプ (37a・37b) からの増幅信号に、2種類のガウシアン波形整形を行う。中性子と γ 線との分離能をあげるために、高速波形整形と低速波形整形との両方の整形回路を備えたアンプを配置した。PHA (波高分析器) (41a・41b) は、パルスの波高を AD コンバータでデジタル値に変換する装置である。

アンチコインシデンス回路 (43) は、PHA (41a・41b) から入力された2つの信号のタイミングを比較して同時に入力されたか、異なるタイミングで入力されたか否かを判別する。

制御回路部 (CPU) (45) は、入力された2つの信号の判別とデジタル値から波高分布の記憶を行う。データ収集回路 (47) は、例えば一定の時間毎に CPU (制御回路) (45) から、そこに記憶された波高分布のデータを受け取り、後段のデータ送信回路 (51) に送る装置である。

2チャンネルバイアス回路 (57) は、検出器の直後におかれた光電子増倍管 (35a・35b) に対してプリアンプ

(37a・37b) を通して高圧電源を供給する装置である。データ受信回路 (61) はデータを受け取り、表示及び記録する装置である。電源制御回路 (55) は、電池電源 (53) からの入力を各回路が必要な電圧に変換して、各回路に供給する装置である。

信号の流れは、以下ようになる。

- 50mm 検出器 (31) → ライトガイド (33a) → 光電子増倍管 (35a) → プリアンプ (37a) → アンプ (39a) → PHA (コンバータ) (41a) → アンチコインシデンス回路 (43) → CPU (45) → データ収集回路 (47) → データ送信回路 (51) → 出力。
- 5mm 検出器 (36) → ライトガイド (33b) → 光電子増倍管 (35b) → プリアンプ (37b) → アンプ (39b) → PHA (コンバータ) (41b) → アンチコインシデンス回路 (43) → CPU (45) → データ収集回路 (47) → データ送信回路 (51) → 出力。

地上からの中性子と γ 線とは、最初の検出器である 5mm 検出器 (36) に入射するが、 ^{137}Cs の 667keV 以上のエネルギーの γ 線は 5mm 厚の検出器 (36) と中性子吸収部 (32) とを通過し、50mm の検出器 (31) で PS と相互作用を起こし、シンチレーションを発する。中性子は、5mm 厚の中性子検出器 (36) でシンチレーションを発し、ほとんどのエネルギーを消耗する。5mm 検出器 (36) を通過した一部の中性子は、中性子吸収部 (32) で吸収されるため、50mm 検出器 (31) に中性子は到達しない。従って、50mm の検出器 (31) には、中性子フリーの γ 線のみが到達する。

9 ライトガイドの形態

選択した PS を平板状に加工し、シンチレーションを光電子増倍管へ誘導するライトガイドを形成した。一般的には、検出器の1面から光を収集するライトガイドが採用されているが、検出器の2面から光を収集するライ

トガイドとしている。**Fig.25**に示すように、PSの角部であって2面に接する位置に、ライトガイドとフォトマルとを形成し、2面から光を収集することができる。

10 実証試験

1) 試作器

Fig.26(b)に試作器の外観を示す。BC-412PS 中性子検

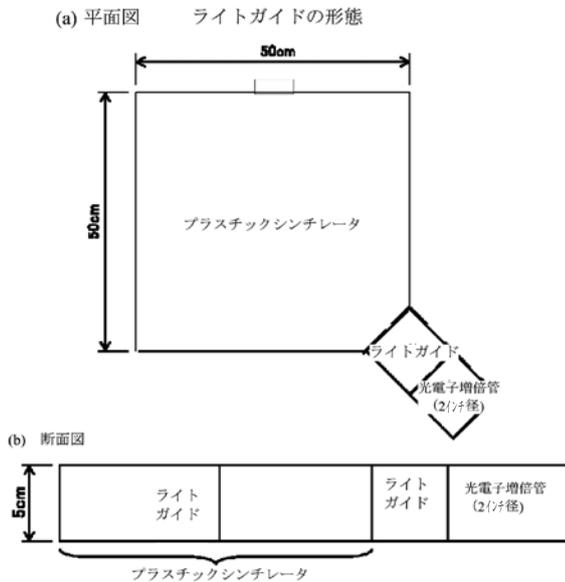


Fig.25 ライトガイドの形態図
Structural form of light-guide

出器 (以下「PS5」と称する。)として、5mm (厚さ) × 500mm × 500mm, BC-412PSのγ線検出器 (以下「PS50」と称する。)として50mm (厚さ) × 500mm × 500mmのシンチレータと光電子増倍管をライトガイドで接続した。検出器は、外部からの光が入射しないように黒い遮光テープで包装し、シリコンオイルで接合した。中性子吸収部には、10%ホウ素入りポリエチレンブロック (200mm × 100mm × 50mm) を、検出器間に敷き詰めた。**Fig.26(b)**に示す写真の0.6 m四方の白いシートの下がPSであり、その手前の黒い部分が光電子増倍管とプリアンプである。赤色パネルのものが2チャンネルバイアス電源、緑色パネルのものは2台のアンプである。左のケースには青いパネルのものが2台のPHA、黄色のパネルのものはタイミング回路 (出力回路を兼ねる) である。エネルギー校正のために、¹³⁷Cs、⁴⁰K、²⁰⁸Tlの線源を測定器付近に置き、線源からのγ線を検出器に外部照射し、これらの核種のコンプトンエッジエネルギーでエネルギー校正を行った。

2) 実証試験の方法

実証試験は、高さ9mの上屋屋内プール (50m × 25m)の中心に電動リフトで測定システムをつり下げ、コンクリート床に置いた線源を測定し、γ線と中性子の分布を観測した (**Fig.26(a)**)。γ線の線源として¹³⁷Cs (1.8MBq)を、中性子の線源として²⁵²Cf線源 (0.5MBq)を、⁴⁰Kの線源としてカリ肥料 (10袋/10kg, 2.0MBq)を使用した。

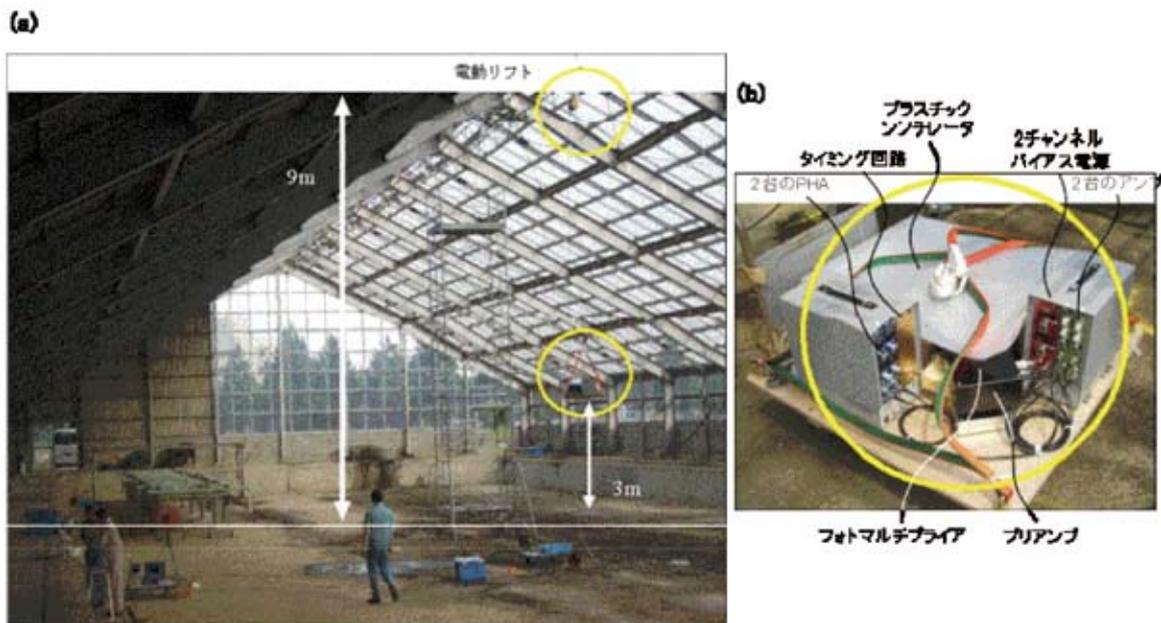


Fig.26 中性子 (²⁵²Cf)とγ線 (¹³⁷Csと⁴⁰K: KCl化学肥料)を使った実証試験 (a) 実証試験の状況、(b) 試作器の外観。図中のパーツ名は**Fig.24**に対応する。

Experiments using standard sources of neutrons (²⁵²Cf), γ-rays (¹³⁷Cs and ⁴⁰K: potash chemical fertilizer) (a) experimental conditions. (b) the appearance of radioactivity prospecting instrument. The labeled parts of device shown in the figure correspond to the parts of device in Fig.24.

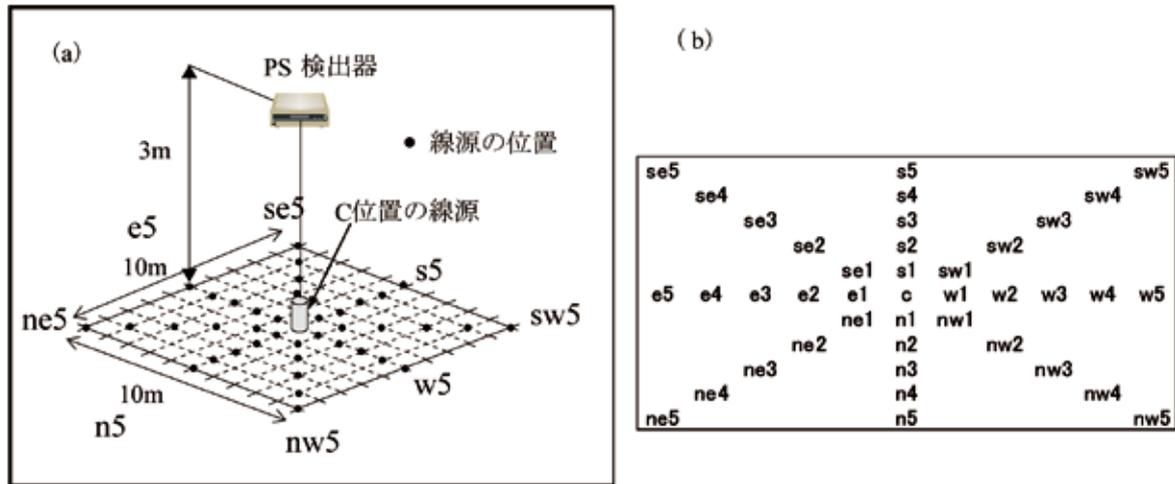


Fig.27 3m上空からの検出器と線源との関係(a)と測点名(b)

Relationship between the detector at a height of 3 meters and standard sources of nuclide, and title of survey points.

最初に測定システムと線源の高度差を変えた γ 線の減衰状況を調査した。各測定時間は500秒である。その後、高度差を3mに固定した性能試験を行った。Fig.27(a)は、3m上空の測定システムと線源の関係を示す。測定システムを固定し、線源を移動させた。Fig.27(b)は線源位置の測点名を示している。中心をcとし、2m間隔で、南北(s1~5, n1~5)方向、東西(e1~5, w1~5)方向、北西-南東(nw1~5, se1~5)方向、北東-南西(ne1~5, sw1~5)方向に番号を付けた。総測定点は41点である。各測定時間は200秒である。

3) 試験結果

Fig.28は、 ^{137}Cs 線源からの高度が上がることによるCs- γ 線の減衰を示す。x軸は ^{137}Cs 線源からの高度差を、y軸は、高度差1mでのコンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウンtr比(C_{MMGC})法で解析したCs- γ 線のエネルギーを1とした場合の、減衰比率である。高度差3mまでは、直線関係で減衰しているが、高度差4m、5mでは、 γ 線が屋根で散乱するために、直線関係が乱れてくる。そこで、以降の性能試験では、高度差3mで固定し、地上からの線源の距離により、計数がどのように変化するかを求めた。

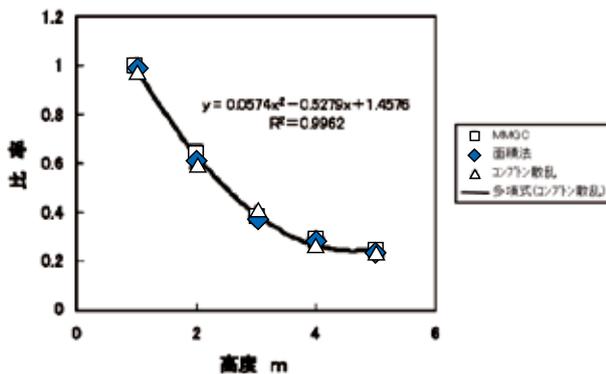


Fig.28 ^{137}Cs 線源からの高度差によるCs- γ 線の減衰を示す図
Attenuation of gamma ray of ^{137}Cs with the distance from source of ^{137}Cs

Fig.29は、3mの高度から、 ^{252}Cf の点線源を、PS5とPS50とで測定したときの微分曲線例を示す。測定位置ごとの微分曲線は異なる色で示している。PS50の微分曲線(Fig.29(b))には、検出器付近に置いた ^{137}Cs 、 ^{40}K 、 ^{208}Tl 線源の3つのピークが表れている。微分曲線は、北測線を測定したn1~n5までと、南東方向を測定したse1~se5までの2測線グループにまとめられる。2グループに分けられたのは後述するゲインのジャンプが起こったためである。Fig.29(a)は、PS5で測定したスペクトルの例を示している。PS5の微分曲線には、これらの3線源からの γ 線を示すピークは表れていない。このことは、3線源からの γ 線はPS5を貫通し、相互作用を示さなかったことを示している。

Fig.30はPS5検出器(a)と有機液体シンチレータ(NE-213)検出器(b)で ^{252}Cf 線源からの中性子を測定した時のスペクトルを比較している図である。同様のスペクトルを有することがわかる。

Fig.31は、 ^{252}Cf 点線源の3m上空からの ^{252}Cf の中性子分布図を示す。式(16)により ^{252}Cf 点線源位置が明瞭に測定されている。ここで、Fig.31は、Fig.27の測定位置と中性子線源の関係において、PS5で測定し、式(16)による計数値をZ軸で、測定位置をX、Y軸でプロットした。

測定中、ガラス張りの屋内プールの室温は、18℃~30℃程度まで変化していた。Fig.32は、試験開始後の時間経過に伴い ^{40}K の γ 線のコンプトンエッジのエネルギーチャンネルが、どのように変化したかを示している。 ^{40}K の γ 線のコンプトンエッジのエネルギーチャンネルは、170分間で335chから320chに変化している。このような遷移的に生じるゲインの変化では、同一のエネルギーに対応するチャンネルは低エネルギー側へシフトする傾向がある。この変化は、測定条件で遷移的な変化は温度条件だけであるので、測定器周辺の温度変化に関係していると推測される。

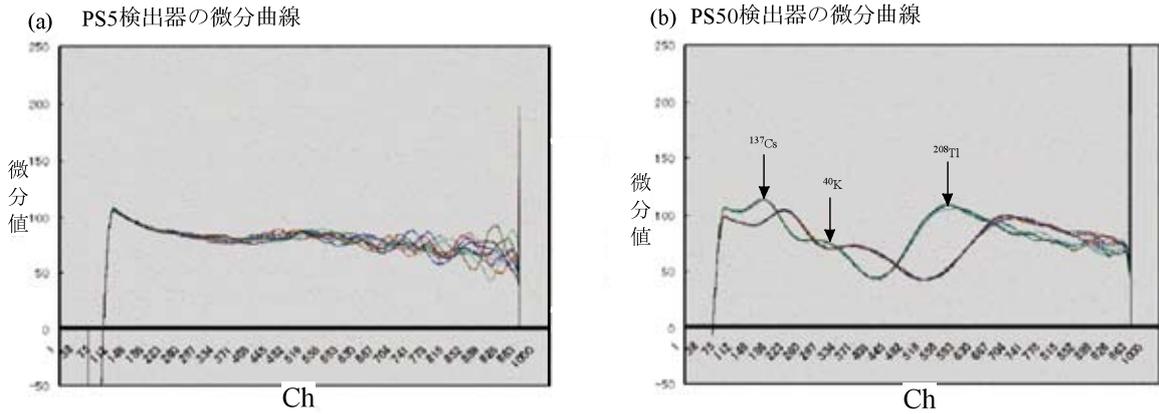


Fig.29 3mの高度から²⁵²Cfの点線源をPSとPS50で測定したときの微分曲線例
 Examples of differential curve measured the source of ²⁵²Cf by PS5 (a) and PS50 (b) directors at the height of 3 meters.

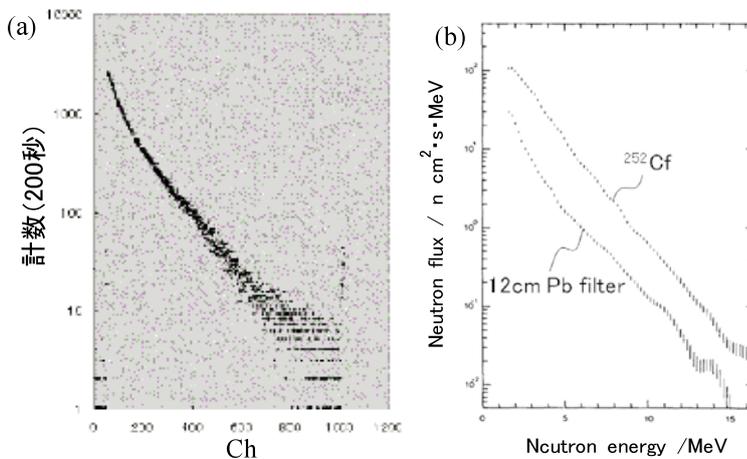


Fig.30 ²⁵²Cf線源のPS5検出器(a)と有機液体シンチレータ (NE-213) 検出器(b)のスペクトルの比較
 有機液体シンチレータ検出器のスペクトルはNordell (1984)による。
 Comparison of spectrum forms of the source of ²⁵²Cf measured by PS5 and by organic liquids scintillator (NE-213).
 The spectrum of organic liquids scintillator by Nordell(1984).

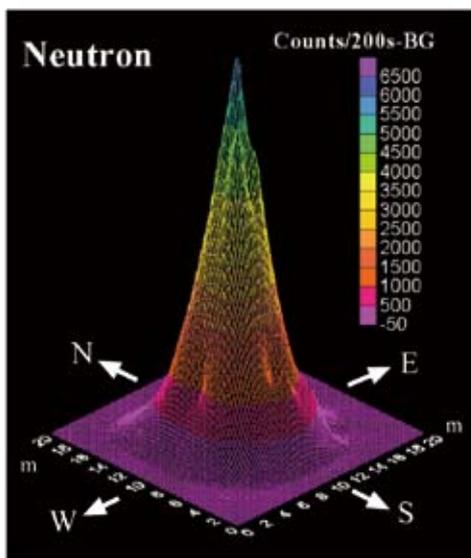


Fig.31 ²⁵²Cf点線源の3m上空からの中性子分布図
 3D distribution diagram of neutrons measured by PS5 for the ²⁵²Cf neutron source at the height of 3 meters

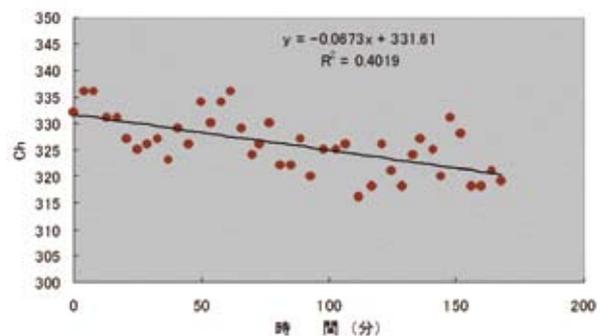


Fig.32 測定時間経過にともなう⁴⁰Kコンプトンエッジエネルギーチャンネル位置の変化
 The drift of the channel to the energy of the Compton Edge of ⁴⁰K with the progress of measurement.

Fig.33(a) は、上空 3m から ^{137}Cs 線源を測定した 1 測線の微分曲線を重ね合わせて、ゲインを補正した例を示す図である。測定位置ごとの微分曲線は異なる色で示している。 ^{137}Cs のコンプトンエッジがある 160ch 付近に注目すると、最初の測定である 1m 距離からの微分曲線のピークの位置から、距離が離れるにつれて低エネルギー側にピーク位置がシフトしているのがわかる。**Fig.33(b)** は、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 、 ^{208}Tl のコンプトンエッジのチャンネル位置を最初の測定位置に固定するように補正した結果を示している。このように微分曲線を基にゲインの変動を補正できる。

従来法の NaI 検出器のゲイン補正では、微弱な参照 γ 線（例えば ^{137}Cs 線源 662keV フォトピーク）を常に測定器に照射しておいて（参照線源を内蔵させる）、このピーク位置を追跡する（最初に、662keV の ch が 100ch であるとすると、この ch が 95ch に減少すれば、測定器の電圧を上げ、増加すれば電圧を減少させる）。しかし、PS では、フォトピークが形成されないために、参照 γ 線のスペクトルを、一旦、微分曲線に変換し、コンプトンエッジを強調したピークを追跡する。

尚、自動補正システムを用いない場合には、測定後に微分曲線を計算し、参照ピーク位置が常に同じチャンネルになるようにマニュアルで ch 位置を平行移動（100ch のピーク位置が 95ch に移動したら、全てのチャンネルを -5ch 下方修正）する方法で補正しても良い。自動化のために、例えば LED を参照エネルギーとした補正と微分曲線による補正との両方又はいずれかを自動化する方法もある。今後の課題としたい。

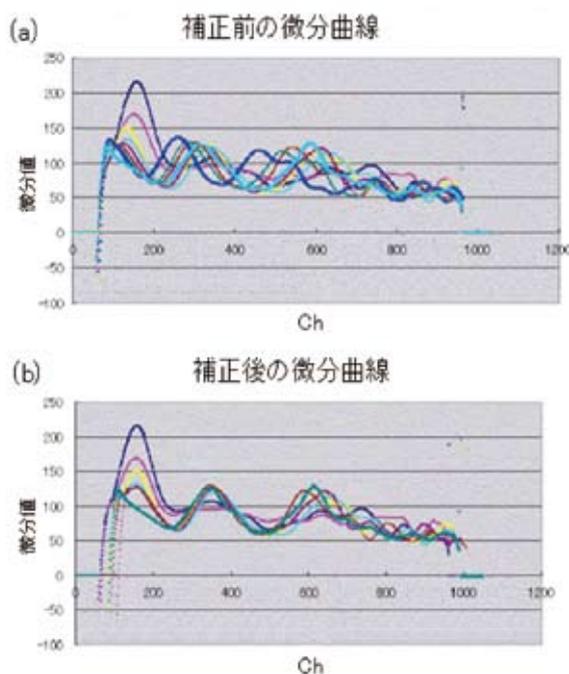


Fig.33 ゲインが漸移的に移動する場合のエネルギー補正例（補正前 (a)、補正後 (b)）

Example of adjustment of gradually drifted gain.

(a) Original differential curves. (b) Corrected differential curves.

Fig.34(a) は、ゲインの変動が、ジャンプするように起こっている場合を示す図である。**Fig.34** では 40 回の測定結果を異なる色の微分曲線で示している。ゲインの変動は、3 回生じている。このような場合にも、微分曲線によりゲインを上記と同様に補正することができる (**Fig.34(b)**)。尚、**Fig.34(a)** に示すように、「ゲインの変動が 3 回生じている」との記載は、例えば、セシウムのコンプトンエッジのピークが異なる 3 つの位置にあることを示す。ゲインの変動が生じていなければ、**Fig.34(b)** に示すようにピーク位置 (ch) は同じになる。

ゲイン変動には、測定環境の温度が徐々に上昇し、エネルギー軸が漸移的に数 ch ずつずれていく場合と、何らかのショック（電圧の変動等が考えられる）により、エネルギー軸が数 10ch、一瞬にしてずれる場合がある。

Fig.35 は、コンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウンタ比法で解析した、 ^{137}Cs の γ 線の分布図である。各方法での解析の前に、測定スペクトルは、微分曲線によりゲイン補正を行っている。いずれの手法でも、 ^{137}Cs 線源の位置を明瞭に検出していることがわかる。人工グロスカウンタ比法が、最もピンポイントで ^{137}Cs 線源位置を検知している。微分曲線面積法は、線源位置に鋭いピークを形成しているが、ピークの裾野が広がっている。コンプトン散乱法は、線源位置のピークはやや不明瞭であるが、裾野の広がり、微分曲線面積法よりも小さいことがわかる。

Fig.36(a) ~ (d) は、 ^{137}Cs 点線源を 3m 上空から測定したときのコンプトン散乱法による ^{137}Cs 、 ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl γ 線の分布図を示す図である。環境中の ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl の γ 線の分布はほとんどフラットであり、 ^{137}Cs の分布とは明瞭な違いを示していることがわかる。

Fig.37(a) は、KCl 肥料のブロックを 3m 上空から測定したときの ^{40}K γ 線の分布図をコンプトン散乱法により解析した結果を示す図である。KCl 肥料は 20kg の袋、10 袋を 2 段に重ねたものであり (**Fig.37(b)**)、点線源になっていないので、 ^{137}Cs 線源の ^{137}Cs γ 線の分布ほど、明瞭なピークを示さないが、中心で凸の分布を示すことがわかる。

VII 結 言

γ 線放射能探査装置の発達史を概観すると、測定精度を向上させるための検出器の大型化の歴史になっている。現在、 γ 線放射能探査は、空中から探査するヘリボーンが主流になっている。ヘリボーンによる放射能探査は、断層調査のみならず、核施設からの放射性核種の漏洩モニタリング、事故後の漏洩後の土壤汚染の広がり調査等で、短時間で広域の核種分布を決定できる重要なツールとなっており、今後も検出器の大型化が必要であると考えられる。一方では、無人ヘリコプターに搭載できる軽量の装置の開発も望まれている。この場合、単に検出器

を大型化するのみならず、軽量化も求められる。このような矛盾する要望に応えられる検出器はPS検出器しかない。

この論文では、地下水調査のツールとしての γ 線放射能探査の原理を整理するとともに、著者らが進めているPS検出による放射能探査装置の開発状況について述べた。内容は以下のようにまとめられる。

1. 山地の地下水のうち多量の地下水が期待できる地下水は、断層付近に分布する。そのため、山地の地下水開発では、断層位置、規模の把握が重要である。
2. 断層周辺では、ウラン系列核種が濃集する傾向がある。核種弁別ができる γ 線放射能探査装置(γ 線スペクトロメータ)により、 ^{214}Bi と $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ を指標として調査することにより、埋没断層位置を探査できる。

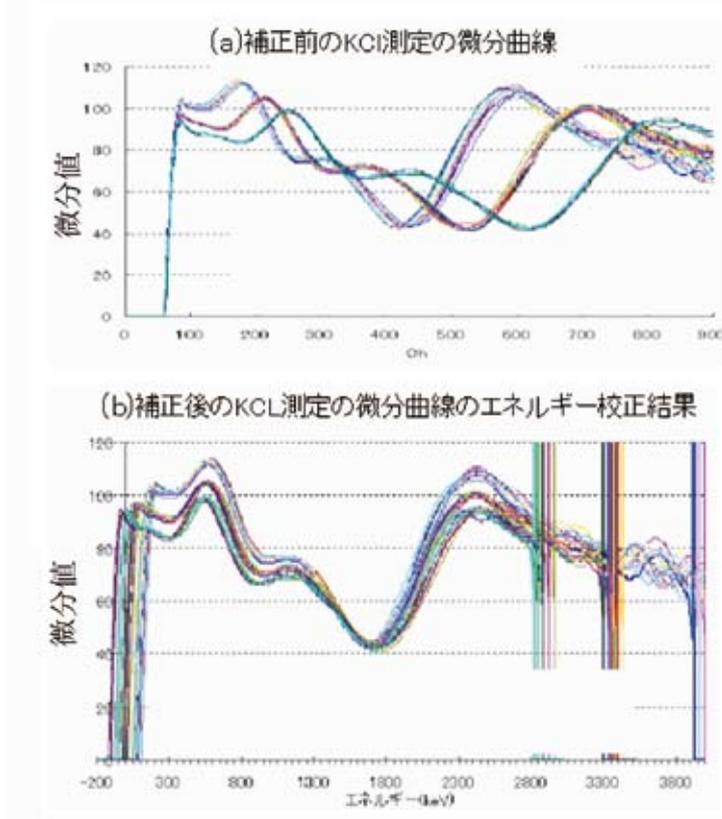


Fig.34 ゲインがジャンプするように移動する場合のエネルギー補正例 (補正前 (a), 補正後 (b))
Example of adjustment of discontinuously drifted gain. (a) Original differential curves. (b) Corrected differential curves.

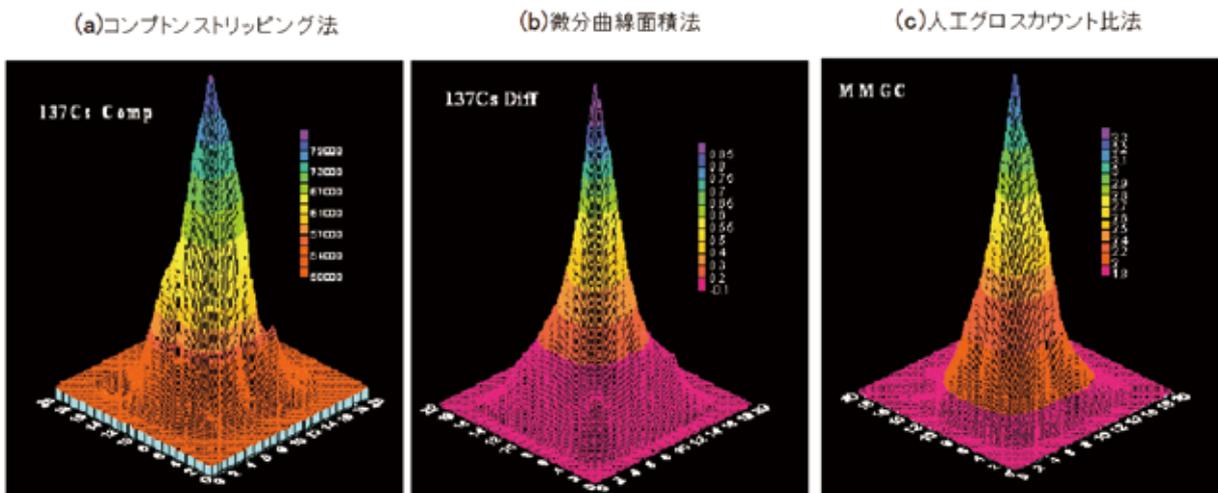


Fig.35 ^{137}Cs 点線源を3m上空から測定したときのコンプトン散乱法 (a), 微分曲線面積法 (b), 人工グロスカウント比法 (c) によるCs- γ 線の分布図 (X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)

3D distribution diagrams of gamma ray of ^{137}Cs analyzed by methods of the Compton scattering, the integral of differential curve and man-made gross count ratio when PS50 ditector at the height of 3 meters measured ^{137}Cs γ -ray source.

3. 放射能探査装置の歴史は、測定精度向上のためのNaI検出器の大型化の歴史としてまとめられる。当初は1㍓以下の容量のNaI検出器が使われ、現在では、10㍓～16㍓の指摘の通り修正しました。大型検出器が用いられるようになってきた。現在、放射

能探査のためのγ線スペクトロメータ検出器としては、NaI検出器が主流である。

4. 今後の探査装置の開発では、検出器の大型化と軽量化が求められる。この要求に応えられる素材として、PSを選定し、実用的な検出器を試作した。

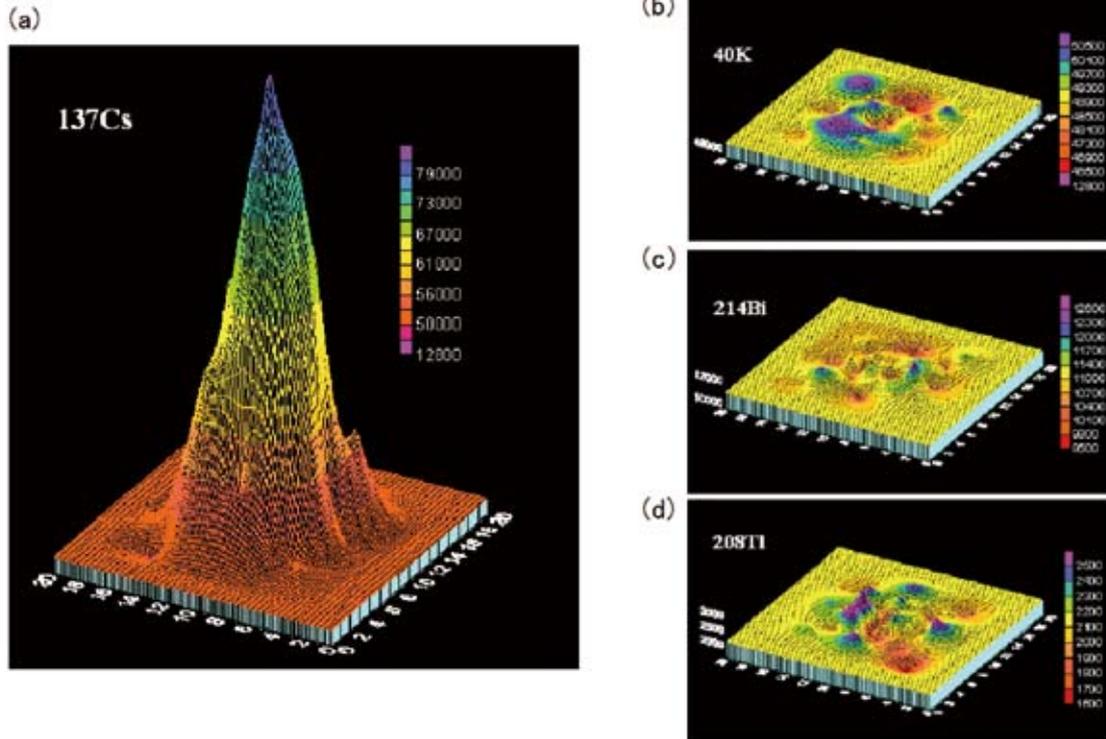


Fig.36 ^{137}Cs 点線源を3m上空から測定したときのコンプトン散乱法による ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl γ線の分布図である (a～d)。(X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)

3D distribution diagrams analyzed ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi , and ^{208}Tl by method of Compton scattering when PS50 detector at the height of 3 meters measured the gamma ray source of ^{137}Cs .

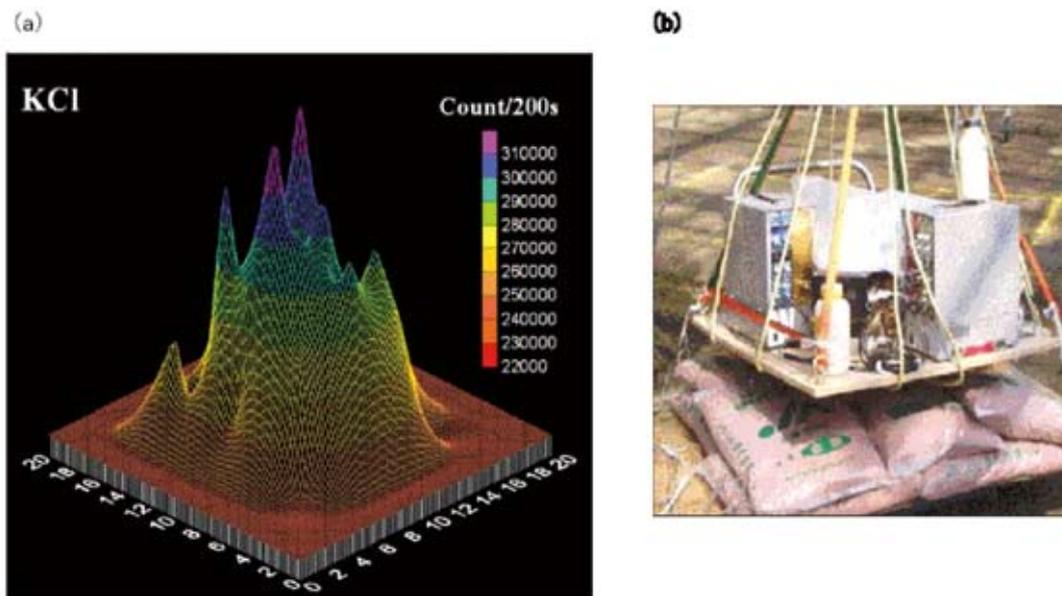


Fig.37 KCl肥料を3m上空から測定したときのコンプトン散乱法による ^{40}K γ線の分布図 (a)と ^{40}K γ線源：KCl肥料の外観 (b) (X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)

3D distribution diagrams(a) analyzed ^{40}K by method of Compton scattering when PS50 detector at the height of 3 meters measured the gamma ray source of potash chemical fertilizer as ^{40}K and the appearance of potash chemical fertilizer (b).

5. 試作された検出器の実証試験により、次のことが明らかになった。

- 1) 中性子検出用 PS5 と γ 線検出用 PS50 の 2 検出器の間に、中性子吸収部を挟み込む 3 層構造の測定システムにより、中性子- γ 線が弁別できる。
- 2) PS50 のスペクトルの微分曲線によりゲインをモニタリングし、ゲインを補正することにより、安定して γ 線が測定できる。
- 3) コンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウンタ比法により γ 線のエネルギー弁別が可能である。

実証試験は、単純な線源に対する応答から測定器の性能を実証したものであり、実際に野外調査で使用するためには更に複雑な線源や測定条件による試験が必要であるが、今回の実証試験により PS 検出器を放射能探査の検出器として利用可能であることを検証することができた。

謝 辞

本研究の PS 検出器の開発は、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。閲読者 B の丁寧な査読に感謝する。

注) Nuclear Enterprise 社の NE-213 は、生産を中止している。同等の機能を有するものが米国バイクロン社製 BC501 である。

参考文献

- 1) Akimov, Yu. K. (1996): Nuclear Radiation Detectors Based on Liquid Organic Scintillators (Review) Instruments and Experimental Techniques, 39, (3), 315-348
- 2) Ambronn, R. (1928): Element of Geophysics, as Applied to Explorations for Minerals, Oil and Gas. New York: McGraw Hill Book Co., 123-129
- 3) Carroll T. R. (1981): Airborne Soil Moisture Measurement Using Natural Terrestrial Gamma Radiation, Soil Science, 132 (5), 358-366
- 4) Coelho, P.R.P., Da Silva, A. A. and Maiorino, J.R.(1989): Neutron energy spectrum measurements of neutron sources with an NE-213 spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 280, 270-272.
- 5) Darnly A. G.(1972): Airbone gamma-ray survey techniques, Uranium Prospecting Handbook, The Institution of Mining and Metallurgy, 174-211.
- 6) ドミニコ, P.A.・シュワルツ, F.W. (大西有三監訳) (1995): 地下水の化学 I - 地下水の物理と化学 -, 土木工学社, 235p.
- 7) グレン F. ノル (木村逸郎, 阪井英二訳) (2001): 放射線計測ハンドブック第 3 版, 931, 日刊工業新聞
- 8) Hatuda Z., Matsuzawa A and Kamei K. (1942): The reflection of underground structure on the radio-activity of soil air, Sci. Rep. Geol. Mineral. Inst. Kyoto Univ., 1, 1-10
- 9) 初田甚一郎 (1953): 放射能探鉱. 物理探鉱, 6 (3・4), 131-137
- 10) 堀川義夫 (1969): 自動車放射能探査による放射能強度分布 - 特に花崗岩類の γ 線強度について -, 日本におけるウランの産状(その 2), 地質調査所報告, 232, 365-395
- 11) 今泉眞之・竹内陸雄・小前隆美 (1993): 長野県山口村の阿寺断層の土壌ガス中の ^{222}Rn 濃度と γ 線スペクトロメトリーの違いについて, 応用地質, 34 (1), 1-13
- 12) 今泉眞之・奥山武彦・小前隆美・浜田浩正 (1995): VLF-EM 法と放射能探査による 1888 年磐梯山爆裂カルデラ内の断層系調査, 応用地質, 36, 5, 322-338
- 13) 今泉眞之・石田 聡 (2001): 環境地質調査ツールとしての γ 線スペクトロメトリー, 環境地質学シンポジウム論文集, 11, 235-240
- 14) Israel H. and Bjornsson S. (1967): Radon (^{222}Rn) and thoron (^{220}Rn) in soil air faults: Zeitschrift. Geophys., 33, 48-64
- 15) 岩崎章二 (1969): 空中放射能探査, 日本におけるウランの産状 (その 2), 地質調査所報告, 232, 353-358
- 16) 神田祐太郎 (1979): 弾性波探査結果より見た阿寺断層の破碎帯, 物理探鉱, 32(4), 1-6
- 17) 片山信夫 (1961a): 総説, ウラン・その資源と鉱物, 朝倉書店, 1-12; 40-53
- 18) 木村重彦 (1987): 地表の自然ガンマ線による温泉開発位置の探査法について, 温泉科学, 37, 73-92
- 19) 木村重彦・高野 彬・五十嵐生男 (1990): 携帯用自然ガンマ線測定装置による割れ目の解析, 応用地質, 31(4), 187-194
- 20) Kristiansson K. and Malmqvist L.(1982): Evidence of nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and a new physical model for the transport, Geophysics, 47, 1444-1452
- 21) 工藤勝久・武田直人・越川誠一・豊川弘之・瓜谷章 (2001): 熱中性子場に混在する γ 線スペクトル測定, 日本原子力学会「2001 年秋の大会」, E53, 204
- 22) Lane A. C. and Bennett W. R. (1934): Location of a fault by radioactivity, Beitr. angew. Geophys., 4, 353-357
- 23) Latham A. G. and Schwarcz H. P. (1989): Review of the modelling of radionuclide transport from U-series disequilibria and of its use in assessing the safe disposal of nuclear waste in crystalline rock, Appl. Geochem, 4, 527-537

- 24) Lipnid P, Bol A, Gilot J F, Leleux P, Macq P. (1991): A low-cost plastic detector for energetic neutrons. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 305(1), 158-161
- 25) Lawson R. T., Short S. A., Davey B. G. and Gray D.J.. (1986): $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th}$ activity ratios in mineral phases of a lateritic weathered zone. Geochim, Cosmochim. Acta, 50, 1697-1702
- 26) 文部科学省 (1990)：放射能測定法シリーズ 20, 空間 γ 線スペクトル測定法, 159, 財団法人日本分析センター
- 27) 門間正彦・山下幹雄・五十嵐隆士・加藤和明・稲田哲雄 (1999)：ノイズとボケを伴う放射線スペクトルにおける特徴の抽出に関する研究 - ステップエッジを抽出するためのデータ平滑化とデコンボリューション法の検討 -, 茨城県立医療大学紀要, 14, 43-54
- 28) 中野政詩 (1991)：土の物質移動学, 189, 東京大学出版会
- 29) 二平 聡・今泉眞之 (1999)：放射能探査法の測定原理と調査事例, 農業土木学会誌, 67, 1183-1190
- 30) 日本アイソトープ協会 (1999)：中性子による計測と利用, 260, 丸善株式会社
- 31) Nielson D. L, Linpei C, and Ward S. H (1990) Gamma-ray spectrometry and radon emanometry in environmental geophysics, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol.1, Society of Exploration Geophysics: 219-250.
- 32) Nordell B. (1984): Measurement of photoneutron energy spectra from tin, lead and uranium using an NE-213 neutron spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 224, 547-556
- 33) 農林水産省監修 (2003)：世界のかんがいの多様性 - 持続的な水使用と健全な水循環の形成に向けて, 68
- 34) 太田猛彦 (1992)：山地の地下水, 森林水文学 (塚本良則編), 157-164, 文永堂出版
- 35) 落合敏郎 (1965)：放射能式地下水探査法, 234, 昭晃堂
- 36) ——— (1992)：リモートセンシング (選択ガンマ線) による地下水脈の検出とその水量測定 (1), 地下水技術, 34(2), 9-13
- 37) ——— (1992)：リモートセンシング (選択ガンマ線) による地下水脈の検出とその水量測定 (2), 地下水技術, 34 (3), 1-11
- 38) ——— (1999)：活断層のガンマ線探査, 156, リーベル出版
- 39) Pozzi S.A., Mullens J. A. and Mihalcz J.T. (2004): Analysis of neutron and photon detection position for the calibration of plastic (BC-420) and liquid (BC-501) scintillators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 524, 92-101
- 40) Rijsberman, F. R. (2006): Water scarcity: Fact or fiction?, Agricultural Water Management, 80, 5-22
- 41) Rybacha, L. B. Bucher, G. Schwarz (2001): Airborne surveys of Swiss nuclear facility sites, Journal of Environmental Radioactivity, 53, 291-300
- 42) Schery D. H., Gaeddert D. H. and Wilkening M. H. (1984): Factors Affecting Exhalation of Radon From a Gravelly Sandy Loam, J. Geophys. Res., 89, 7299-7309.
- 43) 田中和宏 (1993)：平成元年度シンポジウム予稿集 - 活断層の調査法と解釈, 応用地質学会, 15-26
- 44) Tanner A. B. (1964): Radon migration in the ground: A review, Natural Radiation Environment, Univ. Chicago Press, 161-190
- 45) Tanner A. B. (1980): Radon migration in the ground: A supplementary review, Natural Radiation Environment III, Symposium Proceedings, US DOE, NTIS Report CONF-780422, 1, 5-56.
- 46) 辻村憲雄・吉田忠義・石井雅人 (2005)：中性子・ γ 線用臨界検出器の開発, サイクル機構技報, 28, 65-66
- 47) Winkelmann I., Thomas M. and Vogl K. (2001): Aerial measurements on uranium ore mining, milling and processing areas in Germany. Journal of Environmental Radioactivity 53, 301-311
- 48) 山下幹雄 (1981)：有機シンチレータによるパルス波高スペクトルにおけるコンプトン端位置を決定する新しい方法, 放射線, 1981: 8(3), 98-115
- 49) ———・河田 燕 (1983)：有機シンチレータ検出器による γ 線吸収線量率の高精度絶対測定 (1) 基礎技術と予備実験, 電子技術総合研究所兼報, 47 (9/10), 96-107
- 50) 吉村辰朗・松本宏彰 (1994)： γ 線測定で見る断層破砕帯 - 本質の問題と今後の課題 -, 土と基礎, 42 (5), 41-46

Development of Radioactivity Prospecting Device with Plastic Scintillator

IMAIZUMI Masayuki, YOSHIMOTO Shuhei, TSUCHIHARA Takeo,
ISHIDA Satoshi, UCHIYAMA Sadayuki and YUUKI Youichi

Summary

A large amount of undeveloped groundwater may still be left in the rocky mountainous areas of Asia and Africa. A location of buried fault is of particular concern for the development of groundwater resources in the rocky mountainous areas because groundwater tends to occur around the fault. However, these groundwater resources are unevenly distributed around buried fault zones. The prospecting methods to accurately locate buried fault zones for development of groundwater resources in the rocky mountainous region has thus been needed. Radioactivity prospecting by means of gamma-ray spectrometry using the NaI detector is a geophysical prospecting method that can detect buried fault zones and has been successfully used as an important tool in Japan during the past ten years, but there are still several problems to solve such as the empirical understanding principal of detecting buried fault by radioactivity prospecting, and development of high efficient and cheap detector.

The buried fault in the dam-site where the surface soil was stripped showed that many springs were observed along the fractures in granodiorite of CM and CH levels on the both sides of the main fault zone. The radioactivity prospecting across the main fault zone showed that ^{214}Bi and $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ decrease over the main fault zone. These phenomena are interpreted as the leaching of the uranium. The fluctuation of ^{222}Rn concentration showed the peak at the point near the fault. ^{222}Rn concentration over the areas of springs showed the low concentration. The high ^{222}Rn concentration did not have any influence on ^{214}Bi and $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$. This can be explained by the parent nuclides of radon, ^{238}U and radium (^{226}Ra). The indexes of ^{214}Bi and $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ measured by γ -ray spectrometry are useful to detect the location of unknown buried fault.

We developed a new radioactivity prospecting device featuring a PS, which is lightweight, easy-processing and inexpensive compared with conventional NaI detectors. Experiments showed that the three-layered PS detectors and the analysis method used here accurately measured the distributions of fast neutrons and also discriminated between γ -rays of different nuclides. These results do indicate that PS can be used for radioactivity prospecting, thus potentially providing substantial advantage over the currently employed NaI detectors, although additional tests with more complex spectra are needed to more completely test the device and methodology.

Keywords : *groundwater investigation, groundwater resources, buried fault zones, fracture, γ -rays*

農作業が有する高齢者の疾病予防に関する検討

松森堅治*・西垣良夫**・前島文夫**・臼田 誠**・永美大志**・矢島伸樹**

目 次	
I 緒 言	105
II 方 法	106
1 調査対象者の選定	106
2 農業との関わり方からみた健康状態の 比較検討項目	106
3 統計学的手法	107
III 結 果	107
1 生活状況についての比較	107
2 健康指標データについての比較	107
IV 考 察	109
1 日常的な農作業の効果についての検討	109
2 非農家の農業体験の効果についての検討	112
3 中高年層の農業への回帰の動向	113
V 結 言	113
参考文献	114
Summary	115

I 緒 言

高齢者においては、加齢に伴い身体機能が低下し、日常生活能力も低下する。日本の人口動態において介護を必要とする人が加速度的に増加することが、高齢社会の進展に伴い予測されている。近年「健康寿命」という概念が提唱され、普及してきたことでも分かるように、元気で活動的に暮らすことができる期間をいかに延ばすかが大きな政策的課題となっている。

適度な身体活動・運動、精神活動、社会参加が高齢者の様々な身体機能の低下を軽減する効果を有することは定説になってきている。本研究で対象にする農業労働については、歴史的には過酷な労働に伴う様々な健康影響について「農村医学」の分野において、解明が積み重ねられ、労働改善の努力もされてきた。戦後期、高度成長期前においては問題告発型の学問として栄養不良、過重労働、劣悪な労働・生活環境が与える健康状態、各種疾病を主要な問題としていたが、近年では農村の生活環境も激変し、基本的な生活形態は都市と大差なくなり、疾病構造も、都市と同様の過食、栄養過多、運動不足等から引き起こされる生活習慣病、著しい長寿化を達成した結果である高齢者の老人性疾患の増加、社会問題としては、都市部より急速に進展している人口構成の超高齢化に焦点が移行している。

その結果として、近年においては高齢者が各人の有す

る身体機能にみあった農業体験を続けることによりその身体機能の低下を軽減することも期待されるようになってきている。厚生労働省「平成13年度老人医療事業報告」(2004)によれば都道府県別に65歳以上の有業率(65歳以上人口に占める65歳以上有業者の割合)をみると、平成13年度においては長野県が30.7%と最も高く、次いで山梨県(28.3%)、福井県(27.7%)、鳥取県(27.4%)、静岡県(27.3%)となっている。これらの県は総じて一人当たり老人医療費が低い傾向にあり、健康で元気な高齢者が多いことがうかがえる(Table1, Fig.1)。これら中山間地域の高齢者の就業形態として最も多いのが農業である。

国保中央会を始めとする研究会による平成9年の報告「市町村における医療費の背景要因に関する報告書」(1997)では、長野県の長寿と老人医療費が安い背景を調査している。長野県が現在、健康長寿でかつ老人医療費が低い要因の一つとして、老人の就業率が高いこと、特に健康な高齢の農業従事者が多いことが挙げられているが、調査の性質上、高齢の農業従事者の健康特性までは分析されていない。

近年、都市部の人々がいわゆる「グリーン・ツーリズム」として農業体験をする機会も増えており、都市と農村との対流が盛んになりつつある。グリーン・ツーリズムとは、これを一言で言い換えると「農村で楽しむゆとりある休暇」と言える。平成6年6月に「農山漁村滞在型余暇活動促進法」が制定され、「農村の持つ自然、文化のストックを活かして人々との交流を楽しむ滞在型の余暇活動」として、「グリーン・ツーリズム等都市農山漁村交流の推進」が農水省によりプロジェクトとして支援・推進されている。参加者の心身に与える影響として、ストレス解消といった精神的なリフレッシュ効果、自然

* 農村環境部環境評価研究室

** (財)日本農村医学研究所

平成20年12月15日受理

キーワード：農業、健康指標、健診、生活習慣病、農業体験、都市農村交流

Table 1 一人当たり老人医療費と有業率
Relation between medical care expenditures for
the elderly per person and employment rate

都道府県名	有業率 (%)	一人当たり老人医療費 (円)	都道府県名	有業率 (%)	一人当たり老人医療費 (円)
長野県	30.7	602,141	佐賀県	23.2	822,409
山梨県	28.3	642,408	広島県	23.2	857,444
福井県	27.7	736,814	岡山県	23.1	770,347
鳥取県	27.4	678,638	滋賀県	23.1	691,066
静岡県	27.3	656,725	山口県	23.0	790,918
東京都	26.5	775,397	石川県	22.8	828,262
島根県	25.8	693,275	山形県	22.8	628,617
岩手県	25.5	660,630	鹿児島県	22.8	829,589
和歌山県	24.8	736,012	新潟県	22.5	627,096
栃木県	24.8	656,073	福島県	21.9	699,320
岐阜県	24.8	691,582	大分県	21.6	801,768
茨城県	24.7	660,867	千葉県	21.5	653,778
高知県	24.6	833,617	秋田県	20.4	692,696
香川県	24.6	787,890	大阪府	20.2	892,499
群馬県	24.4	664,930	熊本県	20.2	817,100
三重県	24.2	664,979	神奈川県	20.1	712,717
青森県	24.2	703,498	奈良県	19.2	722,556
埼玉県	24.2	706,367	宮城県	19.2	696,035
徳島県	24.0	788,865	北海道	18.3	929,878
富山県	23.9	738,197	福岡県	18.2	927,751
宮崎県	23.9	732,960	長崎県	18.1	882,060
愛媛県	23.6	765,238	兵庫県	17.7	765,131
愛知県	23.5	762,613	沖縄県	17.6	776,385
京都府	23.3	821,787	全国平均	22.7	756,618

の中で身体を動かすことによる運動の効果等が考えられている。各地のグリーン・ツーリズムの説明においても自然の中で身体を動かすことによる健康増進効果を謳ったものが数多いが、参加者においても自然志向、健康志向が強いことが明らかになっており、農業体験の健康についての影響もしくは効用を実証的に明らかにすることもまた求められている。

本研究では、高齢者の健康指標のデータを豊富に所有する長野県厚生連健康管理センターの健診データを用い、健康指標データと農作業体験の有無、生活習慣を総合的に検証する。それにより農作業に関わる頻度と高齢者の健康の関連を総合的に検証することを目的とした。

なお、本報は農村工学研究所運営交付金プロジェクト研究「中山間地域における対流に伴う教育・保健等機能の評価手法の開発」(H16-18)において(財)日本農村医学研究所への委託により実施された研究の成果の一部である。

II 方法

本研究においては、まず高齢者の疾病予防に農業体験が有効であるという仮説に対して、高齢者の健康診断の経年的データを農業体験の有無、労働内容、年齢等により層別化し検討した。この解析結果により、農業従事者の健康指標の特徴を把握することとした。

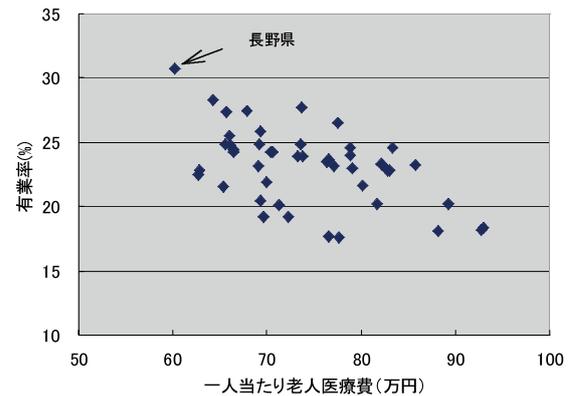


Fig.1 一人当たり老人医療費と有業率
Relation between medical care expenditures for
the elderly per person and employment rate

厚生労働省「平成13年度老人医療事業報告」(2004)より

1 調査対象者の選定

対象は、長野県厚生連健康管理センターが実施した集団健康スクリーニング(健診)を1998年あるいは1999年とそれぞれの4年後にも受診している初年度65歳~74歳の長野県住民とした。この対象者について、グリーン・ツーリズム等の参加者など非農家における農業体験の意義を検討するため、非農家の人をさらに花・野菜作りを趣味としているかどうかで区分した。検討においては、年齢を「65~69歳、70~74歳」の2つに分け、さらに農業との関わり方の差により、「農業を1日3時間以上従事している人(以下①農業)、農業非従事者で花・野菜づくりを趣味で行っている人(以下②趣味農業)、農業非従事者で花・野菜づくりも行っていない人(以下③非農業)」の3つの群に対象者を分類した(**Table 2**)。

また、疾患によってデータが影響される可能性を小さくするために、今回の対象からは脳血管疾患・心疾患の治療中や既往のあるもの、胃切除後、血液データではWBC(白血球) < 3000/ μ l, \geq 10000/ μ l, Hb(血色素量) < 12g/dl, > 18g/dl, PLT(血小板数) < 10×10^4 / μ l, \geq 50×10^4 / μ l, Alb(アルブミン) \leq 3.8 g/dl, AST(GOT) \geq 80 IU/l, ALT(GPT) \geq 90 IU/l, γ -GTP \geq 300 IU/l, Cr(クレアチニン) \geq 1.2mg/dl, 尿検査における尿蛋白 \geq 2+等は除外した。その結果、対象者数は女性3,049名、男性2,161名となった(**Table 2**)。

2 農業との関わり方からみた健康状態の比較検討項目

上記の年齢と農業との関わり方の違いによって分類した6つの群で、生活状況の喫煙、飲酒、食材摂取状況について、検査データの高血圧、糖尿病、高尿酸血症、高脂血症治療、血中脂質(総コレステロール TCHO, non HDL-コレステロール)について集計し、群間の比較検討を行った(初年度と4年後)。

生活状況において、喫煙は、[なし, 過去喫煙, 現在喫煙]

Table 2 性、年齢、群別の対象者数
Number of sample according to sex, age, and group

	①農業	②趣味農業 趣味で花・ 野菜作り	③非農業 趣味で花・野 菜作りなし	合計	
女	65-69歳	1,201	561	311	2,073
	70-74歳	602	224	150	976
	合計	1,803	785	461	3,049
男	65-69歳	889	221	211	1,311
	70-74歳	628	113	109	850
	合計	1,517	324	320	2,161

の3区分、飲酒は、[なし、一週間に3日以下、一週間に4日以上で一日2合未満、一週間に4日以上で一日2合以上]に4区分した。食材摂取状況は、[牛乳・乳製品、卵、魚、肉、大豆類、緑黄色野菜、その他の野菜、海藻類、芋類、果物]の10種類について一日1回以上摂取していると回答した場合を1点とし、10種類の合計点を算出して食材摂取頻度(食材Σ)とした。さらに、食材Σを[3点以下、4～6点、7～10点]の3段階に分けて群間の比較に用いた。

検査データにおいて、高血圧は収縮期血圧160mmHg以上及び治療中、糖尿病は空腹時血糖126mg/dl以上、随時血糖200mg/dl以上、HbA1c6.1%以上及び治療中、高尿酸血症は血中尿酸8.0mg/dl以上及び治療中と定義して、当てはまる人数を群ごとに集計した。血中脂質値については、高脂血症で治療中のものを除いて比較した。また、初年度についてはBMI(BMI=体重(kg)÷身長(m)²)の比較も行った。

3 統計学的手法

喫煙、飲酒、食材摂取状況、高血圧、糖尿病、高尿酸血症、高脂血症治療の比率の比較には χ^2 検定を、BMIと血中脂質の連続変数の比較には一元配置分散分析及び多重比較検定を用い、有意水準は5%未満とした。解析ソフトウェアはSPSS 11.0J for Windowsを使用した。

III 結果

1 生活状況についての比較

生活状況の項目と①から③の農業との関わりによる群および年齢階層によってクロス集計し、3つの群の構成比率の差を検討した。集計および検定の結果をTable 3にまとめた。また、群間の違いを視認できるように、65～69歳について生活状況の項目ごとにFig. 2～Fig. 7を作成した。

喫煙については、女性では2回の検査で両年齢階層ともに群間に有意差があり(Table 3)、①農業は喫煙なしの比率が高かった。②趣味農業は①農業と③非農業の中間の値であった(Fig. 2)。男性では、2回の検査で両年齢階層ともに、①～③の群間で有意差は認めなかった

(Fig. 3)。しかし、喫煙なしの比率は両年齢階層の2回の検査ともに①農業で高かった。

飲酒については、女性男性ともに65～69歳では群間に有意差があったが、70～74歳では差を認めなかった(Table 3)。女性では、65～69歳で①農業は飲酒なしの比率が高かった(Fig. 4)。男性では、65～69歳で③非農業で飲酒なしの比率が高く、①農業は一週間4日以上で一日2合未満が高かった(Fig. 5)。女性男性ともに70～74歳では群間に差を認めなかったものの、初年度は65～69歳の結果と同じく女性は①農業、男性は③非農業で飲酒なしの比率が高い傾向もみられた(Table 3)。

食材摂取頻度については、女性男性ともに65～69歳では群間に有意差があったが、70～74歳では差を認めなかった(Table 3)。65～69歳の初年度で③非農業の食材Σ3以下の比率は女性19.6%、男性31.3%で、①農業のそれぞれ10.2%と19.5%に比べてともに高かった。逆に、食材Σ7-10では①農業が女性53.5%、男性42.5%で、③非農業のそれぞれ43.4%と33.6%に比べてともに高かった(Fig. 6, Fig. 7)。女性の②趣味農業は食材Σ7-10の比率が①農業と同等であった。これら傾向は、初年度および4年後ともに見られた。70～74歳では群間に有意差を認めなかったものの、女性では65～69歳と同様の傾向が見られた(Table 3)。

また、群間の比較ではないため統計的な検定を行っていないが、年齢階層および4年後の状況を比べると、飲酒なしの比率は女性男性の両年齢階層の全ての群で4年後に増加し、かつ70～74歳の方が高い傾向が見られた。喫煙なしの比率では、男性の全ての群で4年後に増加するが、65～69歳より70～74歳で高い傾向にあった(Table 3)。

2 健康指標データについての比較

検査の項目と①から③の農業との関わり方による群および年齢階層によって集計し、3つの群の差を検討した。集計および検定の結果をTable 4, Table 5に示した。また、群間の違いを視認できるように、検査データの項目ごとの主な結果をFig. 8～Fig. 19にグラフ化して示した。

BMIは、初年度についてのみ群間で比較した。女性男性ともに、両年齢階層において、有意差を認めなかった(Table 4)。

高血圧者は、女性男性ともに加齢と共に増加していくが、両年齢階層の2回の検査ともに、有意差はなかった(Table 5)。しかし、有意差はないものの女性男性ともに70～74歳では、①農業で比率が低い傾向が見られた(Fig. 8, Fig. 9)。

糖尿病患者は、女性では群間に有意差を認めなかった(Table 5)。男性では、65～69歳の初年度において①農業の8.3%に対して③非農家で13.7%と高率であり、また、①農業、②趣味農業、③非農業の順に率が上昇する傾向を示した(Fig. 10)。また、有意差はないものの、

男性の65～69歳の4年後と70～74歳の女性男性の両年度でも同様の傾向が見られた (Table 5)。

高尿酸血症者は、女性では群間に有意差を認めなかった (Table 5)。男性では、65～69歳の初年度と70～74歳において群間に有意差を認め、③非農業が高率であった (Fig.11)。男性では、①農業、②趣味農業、③非農業の順に率が上昇する傾向を示した。また、有意差

のない男性の65～69歳の4年後でも同様の傾向が見られた (Table 5)。

高脂血症治療中者は、女性では、両年齢階層ともに群間で有意差を認めた。女性の65～69歳では、②趣味農業が高率で、70～74歳では③非農業が高率であり、いずれにおいても①農業がもっとも低率であった (Fig.12, Fig.13)。男性の65～69歳では有意差は認めなかった

Table 3 農業との関わりと生活状況
Differences between groups in life style

	n (人)	女			男		
		①農業	②趣味農業	③非農業	①農業	②趣味農業	③非農業
65-69歳		1201 100.0%	561 100.0%	311 100.0%	889 100.0%	211 100.0%	211 100.0%
喫煙初年度							
なし		1196 99.6%	545 97.1%	296 95.2%	305 34.3%	62 29.4%	61 28.9%
過去喫煙		2 0.2%	10 1.8%	9 2.9% **	365 41.1%	87 41.2%	91 43.1%
現在喫煙		3 0.2%	6 1.1%	6 1.9%	219 24.6%	62 29.4%	59 28.0%
喫煙4年後							
なし		1196 99.6%	547 97.5%	299 96.1%	323 36.3%	63 29.9%	66 31.3%
過去喫煙		4 0.3%	8 1.4%	9 2.9% **	383 43.1%	101 47.9%	102 48.3%
現在喫煙		1 0.1%	6 1.1%	3 1.0%	183 20.6%	47 22.3%	43 20.4%
飲酒初年度							
なし		1103 91.8%	482 85.9%	268 86.2%	184 20.7%	58 27.5%	62 29.4%
一週間3日以下		71 5.9%	46 8.2%	29 9.3%	127 14.3%	24 11.4%	33 15.6%
一週間4日以上、一日2合未満		24 2.0%	29 5.2%	14 4.5% **	358 40.3%	68 32.2%	67 31.8% *
一週間4日以上、一日2合以上		3 0.2%	4 0.7%	0 0.0%	220 24.7%	61 28.9%	49 23.2%
飲酒4年後							
なし		1109 92.3%	494 88.1%	284 91.3%	216 24.3%	67 31.8%	72 34.1%
一週間3日以下		61 5.1%	44 7.8%	17 5.5%	122 13.7%	32 15.2%	32 15.2%
一週間4日以上、一日2合未満		31 2.6%	20 3.6%	9 2.9% *	361 40.6%	65 30.8%	65 30.8% *
一週間4日以上、一日2合以上		0 0.0%	3 0.5%	1 0.3%	190 21.4%	47 22.3%	42 19.9%
食材Σ初年度							
-3		123 10.2%	74 13.2%	61 19.6%	173 19.5%	53 25.1%	66 31.3%
4-6		435 36.2%	186 33.2%	115 37.0% **	338 38.0%	77 36.5%	74 35.1% **
7-10		643 53.5%	301 53.7%	135 43.4%	378 42.5%	81 38.4%	71 33.6%
食材Σ4年後							
-3		164 13.7%	69 12.3%	68 21.9%	172 19.3%	46 21.8%	69 32.7%
4-6		432 36.0%	209 37.3%	105 33.8% **	324 36.4%	86 40.8%	74 35.1% **
7-10		605 50.4%	283 50.4%	138 44.4%	393 44.2%	79 37.4%	68 32.2%
70-74歳		602 100.0%	224 100.0%	150 100.0%	628 100.0%	113 100.0%	109 100.0%
喫煙初年度							
なし		600 99.7%	216 96.4%	144 96.0%	163 26.0%	22 19.5%	22 20.2%
過去喫煙		1 0.2%	5 2.2%	4 2.7% **	289 46.0%	65 57.5%	59 54.1%
現在喫煙		1 0.2%	3 1.3%	2 1.3%	176 28.0%	26 23.0%	28 25.7%
喫煙4年後							
なし		601 99.8%	219 97.8%	145 96.7%	178 28.3%	26 23.0%	25 22.9%
過去喫煙		0 0.0%	2 0.9%	3 2.0% **	308 49.0%	66 58.4%	63 57.8%
現在喫煙		1 0.2%	3 1.3%	2 1.3%	142 22.6%	21 18.6%	21 19.3%
飲酒初年度							
なし		554 92.0%	201 89.7%	135 90.0%	156 24.8%	34 30.1%	38 34.9%
一週間3日以下		30 5.0%	14 6.3%	7 4.7%	95 15.1%	17 15.0%	23 21.1%
一週間4日以上、一日2合未満		18 3.0%	7 3.1%	6 4.0%	258 41.1%	45 39.8%	35 32.1%
一週間4日以上、一日2合以上		0 0.0%	2 0.9%	2 1.3%	119 18.9%	17 15.0%	13 11.9%
飲酒4年後							
なし		556 92.4%	208 92.9%	139 92.7%	186 29.6%	35 31.0%	39 35.8%
一週間3日以下		30 5.0%	11 4.9%	6 4.0%	76 12.1%	12 10.6%	17 15.6%
一週間4日以上、一日2合未満		16 2.7%	3 1.3%	4 2.7%	266 42.4%	54 47.8%	42 38.5%
一週間4日以上、一日2合以上		0 0.0%	2 0.9%	1 0.7%	100 15.9%	12 10.6%	11 10.1%
食材Σ初年度							
-3		89 14.8%	40 17.9%	25 16.7%	110 17.5%	31 27.4%	22 20.2%
4-6		195 32.4%	69 30.8%	47 31.3%	252 40.1%	40 35.4%	41 37.6%
7-10		318 52.8%	115 51.3%	78 52.0%	266 42.4%	42 37.2%	46 42.2%
食材Σ4年後							
-3		90 15.0%	27 12.1%	32 21.3%	128 20.4%	21 18.6%	22 20.2%
4-6		207 34.4%	81 36.2%	49 32.7%	209 33.3%	48 42.5%	35 32.1%
7-10		305 50.7%	116 51.8%	69 46.0%	291 46.3%	44 38.9%	52 47.7%

※ 群間の検定は、項目毎ではなく3つの群の構成比率に差があるかを検討している。 * p<0.05 ** p<0.01

Table 4 農業との関わりとBMI
Differences between groups in BMI

	女			男		
	①農業	②趣味農業	③非農業	①農業	②趣味農業	③非農業
65-69歳	23.0±2.8 (1201)	23.0±2.8 (561)	23.0±2.9 (311)	23.3±2.6 (889)	23.2±2.5 (211)	23.4±2.5 (211)
70-74歳	22.8±2.9 (602)	23.2±2.8 (224)	23.2±3.4 (150)	22.8±2.6 (628)	22.9±2.4 (113)	22.8±3.1 (109)

※ BMI = 体重 (kg) ÷ 身長 (m)², ±の数値は標準偏差, カッコ内の数値は人数, * p<0.05 ** p<0.01

が (Fig.14), 70～74歳では③非農業の4年後において高率であった (Fig.15)。

血中脂質 (高脂血症治療中を除いて) は, 男女ともに, ②趣味農業と③非農業はそれぞれ, ①農業よりも一部総コレステロールと non HDL-C が有意に高値を示したが (Fig.16～Fig.19), ②趣味農業と③非農業の間には有意差は認めなかった (Table 5)。特に, 65～69歳で顕著であり, たとえば女性の初年度の総コレステロールでは①農業の 208.1mg/dl に対して, ②趣味農業で 215.0mg/dl, ③非農家で 216.6mg/dl と高かった。

IV 考察

1 日常的な農作業の効果についての検討

農業をしない人 (③非農業) と農業に1日3時間以上従事している人 (①農業) の健康指標の比較においては (初年度と4年後), 農業をする人の群は農業をしない人の群と比較し, 全体に良好な食生活習慣 (Fig.6, Fig.7) であり, 高血圧, 糖尿病, 高脂血症, 高尿酸血症が少ない傾向が認められた (Fig.8～Fig.19)。食材摂取においては, 65～69歳において男女とも群間に有意差が認められ, 農業をしない群において食材摂取の種類が少ない

Table 5 農業との関わりと検査データ
Differences between groups in health checkup data

	n (人)	女			男		
		①農業	②趣味農業	③非農業	①農業	②趣味農業	③非農業
65-69歳	n (人)	1201	561	311	889	211	211
高血圧初年度		329 27.4%	162 28.9%	85 27.3%	246 27.7%	52 24.6%	50 23.7%
高血圧4年後		437 36.4%	200 35.7%	105 33.8%	307 34.5%	71 33.6%	71 33.6%
糖尿病初年度		61 5.1%	20 3.6%	18 5.8%	74 8.3%	18 8.5%	29 13.7% *
糖尿病4年後		74 6.2%	27 4.8%	19 6.1%	88 9.9%	21 10.0%	28 13.3%
高尿酸血症初年度		3 0.2%	1 0.2%	1 0.3%	42 4.7%	16 7.6%	20 9.5% *
高尿酸血症4年後		6 0.5%	2 0.4%	1 0.3%	59 6.6%	15 7.1%	23 10.9%
高脂血症治療初年度		74 6.2%	59 10.5%	32 10.3% **	17 1.9%	8 3.8%	7 3.3%
高脂血症治療4年後		137 11.4%	94 16.8%	49 15.8% **	32 3.6%	11 5.2%	9 4.3%
	n (人)	1046	458	253	852	197	199
TC初年度	(mg/dl)	208.1 ±28.4 **	215.0 ±26.4	216.6 ±29.8 ††	191.3 ±29.1 **	199.5 ±31.0	197.5 ±31.9 †
TC4年後	(mg/dl)	208.5 ±28.5 **	215.9 ±27.8	217.2 ±29.1 ††	190.9 ±28.2 **	199.1 ±30.8	196.1 ±32.4
non HDL-C初年度	(mg/dl)	149.6 ±29.2 **	155.8 ±27.5	159.8 ±29.7 ††	136.6 ±29.6 **	146.1 ±31.0	144.7 ±34.2 ††
non HDL-C4年後	(mg/dl)	149.3 ±29.4 **	155.6 ±28.2	159.3 ±28.3 ††	135.9 ±28.4 **	145.6 ±31.0	142.6 ±32.8 †
70-74歳	n (人)	602	224	150	628	113	109
高血圧初年度		188 31.2%	85 37.9%	60 40.0%	164 26.1%	36 31.9%	33 30.3%
高血圧4年後		249 41.4%	101 45.1%	71 47.3%	228 36.3%	44 38.9%	41 37.6%
糖尿病初年度		32 5.3%	15 6.7%	12 8.0%	41 6.5%	9 8.0%	13 11.9%
糖尿病4年後		40 6.6%	15 6.7%	15 10.0%	55 8.8%	13 11.5%	11 10.1%
高尿酸血症初年度		1 0.2%	1 0.4%	1 0.7%	26 4.1%	11 9.7%	12 11.0% **
高尿酸血症4年後		1 0.2%	0 0.0%	0 0.0%	32 5.1%	9 8.0%	12 11.0% *
高脂血症治療初年度		46 7.6%	20 8.9%	22 14.7% *	11 1.8%	0 0.0%	2 1.8%
高脂血症治療4年後		71 11.8%	27 12.1%	31 20.7% *	21 3.3%	4 3.5%	12 11.0% **
	n (人)	514	192	112	604	109	97
TC初年度	(mg/dl)	207.8 ±29.4	212.6 ±27.0	212.1 ±29.6	190.8 ±26.9	194.9 ±28.5	194.9 ±27.1
TC4年後	(mg/dl)	206.5 ±28.4	212.0 ±27.6	215.4 ±30.9 †	189.9 ±28.3	195.1 ±28.4	194.0 ±26.8
non HDL-C初年度	(mg/dl)	148.7 ±29.5 **	157.5 ±26.2	153.8 ±31.7	136.2 ±27.5 *	144.0 ±29.8	140.7 ±28.5
non HDL-C4年後	(mg/dl)	147.3 ±28.3 **	156.1 ±26.8	156.4 ±31.8 †	135.6 ±28.2	142.5 ±29.8	139.0 ±26.1

※ 高血圧, 糖尿病, 高尿酸血症, 高脂血症治療の数値は人数, nは各群の総人数, 3つの群の構成比率に差があるかを検討している。 * p<0.05 ** p<0.01

血中脂質 (総コレステロールTC, non HDL-C) の数値は平均値, nは各群の総人数で, 2つの群間で差を検討している。

①vs② * p<0.05 ** p<0.01, ①vs③ † p<0.05 †† p<0.01, ②vs③ † p<0.05 ‡ p<0.01

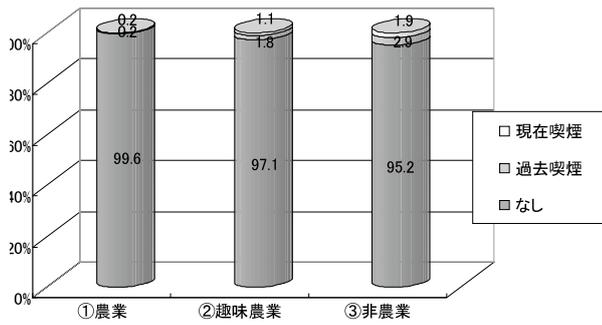


Fig.2 女性 65-69 歳喫煙 (初年度)
Woman's (65-69 years old) smoking ratio (first year)

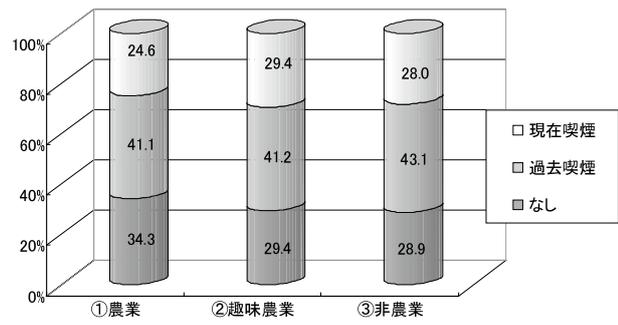


Fig.3 男性 65-69 歳喫煙 (初年度)
Man's (65-69 years old) smoking ratio (first year)

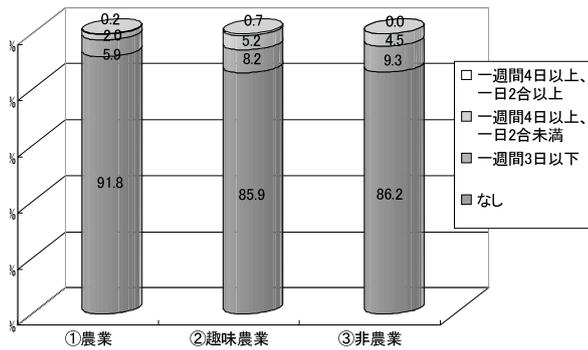


Fig.4 女性 65-69 歳飲酒 (初年度)
Woman's (65-69 years old) drinking ratio (first year)

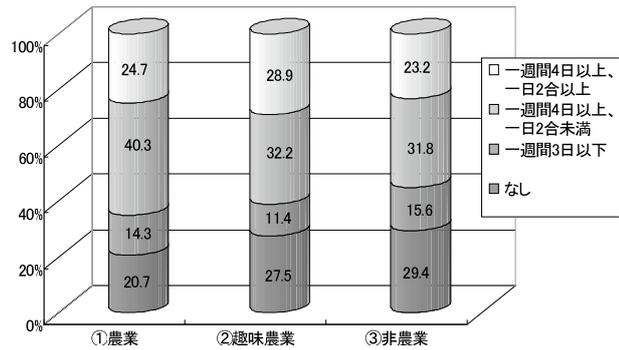


Fig.5 男性 65-69 歳飲酒 (初年度)
Man's (65-69 years old) drinking ratio (first year)

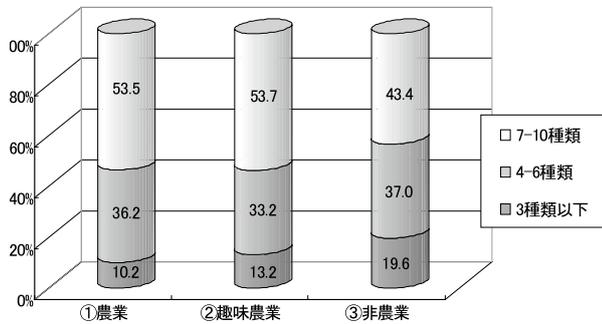


Fig.6 女性 65-69 歳食材摂取頻度 (初年度)
Woman's (65-69 years old) kind number of food (first year)

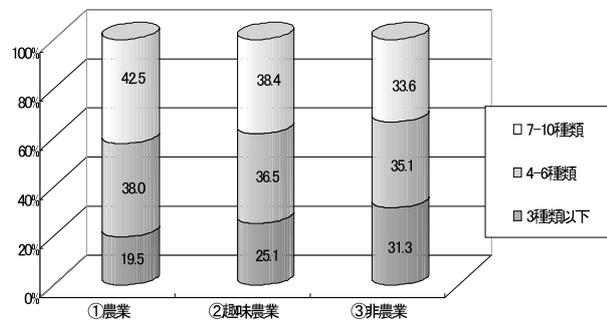


Fig.7 男性 65-69 歳食材摂取頻度 (初年度)
Man's (65-69 years old) kind number of food (first year)

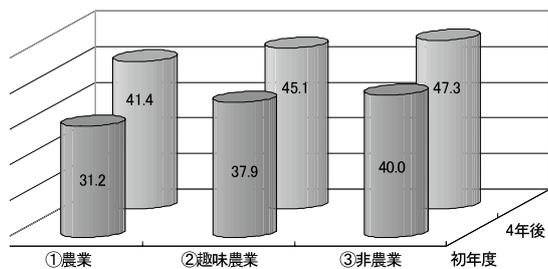


Fig.8 女性 70-74 歳 高血圧
Woman's (70-74 years old) Hypertention ratio (first year)

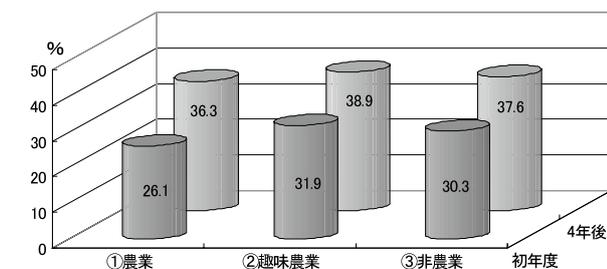


Fig.9 男性 70-74 歳 高血圧
Man's (70-74 years old) Hypertention ratio (first year)

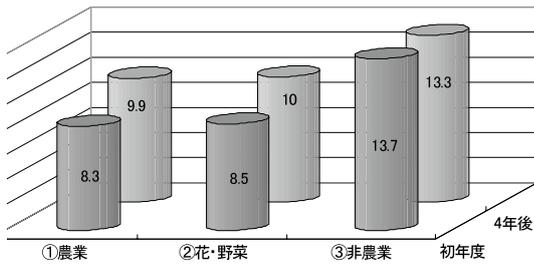


Fig.10 男性 65-69 歳 糖尿病
Man's (65-69 years old) Diabetic ratio

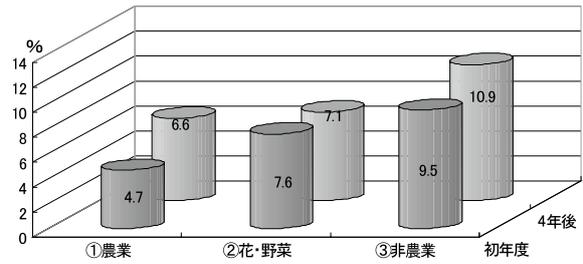


Fig.11 男性 65-69 歳 高尿酸血症
Man's (65-69 years old) Hyperuricemia

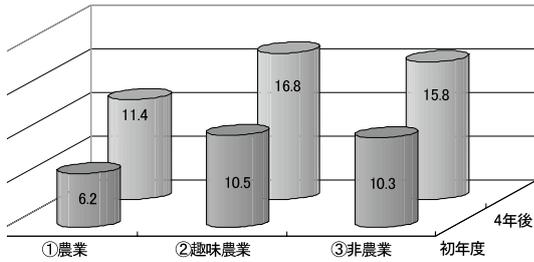


Fig.12 女性 65-69 歳 高脂血症 (治療中)
Woman's (65-69 years old) Hyperlipemia (under treatment)

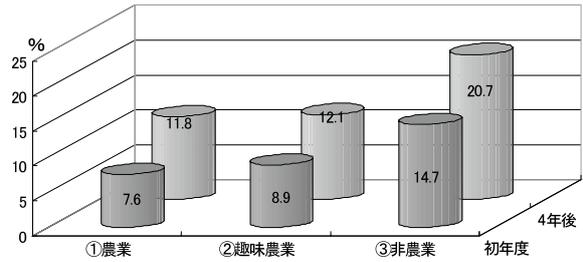


Fig.13 女性 70-74 歳 高脂血症 (治療中)
Woman's (70-74 years old) Hyperlipemia (under treatment)

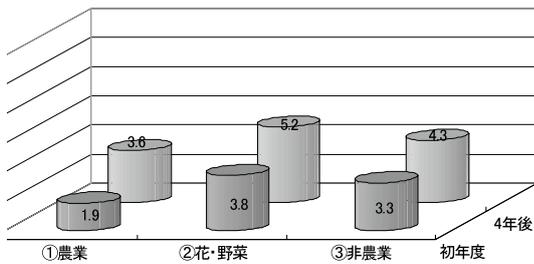


Fig.14 男性 65-69 歳 高脂血症 (治療中)
Man's (65-69 years old) Hyperlipemia (under treatment)

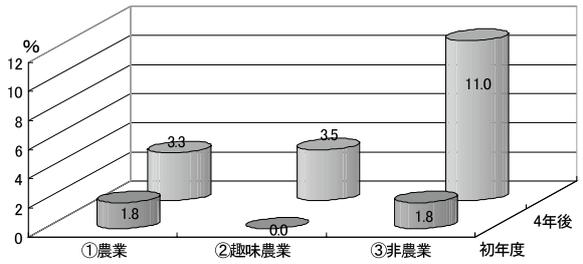


Fig.15 男性 70-74 歳 高脂血症 (治療中)
Man's (70-74 years old) Hyperlipemia (under treatment)

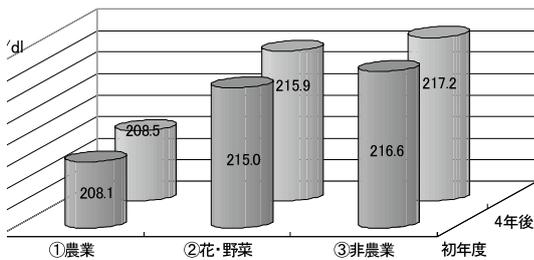


Fig.16 女性 65-69 歳 総コレステロール (平均値)
Woman's (65-69 years old) Total cholesterol (average)

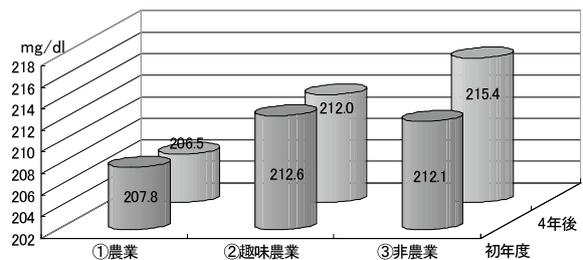


Fig.17 女性 70-74 歳 総コレステロール (平均値)
Woman's (70-74 years old) Total cholesterol (average)

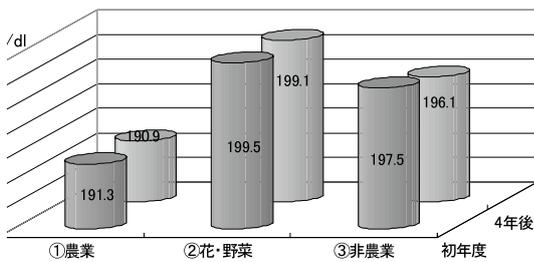


Fig.18 男性 65-69 歳 総コレステロール (平均値)
Man's (65-69 years old) Total cholesterol (average)

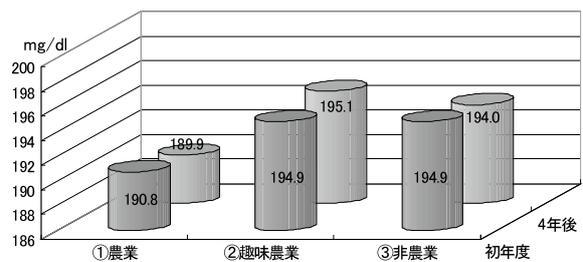


Fig.19 男性 70-74 歳 総コレステロール (平均値)
Man's (70-74 years old) Total cholesterol (average)

人が多かった (Fig.6, Fig.7)。また検査データに有意差を生じた項目は、男性の糖尿病 (Fig.10)、高尿酸血症 (Fig.11)、および治療中も含めた男女の血中脂質 (Fig.16 ~ Fig.19) 等である。

農業を3時間以上している群①では、男女、開始年齢を問わず、食材摂取状況が良好であり、糖尿病、高脂血症、高尿酸血症の検査データにおいても、農業をしない群②③に比べて良好と言える傾向であった。要因については今後の検討課題であるが、これらの疾病の予防対策として、食生活習慣、運動習慣が大きな比重を占めることから、日常の農業労働、農業に関係する生活習慣がこれらの疾病予防に有益に作用した可能性があり、注目に値する結果である。非農家であっても花・野菜作りを日常生活に取り入れている人 (②趣味農業) は、食生活を始めとして生活状況が比較的良好であり、糖尿病や高尿酸血症が少ない可能性が示唆された。

また、農業との関わり方の違いによる群間の比較の検定結果を Table 6 に整理した。クロス表の104項目中41項目で5%水準以上で有意差が見られ、そのほかに、有意差が認められなかった項目の中にも有意差のあった項目と同様の傾向もしくは①農業が最も良好な結果となった項目が30あり、サンプル数を増やすことでこれらも有意となる可能性がある。

2 非農家の農業体験の効果についての検討

日常生活に農業体験を加えることによって高齢者の身

体機能の低下を軽減できるかどうかを検討することが本研究の目的である。しかし、長野県厚生連健康管理センターが実施している集団健康スクリーニング (健診) を受診した長野県在住者を対象としているため、都市部の住民が農村に一時的に滞在して農業体験をするといったケースは設定できない。そこで、健診の間診表において花・野菜づくりを趣味や生きがいとして回答していたかどうかで非農家を②趣味農業と③非農業の2つに分け、非農家で花・野菜づくりを行っている②趣味農業の群に注目し結果を検討した。

生活状況のうち食材摂取については、②趣味農業は③非農業よりも良好と考えられた。女性65~69歳では食材摂取の多いものが①農業と同等の率であり、また、男性65~69歳では、食材摂取の多いものの率が①農業と③非農業の間に入っていた。

検査データについては、群間でBMIに有意差を認めないものの、男性の一部の階層で糖尿病患者と高尿酸血症者について有意差を認めた。糖尿病患者については、男性65~69歳の初年度で有意差があり、②趣味農業の率は①農業と③非農業の間に入っていた。ただし、4年後の率には有意差は認めなかった。高尿酸血症者については、男性で65~69歳の4年後を除いて群間に差を認め、②趣味農業の率は①農業と③非農業の間に入っていた。

非農家であっても花・野菜づくりを趣味生きがいとしている人は、食生活をはじめとして生活状況が比較的良好であり、検査データにおいても一部の階層で糖尿病や

Table 6 農業との関わり方の違いによる群間の差の検定結果の一覧
List of test result of groups in lifestyles and health checkup data

	性別	女				男			
		初年度		4年後		初年度		4年後	
		65-69	70-74	65-69	70-74	65-69	70-74	65-69	70-74
喫煙		**	**	**	**	△	△	△	△
飲酒		**		*		*		*	
食材摂取		**	△	**	△	**	**	△	
高血圧			△		△		△		△
糖尿病			△		△	*	△	△	△
高尿酸血症						*	**		*
高脂血症治療		**	*	**	*	△		△	**
総コレステロールTCHO	①*②	**	△	**	△	**	△	**	△
	①*③	**	△	**	*	*	△	△	△
	②*③								
non HDL コレステロール	①*②	**	**	**	**	**	*	**	△
	①*③	**	△	**	*	**	△	**	△
	②*③								

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, △印は0.05の有意水準を満たさないが①農業が良好な値を示した項目。

比率 (喫煙, 飲酒, 食材摂取状況, 高血圧, 糖尿病, 高尿酸血症, 高脂血症治療) の比較には χ^2 検定を用いた。

喫煙, 飲酒, 食材摂取状況は、①農業, ②趣味農業, ③非農業の項目毎ではなく3つの群の構成比率に差があるかを検討した。

高血圧, 糖尿病, 高尿酸血症, 高脂血症治療は、項目毎に①農業, ②趣味農業, ③非農業の3つの群の構成比率に差があるかを検討した。

連続変数 (血中脂質 (TCHO, non HDL)) の比較には一元配置分散分析及び多重比較検定を用いた。

血中脂質は①農業, ②趣味農業, ③非農業の2グループの組み合わせの比較である。

高尿酸血症が少ないなどの傾向が認められた。特に糖尿病は高齢者においても生活の質を低下させる疾患であり、継続して実行できる予防策が求められている。非農家における花・野菜づくりは方法の一つとして期待される。ただし、今回は断面調査であり、また、群間で糖尿病発症に影響する因子（家族歴、高血圧や高脂血症の合併など）が異なる可能性もあり、非農家の人における軽度の農業体験が糖尿病の発症を抑制するかどうかについては更なる検討が必要である。

3 中高年層の農業への回帰の動向

国勢調査の結果から中高年齢層の農業への就業の状況を見ると、長野県の5歳階級別の人口は平成17年では55～59歳をピークとし、就業者に占める農業者の割合（農業者比）は、年齢が上がるほど高く特に60歳以上で急上昇し75～79歳では0.6を越える。農業者数も男女ともに70～74歳をピークに増加している（Fig.20a, b）。平成12年からの変化をみると、農業者比の比は女性の40～49歳を除いてほぼ全ての年齢階級で1.0を越え、農業者数の比でも1.0を越える階級が多く（Fig.20c, d）

年齢が進むにつれて農業就業者が増える傾向を示し、特に60～64歳の男性では5年前の3,418人から7,681人に増えていた（Fig.20d）。

農業者総数では、平成12年の37,044人から平成17年には36,750人に減ってはいるものの、定年帰農をはじめとする中高年齢層での新規就農の傾向が見られることから、農作業を行うことが健康指標に良好な結果を示した今回の結果が、就農の意欲を向上させ、農業者が増加する一助となることを期待する。

V 結 言

研究結果から、農作業を日常的に行っている人の特性について分析を行うことが出来た。結果を以下に整理する。

- (1) 農業を行っている人は、農作業を全くしない人に比べて、糖尿病、高脂血症等の生活習慣病の危険因子の保有率が低い傾向があった。
- (2) 農業を行っている人は、食材摂取もより多種の食材を摂取しているという傾向であった。

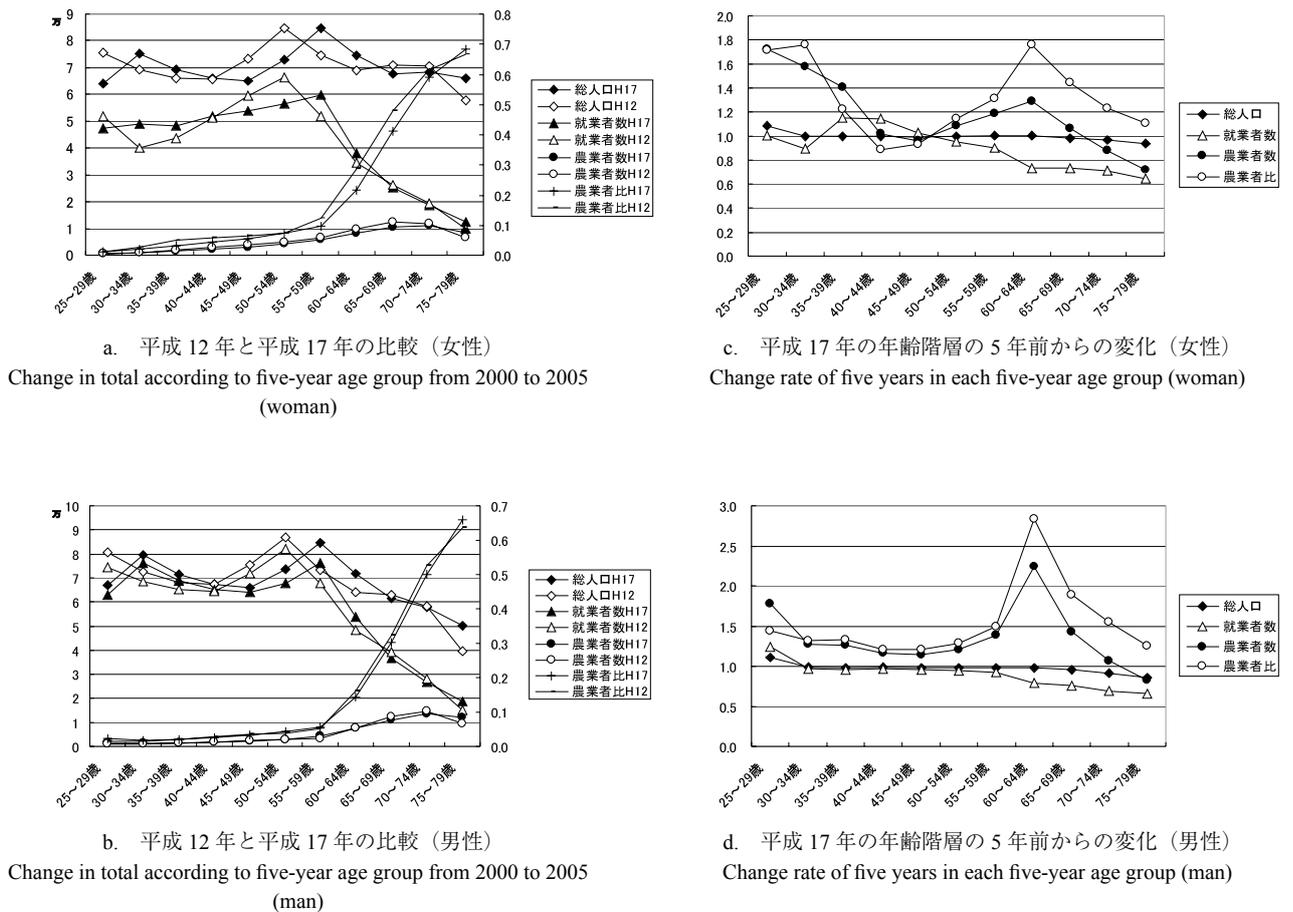


Fig.20 長野県の5歳階級別人口、就業者数、農業者数、農業者比の変化

Change in population, number of employees, number of farmers, and ratio of farmers by five-year age group of Nagano Prefecture

平成12年と平成17年国勢調査データより作成した。農業者比は就業者数に対する農業者数の比である。cとdは平成17年の各年齢階層の5年前の人数（農業者比の場合は比）との比（H17年の60～64歳の数÷H12年の55～59歳の数）である。

- (3) 非農家であっても花・野菜作りを日常生活に取り入れている人は、食生活を始めとして生活状況が比較的良好であり、糖尿病や高尿酸血症が少ない可能性が示唆された。
- (4) 日常の農作業、農業に関係する生活習慣がこれらの疾病予防に有益に作用した可能性が認められた。

本研究の成果は、いわゆる「定年帰農」の推進や、グリーン・ツーリズム推進事業に対して直接的な方法を提示するものではないが、動機付けに参考となるデータが得られた。総務省の「人口減少自治体の活性化に関する研究会報告書」(2006)によれば、グリーン・ツーリズムやその発展形態として都市近郊においては、二地域居住という形態でセカンドライフの一環として副業ないしは楽しみとしての農業を目的とする事業を推進している府県が多く見られる。本研究においては、比較的軽度の農作業の継続であっても、生活習慣病の発生予防という事業の推進に役立つデータを提供出来たことで、都市と農村の対流参加を促す動機付けに役立てる資料として活用が期待できる。

留意点として、本研究のデータ、結果は現在、長野県に在住する住民の健康診断のデータによるものであるということから、都市の中老年に対しての単純な適用、一般化には問題があり、他の条件による同様な研究、検証が行われることを期待する。

参考文献

- 1) 国民健康保険中央会 (1997) : 市町村における医療費の背景要因に関する報告書, <http://www.kokuho.or.jp/syucho/lib/haikei.pdf> (verified 2008-12-08)
- 2) 厚生労働省 (2004) : 平成 13 年度老人医療事業報告, <http://www.dbtk.mhlw.go.jp/toukei/kouhyo/index.html> (verified 2008-12-08)
- 3) 総務省 (2002) : 平成 12 年国勢調査第 2 次基本集計 (労働力状態, 就業者の産業, 就業時間など) 長野県, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000000030137&cycode=0> (verified 2008-12-08)
- 4) 総務省 (2003) : 平成 14 年就業構造基本調査, <http://www.stat.go.jp/data/shugyou/2002/kakuhou/yoyaku.htm> (verified 2008-12-08)
- 5) 総務省 (2006) : 人口減少自治体の活性化に関する研究会報告書, http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/pdf/060525_2_3.pdf (verified 2008-12-08)
- 6) 総務省 (2008) : 平成 17 年国勢調査第 2 次基本集計 (労働力状態, 就業者の産業, 就業時間など) 長野県, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001007905&cycode=0> (verified 2008-12-08)

Effects of Farm Work on Elderly People to Prevent a Decline in Their Physical Functions

MATSUMORI Kenji, NISHIGAKIYA Yoshio, MAEJIMA Fumio,
USUDA Makoto, NAGAMI Hiroshi and YAJIMA Nobuki

Summary

It is pointed out that farm work has an effect on the physical functions of elderly people. Demonstrative studies on the concrete effects, however, have not been fully carried out, including the relationship between barometers of health in elderly people. In this study, data from health checkups were analyzed in relating to farm work. This study provides useful information on the effects of farm work among elderly people.

Approximately 5,000 elderly people aged 65-74 were divided into three groups: (1) those who were engaged in farm work for three hours or more every day, (2) those who were not engaged in farm work but grew flowers and vegetables as a hobby, (3) those who were not engaged in farm work nor did they grow flowers and vegetables. A study was carried out as to whether there were differences in the state of their daily lives and an examination was made of data due to differences in the level of involvement in agriculture. As a result of this comparison, Group (1) was better than Group (3) in dietary habits and in risk factors for arteriosclerosis (diabetes, hyperlipaemia, and hyperuricemia) with a significant difference. With regard to the proportion of men who suffered from diabetes, the rate was 13.7% for Group (3) whereas it was 8.3% for Group (1). With regard to the value for total cholesterol among women, it was 216.6 mg/dl for Group (3) whereas it was 208.1 mg/dl for Group (1). Group (2) ranked between Group (1) and Group (3) for most items.

Farm work has an effect on the physical functions of elderly people, such as the prevention of lifestyle-related diseases. Data obtained through this study can be used to motivate elderly people to participate in interaction activities between urban and rural people.

Keywords : agriculture, health barometers, health checkups, lifestyle diseases, rural-urban interaction, agricultural experience

仮想実験による農村水路景観の評価構造に関する考察

廣瀬裕一*・松森堅治*・嶺田拓也*・石田憲治**

目次

I 緒言	117	IV 考察	125
II 研究方法	118	1 水路2景の評価構造の相違	125
1 評価構造モデル	118	2 人間の過去の水路と関わる活動の有無が 評価構造に及ぼす影響	126
2 仮想実験の方法	118	3 子供の頃水辺で遊んだ経験の有無が 好ましさの評価に及ぼす影響	126
III 結果	119	V 結言	127
1 好ましさの評価に影響を与える判断 (評価階層と判断階層間の関係)	119	参考文献	127
2 水路景観の択一評価の判断に影響を及ぼす 外的環境(判断階層と外的環境階層の関係)	120	Summary	129
3 水路2景の評価構造の構築	122		

I 緒言

高度経済成長期以降わが国の農業農村整備は、主に生産性向上や労働効率の改善を目的に実施された。一方で近年、ゆとりや安らぎといった国民の価値観の変化等により国民は、生産性の向上等に依らない多様な評価軸で農村環境を評価しつつある。その結果、良好な農村環境の維持や質的向上が図られる農業農村整備が求められている。

すなわち、農村には生産環境としての好ましさだけでなく、生活・余暇環境等としての好ましさも必要となっている。このような多様な評価軸を適切に把握するためには、国民がどのような農村環境を「好ましい」と評価するかを知る必要がある。また、「好ましい」と評価される農村環境は、求める機能や評価する人の属性や価値観、経験等によって多様であると考えられるため、農村環境やそれを構成する農村景観を好ましいと評価する理由を適切に知ることも必要である。

ところで、農業用水路は農村集落の形成に影響を及ぼしているため(本庄ら, 1999)、農村景観を構成する主要な景観と考えられる。そのため、農業用水路の景観を良好に保全することは極めて重要である。小林ら(2003)によると、水路景観の選好は、水深、水路材料、立地

条件等の属性やその水準が強い影響を及ぼし、大田ら(1996)によると、住民は農業用水路の景観評価に価値系、人工系、自然系の3つの主要な景観要素を潜在的に意識したことをそれぞれ報告した。これらの報告から、農業用水路景観の良好な保全のためには、人々が水路から読み取る情報が選考性評価に及ぼす影響を構造的に把握すること(評価構造の構築)が重要だと考えられる。

景観に対する選好を評価構造に着目して解明した研究は、自然景観における好ましさの評価構造を明らかにした児島ら(1995)、水田景観を対象とした田野倉ら(1999)、河川を対象とした小池ら(1988)、三阪ら(2006)、島谷(1998)、村川ら(1986a)、(1986b)があるが、農業用水路や農村の水路景観を対象とした研究は小林ら(2003)と大田ら(1996)の報告がある程度で、情報を蓄積することは非常に有意義である。

そこで、農村の水路景観を対象に、水路を構成する様々な要素(以下景観構成要素)がどのように水路景観の好ましさの評価に結びついているかを、人間の認知構造を考慮した階層型評価構造モデルを用いて、人工的と自然的な水路景観に対する評価構造を構築するために、以下の検討を行った。

- 1) 農村部の水路景観の選好性評価に影響を与える判断の抽出とその関係の解明。
- 2) 判断の決定に影響を与えた水路景観の物理的要因の検討。

子供の頃の遊んだ経験や地域活動等の参加が水辺への愛着に影響を及ぼす(佐竹ら, 2007)ことから、これらの経験と水路景観の選好性の関連をみるために、

- 3) 人間の過去の水路と関わる活動の有無が評価構造に

* 農村環境部環境評価研究室

** 農村計画部部长

平成20年11月7日受理

キーワード: 評価グリッド法, アンケート, インタビュー, 水路景観, 農村計画

及ぼす影響の検討。

- 4) 2) で明らかになった評価構造から 1) で設定した判断階層を表現する質問項目の妥当性の検討、および改良点等の考察。

なお、景観構成要素の視覚的認知による評価に限定するために、人工的と自然的な水路の写真2景の提示により、対象とする水路景観に予見をもたない農村工学研究所事務系職員を被験者とした仮想の住民集団を対象として、アンケートとインタビューを行った。ここではこの調査を仮想実験と呼ぶ。農村工学研究所事務系職員を被験者にした理由は、使用した景観写真地区の居住による目に見えない評価構造（例えば、日常経験から得られる評価や臭い等の評価）の混入を避けるためである。

II 研究方法

1 評価構造モデル

水路2景の「選好性」評価に影響を与える評価構造の構築は、小池ら（1988）が提案した都市河川の心理的空間評価の階層モデル（Fig.1）に即して進めた。このモデルは、パーソナルコンストラクト理論（讃井ら、1986）に基づいて評価に至る階層構造を説明するため、好ましいと評価するために必要な構造を階層別に明確に表現することができる。

具体的には、水路に対して「好ましい」と評価する際に、例えば「安全である」ことがその理由であれば、「安全である」ことが「好ましい」コンストラクトの下位にくるコンストラクトである。同様に、「安全である」と判断する理由として「整備されている」という下位のコンストラクトで与えられる、というように、「好ましい」という評価にいたるまで幾つかの階層構造をなしているとする。これらの階層構造は、「好ましい」のような選好性を評価する評価階層、「安全である」のような判断をする判断階層、「整備されている」のように判断に影響を与える景観構成要素を空間から感じ取る外的環境を一次的に感じ取る部分（外的環境階層）の3階層であり、

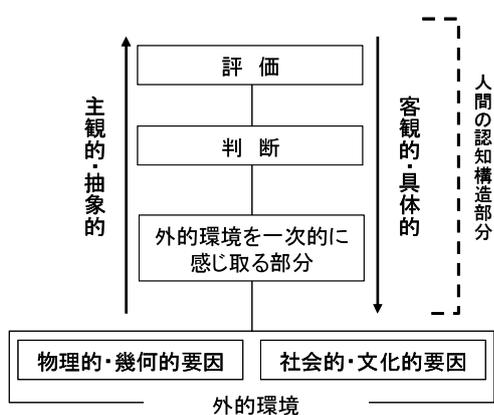


Fig.1 都市河川の心理的空間評価の階層モデル（小池ら、1988）
The cognitive model for evaluation of psychological river space

「評価」-「判断」-「外的環境」の階層間の関係は人間の認知過程に従っているとしていることが特徴である。

評価階層と判断階層の関係をアンケート調査から、判断階層と外的環境階層の関係をインタビュー調査から解析し、判断階層を接合点として両調査の結果を併せて2景の評価構造を構築した。

2 仮想実験の方法

a 被験者

アンケート調査とインタビュー調査の被験者は、農村工学研究所の事務系職員である。景観構成要素の視覚的認知に関する評価構造に限定するために、対象とする水路景観に予見をもたない被験者（例えば、写真からはわからない、臭いや音等の情報がない被験者のこと）を仮想の住民集団とした。

b 提示した写真（水路景観2景）について

被験者に提示した2枚の写真（Fig.2）は、長野県内で2006年3月下旬に撮影した、ワークショップを実施して地域住民との十分な合意形成を図って整備された人工的な水路景観である写真Aと、写真Aと比べて相対的に自然的な水路景観である写真Bである。アンケート調査、インタビュー調査では、2景の水路を農業用水路であるとあらかじめ被験者に提示した。

c アンケート調査の概要

アンケート調査は、2006年8月下旬に実施した。農村工学研究所事務系職員54人に回答を依頼して、50人から回答を得た（Table 2）。

質問項目（Table 1）の内、評価階層と判断階層間の評価構造の解明で使用した質問項目は、都市河川のイメージ評価を行った松浦ら（1986）の研究を参考に、評価対象写真の水路の構造や素材等に基づく明確な評価の差が想定される質問項目を中心に、類似の因子は代表的なものを取り上げる等回答者の負担に配慮しつつ絞り込んだ8つを設定し、心理学的測定法の一つであるSD法（日本建築学会、2006）による5段階評価（例えば、Q1「選好性」では、「大変好ましい」を5点、「やや好ましい」を4点、「どちらでもない」を3点、「やや好ましくない」を2点、「全く好ましくない」を1点とした。）で質問した。

他の項目は、過去の農業経験、水辺で遊んだ経験、水路の管理作業経験に関する質問と、2景の択一評価である。これらは、農業や水辺での遊びの経験などの経験の有無が水路の好ましさの評価構造に与える影響の解析に用いる。

d インタビュー調査の概要

判断階層と外的環境階層間の評価構造の解明を目的としたインタビュー調査には、評価グリッド法（讃井ら、1986）を用いた。評価グリッド法は、人間の認知構造に基づいて回答者の評価構造を聞き取る方法で、インタビューの主観の混入が少ないことが特徴である。聞き取り調査にはラダーリングと呼ばれる手法を用いた。具



Fig.2 使用した写真とそれらの物理的要因の特徴
Using two photos and its characteristic of physical factor

Table 1 質問項目
Question items

評価階層	Q1	選好性	好ましくない - 好ましい
判断階層	Q2-1	美しさ	見苦しい - 美しい
	Q2-2	力強さ	弱弱しい - 力強い
	Q2-3	開放感	窮屈な - 自由な
	Q2-4	近代性	伝統的な - 近代的な
	Q2-5	まとまり感	雑然とした - 整然とした
	Q2-6	親近感	疎遠な - 身近な
	Q2-7	安全性	危険な - 安全な
	Q2-8	人為性	自然的な - 人工的な
評 点		1点 ← → 5点	
Q3 農業経験の有無			
1. ある (農家)		2. ある (非農家)	
3. ない (家庭菜園程度はある)		4. ない	
Q4 子供の頃水辺で遊んだ経験			
1. ある		2. ない	
Q5 水路の管理作業経験			
1. ある		2. ない	
Q6 良いと感じた水路景観			
1. 写真 A		2. 写真 B	
		3. どちらでもない	

Table 2 被験者の年齢構成
Examinee's age composition

年齢層		20代	30代	40代	50代以上	合計
アンケート調査	女性	7	7	10	6	30
	男性	10	8	2	0	20
インタビュー調査	女性	0	4	2	4	10
	男性	1	2	0	0	3

Table 3 水路2景の択一判断
Alternative judgment of two canal landscapes

択一判断	男性	女性	合計	グループ名
写真 A が良い	5	10	15	グループ A
写真 B が良い	10	11	21	グループ B
どちらでもない	5	9	14	グループ C
合計	20	30	50	

者は、13人で (Table 2)、このうち11名はアンケート調査の被験者も務めた。

III 結果

1 好ましさの評価に影響を与える判断 (評価階層と判断階層間の関係)

アンケート調査の結果、得られた2枚の写真に対する評価階層および判断階層の全回答者の平均評点を Fig.3 に示した。判断階層では、「美しさ」、「力強さ」、「親近感」は2景とも同様の判断を示し、それ以外は対極の判断となっている。具体的には、写真Aを窮屈な、近代的な、整然とした、安全な、人工的な水路景観と被験者は捉え、

体的には、被験者に水路2景から好ましいと思う水路景観を選択させ、好ましいと思った理由 (判断階層) を聞き取った後、その理由を水路景観のどこを見て読み取ったか (外的環境階層) と、その理由 (例えば『安全そうだ』) を感じることは、被験者にとってどのような良いことがあるのか (上位の判断階層もしくは評価階層; 例えば『暮らしやすい』) を聞きとり、それぞれの因果関係を構築した。調査は、2007年3月に実施した。被験



**：T検定(両側)で評点平均差が1%で有意

Fig.3 評価階層と判断階層の全回答者の平均評点

Average score of all respondent between estimate-hierarchy and judgment-hierarchy

写真Bを自由な、伝統的な、雑然とした、危険な、自然的な水路景観と捉えている。一方で評価階層(「選好性」)は写真A、写真Bともに好ましいとする傾向を示し、判断階層ほど大きな違いがないことが示唆された。

松浦ら(1986)は、比較的好まれている中小河川は、歴史性に基づく古めかしさや静寂さ、日本らしさを持つものと、近代的、都市的な整備が行われた美しい河川であると指摘しているが、本研究で設定した水路2景はともに好ましいと評価される傾向を示し、前者は写真B、後者は写真Aに類似すると考えられることから、Fig.3の結果は妥当であると考えられる。

好ましいという評価に関係する判断階層の質問項目を明らかにするために、2景の好ましさの択一判断(Table 1のQ6)に基づいて被験者をグループ分けした(Table 3)。写真Aが良いとした人をグループA、写真Bが良いとした人をグループB、どちらでもないとした人をグループCとして、以降は2景の写真に対する択一判断を明確にしたグループAとグループBの結果を中心に解析を進める。写真AとBのグループ別平均評点をFig.4とFig.5に示す。

写真A(Fig.4)については、グループAとグループBの各質問項目の評点から有意差が認められた質問項目は「選好性」、「美しさ」、「親近感」、「安全性」で、「力強さ」、「近代性」、「まとまり感」、「人為性」は有意差を認めなかった。つまり、グループAは、グループBより写真を美しく、身近で、安全で、好ましいと考えていると思われる。質問項目間の相関係数(Table 4)を見ると、



**：T検定(両側)で評点平均差が1%で有意

*：T検定(両側)で評点平均差が5%で有意

Fig.4 写真Aの択一判断グループ別平均評点

Average score in alternative judgment groups (Photo. A)

グループAは写真Aの「選好性」に対して「安全性」と「美しさ」が高い数値を示し、判断階層間の各項目間の相関係数を見ると、「安全性」の判断には「近代性」、「まとまり感」、「人為性」が関係した。

写真B(Fig.5)では、グループAとグループBの各質問項目の評点から有意差が認められた質問項目は、「選好性」、「美しさ」、「まとまり感」、「安全性」(但し、「選好性」、「まとまり感」と「安全性」は有意確率が5%)であった。つまりグループBは写真Bを美しいと考え、グループAに比べより整然としているあるいは安全であるとの判断が好ましさに関係していると思われる。質問項目間の相関係数(Table 5)を見ると、グループBは写真Bの「選好性」に対して「美しさ」と「開放感」の判断項目が高い数値を示し、「美しさ」には「開放感」、「近代性」、「安全性」が、「開放感」には「近代性」、「人為性」、「美しさ」がそれぞれ関係した。なお、グループCの平均評点は、全被験者の平均評点とほぼ同じであった。

水路2景の「選好性」評価を決定する判断階層の質問項目を解明するために、「選好性」評価を目的変数、判断階層の全ての質問項目を説明変数とする重回帰分析を行い、Table 6の結果を得た。結果からグループAは写真Aを安全で開放的であることを理由に好ましいと評価し、グループBは写真Bを美しく開放的であることを理由に好ましいと評価しているものと考えられた。ところで、グループAの写真Aに対する「選好性」評価の説明変数として、「安全性」の次に単相関係数が高い「美しさ」が採用されなかったが、これは「安全性」と「美しさ」が正の相関関係を持つことから、「美しさ」の一部が「安全性」に含まれ、「安全性」と負の相関関係を持つ「開放感」が採用されたものと考えられる。

2 水路景観の択一評価の判断に影響を及ぼす外的環境(判断階層と外的環境階層の関係)

被験者が写真から読み取る情報と「選好性」評価につながる判断の因果関係を検討するために、評価グリッド法を用いてインタビュー調査結果の判断階層と外的環境階層間の構造化を行った。インタビュー調査の被験者13人の内、写真Aを好ましいと回答した人は9人(グルー



**：T検定(両側)で評点平均差が1%で有意

*：T検定(両側)で評点平均差が5%で有意

Fig.5 写真Bの択一判断グループ別平均評点

Average score in alternative judgment groups (photo. B)

Table 4 グループAの写真Aに対する判断項目間の相関関係
Correlation between both judgment items of group A for photo. A

単相関 (写真A)	選好性	美しさ	力強さ	開放感	近代性	まとまり 感	親近感	安全性	人為性
選好性	1.00								
美しさ	0.59*	1.00							
力強さ	-0.01	0.50	1.00						
開放感	0.32	0.32	0.38	1.00					
近代性	0.50	0.03	-0.50	-0.44	1.00				
まとまり感	0.38	0.38	0.32	-0.18	0.58*	1.00			
親近感	0.49	0.30	0.10	-0.02	0.03	0.13	1.00		
安全性	0.65**	0.27	-0.42	-0.35	0.85**	0.53*	0.43	1.00	
人為性	0.38	0.14	-0.28	-0.34	0.58*	0.44	0.36	0.53*	1.00

**：無相関の検定で1%有意の関係 *：無相関の検定で5%有意の関係

Table 5 グループBの写真Bに対する判断項目間の相関関係
Correlation between both judgment items of group B for photo. B

単相関 (写真A)	選好性	美しさ	力強さ	開放感	近代性	まとまり 感	親近感	安全性	人為性
選好性	1.00								
美しさ	0.76**	1.00							
力強さ	0.03	0.11	1.00						
開放感	0.65**	0.47*	-0.20	1.00					
近代性	-0.46*	-0.46*	0.18	-0.70**	1.00				
まとまり感	-0.10	0.12	-0.36	-0.37	0.22	1.00			
親近感	0.30	0.11	-0.27	0.28	-0.22	-0.37	1.00		
安全性	0.29	0.47*	-0.12	0.23	-0.40	0.45*	-0.08	1.00	
人為性	-0.48*	-0.40	-0.19	-0.61**	0.52*	0.59**	-0.30	0.15	1.00

**：無相関の検定で1%有意の関係 *：無相関の検定で5%有意の関係

Table 6 択一判断で選択した景観を好ましいと評価した要因
Factor to evaluate landscape selected by alternative judgment as desirable

グループ A			グループ B		
写真 A	安全性	開放感	写真 B	美しさ	開放感
標準偏回帰係数	0.862**	0.622**	標準偏回帰係数	0.586**	0.370*
修正済決定係数	0.72		修正済決定係数	0.65	
修正済重相関係数	0.85		修正済重相関係数	0.81	

・P値の有意確率：**は1%で有意，*は5%で有意
・VIF値で多重共線性の確認を行ったが，多重共線性は発生していないと判断した。

プA_E)，写真Bは4人(グループB_E)であった。

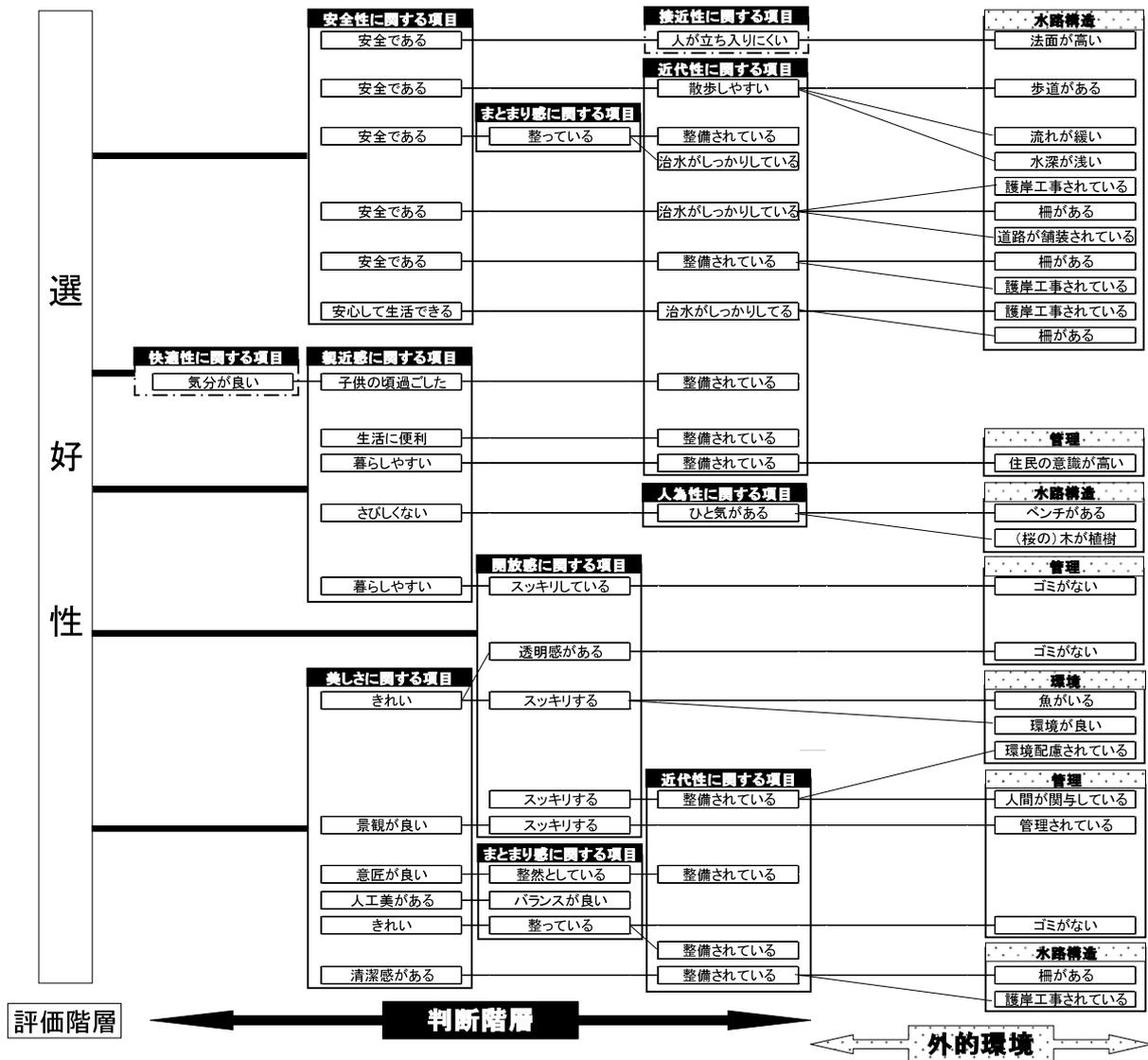
a 写真Aを好ましいとした群(グループA_E)の構造

グループA_Eの写真Aの評価構造(Fig.6)を見ると，写真から読み取っている情報として，

- ・柵がある，護岸工事されている，法面が高い等の整備水準に関する情報【水路構造】。
- ・ゴミがない，人間が関与している，住民の意識が高い等の管理水準に関する情報【管理】。

が大半を占める。

グループA_Eのうち，水路構造に関する情報を写真から読み取った人は，整備されていることや治水がしっかりしている等に情報を整理し(以下下位の判断階層と定義する)，安全であるや暮らしやすいといった判断(以下上位の判断階層と定義する)をしている。管理に関する情報を写真から読み取った人は，スッキリするや整っている等の下位の判断から美しい，や暮らしやすいといった上位の判断をしている。



※「接近性に関する項目」と「快適性に関する項目」は、アンケート調査における質問項目では設定されなかった。

Fig.6 グループ A_E の写真Aの判断構造
Judgment structure of photo.A of group A_E

b 写真Bを好ましいとした群（グループB_E）の構造

グループB_Eの写真Bの判断構造（Fig.7）を見ると、写真から読み取っている情報として、

- ・植物がある，土がある，水辺にアプローチしやすい等水路の構造に関する情報。【水路構造】
- ・管理されている，地域住民の関心が高い等管理水準に関する情報。【管理】

が大半を占める。

グループB_Eで水路構造のうち、植物があるや土がある等の情報を読み取った人は、生物がいそうや自然がある等の下位の判断を経て、美しい、気分が良い等の上位の判断をしている。また、アプローチしやすい構造だと考えた人は、水に触れる等の下位の判断を経て、自然を楽しめ、安全であるとの上位の判断している。また、管理されていることや地域住民の関心が高いこと等の管理

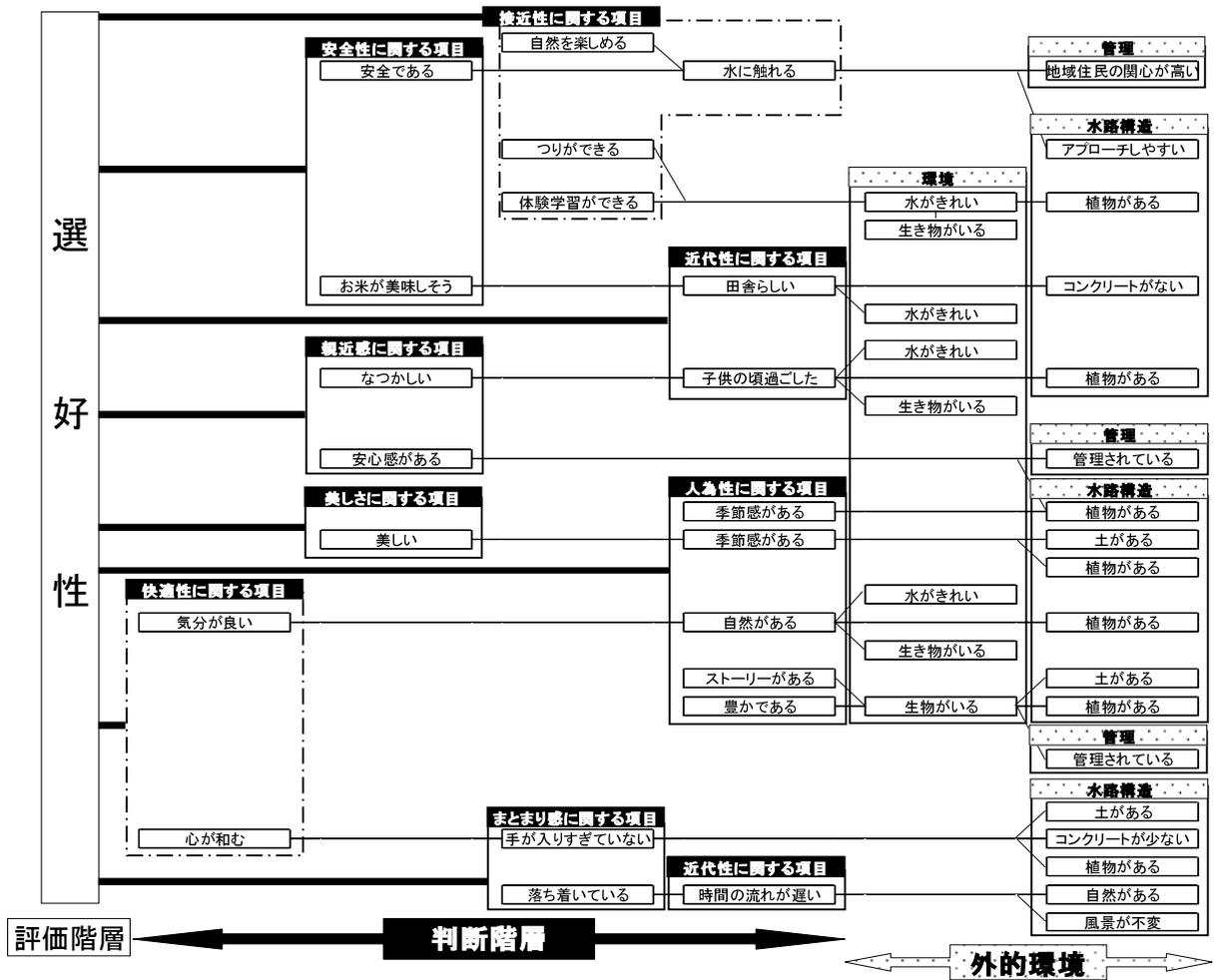
に関する情報も、生き物がいることや水に触れるといった下位の判断から、ストーリーがある、安全である、自然を楽しめるといった上位の判断に結びついている。

3 水路2景の評価構造の構築

アンケート調査の結果とインタビュー調査の結果を連結して（Fig.8）写真A、写真Bそれぞれの評価構造を構築した。

a 写真Aの評価構造

アンケート調査で示したグループAの評価構造とインタビュー調査で得られたグループA_Eの評価構造の関連を考える。Fig.6に示したように、インタビュー調査で示された判断階層に位置する言葉をグループ分けしたところ9つのグループが作成された。この内、「快適性に関する項目」と「接近性に関する項目」以外は、アンケート調査の質問項目と関連する項目であると考えられ



※「接近性に関する項目」と「快適性に関する項目」は、アンケート調査における質問項目では設定されなかった。

Fig.7 グループ B_E の写真Bの判断構造
Judgment structure of photo. B of group B_E

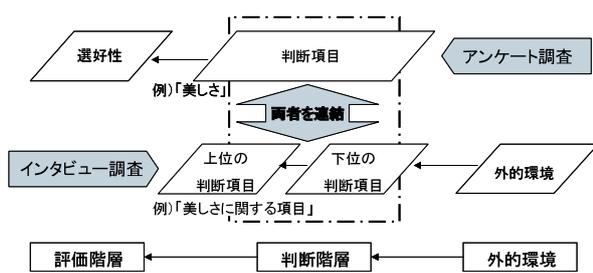


Fig.8 アンケート調査とインタビュー調査の連結
Combination between questionnaire and interview-survey

た（例えば「美しさに関する項目」とアンケート調査の判断階層の質問項目「美しさ」）。

重回帰分析からグループAの写真Aの「選好性」と関係する判断階層の質問項目として「安全性」と「開放感」が抽出された（Table 6）。

「安全性」は、Fig.6での「安全性に関する項目」で示された判断で説明される質問項目と考えられ、「接近性に関する項目」、「まとまり感に関する項目」、「近代性に関する項目」の上位判断階層であった。「接近性に関する項目」は、水路の法面が高く人が立ち入りにくいため安全であるとする判断であった。この項目はアンケート調査では設定しなかった判断である。「まとまり感に関する項目」は、整備され、治水がしっかりしているという「近代性に関する項目」の上位判断階層として位置づけられ、アンケート調査における「まとまり感」と関係する判断であると考えられた。「近代性に関する項目」は、写真Aから護岸工事がなされ、柵があるといった水路構造の様子を読み取った判断であることが示され、アンケート調査での「近代性」に関する判断であると考えられた。写真Aのような人工的な水路では、洪水等の災害と日常生活での事故に対する安全性が水路の好ましさの評価に重要な要因として指摘できる。

「開放感」は、Fig.6から主に「美しさに関する項目」と「親近性に関する項目」の下位に位置する「開放感に関する項目」で説明される質問項目と考えられた。その構造は、写真からゴミがない、管理されているといった情報を読み取り、スッキリする、透明度があるといった

に関する項目」の上位判断階層であった。「接近性に関する項目」は、水路の法面が高く人が立ち入りにくいため安全であるとする判断であった。この項目はアンケート調査では設定しなかった判断である。「まとまり感に関する項目」は、整備され、治水がしっかりしているという「近代性に関する項目」の上位判断階層として位置づけられ、アンケート調査における「まとまり感」と関係する判断であると考えられた。「近代性に関する項目」は、写真Aから護岸工事がなされ、柵があるといった水路構造の様子を読み取った判断であることが示され、アンケート調査での「近代性」に関する判断であると考えられた。写真Aのような人工的な水路では、洪水等の災害と日常生活での事故に対する安全性が水路の好ましさの評価に重要な要因として指摘できる。

「開放感に関する項目」を経て、きれい、景観が良いといった「美しさに関する項目（これはアンケート調査での質問項目「美しさ」に相当）」につながるものと、暮らしやすいといった「親近感に関する項目（同じく「親近感」に相当）」につながる構造が確認された。また、写真から魚がいる、環境が良いといった環境に関する情報を読み取り、スッキリするといった「開放感に関する項目」を経て「美しさに関する項目」であるきれいとの判断をする評価構造も確認された。

インタビュー調査から「選好性」との因果関係をもつ判断項目は、Table 6 に示した「安全性」、「開放感」に加えて「美しさ」、「親近感」、「快適性」が抽出された。「美しさ」では、「開放感」に加えて人工美が感じられるようなバランスの良い整備などの「まとまり感」を下位の判断項目とする構造が構築された。人工的な水路では意匠に加えゴミや水質などの管理水準が美しさの要件になると思われる。「親近感」では、護岸やベンチの整備と管理の情報に基づく「近代性」と「人為性」および「開放感」の下位判断を経て、住宅の近くにあるべき環境として日常生活を営む上での利便性を感じ取り、身近な環境と判断される構造が構築された。「快適性」はアンケート調査の質問項目としては設定しなかったが、子供のころ過ごした環境に似ているという「親近感」から、慣れ親しんだ環境と類似の景観の中で生活できることに気分がよと感じる判断の構造が構築された。

以上より、人工的な水路景観では、主に水路の構造や護岸の意匠、施設に関する情報（水路構造）と、ゴミがない等の管理に関する情報（管理）、環境が良い等の環境に関する情報（環境）の3つが外的環境階層として抽出され、それらに対する「接近性」、「近代性」、「人

為性」、「まとまり感」が下位の判断階層となり、「安全性」、「開放感」、「美しさ」、「親近感」、「快適性」という上位の判断階層を経て「選好性」につながる評価構造を示すことができた。この関係は、Fig.9 のようにまとめられた。

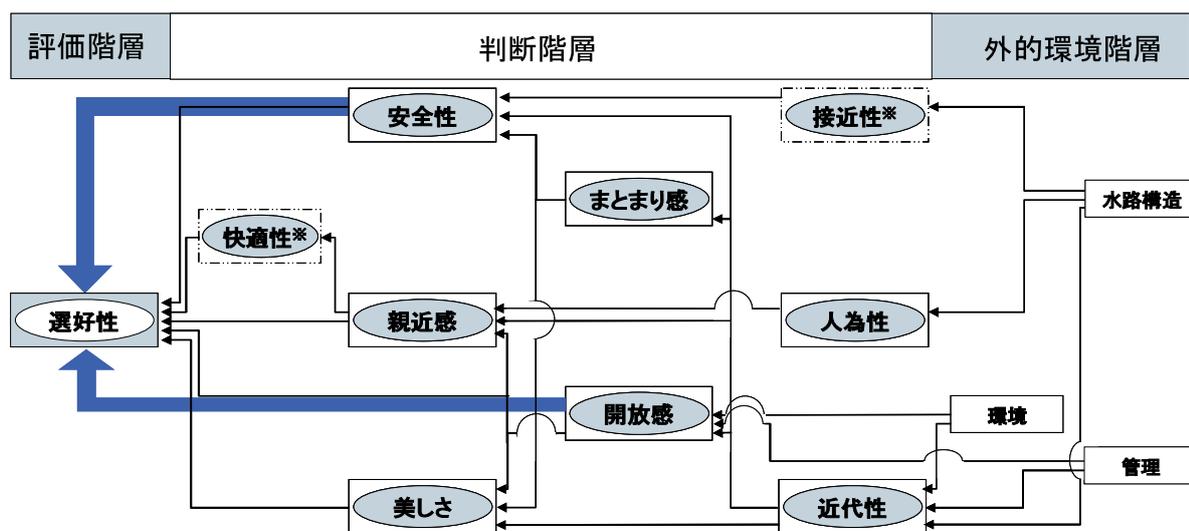
b 写真Bの評価構造

アンケート調査で示したグループBの評価構造とインタビュー調査で得られたグループB_Eの評価構造の関連を考える。Fig.7 に示したように、インタビュー調査で示された判断階層に位置する言葉をグループ分けしたところ8つのグループが作成された。この内、「快適性に関する項目」と「接近性に関する項目」以外は、アンケート調査の質問項目と関連する項目であると考えられた。

グループBの写真Bの「選好性」と関係する判断として、「美しさ」と「開放感」が重回帰分析により抽出された（Table 6）。

「美しさ」はFig.7で「美しさに関する項目」で説明される判断項目と考えられ、「人為性に関する項目」の上位判断階層であった。これは、写真から土がある、植物があるといった水路構造に関する情報を読み取り、「人為性に関する項目」である季節感があり美しいと判断し、それが「選好性」評価につながる構造である。

「開放感」を直接的に説明する言葉は、インタビュー調査から抽出することができなかった。しかし、判断階層の項目間の相関係数（Table 5）で「開放感」と高い相関関係を有した質問項目が「近代性」と「人為性」であったことから、伝統的や自然的と考えられる外的環境である、植物や土の存在や田舎らしさが関係することが予想される。この点については、グループB_Eの被験者数が少なかったことも原因と考えられ、今後、被験者を



※「接近性」と「快適性」は、アンケート調査における質問項目では設定されなかった。

← は、重回帰分析の結果「選好性」の説明変数として採用された判断項目との関係。

Fig.9 グループAの写真Aの評価構造
Evaluation structure of Photo. A of group A

増やすことで「開放感」の判断構造を明らかにしたい。

重回帰分析で「選好性」の説明項目として抽出されなかった残りの判断項目について検討する。「安全性」は、Fig.7から「安全性に関する項目」と強く関係を持つ判断と考えられ、水辺にアプローチしやすい（水路構造に関する項目）、地域住民の関心が高そう（管理に関する項目）とする情報を写真から読み取ることで、水に触れるとする下位の判断階層「接近性に関する項目」を経て「安全性に関する項目」につながる構造と、水がきれい（環境に関する項目）、コンクリートがない（水路構造に関する項目）という情報を読み取り、田舎らしいとする下位の判断階層「近代性に関する項目」を経て「安全性に関する項目」につながる構造が構築された。自然的な水路における「安全性」では、つりや水遊び等での安全と健全な米を生産できる環境を予測できることが重要で、人工的水路で求められた災害に対する安全と「安全性」の内容に違いが見られた。

「親近感」は Fig.7 での「親近感に関する項目」と、強い関係がある判断項目と考えられ、写真から管理されており地域住民の関心が高いといった管理に関する情報や、土がある、植物がある、アプローチしやすい等構造に関する情報を読み取ることで、「人為性に関する項目」と「接近性に関する項目」の下位判断を経て、安心感がある、なつかしいといった気分的な「親近感」や自然を楽しむ、釣りができる等の活動面での「親近感に関する項目」につながる構造が構築された。

「快適性に関する項目」は、写真から植物がある、土がある等の情報を読み取ることで、下位の判断階層である自然があるといった「人為性に関する項目」と手が入

りすぎていないといった「まとまり感に関する項目」を経る構造が構築された。

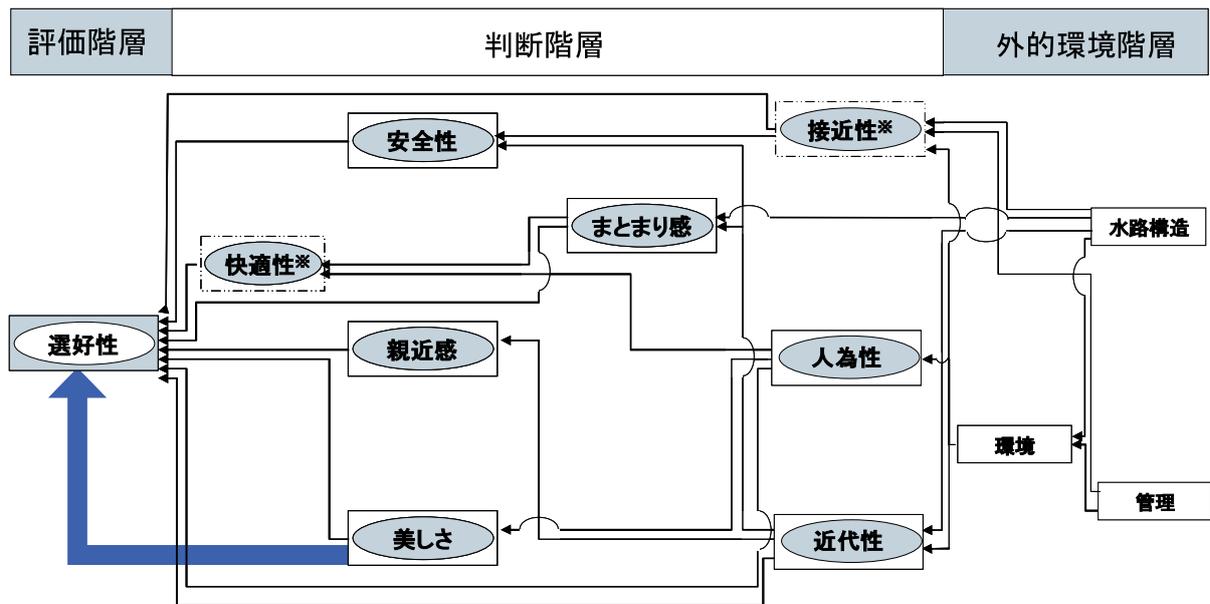
このように自然的な水路景観では、植物や土などの自然的要素からなる水路構造や生物の存在に関する情報と、管理され地域住民の関心が高いといった管理に関する情報、水がきれいや生き物がいるといった観光に関する情報の3つが外的環境階層として抽出され、それらに対する「接近性」、「近代性」、「人為性」、「まとまり感」が下位の判断階層となり、「安全性」、「美しさ」、「親近感」、「快適性」という上位の判断階層を経て「選好性」につながる評価構造を示すことができた。この関係は、Fig.10 のように整理された。

IV 考察

水路2景に対する評価構造を、アンケート調査による評価階層と判断階層間の関係、インタビュー調査による判断階層と外的環境階層の関係に分けて構築し、それらを統合することで評価構造を構築した。ここでは、得られた評価構造から水路2景の評価構造の相違と2景の好ましさの択一評価を決定する要因を水辺に関する個人の経験の有無との関係を含めて考察する。

1 水路2景の評価構造の相違

水路2景の評価構造 (Fig.9, Fig.10) を比較してみると、どちらも上位の判断階層として「安全性」、「美しさ」、「親近感」、「快適性」が、下位の判断階層として「接近性」、「近代性」、「人為性」、「まとまり感」から構成され、一見類似した構造となっている。しかし、重回帰分析の



※「接近性」と「快適性」は、アンケート調査における質問項目では設定されなかった。
 ←は、重回帰分析の結果「選好性」の説明変数として採用された判断項目との関係。

Fig.10 グループBの写真Bの評価構造
 Evaluation structure of Photo.B of group B

結果からは人工的な水路では「安全性」、自然的な水路では「美しさ」が重視され、2景の水路構造は外的環境と判断階層との結びつきが異なる傾向も見られた。例えば、「安全性」は人工的な水路では治水や生活利便上安全と考えられているが自然的な水路では水路への接近が容易なため、自助努力で解決しやすい（例えば水路に転落しても自力で這い上がれる）ため安全と全く異なる構造を示し、水路設計の際は、住民がどのような安全を求めているかを十分に吟味する必要がある。一方、水路の管理に関する外的環境の情報は、2景の水路ともに「選好性」評価につながる重要な要素となっており、このことは、日常的に地域住民等による水路や水路周りのゴミ掃除、雑草抜き等の管理の実施が水路への選好性向上に有効であることを示唆している。

最後に、Fig.4, Fig.5, Table 4, Table 5の結果より、グループ間で写真Aと写真Bの評価、判断に違いがあったことについて、その原因と考えられる被験者の属性と択一判断および評価構造との関係を考察する。

2 人間の過去の水路と関わる活動の有無が評価構造に及ぼす影響

グループA (15人)、グループB (21人)、グループC (14人) (Table 3) について過去の農業や水辺に関する経験 (Table 1の質問でQ3～Q5) でクロス集計した結果をTable 7に結果を示す。農業経験、子供の頃水辺で遊んだ経験、水路の管理作業経験の3つの経験のうち、子供の頃水辺で遊んだ経験がある被験者の多くは写真Bの水路景観を良いとし、特にグループBは全ての被験者が子供の頃水辺で遊んだ経験があった。そこで、子供のころ水辺で遊んだ経験の有無が評価構造に及ぼす影響を検討するために、評価階層と判断階層の全ての質問項目と子供の頃水辺で遊んだ経験の有無でクロス集計を行い、 χ^2 検定を行った。その結果、写真Bに対する「美しさ」の判断と子供の頃水辺で遊んだ経験の有無のみが1%で有意な関係を持つことが示された (Table 8)。つまり、子供の頃水辺で遊んだ経験がある被験者の多くは、写真Bの水路景観を「美しい」と判断するが、子供の頃水辺で遊んだ経験がない被験者は、写真Bの水路景観を少なくとも「美しい」とは判断していないと予測される。

農業経験や水路の管理作業経験についても、経験と各質問項目間のクロス集計を行い、 χ^2 検定を行ったが有意な関係は見られなかった。

3 子供の頃水辺で遊んだ経験の有無が好ましさの評価に及ぼす影響

子供の頃水辺で遊んだ経験の有無で、水路2景の「選好性」評価を決定する判断に影響を与える判断項目の違いを検討するために子供の頃水辺で遊んだ経験の有無ごとに目的変数を評価階層に、説明変数を判断階層にした重回帰分析を行った (Table 9)。

子供の頃水辺で遊んだ経験がある被験者では、両写真ともに「美しさ」が選択され、「美しい」と判断できる水路景観に対して「選好性」評価を向上させることが示唆された。「美しさ」の判断に影響する評価構造をみると、グループAは、スッキリしている（「開放感」）、暮らしやすい（「親近感」）との判断を重視すると考えられ、グループBは、自然がある（「人為性」）との判断を重視するものと推察される。

Fig.7で示したグループBの写真Bの評価構造では、写真には写っていない「生き物がいる」とする外的環境を写真から読み取った人がいたが、このような人は、子供の頃水辺で遊んだ経験があり、写真Bのような植物が生え、土があるような水路構造を持つ水辺や水路には、生き物がいる可能性が高いことを経験上知っているため、想像力を働かすことができたものと推察される。Fig.7で示された「アプローチしやすい→安全である→好ましい」の評価構造も、子供の頃水辺で遊ぶ中で経験的に知った事実であると考えられる。このように、子供の頃水辺で遊んだ経験は、写真Bの択一判断にも影響を与えたと考えられる。

子供の頃水辺で遊んだ経験がない被験者は、グループBにはいなかった。この被験者群は、写真Aを「安全」で「開放的」だから好ましいと評価しており、Fig.6より護岸工事され治水対策された安全性と、ゴミがなくスッキリした開放感を好ましいと評価していることから、生活上安全で便利で快適な水路を求めていると推察される。

まとめると、グループAは子供の頃水辺で遊んだ経験

Table 7 個人の水辺での活動に関係した過去の経験
Past experience for individual action in waterside

		写真Aが良い (グループA)	写真Bが良い (グループB)	どちらでもない (グループC)	合計
農業経験	ある	1	4	2	7
	ない	14	17	12	43
子供の頃水辺で遊んだ経験	ある	8	21	8	37
	ない	7	0	6	13
水路の管理作業経験	ある	3	5	6	14
	ない	12	16	8	36

Table 8 美しさ(写真B)と子供の頃水辺で遊んだ経験の有無のクロス集計

Cross table between experiences of playing in waterside in childhood and 'Beauty' (Photo.B)

子供の頃水辺で遊んだ経験	←見苦しい 美しさ(写真B) 美しい→					合計
	1	2	3	4	5	
1(ある)	2	6	11	14	4	37
2(ない)	0	2	11	0	0	13
合計	2	8	22	14	4	50

χ^2 検定の結果,1%で有意な関係を有した。

の有無に拘らず,日常生活の安全性と利便性や定期的な管理があると判断できる水路景観を好み,グループBは子供の頃水辺で遊んだ経験から写真Aにはない長所を想像できるために自然があると判断できる水路景観を好んだと考えられる。

V 結 言

本研究では,人工的と自然的な水路景観に対する評価構造の相違に関する知見を得るために,対象とする水路景観に予見をもたない農村工学研究所事務系職員を被験者とした仮想の住民集団を対象として,人工的な水路景観と自然的な水路景観に対するアンケートとインタビューの仮想実験を行った。得られたデータを,人間の認知構造を考慮した階層型評価構造モデルで解析し,その評価構造の違いや選好性の択一判断に影響を及ぼす要因の検討を行い,以下の結果を得た。

1. 人工的な水路景観(写真A)を好む人(グループA)は,災害に対する安全性や生活のしやすさを重視し,それを満たす水路景観を好む傾向がある。
2. 自然的な水路景観(写真B)を好む人(グループB)は,生き物が存在しそうな水路構造を好む傾向がある。
3. 2景の択一判断の決定に影響した要因は,子供の頃水辺で遊んだ経験の有無であると思われる。その理由は,グループBの評価構造では,写真から読み取った情報から遊び等を通した経験がないと発想しづらい情報の整理をしていることによる。一方,グループAは,日常の生活経験から好ましい水路を想起したと考えられる。

得られた結果は,松浦ら(1986)などの報告に沿いつつも,その構造を具体的に提示したもので,水路景観の選好性とその判断の合理性があると筆者は考える。しかし,ここで得られた結論は,農村工学研究所事務系職員50名という小規模な仮想社会の調査に基づくものである。個人の過去の経験も偏ったデータにならないように,研究職員を排除する等の対策を講じたが,本研究で示した結果が一般的かどうかは,今後の調査で明らかにしたい。よって,住民の評価構造を明らかにする

Table 9 子供の頃水辺で遊んだ経験の有無を考慮した水路景観2景の評価に影響を与えた判断

Judgment that influences evaluation of two canal landscapes related presence of experience playing in waterside in childhood

子供の頃水辺で遊んだ経験がある(37人)			
写真A**	美しさ	開放感	親近感
標準偏回帰係数	0.463**	0.301*	0.252*
修正済決定係数		修正済重相関係数	
0.581		0.762	
写真B**	美しさ	人為性	
標準偏回帰係数	0.531**	-0.254*	
修正済決定係数		修正済重相関係数	
0.577		0.760	
子供の頃水辺で遊んだ経験がない(13人)			
写真A**	安全性	開放感	
標準偏回帰係数	0.796**	0.322*	
修正済決定係数		修正済重相関係数	
0.781		0.884	
写真B**	力強さ		
標準偏回帰係数	0.561**		
修正済決定係数		修正済重相関係数	
0.252		0.502	

**は1%で有意,*は5%で有意

ためには,今後,被験者を増やした調査によって本研究で得られた結果を検証する必要がある。

謝 辞

評価グリッド法の適用方法に関して,開発者である関東学院大学の讚井純一郎教授から貴重な助言を頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 本庄宏行・藤本信義・橋伸夫・筒井義富・小林宏康・岡本佳久・中島大助(1999):農村地域の用水路に対する居住者の関わりと評価に関する研究-集落の形態の特性からみて-,農村計画論文集,145-150.
- 2) 小林宏康・筒井義富・小嶋義次・千賀裕太郎(2003):コンジョイント分析による水路景観の評価構造の解析,農土論集 No223,1-10
- 3) 小池俊雄・玉井信行・高橋裕・泉典洋・岡村次郎(1988):都市河川空間の評価構造に関する研究,土木計画学研究論文集 No6, 105-112.
- 4) 児島隆政・古谷勝則・油井正昭(1995):自然景観における好ましさの評価構造に関する研究,ランドスケープ研究 58(5), 177-180
- 5) 松浦茂樹・島谷幸宏(1986):都市河川のイメージの評価と河川環境整備計画,土木計画学研究論文集

- No4, 205-212.
- 6) 三阪和弘・小池俊雄 (2006) : 河川環境の評価構造における流域共通性と地域差, 土木学会論文集 No.810/ II -74, 115-125
 - 7) 村川三郎・飯尾昭彦・西田勝・西名大作 (1986a) : 長良川・筑後川・四万十川の特性と河川環境評価の分析, 日本建築学会計画系論文報告集 No.363, 9-19
 - 8) 村川三郎・西名大作 (1986b) : 住民意識による都市内河川環境評価の分析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.366, 42-52
 - 9) 日本建築学会 (2006) : 建築・都市計画のための空間学事典 [改訂版], 改訂版第2刷, 214, 井上書院, 東京
 - 10) 大田征六・長堀金造・赤江剛夫 (1996) : 斐川町地区用水路の住民による景観評価, 農村計画学会誌 Vol.14, No4, 38-48
 - 11) 讃井純一郎・乾正雄 (1986) : レパートリー・グリッド発展手法による住環境評価構造の抽出, 日本建築学会計画系論文集 No367, 15-21.
 - 12) 佐竹俊之・上甫木昭春 (2007) : 人々が地域の水辺に対して抱く愛着に関する研究, ランドスケープ研究 70 (5), 663-668
 - 13) 島谷幸宏 (1998) : 景観からみた平常時の河川目標流量の設定に関する研究, 土木学会論文集, No587/ VII -6, 15-26
 - 14) 田野倉直子・横張真・山本勝利・加藤好武 (1999) : 地元住民による水田景観の認知構造, ランドスケープ研究 62(5), 727-732

Study on the evaluation structure for canal landscape in rural area by virtual experiment

HIROSE Yuichi*, MATSUMORI Kenji*, MINETA Takuya* and ISHIDA Kenji*

Summary

In order to obtain the knowledge on residents' evaluation structure for landscapes with an artificial and a natural canals, we carried out the virtual experiment where the questionnaire and the interview about two photographs with an artificial and a natural canals to a virtual residents' mass that consists of the staff of office in the National Institute of Rural Engineering (NIRE). They don't have the preliminary knowledge of the two canals. The data from the experiment was analyzed using the hierarchical Evaluation-Grid-Method (EGM) that is considered human's cognitive construct. We study the differences in the evaluation structure and the factor that influenced the alternative decision on the basis of the analytical results. The reason why the staff of office in NIRE is regarded as the residents' mass is to avoid the interventions caused by residence in areas photographed to the evaluation structure. The interventions, for instance, are experiences of daily life and of smell from the canals, etc. The results are summarized as follows;

1. Group A, who feels agreeable to the photograph A with the artificial canal, considers that safety against the disaster and easiness of life are important and has a tendency to like the canal landscape with a feeling of safety and easiness.
2. Group B, who feels agreeable to the photograph B with the natural canal, has a tendency to like the canal landscape with the survival atmosphere of animal.
3. The factor that influences the decision of the alternative two photographs seems to be with or without the experience of playing in the waterside in childhood because the evaluation structure of the group B shows the process of processing information with linkage between the experiences of playing in the waterside and information obtained some hint from the photograph, while the group A seems to deiced a desirable photograph from the experiences of daily life.

Keywords : Evaluation-Grid-Method, questionnaire, interview, canal-landscape and rural-planning

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

友正達美*・山下 正*

目 次

I 緒 言	131	III 普及側と用水供給側が連携した用水管理の 対応の方向	135
II 水稲の高温障害と用水管理の課題	131	IV 結 言	136
1 水稲の高温障害の状況	131	参考文献	137
2 高温障害対策技術の分類	131	Summary	138
3 高温障害対策と用水需要の関係	132		
4 高温障害対策における用水管理の課題	132		

I 緒 言

近年、水稲生育期間の登熟期の高温を原因とする米の品質低下、いわゆる高温障害の発生が問題となっており、その対策が急がれている。これまで品種改良や栽培技術の観点から、水稲の高温障害対策として様々な方法が提案されており、農業改良普及センターや農業協同組合の技術指導部門等（以下、普及側と記す）によって農家への指導がなされているが、その中には、作期の移動や掛け流し灌漑等、慣行栽培とは異なる用水管理を行うものがあり、これらは灌漑期間や期間中の用水量、すなわち用水需要を変化させる。一方、土地改良区等による用水の供給は、灌漑地区の用水計画に基づく水源の利用可能量や水利施設の送水能力に制約されているため、このような高温障害対策による用水需要の変化に充分に対応できないことが多い。そのため、高温障害対策に当たっては、用水の需要と供給のバランスを考慮した上で、実施可能な方法を選択し、農家への対策の実施を促すことが必要になるが、その方法は充分検討されていない。

そこで、水稲の高温障害対策によって用水需要がどのように変化し、その実施上どのような課題があるかを、文献に基づいて整理し、今後、用水の需給バランスを考慮した高温障害対策を実施するための、普及側と用水供給側が連携した対応の方向について検討した。

II 水稲の高温障害と用水管理の課題

1 水稲の高温障害の状況

西日本を中心に東北以南の広い地域で、米の品質低下が問題となっている。米は等級によって価格差があり、農協による集荷価格では、一等米に対して二等米は60kg当たり1,000円程度の安値となることから（米穀データバンク、2008）、米の収量が同一であっても、品質低下は農家に経済的な損失をもたらす。

米の等級低下の主な原因は、①白未熟粒の発生、②充実不足、千粒重の低下、③胴割粒の発生である。これらの品質低下のメカニズムについてはなお不明な点が多いが、出穂後20日間の平均気温が25度付近を越えると一等米の比率が低下する傾向が見られること、白未熟粒については、出穂後約20日間において、日平均気温が26～27℃の場合に発生が増加すること、胴割粒については、出穂後10日間の最高気温が32℃以上で発生が増加することから、出穂後の登熟期の高温が原因と考えられている（森田、2008a）。

全国の出穂最盛期後20日間の平均気温は、過去30年間（1973～2002年）で24.6度から26.4度に上昇しているが、今後、地球温暖化の進行に伴い、更に平均気温が上昇し、高温障害が多発するのではないかと懸念されている（森田、2008a）。

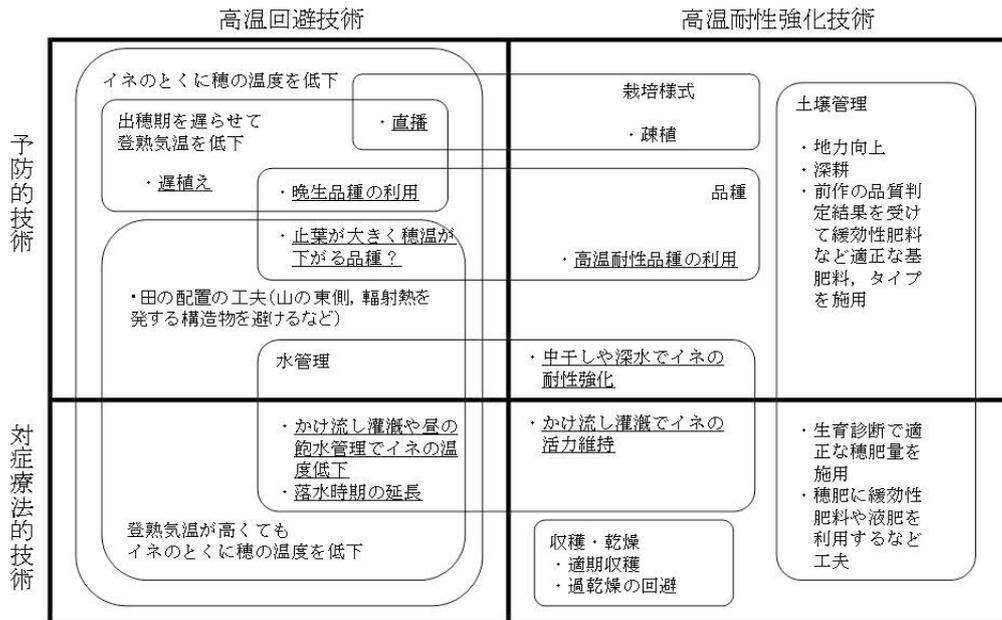
2 高温障害対策技術の分類

このような登熟期の高温による障害発生を克服する対策として、これまでに品種、栽培様式、土壌管理等、さまざまな面から対策技術が提案されている。森田（2008b）はこれらの技術の性格を、大きく二つの視点から分類した（Fig. 1）。一つめの視点は、対策を行う時期であり、①登熟期や高温になる以前に対策を行う予防的技術と、②実際に高温になってから、または高

* 農地・水資源部 用水管理研究室

平成20年11月5日受理

キーワード：水稲、高温障害、用水管理、水利施設、地球温暖化



※ 著者注: 下線は用水需要を変化させる可能性のある技術 (著者加筆)

Fig. 1 高温登熟障害を克服する技術の性格による分類 (森田, 2008b)

Classification of characters of measures against rice grain damage under high temperatures during ripening of rice

温が予想されてから行う対症療法的技術に分類される。もう一つの視点は、高温への対処方法であり、①登熟期に高温に当たらないようにする高温回避技術と、②登熟期に高温になっても登熟を良好にする高温耐性強化技術に分類される。この二つの視点の組み合わせにより、高温障害対策は①予防的・高温回避技術、②予防的・高温耐性強化技術、③対症療法的・高温回避技術、④対症療法的・高温耐性強化技術、の4つに分類される。この分類は、高温障害対策における用水管理の性格を理解する上で有用と考えられることから、以下、この4分類に従って記述を進める。

3 高温障害対策と用水需要の関係

これまで提案されている様々な高温障害対策の中から、灌漑期間や期別用水量に影響を及ぼす可能性のあるものを取り出し、Fig. 1に従って性格を分類した上で、技術の内容、用水需要への影響を文献情報に基づいて整理した結果をTable. 1に示す。

予防的技術は高温障害が発生する登熟期より以前から対策を行うため、用水管理の中に組み込まれ、毎年用水需要が発生する。一方、対症療法的技術は、高温障害発生の場合にのみ適用されることから、毎年用水需要が発生するわけではない。また、高温回避技術は、水稻の出穂期と高温期が重ならないように出穂の時期をずらすか、または高温期に水稻の温度を下げることを目的としている。前者では灌漑期間が変化し、後者では圃場の湛水深を操作して冷水の導入または温水の排除を図るため、高温期の用水需要が変化する。

ここで特に注目されるのは、対症療法的・高温回避技術としての掛け流し灌漑である。掛け流し灌漑は、気温より低い水温の用水によって水稻を直接冷却しようとするものであり、他の対症療法的・高温回避技術である飽水・保水管理よりも白未熟粒や胴割粒の発生を抑制する効果が高い (Fig. 2) (北畠ほか, 2005)。そのため、用水管理による高温障害対策の代表的な方法と考えられている。しかしながら、用水によって水稻を冷却するためには、①水田に流入する水温が気温より低いこと、②水田内で水温が上昇しないうちに水を入れ替えるだけの用水量を確保すること、の2点が必要になる。宮城県 (2008) の指針では、掛け流し灌漑の用水量は約 300 mm/day ないしそれ以上という膨大な量に上っている。

次に、このような高温障害対策における用水管理の実施状況とその課題について検討する。

4 高温障害対策における用水管理の課題

a 普及側の高温障害対策の実施状況

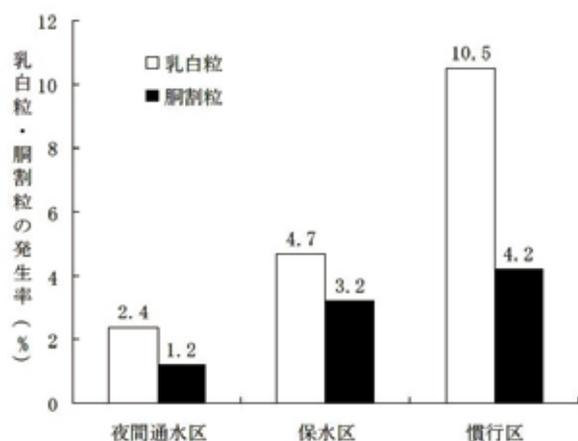
農林水産省生産局が、平成 19 年度の夏季に全国で取られた高温障害への適応策について、効果と問題点を地域別にとりまとめた結果 (農林水産省生産局, 2008) をもとに、導入技術、Fig. 1 の4分類による技術の性格、地域、効果および問題点等を整理した。その結果をTable. 2に示す。

表中の網掛け部分は、適応策の問題点として、「かんがい用水の十分な確保」が挙げられた導入技術等である。また、問題点の欄の記載に地域名がない場合は、導入された全ての地域でそれが問題になったことを示

Table.1 用水管理に関係する高温障害対策とその用水需要への影響
Water management techniques for high temperatures during ripening of rice and influences of them on water demand

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

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



※ 著者注：夜間通水区は出穂から刈り取り10日前までの期間、夜間に掛け流し灌漑を行った試験区。保水区は、同期間に保水管理を行った試験区で管理内容は本文の飽水・保水管理と同様。

Fig. 2 水管理が品質に与える影響（北嶋ほか，2005）
Influence of water management on rice grain quality

す。

11種類の導入技術のうち、「適期防除」「畦畔草刈り」はカメムシ類による斑点米の発生を軽減するための技術である。この2つを除いた9技術について見ると、うち5技術について「かんがい用水の十分な確保」が問題点として挙げられている。更に「高温耐性品種の導入」を除く4技術については、導入されたすべての地域で用水確保が問題点として挙げられている。このように、多くの地域で「かんがい用水の十分な確保」が問題になっているのは、高温障害対策の実施に当たって、用水需給が充分定量的に検討されていないことによるものと考えられる。

b 用水供給側の対応の状況

農林水産省農村振興局が、用水管理を行っている面積規模1,000ha以上の土地改良区301地区を対象に行ったアンケート調査によれば、平成19年に高温障害が発生した土地改良区は107地区であった。平成19年に土地改良区が行った対応の状況をFig. 3に示す。作期の移動（58地区）、水管理の変更（40地区）等の対応が

Table.2 平成19年度に取られた高温障害への適応策とその問題点等
Adaptation techniques for high temperatures during ripening of rice in 2007 and problems of them

導入技術等	技術の性格による分類		地域	効果等	問題点
遅植え	予防的	高温回避	東北、関東・北陸、中国・四国、九州	被害粒の減少	かんがい用水の十分な確保
直播	予防的	高温回避	関東・北陸	被害粒の減少	一部県においては効果が現れていない
早期移植の回避、疎植栽培の導入	予防的	高温回避、高温耐性強化	東海・近畿	被害粒の減少	かんがい用水の十分な確保
適正な施肥・水管理	予防的、対症療法的	高温耐性強化	九州	被害粒の減少	—
高温耐性品種の導入	予防的	高温耐性強化	関東・北陸、東海・近畿、九州	被害粒の減少	かんがい用水の十分な確保（東海・近畿）
早期落水の防止	対症療法的	高温回避	東海・近畿、中国・四国、九州	被害粒の減少	かんがい用水の十分な確保
掛け流しかんがい	対症療法的	高温回避	東北、関東・北陸	被害粒の減少	かんがい用水の十分な確保
もみ数制御のための肥培管理	対症療法的	高温耐性強化	関東・北陸、東海・近畿、中国・四国	被害粒の減少	高温による肥効の現れ方が不安定（東海・近畿） 適期移植、適正品種の選定等と組み合わせた総合的な対策が必要（中国・四国）
適期収穫	対症療法的	高温耐性強化	関東・北陸、東海・近畿	被害粒の減少	生産者への気象情報の迅速な提供が必要（関東・北陸） 普通期の前進化による早生品種との作業競合（東海・近畿）
適期防除	カメムシ類の防除対策であり、直接的な高温障害対策ではない。		東北、関東・北陸、東海・近畿、中国・四国、九州	被害粒の減少	班点米カメムシ類の生態把握が必要（東北） ドリフトの回避から防御回数が増加傾向（東海・近畿）
畦畔草刈り			関東・北陸		

農林水産省生産局（2008）をもとに著者が加筆して作成

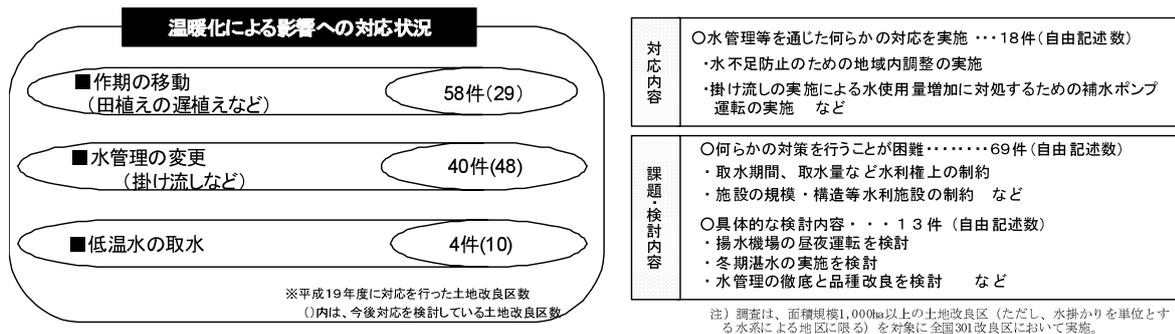


Fig. 3 地球温暖化による影響への対応（農村環境の保全に関する研究会，2008）

Measures against influence of the global warming

行われている（選択式・複数回答）。しかしながら、水利権や水利施設の制約等から対策を行うことが困難な地区（自由記述）が、69にのぼっている（農村環境の保全に関する研究会，2008）。

農業用水の供給側としては、用水需要の変動を伴うような高温障害対策の実施に対して、十分な用水供給が行えない場合があることは、きわめて当然である。

一般に水田の用水計画では計画時点で想定した用水需要に基づいて必要水量を積み上げて算定されており、用水需要の変化に対応するために水資源の「余裕分」をあらかじめ確保することは、その変化が確実にされない限り水利権上認められるものではない（水利権実務研究会，2005）。また、水利施設の送水能力は、用水計画に基づくピーク用水量（通常は代かき用水量）に

基づいて設計されており、それを超える用水供給は不可能である。代かき用水量は漏水田でも 150～250 mm とされているが（農林水産省構造改善局，1993），これは全ての圃場で一斉に入水するのではなく，代かき日数として1週間程度が想定されているため，仮に代かき日数を仮に5日間とすると 30～50mm/day の用水量となる。他方，掛け流し灌漑は，全ての圃場で一斉に 300 mm/day を入水するものであり，用水計画の想定をはるかに超えている。そのため水利施設は掛け流し灌漑を地区全体で同時に行える水量を送水する能力を持っていない。

そのため，用水計画の想定と異なる用水需要への対応は，水源については地区内の渓流水，地下水，排水の反復利用等，水利権上の制約のない水源を利用するか，生産調整等による用水の余裕分を利用する他はない。また，送水能力についても，掛け流し灌漑が実際に行える圃場はごく一部に限られると考えられる。

c 高温障害対策における用水管理の課題

このように，高温障害対策における用水管理を実施する上で，用水供給側の制約が強い場合は，必要に応じて普及側の対策を変更する等して，農家に指導する必要がある。また，その際に用水供給側は，高温障害対策のための用水需要の変化を認識した上で，将来の水利権や水利施設の更新において，用水供給の制約を緩和できるかどうか検討する必要がある。このような指導，検討を行うには，普及側と用水供給側の連携が必要不可欠であり，その対応の方向を明らかにすることが，高温障害対策における用水管理の課題と考えられる。

III 普及側と用水供給側が連携した用水管理の対応の方向

従来充分に行われてこなかった，普及側と用水供給側が連携した用水管理の対応の方向として，望ましいと考えられる検討手順を Fig. 4 に示す。

①普及側による用水管理の提案：普及側は，灌漑地区内の水稻の品種，栽培時期から，高温障害対策における用水管理を提案する。実際に高温障害の発生が予測される場合には，気温，水稻の生育の推移から高温障害発生危険のある範囲を明らかにする。

②用水供給の可否の検討：用水供給側は，提案された用水管理が実施できるかどうか，灌漑期間，期別の用水量，用水水温の情報に基づいて検討する。このうち，水温については従来観測しておらずデータの蓄積がない場合が多いと考えられるが，対症的・高温回避技術としての掛け流し灌漑や夜間の灌漑の有効性は，水温と気温の関係が重要な判断材料になる。その際，水源からの取水地点の水温はもちろん，送水過程での水温

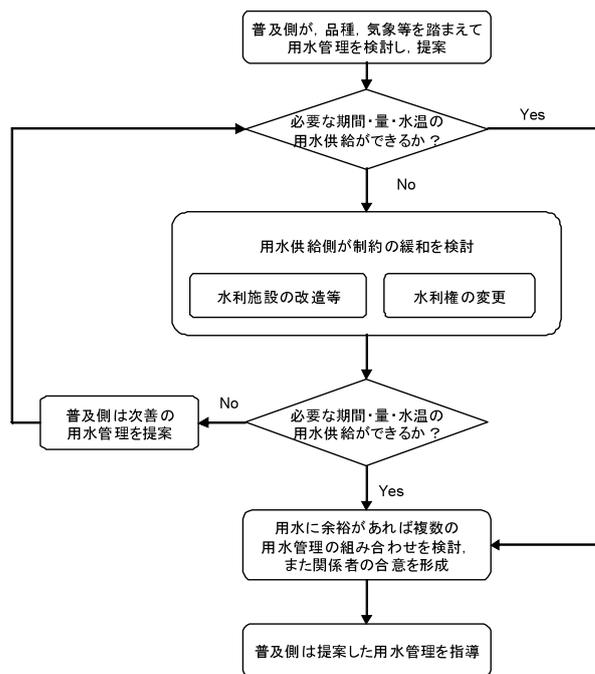


Fig. 4 普及側と用水供給側が連携した用水管理の検討手順
Procedure for water management against grain damage under high temperatures during ripening of rice with corporation of agricultural extension sector and agricultural water supply sector

変化にも留意する必要がある。水源の水温が低くても，送水の過程で水温が上昇したり，排水の反復利用等によって水温の異なる他の水と混合するなどして，末端の圃場に到達するまでに水温が変化している場合があるためである。例えば，用水供給側は主要な水利施設で，普及側は生育調査を行っている圃場およびその周辺等で，それぞれ水温の観測を行い，観測結果を蓄積して共有する等の連携が考えられる。実際に高温障害の発生が予測される場合には，水源からの取水制限等想定していない制約が無い確認する。

③用水供給の制約緩和の検討：用水供給が不可能な場合，用水供給側は必要に応じて制約の緩和が可能か検討する。具体的な方法としては，水利施設の改造等，水利権の変更が考えられる。

ア．水利施設の改造等：水利施設の改造等が可能であれば，高温障害対策のための用水需要に対応するために，必要な施設の追加や設計諸元の見直しを行う。その際，これまでの用水計画は主に水量と水質汚濁に関わる水質項目に関心が向けられていたが，対症的・高温回避技術を行う場合，前述のように水温が重要な指標となる。水温の変動を監視し，なるべく温度の低い用水を末端の水田まで送水できる水利施設を整備することが重要である。具体的には，主要な水利施設に水温計を設置し，普及側や農家に適時の情報提供を行う整備が考えられる。また，水源に水深等による温度差がある場合には，取水施設の改造時に，従来の取水構造に低温の水の取水が可能となる機能を付加すること，送水過程での水温上

昇を抑制するための用水路の地下埋設、排水路からの反復水等温度の異なる水の混合がある場合には、必要に応じて水温の高い排水を混合させないよう排水経路を切り替える施設を整備することが考えられる。末端水利施設については、対症療法的・高温回避技術として、飽水・保水管理や夜間の低水温時の灌漑等、時間や気温・水温条件に応じた用水管理を行うには、パイプライン化等水管理労力を軽減するような整備を行うことが望ましいと考えられる。更に、基幹的水利施設を含む大規模な改造を行う場合には水利権の確保も含めて、高温障害対策のための用水需要に対応できる用水計画と水利施設の設計を行う必要がある。

イ. 水利権の変更: 農業用水の水利権の更新に際しては、用水供給の制約が緩和されるよう、栽培管理用水に高温障害対策のための用水需要を組み込んだ用水計画を策定し、水利権を取得することが望ましい。しかしながら、河川の流量等の水源の制約があることから、現況以上の安定水利権の確保が難しい場合も想定される。その場合、高温障害対策のための用水需要は、前述のように技術の性格によって異なることから、それに適した水利権の取得方法を検討することも考えられる。予防的な技術のうち、落水時期の延期、深水管理等は、毎年の水管理として実施されるべきことから、必要な水源は安定水利権として確保することが望ましい。他方、直播、高温耐性品種の利用や直播に必要な灌漑期間や用水量は、品種や技術の普及について正確な予測が難しいため、変化の方向を予測して暫定水利権として確保し、適宜見直していく方法が考えられる。また、例えば掛け流し灌漑は、必要な用水量がきわめて多いが、ほとんどが河川等に還元される非消費型の水利用である点で消・流雪用水に類似している(水利権実務研究会, 2005)。また、高温障害の恐れのない場合には使用されない。このような用水は、豊水水利権として確保することも考えられる。

④次善の用水管理の検討: 上記の検討によっても用水供給が不可能な場合には、普及側は次善の用水管理を検討する。例えば、掛け流し灌漑に必要な用水量、用水水温が確保できない場合には、飽水・保水管理に変更すること、実際に高温障害の発生が予測される場合には、高温障害発生の危険が特に高い範囲に対策を限定する等が考えられる。これを踏まえて再び②の用水供給の可否を検討する。

⑤複数の用水管理の組み合わせの検討と関係者の合意の形成: ②の用水供給の検討の結果、用水に余裕ができる場合には、複数の用水管理の組み合わせを検討する。例えば、灌漑地区内で高温障害発生の危険性に差がある場合、危険性の低い範囲で飽水・保水管理等の節水的な用水管理を行い、それにより生み出した用水を、

危険性の高い範囲で掛け流し灌漑に利用するような配水が、技術的に可能かどうか、また受益農家内で合意できるかどうかの検討が考えられる。また、水利権について期別取水量だけでなく総取水量にも上限がある場合、高温障害対策の用水需要がそれ以降の用水量の不足を生じさせないかどうかを検討し、必要に応じて灌漑期間の最初からの節水的な用水管理を行うことの検討が考えられる。このような検討を経た用水管理は、関係者の合意形成が実施の前提となる。

⑥普及側と用水供給側の協議・連絡体制の構築: このような検討を行うためには、普及側と用水供給側が情報や意見の交換を密に行う必要がある。そのための協議・連絡体制を構築する必要がある。また、農家への高温障害対策の指導についても、普及側と用水供給側が連携する意義は大きい。例えば、普及側が用水供給の実態について認識が不十分なまま掛け流し灌漑を指導した場合、農家は連続的に用水を入水しようとしても、用水の不足や、揚水機場、加圧機場の運転時間の制限等により、十分な掛け流しができず、結果的に水温の高い湛水状態という、最も避けるべき用水管理になってしまうことがある。用水水温が気温より高い場合も同様である。普及側と用水供給側の連携によって、高温障害対策の面からも、水利秩序の維持の面からも不適切な、このような用水管理を防止し、より効果的で水利秩序を維持できる対策を指導することができると思われる。

なお、高温障害対策における用水管理を行うには、一定の圃場条件が必要であり、特に未整備の水田では、高温障害対策が実施可能な圃場条件を早期に確保する必要がある。具体的には、予防的・高温耐性強化技術として分けつ期の深水管理を行うには、必要な湛水深を確保し、かつ漏水を防止できる畦畔の整備が必要となる。また、対症療法的・高温回避技術として落水時期の延期を行うには、落水後、早期にコンバインによる収穫に必要な地耐力が確保できるような、排水条件の整備が必要となる。こうした圃場条件に不備がある場合には、必要な圃場整備を実施するために関係機関との連携を適宜行うことが望まれる。

IV 結言

水稻の高温障害対策はその技術の性格に応じて用水需要を変化させるが、用水供給は水利権および水利施設による制約がある。そのため、農家に実施可能な対策を指導するためには、普及側と用水供給側が連携した高温障害への対応が必要となる。ここではその方向性を検討し、望ましい検討手順を提案した。

今後、高温障害対策における用水管理による用水需要に関する諸元を定量的に明らかにし、対策実施の可能性の検討や、将来の用水計画の用水量の算定を可能

にしていくことが必要である。また、普及側と用水供給側の連携のあり方、情報提供の方法、連携の有効性等について、具体的な事例に基づく実証研究を行っていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 米穀データバンク (2008)：19年度産集荷価格（概算金、内金、買い取り）一覧，
http://www.japan-rice.com/cargo_booking_price.html
- 2) 宮城県 (2008)：宮城の稲作指導指針（基本編）
- 3) 森田 敏 (2008a)：高温障害の実態とメカニズム，年刊農業技術 2008，農文協，223-236.
- 4) 森田 敏 (2008b)：高温登熟障害の克服技術，年刊農業技術 2008，農文協，237-245.
- 5) 永島秀樹・中村啓二・猪野雅哉・黒田晃・橋本良一 (2005)：高温登熟条件下における乳白粒および胴割粒の発生軽減技術，石川県農業総合研究センター研究報告 26，1-19.
- 6) 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）
- 7) 農林水産省水稲高温対策連絡会議対策推進チーム (2006)：水稲の高温障害対策の克服に向けて（高温障害対策レポート），<http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/kouon/report.pdf>
- 8) 農林水産省生産局 (2006)：水稲の高温対策に関する都道府県の実績状況調査，<http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/kouon/appen12.pdf>
- 9) 農林水産省生産局 (2008)：平成 19 年夏季高温障害対策レポート，<http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/engei/pdf/080418-01.pdf>
- 10) 農村環境の保全に関する研究会 (2008)：農村環境の保全に関する研究会中間とりまとめ～農業農村整備における農村環境保全の新たな理念と展開方向～，資料 3 参考図表(3)，25.
http://www.maff.go.jp/j/study/noukan_hozen/pdf/data3_3.pdf
- 11) 水利権実務研究会 (2005)：新訂 水利権実務一問一答，大成出版社.

Problems and Future Directions of Agricultural Water Management as Measures against Grain Damage under High Temperatures during Ripening of Rice

TOMOSHO Tatsumi and YAMASHITA Tadashi

Summary

Grain damage under high temperatures during ripening of rice is an urgent problem in recent years. Various measures against it are investigated, and agricultural extension sectors need to guide farmers to prevent the damage. However, there is strict limitation of water supply to apply these measures in a specific area. This paper analyzes how the measures against grain damage under high temperatures during ripening of rice influence agricultural water demand by literature documentation, and shows how restriction of water supply constrain agricultural extension sector from choosing practical measures in a specific area. Direction of measures against grain damage under high temperatures during ripening of rice with corporation of agricultural extension sector and agricultural water supply sector considering limitation of water resources are discussed, and a desirable process for choosing practical measures in a specific area is proposed.

Keywords : paddy rice, rice grain damage under high temperature during ripening of rice, agricultural water management, irrigation facilities, global warming

平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震による 震源近傍の老朽水利施設被災状況に関する調査

常住直人*・森 丈久**・田中良和***・高木強治*

目 次

I 緒言	139	2 下真坂用水1号トンネル	149
II 地震の概要	140	3 下真坂用水2号トンネル	149
III 調査概要	141	4 下真坂用水3号トンネル	149
IV 被害状況と緊急復旧状況	143	5 その他	150
1 大原堰用水の被害状況と緊急復旧状況	143	VI 結言	150
2 下真坂用水の被害状況と緊急復旧状況	145	参考文献	150
V 今後の復旧について	149	Summary	152
1 大原堰水路	149		

I 緒言

2008年6月14日8時43分頃、岩手県内陸南部を震源として岩手・宮城内陸地震が発生した。本地震は、西北西から東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型（傾斜角約31度）であり、余震域は北北東から南南西に広がり、岩手県側で活発なものの一部は、宮城県側まで及んでいた。この地震の震源域を含む東北地方脊梁部では、浅い地層を震源とする地震活動が活発であり（Fig.1）、今回の地震についても深さ約8kmと浅い震源になっている（防災科学技術研究所，2008；国土地理院，2008）。

本震震源域の周辺では、過去にも今回震源の約30km南東で宮城県北部地震（1900年，マグニチュード7.0，1962年，マグニチュード6.5）が発生しているほか、1996年に約20km南西でマグニチュード6.1，2003年に約30km南方でマグニチュード6.4の地震が発生しており、これらの地震活動は連続的に分布している。ただ、本震の地震規模は、マグニチュード7.2（気象庁，平成20年7月18日時点）と過去のものに比し大きく、岩手県奥州市と宮城県栗原市では最大震度6強を観測した。また、地震規模に比して大きな地震加速度が観測されたのも特徴で、最大加速度は4022cm/s²（3成分合成、

防災科学技術研究所基盤強震観測網（以下KiK-net）、IWITH25（一関西）を観測した（防災科学技術研究所，2008）。

今回の地震では、地すべり、斜面崩壊に伴う大規模崩落が多発し、交通の寸断が各所で生じており、農業水利施設、農地にも複数の被害が発生している。農林水産被害は営農施設、農地、農業用施設、林地、林道、養殖施設と多岐に亘っており、その総数は2844箇所、被害総額は1330億円となっている（Table 1）。

（独）農研機構農村工学研究所施設資源部では、余震による大規模崩落の危険、二次被害の懸念が概ね収束し、被害の全容が把握可能となった地震発生約1ヶ月後（2008年7月18日）に水利施設（堰、水路系）を対象に独自調査を行った。主調査地は本震の震源地（岩手県一関市鬼越沢，北緯39度1.7分，東経140度52.8分）から南東方向、半径8～11km付近に位置する大原堰用水地区（岩手県奥州市衣川区）、下真坂用水地区（岩手県一関市巖美町）である（Fig.2）。いずれも水路区間のかなりを開削年不詳の素堀水路トンネル（水路出入り口のみ後年に補強）が占めており、その路線、断面も正確には分かっていない。開水路区間にも土水路のままのところがある。

また、これらの調査地は本震の加速度が比較的大きかった地域にあり、近傍観測地点（KiK-net，IWITH26（一関東））の最大加速度は3成分合成で1000cm/s²以上、水平2成分平均・上下成分いずれも700cm/s²以上を記録している（防災科学技術研究所，2008）。今回、本震の加速度は、震源近傍では南東から北西方向に強くなっており、上記調査地もそのエリア内にある。本報文はこ

*施設資源部水源施設水理研究室

**施設資源部水利施設機能研究室

***施設資源部水路工水理研究室

平成20年11月5日受理

キーワード：地震，現地調査，改修，災害，トンネル，開水路，堰

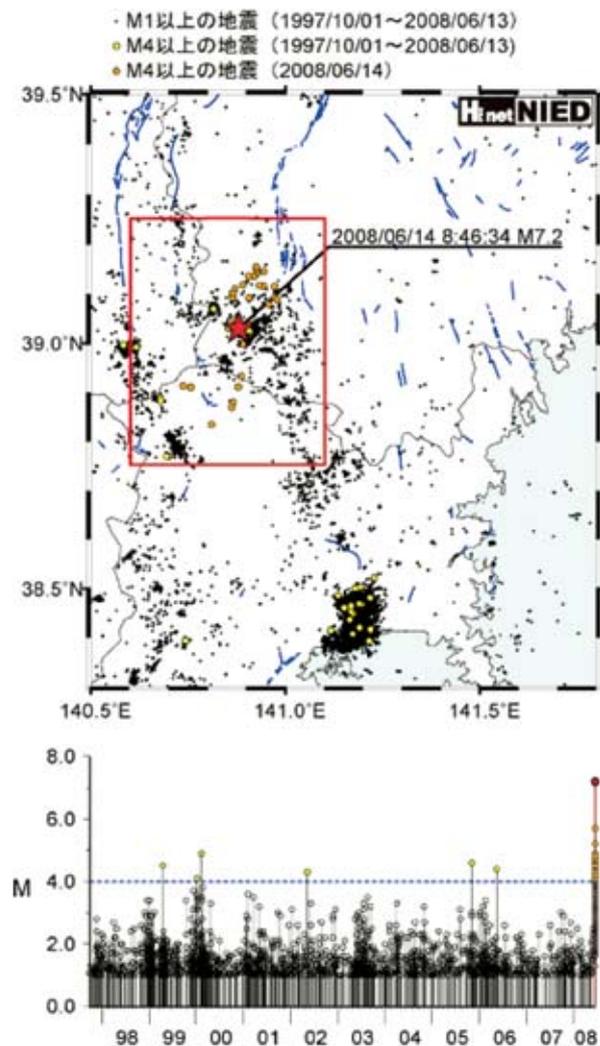


Fig.1 岩手・宮城内陸の深さ20km以内で発生したマグニチュード (M) 1以上の地震の震央分布と今回の地震の余震域周辺 (赤枠内) におけるM-T図 (防災科学技術研究所, 2008)

Epicenter distribution over 20km depth of earthquakes not less than Mw 1 in inland area of Iwate, Miyagi and the M-T figure in the aftershock area of the 2008/6/14 Iwate Miyagi Nairiku earthquake (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2008)

れら調査地区の本格復旧前の被災状況を把握、報告し、今後の復旧方針について考察するものである。

なお、本調査に当たっては、東北農政局、岩手県並びに岩手県土地改良事業団体連合会の関係各位より、資料収集、現地調査に関し、絶大なるご協力を頂いた。また、地震関連の図表については(独)防災科学技術研究所、地質図については(独)産業技術総合研究所よりご提供を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

II 地震の概要

岩手・宮城内陸地震は、逆断層型の地殻内地震とされる。この地震では、震源付近で上方方向に1.4mの変位が生じ、岩手県奥州市衣川区、宮城県栗原市一迫で震度6強、宮城県大崎市ほかで震度6弱を記録した(但し、衣

Table 1 農林水産被害状況 (農林水産省, 2008)
The amount of damage with agriculture, forestry, fishery
(Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008)

区分	主な被害	被害数	被害額 (億円)	被害地域
営農施設等	農業倉庫, 畜産施設, 園芸施設等の破損	調査中	10	岩手, 宮城, 秋田, 山形
	水稻の倒伏等			
農地農業用施設	農地の損壊	464箇所	5	岩手, 宮城, 秋田, 山形
	農業用施設等の損壊	940箇所	47	
	農業用ダムへの土砂流入	1箇所	249	
林野関係	(民有林)			岩手, 宮城, 秋田, 山形
	林地荒廃	115箇所	392	
	治山施設	29箇所	8	
	林道施設	784箇所	13	
	(国有林)			
	林地荒廃	190箇所	578	
	治山施設	6箇所	6	
	林道施設	202箇所	18	
水産関係	養殖施設	10箇所	0.68	岩手, 宮城
	水産物	6箇所	0.34	
合計		2,844箇所	1,330	

注) 2008年9月5日17時00分現在

川区の震度については震度計の法肩設置による周辺以上の過大観測値化の可能性が指摘されている(土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会合同調査団, 2008)。また、東北地方を中心に北海道から関東、中部地方に亘って震度5強から1が観測された(Fig.3)。本震の3成分合成の加速度分布では、震源から半径約20km内に1000cm/s²を超える値が観測され(Fig.4)、30km内では400cm/s²超、60km以遠では200cm/s²以下となっている。半径20km圏内では、本震加速度の3成分合成値、水平2成分の平均値、上下成分値とも南東から北西方向に高い値となっており、震源から南東8~11km圏の今回調査地区も概ねその領域内にある。震源地付近の観測点(Fig.4, KiK-net, IWTH25)を除く本震の最大加速度1372cm/s²(3成分合成)も調査地区近傍観測点(Fig.4, KiK-net, IWTH26)で観測されたものである。同様に地表変状も震源南東方向に比較的多く見られる(防災科学技術研究所, 2008; 2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ, 2008)。

なお、過去の地震と比較すると兵庫県南部地震(マグニチュード7.3)では891cm/s²(神戸海洋気象台)、169cm/s(JR 鷹取)、新潟県中越地震(マグニチュード6.8)では1750cm/s², 148cm/s(いずれも気象庁川口)



Fig.2 調査地区の位置
Places of investigation areas

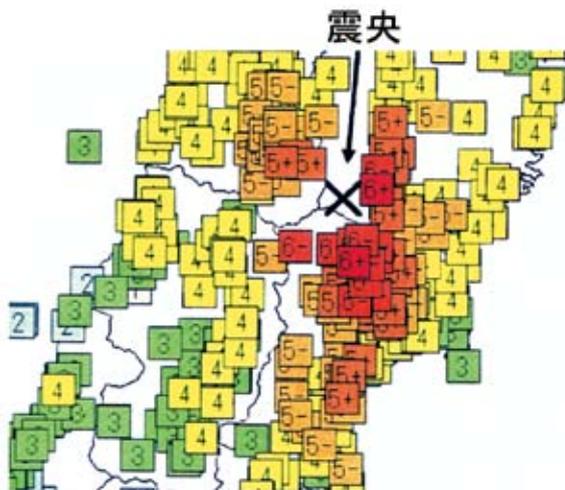


Fig.3 各観測点における震度分布 (気象庁, 2008より)
Distribution of seismic intensity of the 2008/6/14 Iwate Miyagi Nairiku earthquake (Drawn by data of Japan Meteorological Agency, 2008)

の最大加速度、最大速度（いずれも 3 成分合成）が観測されているが、今回の地震ではマグニチュード 7.2 で 4022cm/s^2 (3 成分合成, KiK-net, IWTH25) と地震規模の割に大きな加速度が観測されている。しかし、観測された本震最大速度は 100cm/s (3 成分合成, KiK-net, IWTH25) とその加速度に比し大きくない。これは短周期の揺れが卓越していたためとされる (Fig.5, 防災科学技術研究所, 2008)。

一方、余震は本震加速度が強かった領域と直交するよ

うに、震源より北北東から南南西方向に、長さ 45km、幅 15km の帯状の範囲で震度 1 以上のものが 441 回発生している (6 月 26 日 5 時時点)。この方向での余震発生深さは北部から南部にかけて深さ 10 数 km から 5km 程度以下と浅くなる傾向が見られた。余震活動は総じて岩手県側で活発だったものの最大余震 (マグニチュード 5.7, 震度 5 弱 (気象庁暫定値), 2008 年 6 月 14 日 9 時 20 分) は、宮城県大崎市で発生している (気象庁, 2008; 防災科学技術研究所, 2008)。

今回の地震は総じて言えば、震源が浅く、断層近傍の観測点で非常に大きな鉛直加速度が観測されたこと (上下方向 3866cm/s^2 , IWTH25), 反面、短周期成分 (概ね 0.5 秒以下) が卓越しており、地震速度はそれほど大きくなかったことが特徴である。

III 調査概要

前章で記したように本震加速度の 3 成分合成値、水平 2 成分の平均値、上下成分値はいずれも震源の南東から北西方向に高い値となっている。震源地付近の観測点 (Fig.4, KiK-net, IWTH25) を除く本震の最大加速度 1372cm/s^2 (3 成分合成) も震源南東の一関東観測点 (Fig.4, IWTH26) で観測されている。この方向は本震の震度も強く、地表変状も比較的多く見られる。そこで今回の主調査地は堰、水路等、農業水利施設が散在する震源近傍域で、本震の震源地 (岩手県一関市鬼越沢, 北緯 39 度 1.7

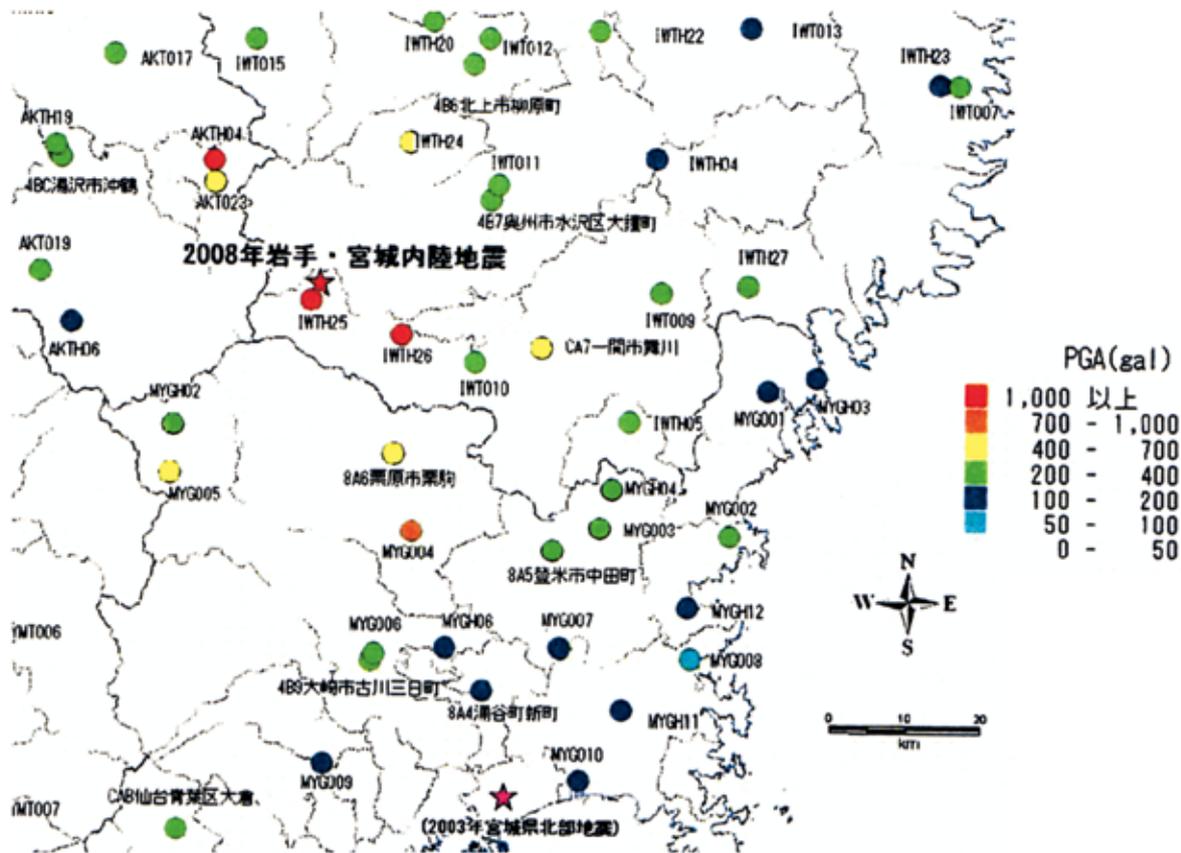


Fig.4 岩手・宮城内陸地震の本震の最大加速度（3成分の合成）（防災科学技術研究所，2008；気象庁，2008より）
 Maximum acceleration at the 3 direction composition of KiK-net and K-net stations in the 2008/6/14 Iwate Miyagi Nairiku earthquake
 (Drawn by data of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2008 & Japan Meteorological Agency, 2008)

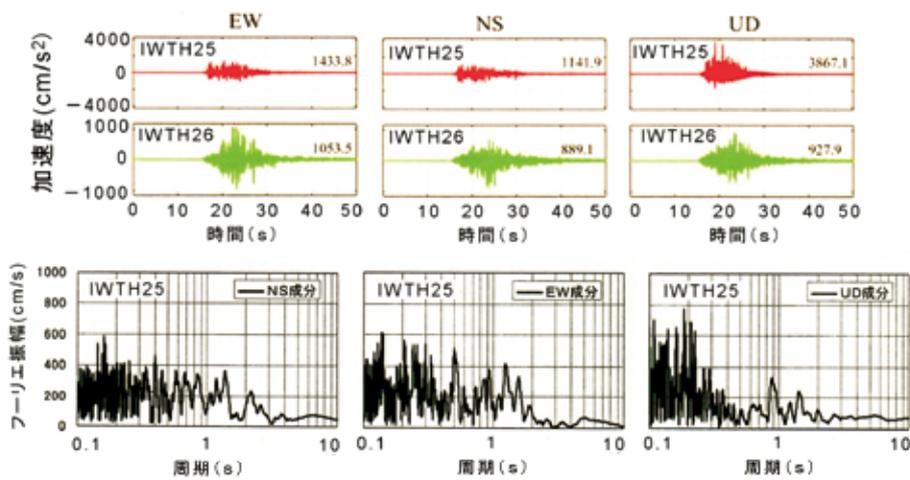


Fig.5 震源付近調査地近傍の地表観測点（KiK-net,IWTH25/IWTH26）での強震加速度波形
 （防災科学技術研究所，2008；青井ら，2008）とフーリエスペクトル

The acceleration waveforms and the fourier spectra of KiK-net, IWTH25/ IWTH26 in the 2008/6/14 Iwate Miyagi Nairiku earthquake
 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2008; Aoi,et al, 2008)

分，東経 140 度 52.8 分）から南東方向，半径 8 ～ 11km 付近に位置する大原堰用水地区（岩手県奥州市衣川区），下真坂用水地区（岩手県一関市巖美町）とした（Fig.2）。大原堰用水地区は，南股川から大原堰において普通期流量 0.205m³/s を取水し，奥州市衣川区南股地域の農地 75.5ha を灌漑しており，一方，下真坂用水は巖美町字下

真坂の本寺川から取水し同字入道の水田 22.0ha を灌漑している。いずれの地区も堰等，上流水源施設から河川沿いに用水路を設置して，下流灌漑地区に配水する形式となっており，河川周辺の急傾斜地に水路を通してること，途中，素堀で施工された古いトンネル区間を多く含むこと，周辺土質が赤土に石レキが混じった脆弱なも

のであることから崩落被害を生じやすい。今回は、この水路に沿って被災箇所を調査を行ったほか、水源付近の土砂崩落地や水田域の被害を調査した。

IV 被害状況と緊急復旧状況

岩手県一関市内における農地・農業用施設被害は農地 120 箇所、農業用施設 147 箇所、関連施設 1 箇所の計 268 箇所となっている。しかし、堰・水路等、構造物そのものの地震による破損はほとんどなく、ため池、道路、水田の亀裂や斜面崩壊など、地盤にかかる被災が多いとのことであった。これは、もう一方の主調査地区である岩手県衣川区についても同様で、調査地区内の堰・水路系に関して言えば、全般に構造物そのものの損傷はほぼ皆無であり、地すべり、斜面崩壊、落石による被災がほ

とんどであった。聞き取りによれば、これは本地震を通じて全般的に言えることのようにあり、地震の周期特性が影響しているのではないかと、このことであった。また、周辺地質は栗駒山等の火山噴出物に広く覆われており、比較的脆弱なことも影響していると思われる (Fig.6)。実際、大原堰用水地区、下真坂用水地区とも周辺土水路も含め開水路の損傷は皆無で、落石や斜面崩壊土砂の水路への落ち込みや、斜面崩壊に伴う落盤からの水路トンネル閉鎖等、二次被害が主であった。堰本体についても構造上の損傷はなく、大原堰管理階段付近の崩落被害のみであった。

1 大原堰用水の被害状況と緊急復旧状況

大原堰用水路は、全長 6.7km のかんがい用水路であり、そのうち、開水路区間 6.427km と、2 箇所のトンネルが



※ 20万分の1日本シームレス地質図より。凡例は出典元HP参照のこと。(独)産業技術総合研究所承認番号第63500-A-20081117-003号

Fig.6 岩手・宮城内陸地震被災域付近の地質図 (産業技術総合研究所, 2008)
The geological features in the damaged area by the 2008/6/14 Iwate Miyagi Nairiku earthquake
(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2008)

延長150m, 123mで接続している (Fig.7)。

大原堰用水路 (幅・高さとも0.8m) については, 堰下流の水路トンネル (Fig.8, 横幅0.8m, 高さ1mの楕円断面トンネル) のうち, 平成8年改修の上流トンネル (Fig.7参照, コンクリート巻き立て補強。費用は仮設, 間接工事込みで85万円/m) は地上傾斜が緩傾斜なこともあり, 斜面崩落も無く無被害だったが, 旧来の素掘トンネルのままであった下流トンネル (開削年不明, 延長123m, 出入口のみヒューム管で補強) では, 斜面崩壊に伴う落盤に依ると見られる土砂閉塞が見られた。斜面崩壊地点はトンネル入り口から約50, 70m地点と出口手前 (Fig.9, Fig.10) の3カ所で, いずれも水路上約20m上の道路際から崩落している。地図の等高線の幅から推察すると, 今回の土砂崩落箇所は大原林道と南股川の間, 斜面が特に急勾配である位置だったことが分かり, 開水路区間もトンネル出口から15m区間に渡って落石により通水断面が完全に閉塞している。

下流トンネル内壁は赤土に石混じりの脆弱な状態で,

トンネル内の閉塞カ所は入り口から70m地点と見られ, 上流水路を満水にしても出口にほぼ水が流れない状態であった。

調査時点では, 斜面上道路復旧および水路下10mの斜面崩壊土砂が流れ込んだ河川 (南股川) の復旧有無の見通しが立っていない状況であり (いずれも市管理), また, 当該トンネル自体, 予算上の制約のため被災前から改修未定だったこともあり, 本格的復旧の目途は立っていない。このため, 地震から1週間後に, 被災したトンネル出口下流120m付近で水路と並行して流れる南股川に仮設揚水ポンプを設置し (Fig.7), そこから河川左岸斜面沿いを流下する水路に水を注水し (Fig.11), 下流受益75.4haの用水を賄っている。揚水には口径200mmのポンプ2基と22kVAの発電機をリースし, 概算費用は3,061,000円である。

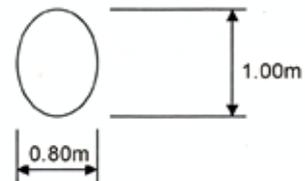
なお, 本地区では, これまでも斜面から水路への転石, 土砂流入は度々見られ, 適宜排除していたとのことであった。



※ 国土地理院, 数値地図より作成

Fig.7 大原堰用水路の被災箇所
Damage places of the Ohhara seki channel

大原堰用水断面図(素掘トンネル部)



大原堰用水断面図(開水路部)

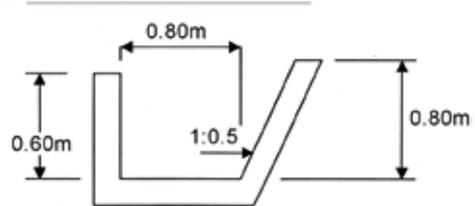


Fig.8 大原堰用水路標準断面
Sectional figures of the Ohhara seki channel



Fig.9 大原堰用水路下流トンネル出口上の道路 (左) と道路下の崩落状況 (右) (Fig.7, ①地点)
Collapse at the road over the outlet of the Ohhara seki downstream channel



Fig.10 大原堰用水路下流トンネル出口の崩落状況（左，手前コンクリートは出口補強部），
下流トンネル出口（右上），下流トンネル出口から内部の状況（右下）（Fig.7，②地点）

Collapse on the outlet of the Ohhara seki downstream channel (left), the outlet of the Ohhara seki downstream channel (upper right), Inside of the outlet of the Ohhara seki downstream channel (lower right)



Fig.11 大原堰用水路の開水路グレーティング上への落石状況（左），開水路への落石状況（中），
仮設ポンプから開水路への放水状況（右）（Fig.7，③地点）

Fallen rocks on the gratings of the Ohhara seki channel (left), fallen rocks in the channel (center),
discharge to the channel from a temporary pump (right)

2 下真坂用水の被害状況と緊急復旧状況

下真坂用水のある一関管内では、衣川区よりも震源南東方向にあるため、斜面崩壊、地割れが多発し、農地、ため池堤体の亀裂等により農地 120 カ所、農業用施設 147 カ所の被災が生じていた。しかし、構造物や水路

の構造的な被災はほとんどなく、主たる被害は大原用水同様、旧来の素堀トンネルでの落盤による閉塞である（Fig.12）。

下真坂用水は巖美町字下真坂の本寺川から取水する全長約 4km、延長 810m のトンネルからなる農業用水路である。トンネルは 1～3 号まであり、各々、1 号が延長



※ 国土地理院, 数値地図より作成

Fig.12 下真坂用水路の被災箇所
Damage places of Shimo masaka channel

166m, 2号が延長98m, 3号が延長546m(以上の延長は出入り口位置からの推定値)でほろ型である(Fig.13)。水路は、震源地から約10kmの位置に当たり、震度6強の強い揺れを受けたと想定される。このうち、3号トンネルは昭和24年アイオン台風時の土砂崩落で埋まった開水路の復旧時に開削したコンクリート吹き付けトンネルであるが、他は開削年不明の素掘トンネルであり、正確な路線も分かっておらず、内壁は大原堰水路と概ね同様、脆弱な状態と考えられる。

被害の発見は、地震発生後に用水路に水が来ないとの通報により現地調査した結果である。斜面崩壊は直線距離166mの1号トンネル(出入り口はコルゲート管)の上流半分で広域に発生しており(Fig.14)、閉塞もそこでの落盤により起きていると見られるが、未だ危険な状態のため、閉塞位置は特定されていない。1号トンネルの入り口付近から、立ち入り禁止区域となっており、内部の調査が実施できない状況にある。1号トンネル入り口上流付近の開水路部には、今回の地震による大きな転石が多数見られた(最大では長径2m程度)。なお、斜面崩壊現場の地質断面図はFig.15のとおりである。

トンネル内部の崩落状況は、1号トンネルと2号トンネル(出入り口のみヒューム管補強)の間の明かり部(トンネル水路間の開水路部)からの目視でも、トンネル内がカーブしているため、確認困難であった。一方、2号トンネルと3号トンネルの明かり部では、2号トンネルの出口付近のヒューム管に5cm程度のズレが確認できた。ただ、これら2号トンネル両端の状況だけからは、

下真坂用水・トンネル断面図

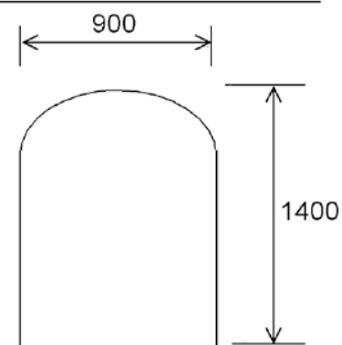


Fig.13 下真坂用水水路トンネル標準断面
A sectional figure of the Shimo masaka channel

2号トンネル内部で崩落しているかどうかは不明であった(Fig.16)。

3号トンネル出入り口はコンクリート巻立で補強されているが、入り口付近のトンネル内部が崩落しているとともに、出口上部の地盤が大きく沈下し、段差ができていた(Fig.17)。また、トンネル下流出口付近の地盤に大きな陥没が2箇所発生しており、トンネル内でも落盤している可能性があるが、内部は暗く坑外からの確認は困難で、土砂崩落の危険もあるため、人間が入ったの確認は困難な状況であった。

現状では、下真坂用水でも、受益水田(22ha)上流端近傍の山谷川に仮設揚水ポンプ(口径150mm, 11kw, 3m³/min, 1台)を設置し、応急措置をとっている。仮設揚水の概算費用は2,383,500円である。本用水でも国



Fig.14 下真坂用水1号トンネルの被災 (左上：トンネル上流開水路への転石 (Fig.12, ①地点), 左下：トンネル出口付近の堆積土 (Fig.12, ③地点), 右：トンネル上部の斜面崩壊 (Fig.12, ②地点)
 Damages of Shimo-masaka channel tunnel No.1 (upper left :fallen rocks in the Shimo masaka upstream channel, lower left :deposited soil at the outlet of the tunnel, right :slope collapse over the inlet of the tunnel)

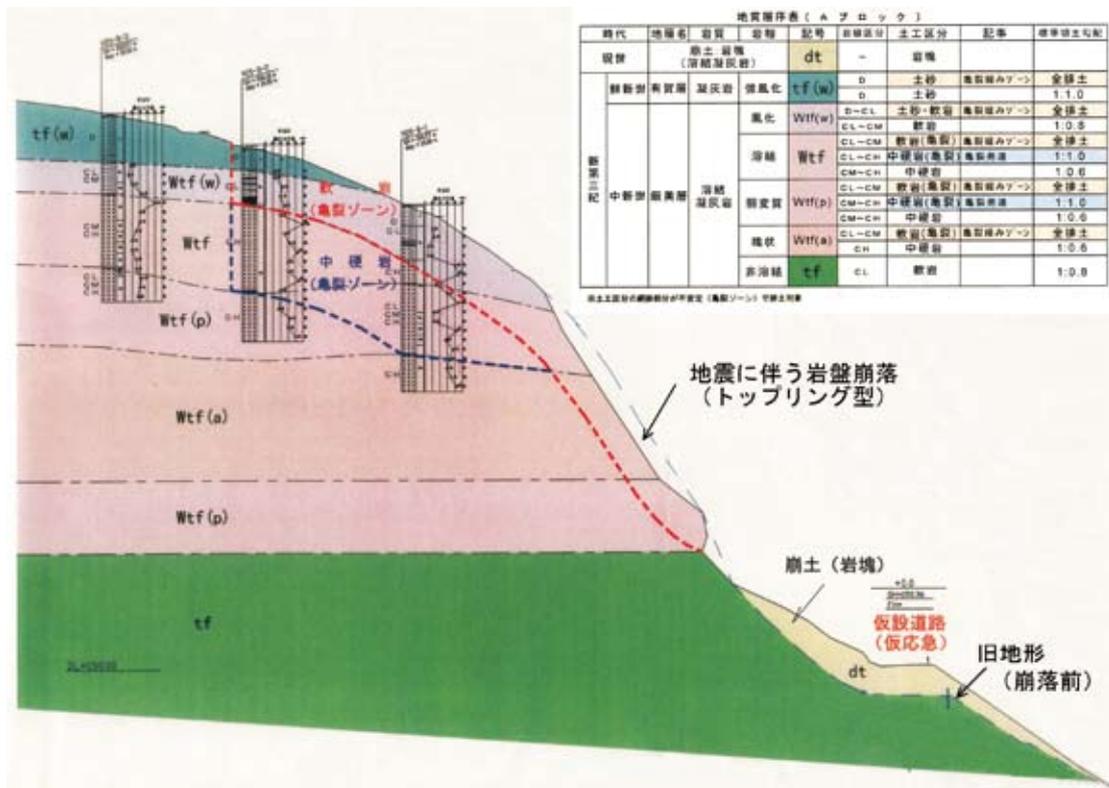


Fig.15 下真坂用水1号トンネル上部の斜面崩壊現場における地質断面図 (Fig.12, ②地点)
 The sectional geological figure of slope collapse site over the inlet of the Shimo masaka channel tunnel No.1



Fig.16 下真坂用水2号トンネル入り口(左 (Fig.12, ④地点)), 出口(右 (Fig.12, ⑤地点))

The Inlet (left) /outlet (right) of Shimo-masaka channel tunnel No.2



Fig.17 下真坂用水3号トンネルの被災(左上:トンネル入り口上部の地盤沈下による段差 (Fig.12, ⑥地点), 左下:トンネル入り口付近の土砂崩落, 右上:トンネル出口 (Fig.12, ⑦地点)直上流上部の地盤の陥没(約2m深さの亀裂), 右下:トンネル出口付近の地盤の陥没)

Damages of Shimo-masaka channel tunnel No.3 (upper left :bump caused by a subsidence over the inlet of the tunnel, lower left : small collapse in the inlet of the channel, upper right :a subsidence over the outlet of the tunnel, lower right :a subsidence at the outlet of the tunnel)

道復旧との調整があり, 今回調査時点でも本格復旧の見通しが立っていない状況であった。

一関市内で下真坂用水よりも上流域にある下り松用水 (Fig.2) においても大規模な斜面崩落があり, 更なる崩落の危険もあるため200m程度遠方からの確認となった。詳細な被害は, 崩落によって堆積した土砂を撤去し

なければ確認できない状況にある。この上流には市野々原地区の河道閉塞現場 (震源より約3km) もある。

なお, 下真坂用水から市野々原地区の一帯では, 地形変状, 水田等, 農地における地割れや段差も顕著で, 同一区画の水田内で0.4mほどの落差が生じているところもあった (Fig.18)。



Fig.18 さがりまつ 下り松用水の斜面崩落状況（左）、水田の地盤沈下（右、はのきだて 楓木立地区）
The slope collapse on the Sagirimatsu channel (left), a subsidence in a paddy field at Hanokidate district (right)

V 今後の復旧について

1 大原堰水路

トンネル出口に崩落土らしきものが見えることから、トンネル内部が崩落している可能性が高い。コンサルタントによるトンネル内部の目視調査により、上流側から 70 m 地点までは健全であることが確認されているため、上流側から 70 m 地点から下流側出口までの約 50 m の区間で崩落が発生していると推定される。ただし、その区間すべてが崩落しているかどうかについては不明であるため、トンネル内部の調査が必要である。トンネル内部の調査に当たっては、余震による崩落のおそれがあるため、自走式カメラロボット等を使用することが望ましいと考えられる。

トンネルの復旧に当たっては、トンネル上部の道路法面の復旧対策との調整が必要であり、道路法面の復旧工法の内容によっては、原形復旧が困難になる場合も想定されるため、トンネル呑口上流から出口下流までの迂回水路を新設することも視野に入れておく必要がある。原形復旧を行う場合には、崩落箇所は地山が緩んでいるため、コンクリート巻立てによる覆工やパイプイントンネル工法などによる補強を検討する必要がある。

また、トンネル出口付近の開水路は、常時より落石や崩落した土砂の堆積が頻発しており、管理者が毎年春に清掃を行っているとのことである。よって、復旧した開水路とその下流側水路には、ステンレス製等、堅牢、管理省力な材質の蓋を被すなどして転石と土砂の進入を防ぐのがよいと考えられる。

2 下真坂用水 1 号トンネル

トンネル出口に崩落土らしきものが見えることから、トンネル内部が崩落している可能性が高い。具体的な崩落箇所が不明であるため、トンネル内部の調査が必要である。トンネル内部の調査に当たっては、余震による崩落のおそれがあること、トンネル自体が素堀の脆弱な

ものであること、土質が脆いことから人が入っての観測は二次災害の危険が高い。自走式カメラロボット等を使用することが望ましい。

トンネルの復旧に当たっては、トンネル上部の地山法面の復旧対策との調整が必要である。法面の復旧工法の内容によっては、原形復旧が困難になる場合も想定されるため、トンネル呑口上流から出口下流までの迂回水路を新設することも視野に入れておく必要がある。原形復旧を行う場合には、崩落箇所は地山が緩んでいるため、コンクリート巻立てによる覆工やパイプイントンネル工法などによる補強を検討する必要がある。

3 下真坂用水 2 号トンネル

トンネル内部で崩落しているかどうかは不明であるが、上下流の 1 号、3 号トンネルの状況や 2 号トンネルも素堀の脆弱な構造であることから、トンネル内部の調査は必要と思われる。当トンネルの内部調査でも、1 号トンネル同様、自走式カメラロボット等の活用が望ましい。

4 下真坂用水 3 号トンネル

トンネル呑口の崩落土やトンネル呑口上部地盤の大きな段差から、トンネル内部が崩落している可能性が高い。また、トンネル下流出口付近の地盤の大きな陥没は、トンネル内部の大規模な崩落によるものと推定される。ただし、これら以外の区間については、具体的な崩落箇所が不明であるため、トンネル内部の調査が必要である。本トンネル内部の調査でも、自走式カメラロボット等の使用が望ましい。

トンネル内部の崩落状況によっては、原形復旧が困難な場合も想定されるため、トンネル呑口上流から出口下流までの迂回水路を新設することも視野に入れておく必要がある。原形復旧を行う場合には、崩落箇所は地山が緩んでいるため、コンクリート巻立てによる覆工やパイプイントンネル工法などによる補強を検討する必要がある。また、出口付近の陥没部分については、土被りが

あまりないようなので、開削の上、ボックスカルバートもしくはパイプを敷設し埋め戻すなどの復旧工法が考えられる。

5 その他

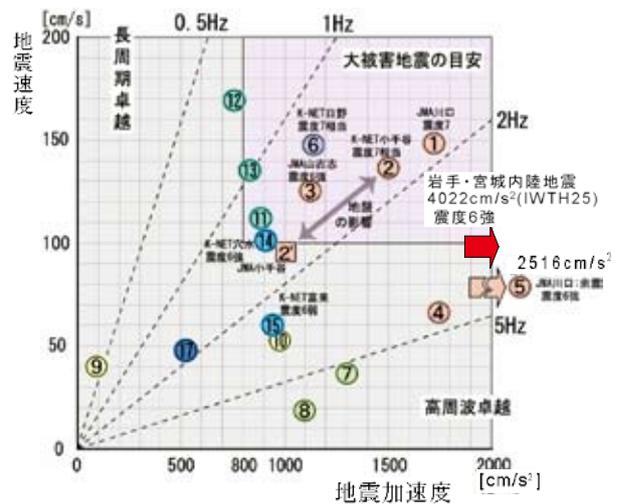
いずれの地区も道路復旧との調整があり、その目処が立たなければ本格的な復旧は困難と思われる。これらの地区の水路トンネルは、一部、コンクリート吹き付けで改修されているが、近代工法以前に素堀で掘られたものがほとんどであり、それゆえ、素堀で掘りやすい路線を通していると考えられ、迂回し、想定以上に長大となっている可能性が高い。このように複雑かつ長大な路線と思われ、かつ二次被災の恐れがある古来の素堀既設トンネルを補強復旧するよりも、既設トンネルを放棄し、極力短く、安全で、かつ道路改修に関わりなく工事可能な新設路線の開削という選択肢も、施設機能の早期復旧等、総合的に勘案すれば考え得る。また、現地は地盤が脆く、今後も豪雨、地震による斜面崩落のリスクは小さくないこと、転石・土砂流入に対する維持管理労力、高齢化による維持管理の困難化等からも、トンネルの新設は有利と思われる。

なお、これらの地区が総じて地盤が脆いうえ（周辺地質は栗駒山等の火山噴出物に広く覆われており、比較的脆弱）、浅い地層での地震が旧来より続いていることを鑑みると、新設を含む復旧、改修に際しては、崩落等の被災を受けやすいところ（傾斜、地すべり履歴有無、地質・土質を考慮）、被災により応急措置が困難なところ（ポンプ等への配電の便、地形、代替水源との距離、代替取水の難易度を考慮）、被災時の用水影響の大きいところを優先して実施する必要がある。

VI 結 言

今回の地震は、震源が浅く、断層近傍で非常に大きな鉛直加速度が観測されたこと、反面、短周期成分（概ね0.5秒以下）が卓越しており、地震速度はそれほど大きくなかったことが特徴であり、それが堰、水路系の水利施設における構造的被害が、比較的老朽化した施設であり、かつ震源近くであっても必ずしも甚大でなかった原因と考えられる。震度、加速度に比して構造物被害が少ないことは、今回の地震被害の特徴であり、一般住宅被害も震度6強だった岩手県奥州市と宮城県栗原市で全半壊162棟であり、当該域一般住宅の約0.2%に過ぎなかった。

以上の被災状況は、最大加速度、最大速度及び卓越周期からの大被害地震（対構造物）の目安である800cm/s²以上かつ100cm/s以上（概ね0.5～4Hz、Fig.19）にも大略当てはまっており、今回地震は加速度は非常に大きい、速度ではこの目安での大被害地震の下限となっている。地震速度が小さくても地震加速度がそれに比し更



※ 図中の丸数字は近年の代表的な地震の分布

Fig.19 地震加速度、速度からの構造物被災目安
 (川瀬, 1998; 青井ら, 2008; 防災科学技術研究所, 2008)
 Structural large damage standard from the maximum acceleration, velocity for an earthquake (Kawase, 1998; Aoi, et al, 2008; National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2008)

に小さければ、地震波の長周期成分が卓越しうるので、堰、調整池など長大構造物に被害を及ぼすことが考えられるが、今回の地震はそれにも当てはまっていない。以上はあくまで Fig.19 の目安に基づくが、今回調査した限りでは、比較的古い堰、水路系の農業水利施設でも、かつその大被害となる目安の下限速度においても（下限速度であれば加速度が非常に大きくても）、当目安の有効性が補完される結果となっている。

ただし、斜面崩壊、地すべりなど土砂災害にはこの目安は必ずしも当てはまらないと見られ（盛り立て構造物であるため池でもクラック等の被害が見られた）、本地震の震源域周辺地質が栗駒山等の火山噴出物に広く覆われた脆弱地盤なこともあり、地すべり、斜面崩壊、土石流、河道閉塞の被害は各所で散見されている。堰、水路系での被害も、この地盤の脆弱さに起因する地すべり等からの間接被害が大半である。ゆえに、地震リスクの評価においては、地震加速度、地震速度など、地震諸元そのものや施設構造からのリスク評価の他、地質、地形（地すべり履歴等）及び降雨特性を含んだ総合的なリスク評価が必要と思われる。

参考文献

- 1) 青井真・森川信之・鈴木亘・関口春子 (2008) : 2008年岩手・宮城内陸地震の強震動と震源過程, 第36回地盤震動シンポジウム (日本建築学会), 1-8, 平成20年12月9日
- 2) (独)防災科学技術研究所: HP: <http://hinet.bosai.go.jp/topics/iwate-miyagi080614/>
- 3) 土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地す

- べり学会合同調査団（2008）：平成 20 年岩手・宮城内陸地震合同調査団速報会資料，平成 20 年 6 月 20 日
- 4) 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ：HP；<http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/GIMNE2008/>
 - 5) 川瀬博（1998）：断層近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能，第 10 回日本地震工学シンポジウム，パネルディスカッション資料集，29-34.
 - 6) 気象庁：HP；http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2008_06_14iwate-miyagi/index.html
 - 7) 国土地理院（2008）：報道記者発表「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動（第 2 報）」，平成 20 年 6 月 18 日
 - 8) 農林水産省：HP；<http://www.maff.go.jp/j/saigai/zisin/0806.html>
 - 9) (独)産業技術総合研究所地質調査総合センター：HP；http://www.gsj.jp/jishin/iwatemiyagi_080614/index.html

Field investigations on Old Irrigation Facilities Damage near the Epicenter of the Iwate Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

TSUNESUMI Naoto, MORI Takehisa, TANAKA Yoshikazu and TAKAKI Kyouji

Summary

The Iwate Miyagi Nairiku earthquake in 2008 caused many damages to agricultural facilities. The hypocentral region of this earthquake was shallow and the earthquake acceleration was high, especially in vertical direction around the epicenter. But structural damages were relatively low to the large acceleration, because the velocity caused by the earthquake was not so high to the acceleration for the superior high frequency components in the earthquake wave form. Therefore, full or half structural damaged houses were only about 0.2% (162 houses) of the whole number in Oushu city (Iwate prefecture) and Kurihara city (Miyagi prefecture) with an intensity of 6 plus on the Japanese seven-stage seismic scale. Also, structural damages of agricultural facilities were few and most of the facilities damages were indirectly caused by slope collapse, land slide, land subsidence, surface crack. These damages were remarkable in old irrigation channels, tunnels on riverside steep slopes.

This situation of low structural damages was almost fit to the structural large damage standard from the maximum acceleration, velocity for an earthquake proposed by Kawase in 1998. Our investigation results supported this standard also in old agricultural facilities, although the maximum velocity for the earthquake was near the lower limit of the structural large damage. But this standard is not able to cover geological damages and indirect structural damages caused by geological damages like slope collapse, land slide, subsidence, and so on. Therefore, it is important for risk analysis that geological and geographical risk assessment should be considered as well as assessments from structural fatigue, earthquake acceleration, earthquake velocity.

Keywords : earthquake, field investigation, rehabilitation, disaster, tunnel, channel, headworks

水理実験による収縮堰付き横越流堰の洪水流下能力の検証

田中良和*・向井章恵*・樽屋啓之*

目 次	
I 緒言	153
II 地区の概要	153
III 実験の概要	154
1 手順	154
2 模型の構造	154
3 測定方法	156
IV 排水路の水面形および流況	156
V 横越流堰の越流特性	158
VI 横越流堰下流端における溢水対策	159
VII 結言	161
参考文献	161
Summary	162

I 緒 言

横越流堰は、本線排水路の通水能力を超過した洪水流量をバイパス水路または遊水池へ越流させて、洪水リスクを低減する機能を有する余水吐施設であり、比較的延長の長い水利施設である。横越流堰の流量係数については、数多くの既往の研究において、様々な形状に対して水理実験により明らかにされており、これらの情報は荒尾ら(2000)によって整理されている。しかし、実際の設計では、用地問題や水利慣行などの制約を受け、既往の研究の水理実験と同等の構造に必ずしも合致しない場合がある。本報告は、横越流堰に与えられた用地面積に対して目標となる越流量を確保できない状況の中、本線排水路の下流側に収縮堰を設けてバイパス排水路への越流量を増加させるようにして解決を図ることを検討した事例研究の成果である。

事例となった長野県県営ため池等整備事業長野3期地区では、本線排水路の下流側の通水能力が小さいために、横越流堰より下流側の本線排水路内に収縮堰を設置することによって、洪水時の越流量を確保することを計画している。一般的な横越流堰の越流量は水路断面が一様であることを前提とした水理設計によって決定されるのに対して、収縮堰付きの横越流堰の越流量は下流側の収縮堰の水路断面変化の影響によって増加するが、これまで同様の形状の水理実験がなされておらず、流量係数も不明であったため、正確な水理設計が困難であった。

そこで本報告では、収縮堰付き横越流堰の水理模型実験を行い、適切な分水量が確保され、溢水が生じな

いかを検証し、本線排水路の下流側の洪水時のリスク管理に資することを目的とした。

この報告を整理するにあたり、長野県長野地方事務所農地整備課に情報提供のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

II 地区の概要

本地区は長野県県営ため池等整備事業の事業計画範囲地区である。流域面積 1,712ha, 受益面積 427ha, 被害想定面積 350ha である。千曲川左岸の長野市東部に位置し、果樹と水稻を中心とした農業地帯である。**Fig.1** に示すように、柳原1号幹線排水路下流の北尾張部付近において横越流堰を設け、柳原バイパス暗渠にて分水して排水する計画である。排水路の全長は 6,805km であり、柳原排水機場の排水量は 23.0m³/s である。分水における基本条件として、「平常時」と「洪水時」の流量条件がある。平常時の流量とは、灌漑時の流量のことである。平常時には、本線排水路の下流側において長野平土地改良区が取水しているため、本線排水路の下流側の流量を 3.3m³/s 以上確保する必要がある。平常時には、バイパス暗渠への越流量はなく、水位は横越流堰のクレストの天端の高さより低いものとしている。洪水時の流量は、1/10 年確率降雨の流量が本線排水路に流下した時点の流量で 34.9m³/s となる。本線排水路の下流側の通水能力に限界があり、洪水時には、本線排水路の下流側の流量を 5.4m³/s 以下に抑制する必要がある。そのためには、余水 29.5m³/s 以上をすべてバイパス暗渠へ分水しなくてはならない。

* 施設資源部水路工水理研究室

平成 20 年 12 月 15 日受理

キーワード：収縮堰, 横越流堰, 洪水

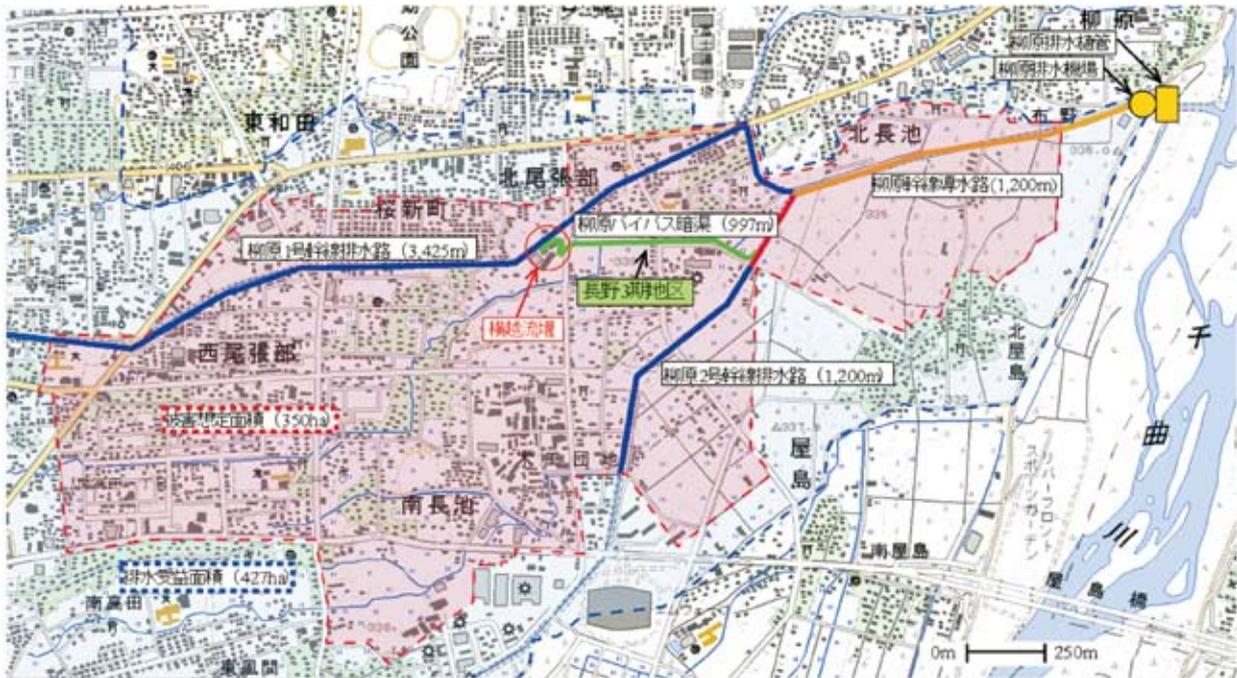


Fig.1 対象地区の概要図 (国土地理院 地図閲覧サービス 2万5千分1地形図使用)
The schematic diagram of object region (Geographical Survey Inst. map reading service 1/25000 topographical map use)

III 実験の概要

1 手順

本実験では、横越流堰の全体、本線排水路とバイパス暗渠の一部を再現した模型を用い、Fig.2の実験フローチャートに沿って検討を行う。

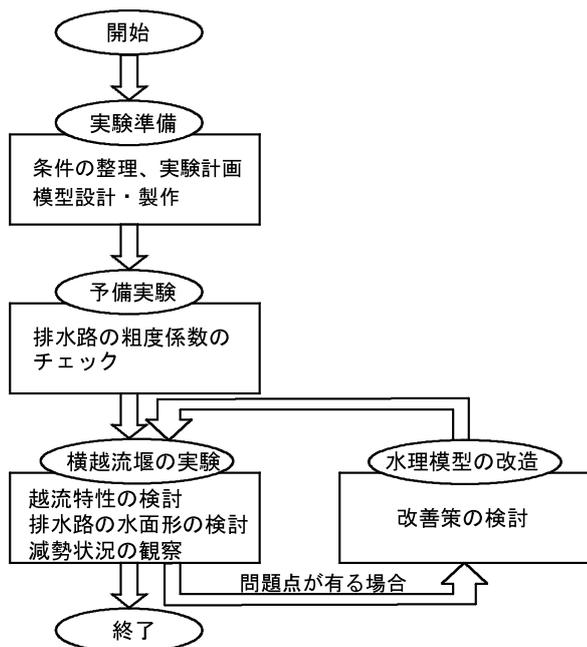


Fig.2 実験手順フローチャート
The experimental procedure flowchart

2 模型の構造

a 横越流堰の流量配分と設計

土地改良事業計画設計基準の技術書「水路工」(2001)によると、越流量は以下の手順にしたがって求められる。

- i 横越流堰上流端 h_1 と下流端 h_2 を仮定する。
- ii 下流の設計流量から横越流堰下流端の水深 H_{e2} を計算する。
- iii 堰長 L と横越流堰上流端の水深 H_{e1} を仮定し、平均越流水深 H_{em} を求める。
- iv 横越流堰の越流量は、次式によって求める。

$$Q_w = CLH_{em}^{3/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Q_w : 越流量 (m^3/s), L : 堰長 (m), H_{e1} , H_{e2} : 横越流堰の上流端と下流端の越流水深 (m), H_{em} : 平均越流水深 (m) = $0.5 (H_{e1} + H_{e2})$, C : 越流係数は次式による。

$$C = 1.838 \times (1 + 0.0012/H_{em}) \times (1 - 0.1 \times (H_{em}/L)^{0.5}) \dots \dots (2)$$

横越流堰の諸量に関する記号は Fig.3 のように説明される。

さらに、本線排水路の横越流堰区間における摩擦損失水頭 H_f と横越流堰の分水損失水頭 H_b は、次式になる。

$$H_f = (I_1 + I_2)L/2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 I_1 : 横越流堰の上流端の動水勾配, I_2 : 横越流堰の下流端の動水勾配である。

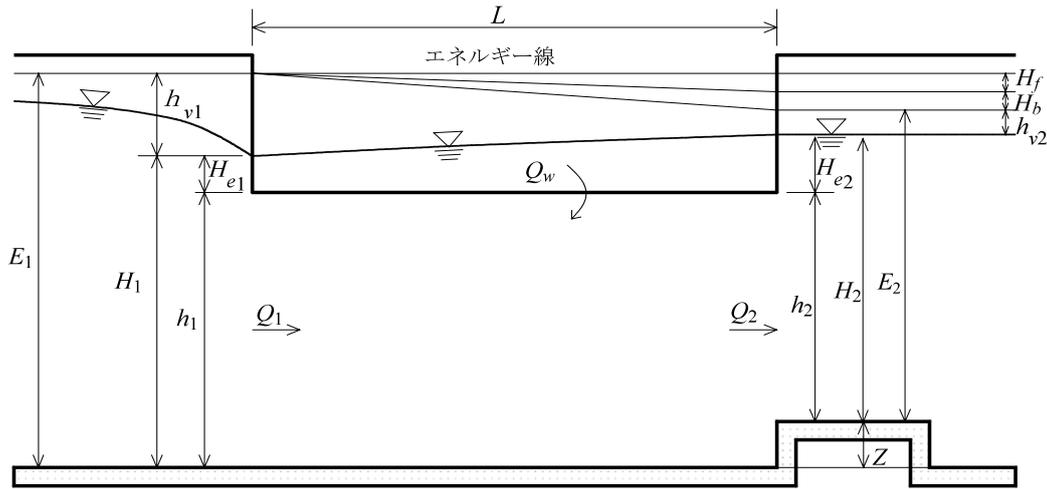


Fig.3 横越流堰の流量に関する記号の説明図
The explanatory drawing of the symbol on flow rate of the side-weir

$$H_b = f_b(v_1^2/2g) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、分水損失係数 f_b は分流比 Q_r の関数として表される。

$$f_b = 0.5807Q_r - \sqrt{0.0788Q_r + 0.0003} + 0.0171 \dots (5)$$

$$Q_r = Q_w / Q_1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 v_1 ：横越流堰の上流端の設計流速、 Q_w ：越流量、および Q_1 ：横越流の上流端の設計流量である。

上下流のエネルギーが一致するので、次式が成り立つ。

$$E_1 = E_2 + Z + H_f + H_b \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 E_1 ：上流端の比エネルギー、 E_2 ：下流端の比エネルギー、 Z ：堰上げ高、 H_f ：本線排水路の横越流堰区間における摩擦損失水頭、 H_b ：分水による損失水頭である。

上下流のエネルギーが一致するように、堰長 L や上流端越流水深 H_{e1} の修正を繰り返す。

本線排水路の場合、勾配は 1/500、水路幅 B は 5m、および粗度係数を 0.015 である。横越流堰の構造を次のように計算して決定した。

洪水時における分土工より上流側の本線排水路の流量は、 $34.9\text{m}^3/\text{s}$ であるので、マンニングの式より、横越流堰よりも上流側の本線排水路の断面の水深 H_1 は 2.114m であった。流速は 3.331m/s であるので、上流側の本線排水路の断面の比エネルギーは 2.680m である。

他方、横越流堰よりも下流側の本線排水路の流量は、 $5.4\text{m}^3/\text{s}$ であるので、収縮堰を設置して流量制限を行う。越流水深 H_2 は、以下の四角堰基本式より、1.146m と求められた。

$$h = \left(\frac{Q}{C \cdot b} \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Q は流量、 C は流量係数、および、 b は越流幅である。ここで、堰上げ高さ Z は $0.968 (=2.114-1.146)$ m とした。

堰長 L を 42m と制限すると、横越流堰からの越流量は、 $29.5 (=34.9-5.4)$ m^3/s であるので、(1) 式から、平均越流水深 H_{em} は 0.530m となった。よって、下流端の越流水深 H_{e2} を 0.529m と設定すると、 h_2 は 0.617 ($=1.146-0.529$) m となり、 h_1 は $1.584 (=0.617+0.968)$ m となる。

さらに、本線排水路の横越流堰区間における摩擦損失水頭 H_f と横越流堰の分水損失水頭 H_b は、それぞれ 0.112m と 0.141m と計算されるので、横越流堰の下流端の比エネルギーは 2.680m となる。これは、上流端の全エネルギーと等しいので、計算はここで終了し、堰長 L は 42m、堰の高さ h_1 は 1.584m と決定された。

b 相似律と模型縮尺

排水路の流れ、堰の越流に対しては、水の粘性・表面張力に比較して重力に起因する慣性力の影響が卓越することから、実物と模型のフルード数を等しくするフルードの相似律に従って実験を行う。

模型の縮尺は大きい方が望ましいが、実験目的に対する必要精度、実験施設の規模および相似性との関係を考慮して選定した。経験上、考慮した事項は以下の通りである。水深は重要区間の水深は 3cm 以上となるようにした。模型の範囲は検討区間の上流側は水路幅の 3～6 倍程度、下流側は水路幅の 2～5 倍程度を目安とした。また、越流堰の実験では、水の粘性や表面張力の影響を避け、越流係数の相似性を満たすためには、堰の越流水深は横越流模型の越流水深を 2～3cm

Table 1 模型縮尺と模型諸量の対比
The contrast of model amount and model contraction scale

水 理 量	実物	模 型			
		$K_L = 1/6$	$K_L = 1/8$	$K_L = 1/10$	$K_L = 1/12$
模型規模					
水路幅 (m)	5	0.833	0.625	0.500	0.417
堰長 (m)	42	7.000	5.250	4.200	3.500
排水路延長 (m)	6805	1134.167	850.625	680.500	567.083
流量規模					
計画流量 (m ³ /s)	34.9	0.396	0.193	0.110	0.070
本線流量 (m ³ /s)	29.5	0.335	0.163	0.093	0.059
分水量 (m ³ /s)	5.4	0.061	0.030	0.017	0.011
水深規模					
計画水深 (m)	2	0.333	0.250	0.200	0.167
越流水深 (m)	0.53	0.088	0.066	0.053	0.044
粗度係数	0.015	0.011	0.011	0.010	0.010
流速規模					
本線流速 (m/s)	3	1.225	1.061	0.949	0.866
レイノルズ数	1.7E+07	1.1E+06	7.4E+05	5.3E+05	4.0E+05
模型規模		大	適	適	適
流量規模		大	適	適	適
水深規模		適	適	適	小
流速規模		適	適	適	適
総合評価		△	○	◎	△

程度以上とした。長さの縮尺を替えて模型諸量を対比して示せば、Table 1 のようになり、本実験では模型縮尺を $K_L = 1/10$ とした。

模型の平面配置を Fig.4 に示す。Table 2 に示すように、模型における本線排水路、越流堰およびバイパス暗渠の再現範囲は以下の通りである。

本線排水路の断面形状は、高さ 2.8m、幅 5.0m の三面張水路である。勾配は 1/500 である。バイパス暗渠の断面形状は箱型である。幅は 1.5m ~ 5.79m、高さは 1.63 ~ 2.89m と下流側の方へ大きくなる。本線排水路に平衡して側道があるため、バイパス暗渠の上流側は上部が道路である。上流側の勾配は 1/30 であるが、下流側の勾配は 1/400 である。横越流堰は堰長 42m、幅 1m である。本線排水路の水路底と横越流堰のクレスト天端までの高さは 1.58m であり、バイパス暗渠の水路底と横越流堰のクレスト天端までの高さは、1.67 ~ 2.97m へと下流側に行くにつれて大きくなる。最後に収縮堰

の形状は、幅 1.9m、高さ 2.514m、長さ 0.9m とした。収縮堰では、高さ 0.1m の角落とし材によって流量を調節できるようにしている。

粗度係数の調整は、模型縮尺 1/10 の相似条件から粗度係数 0.010 をおおよそ満たすように、1cm 立方の角材を 20cm 間隔で貼り付けて、調整を行った。

3 測定方法

実験において、水位、流量、および流速の諸量を測定した。水位の測定は、1/10mm 読みの土研式ポイントゲージを用いて測定した。流量は、本線排水路上流端とバイパス暗渠下流端に設置する量水堰を用いて測定した。流速は、3次元電磁流速計（東京計測 SF-2013）を用いて測定した。このほか、排水路にウラン色素を投入して、目視にて流況を観察した。

IV 排水路の水面形および流況

本線排水路と横越流堰における水面の高さを、Fig.5 の青矢印に図示したように、それぞれ 5cm 間隔と 2cm 間隔で測定した。横越流堰から 29.5m³/s 以上の越流量が流れるためには、収縮堰の中央部の角落とし材を 100cm の高さに積み重ねる必要があった。その際、横越流堰の下流端付近の右岸側の水面が局所的に上昇した。さらに、横越流堰の下流端付近の落水脈は突発的に上昇して側道へ乗り上げるような高い場合も生じた。上昇した水位は右岸側において 2.73m となり、河

Table 2 水路模型の再現範囲
Reproduction range of the open channel model

区分	再現範囲	模型構造	附帯施設
本線排水路	下流：約30m (No.34+11.3~ No.35+12.25)	木製 アクリル製	給水装置 水位調節装置 量水堰
バイパス暗渠	下流：約40m (No.52~No.56)	木製	水位調節装置 量水堰
横越流堰	水利構造の全体	木製	

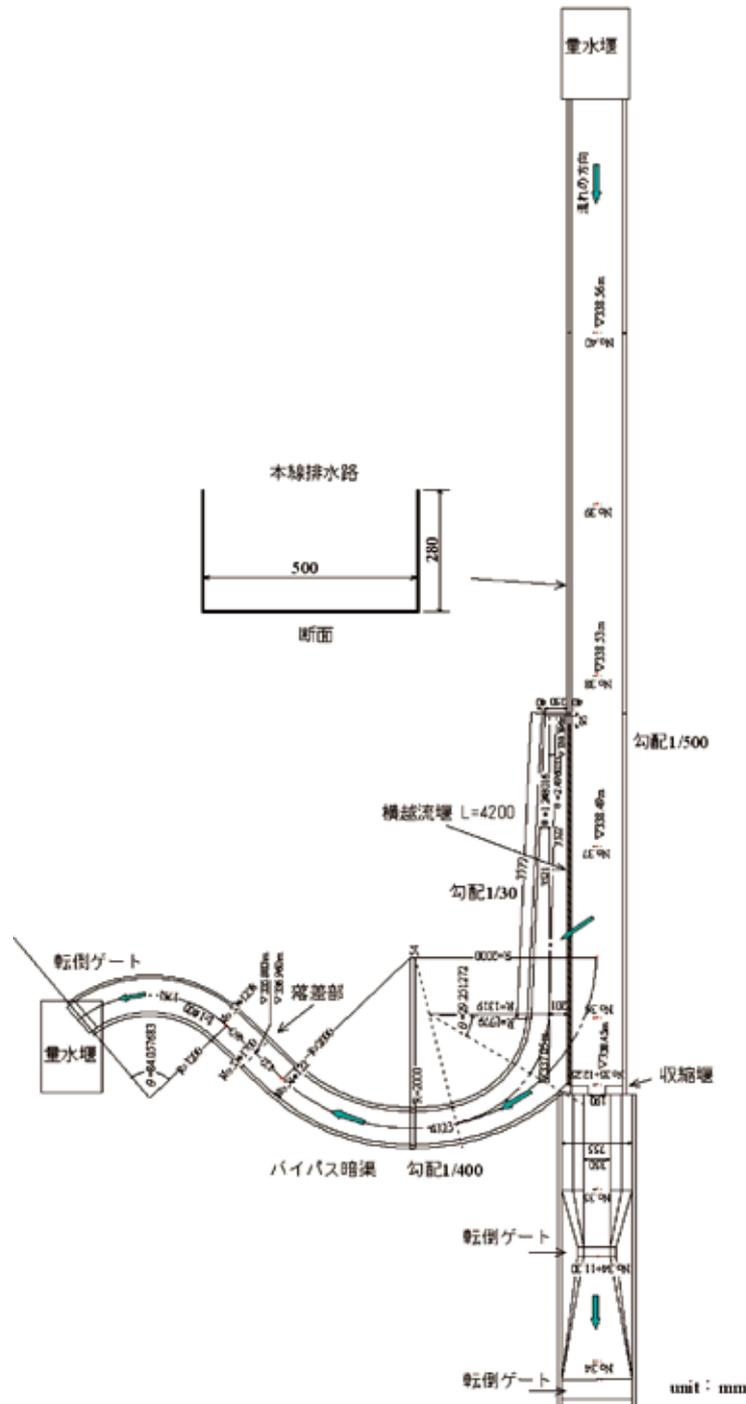


Fig.4 水路模型一般配置
The configuration of the water channel model

岸高 2.8m に肉薄する危険な高さとなり、側道への溢水の可能性が懸念された。

ここで、右岸側の局所的な水面上昇の原因について考える。ウラン色素による流れの軌跡 (Fig.8) では、左岸側の流速は遅く、時折、水平渦が観測されて逆流が生じていたが、右岸側の流速は速く、下流側ほど右岸側を向く速度成分が大きくなっている。また、3次元電磁流速計による流速分布の測定 (Fig.9) では、約5分間の流下方向成分が最大となるデータを選択して記録したがために水平渦の速度成分は確認できないもの

の、右岸側を向く速度成分が下流に行くにつれて大きくなっていることが判る。よって、横越流堰の下流端付近では、左岸側に比べて大きい右岸側の流れが、収縮堰の右岸側の壁面や横越流堰の下流端の水路側壁に衝突して減速し、大きな圧力水頭が生じて水面が上昇したためであると推察される。

横越流堰の下流端付近の落下水脈が突発的に上昇した原因は、横越流堰を越流した落下水脈のナップの形成に起因すると推察される。バイパス暗渠の水面が常に高いために、本線排水路から横越流堰を越流してバ

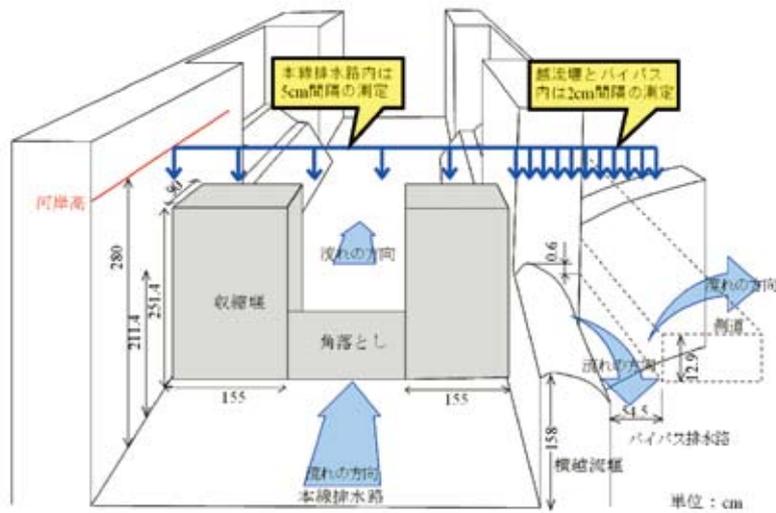


Fig.5 水面形の測定位置
Measurement points of shape of water surface profile

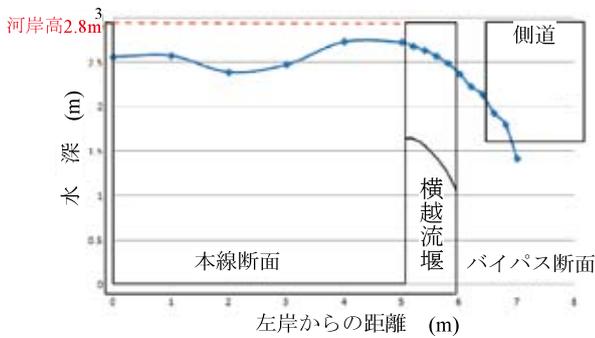


Fig.6 水面形の測定結果
The measurement result of shape of water surface profile

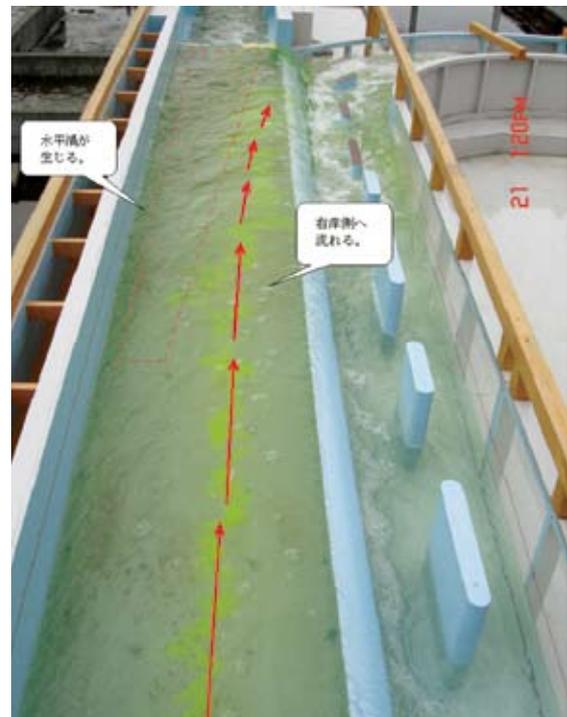


Fig.8 本線排水路におけるトレーサーの流跡
The trajectory of the tracer in the main line drainage



Fig.7 横越流堰の下流端における局所的な水面上昇
The local surface elevation in the downstream edge of the side weir

イパスに流入する際に、十分な落下高さがなく、横越流堰の下流端以外の上流側全域は、ほとんどの時間において付着ナップの状態であった。他方、横越流堰の下流端の約2mの領域では、完全ナップと付着ナップを頻繁に繰り返して、落下水脈の水面形状が大きく乱れた (Fig.10)。

したがって、横越流堰の下流端付近では水面が河岸

高に接近しており、不安定であるために、改良が必要であった。ここでは、収縮堰の堰高を40cm低くして、収縮堰を越流可能な状態にして、水面の上昇を防ぐように改良した。次章において、堰高を40cm低くした2.114mの収縮堰を付けた場合の横越流堰の越流特性を示す。

V 横越流堰の越流特性

本線排水路の流入量を洪水時流量 34.9m³/s とし、収縮堰の堰上げ高さを変化させて、分水量と収縮堰の水

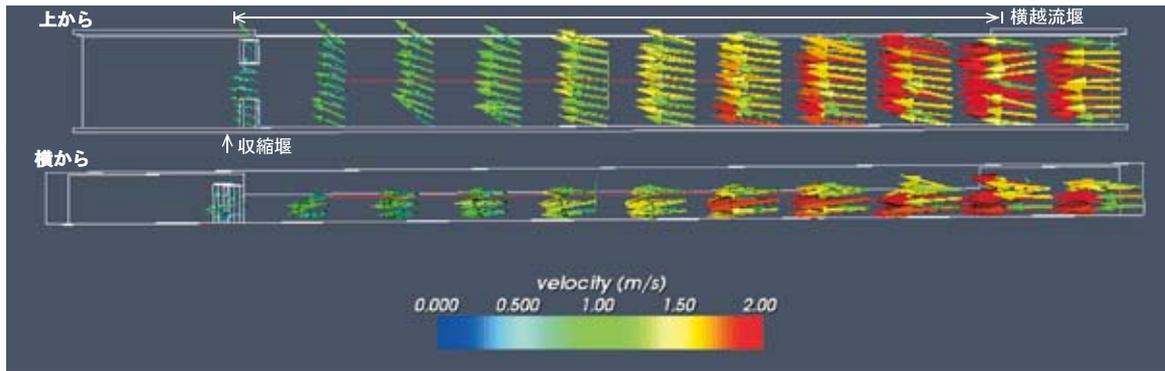


Fig.9 本線排水路における流速ベクトル
Flow velocity vector in the main line drainage

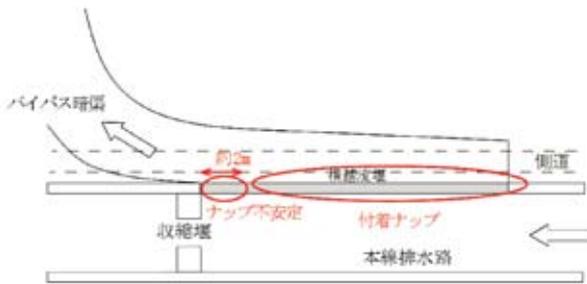


Fig.10 落水水脈の振動する領域の概念図
The conceptual scheme of the region where falling water vibrates

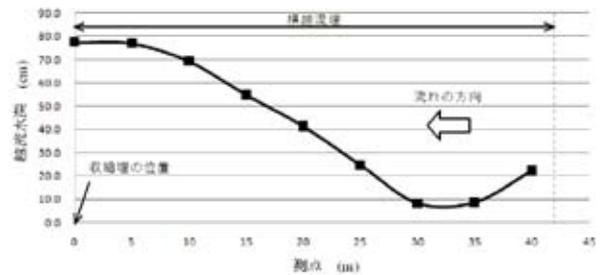


Fig.11 横越流堰における越流水深の変化
The change of the overflow depth in the side-weir

Table 3 収縮堰の堰上げ高さと分水量の関係
The relationship between diversion quantity and contraction dam padding height

収縮堰の堰上げ高さ (cm)	分水量 (m ³ /L)	収縮堰の水深 (cm)
130	30.44	242.5
120	29.80	239.7
110	29.18	243.8
100	28.56	242.5
90	26.96	240.8
80	26.24	240.4
70	25.46	239.4
50	23.65	238.8
0	21.46	237.1

深を測定した。その結果を Table 3 に整理した。分水量 29.5m³/s 以上の適切な分水操作を行うためには、収縮堰中央部の堰上げ高さを 120cm 以上確保する必要があった。しかし、収縮堰中央部の堰上げ高さを 120cm に保持した場合、本線排水路の平常時流量 3.3m³/s が流下すると 2.77m³/s の越流量が生じてしまう。平常時流量を流す時に越流量を 0.0m³/s にするためには、収縮堰中央部の堰上げ高さを 50cm に低下させる必要があった。

越流水深は、一度、測点 40m ~ 35m においては減少したが、測点 35m ~ 5m において大きく増加し、横越流堰の上流端 40m から下流端 0m に向かって S 字状に

増加した。(Fig.11)。

分水量が適切な分水量となる収縮堰の堰上げ高さは 120cm であり、越流水深から (2) 式を使って求めた流量係数は 1.82 であった。横越流堰の公式 (1) より求めた越流量 26.95m³/s とバイパス暗渠下流の量水堰の水深から求めた越流量 29.80m³/s との誤差は 10.58% であった。

越流量が大きく生じた原因は以下のように考えられる。道上と檜谷(1996)による横越流堰周辺の流れの数値解析結果では、右岸側にある横越流近辺のみ右岸側の速度成分があり、左岸側は流下方向の速度成分のみであるのに対して、本実験における収縮堰付き横越流堰では、収縮堰によって左岸側の流速が小さくなり、右岸側においては右岸側を向く速度成分が大きくなったためであると推察される。

よって、(1) より求めた補正後の流量係数は 2.01 であった。

VI 横越流堰下流端における溢水対策

横越流堰の下流端において、落水水脈の水面が本線排水路の下流端において跳ね上がり、側道下の壁面に接触して溢水する現象が発生した。この問題点を改善するために、水理模型の改良を試みた。

改良のポイントは、横越流堰下流端における本線排水路の側壁に、三角柱の整流板を取り付け、本線排水路の主流方向の流れが本線排水路の側壁に衝突するの

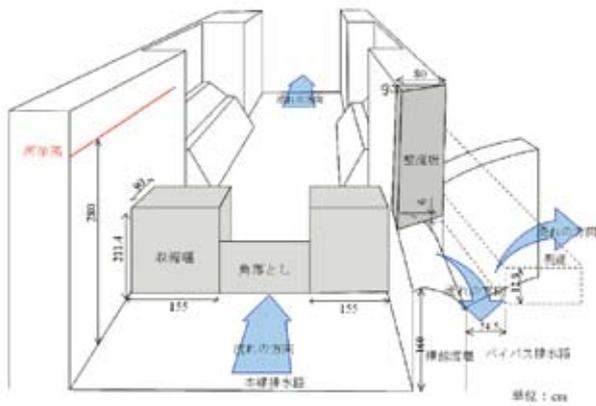


Fig.12 改良型 I の詳細図
The detail drawing of improved I

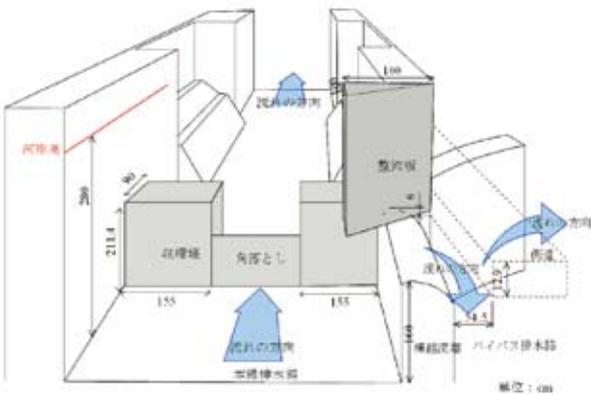


Fig.13 改良型 II の詳細図
The detail drawing of improved II

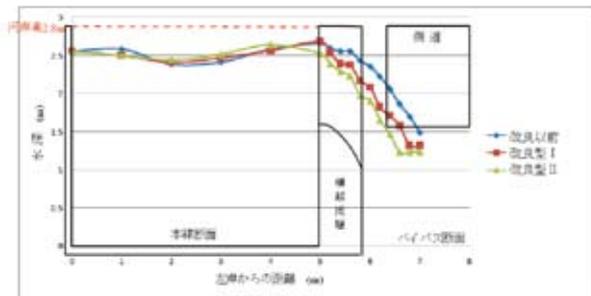


Fig.14 水面形の計測結果
The measuring result of shape of water surface

を避ける構造とした。整流板の大きさを 2 種類試し、それぞれを「改良型 I」と「改良型 II」と呼ぶことにする。Fig.12 と Fig.13 にそれぞれの改良型の形状を示す。

本線排水路の横断面の水深と横越流堰における水面の高さを、Fig.5 と同様に青線に沿って計測した。水面は振動していたため、計測した水深の最大値を計測した。

その結果を、Fig.14 に整理して比較した。改良以前の場合、落下水脈が側道下の壁面に常に接触して溢水したが、改良型 I と II の場合、落下水脈が側道下の壁面に接触する頻度が低くなり、改善された。Fig.14 に



Fig.15 横越流堰の下流端における流況 (改良以前)
The flow condition in the downstream edge of the side-weir (before the improvement)



Fig.16 横越流堰の下流端における流況 (改良型 I)
The flow condition in the downstream edge of the side-weir (improved I)



Fig.17 横越流堰の下流端における流況 (改良型 II)
The flow condition in the downstream edge of the side-weir (improved II)

において、改良型 I よりも改良型 II の方が、落下水脈の水面の高さが約 10cm 低く、落下水脈の接触がより改善された。この違いは流況の写真 (Fig.15 ~ Fig.17) から把握できる。改良型 I では、落下水脈が周期的に側道下の壁面に接触する。他方、改良型 II では、落下水脈が側道下の壁面に接触するまでの周期が緩慢になった。しかし、改良型 II においても完全に接触が無くなるわけではなかった。

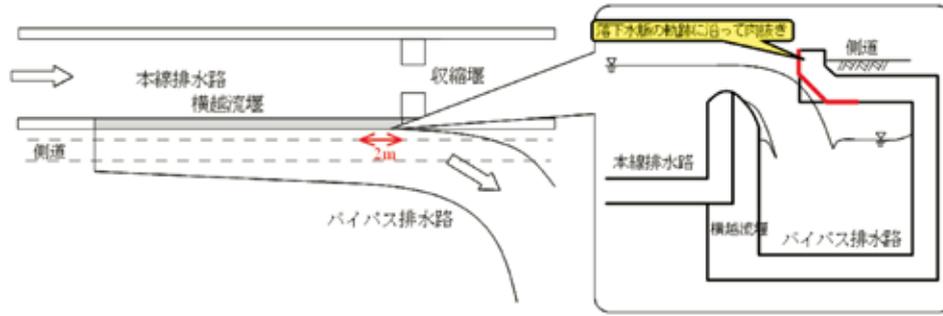


Fig.18 側道の下壁面コンクリート部分を形状変更
Wall surface concrete part under the frontage road is the shape change

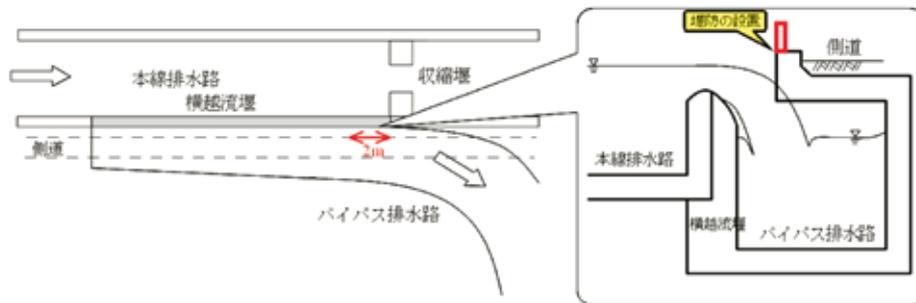


Fig.19 側道の横に堤防の設置
The installation of the embankment by the frontage road

本線排水路の水面と落水脈の振動を制御するための水理模型の改善を行い、大幅なリスクの低減効果が得られたが、落水脈が側道下の壁面へ接触することを完全に抑制出来なかったため、側道へ溢水することを防止する構造にすることがさらに望ましい。さらなる改良案として、以下のような構造にすることによって側道へ溢水するリスクがより低減すると考えられる。

- ①横越流堰下流端 2m 付近の側道下の壁面コンクリート部分を、落水脈が接触しない形状に変更する。
- ②横越流堰下流端 2m 付近の側道横に堤防を設置する。
- ③横越流堰全体の堰高を低くする。ただし、この場合は再度、流量係数の検証が必要である。

Ⅶ 結 言

以上の水理実験の結果を整理すると、以下のように要約できる。

- ①水理実験により適切な越流量を確保できた。本線排水路の洪水時と平常時の越流量の自由度を確保するには、収縮堰の収縮部の堰上げ高さをそれぞれ 120cm と 50cm に調節することで可能になった。ただし、平常時と洪水時においてゲート操作をする必要の無いことが維持管理においては理想的であるが、収縮堰の収縮部の堰上げ高さを変更することなく対処するためには、横越流堰の構造の寸法を再検討する必要がある。

- ②本報告で測定した収縮堰付き横越流堰の流量係数は、横越流堰の公式から導いた値と約 11% の差異があり、2.01 であった。収縮堰の通水断面の減少によって、左岸側の流速が遅くなり、右岸側においては右岸側を向く速度成分が大きくなったことが寄与していると推察された。

- ③本線排水路の主流方向の流れが横越流堰下流端における側壁や収縮堰に衝突し、本線排水路の水面上昇と落水脈の水面形が乱れる問題が生じた。収縮堰の堰高を低くすることと横越流堰の下流端に整流板を据え付けることによって、大幅に低減出来ることを示した。

参考文献

- 1) 荒尾慎司・瀧田康雄・楠田哲也 (2000)：直線水路における横越流堰の分水特性に関する実験的研究および理論的研究の検証 - レビューと課題 - , 下水道協会誌, 37, 448, p.151-164
- 2) 道上正規・檜谷治 (1996)：横越流堰周辺の流れに関する数値シミュレーション, 鳥取大学工学部研究報告, 27, p.87-94
- 3) 農林水産省農村振興局 (2001)：土地改良事業計画設計基準 設計「水路工」 技術書, p.570-578

The verification by the hydraulic test of the ability of the side-weir with the contraction dam under the flood flow

TANAKA Yoshikazu, MUKAI Akie and TARUYA Hiroyuki

Summary

Recently, the farmland which had fulfilled the role of the regulating pondage of the flood decreased. The outflow which lost the adjustment function can become a cause of the flood damage. The side-weir diverts the flood discharge which exceeded ability of the downstream of the main drainage to bypass channel. In this report, case study of the side-weir with the contraction dam was carried out in order to control a risk in the flood in the downstream of the main drainage. In experimental result and value required from the formula, there was 11% difference on the flow coefficient of the side-weir, however, the diversion quantity has been appropriately ensured. Although falling water is disturbed on the downstream edge of side-weir, it was drastically reduced as a result of installing the rectification plate.

Keywords : contraction dam, side-weir, flood

低周波電磁波を利用した地中変位測定法の検討

浅野 勇*・林田洋一*・増川 晋*・田頭秀和*・遠目塚良一**

目 次	
I 緒 言	163
II フィルダムにおける地中変位測定の現状	163
III 低周波電磁波による地中変位測定原理	164
1 低周波電磁波を利用した 地中変位測定法の概要	164
2 低周波電磁波の距離減衰の理論的考察	164
3 地中変位の計算	165
IV 地上における低周波電磁波の送受信実験	166
1 実験装置	166
2 実験方法	166
3 実験結果	167
V 考 察	169
VI 結 言	169
参考文献	170
Summary	171

I 緒 言

土質構造物の安全性を評価するためには地中変位測定が重要である。たとえば、フィルダムでは堤体の安全管理のために層別沈下計や岩盤変位計などを用いた地中変位測定が一般的に行われている。安中（1996）は52の農業用フィルダムを対象とした調査を行い、全体の78%に層別沈下計が、48%に岩盤変位計が設置されていたことを報告している。

一方、現状の地中変位測定法については、計測装置の寸法が大きく、堤体内へ異物を設置することになるため堤体の変形や浸透性状に影響を与えることが懸念される。また、計器の構造も複雑なため計測誤差も発生し易い。さらに、計測は手動で行われることが多いため計測に手間がかかり、測定頻度を上げることが難しいなどの問題点が指摘されている。

このような地中変位測定法の問題点を改善するために、本研究では低周波電磁波に着目した地中変位測定法の検討を行った。筆者らはすでに地中において通信距離が100m程度であれば通信可能な低周波電磁波を利用した地中通信方法を開発している（向後ら、2006）。この研究の中で、地中においても低周波電磁波の強さが距離の3乗に比例して減衰することを確認した。低周波電磁波の強さが距離とともに規則正しく減衰すると仮定すれば、その減衰量から地中における変位測定センサの移動量を推定できる。さらに、低周波電磁波

を利用すれば地中通信も可能なため、地中通信によるデータ伝送と地中変位の測定を同時に行うことが可能である。

そこで、本研究では、低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることができるという仮説の基本的な検討を試みた。具体的には、低周波電磁波の強さの変化と変位量の関係を求める地上実験を行い、その基本的な特性を検討することにした。なお、フィルダムへの適用を想定し、地上実験では計測距離30mで変位測定精度10mmを確保することを目標に実験水準を設定した。

II フィルダムにおける地中変位測定の実状

フィルダムに設置されている代表的な地中変位測定機器にはクロスアーム沈下計と岩盤変位計がある（（社）地盤工学会、2004）。Fig.1にクロスアーム沈下計の構成を示す。クロスアーム沈下計は、フィルダムなどの盛土内部の変形量を測定する計測器であり、層別沈下計とも呼ばれる。クロスアームは、鋼管などに長さ200cm、幅60cm程度の沈下板が剛結された構造であり、盛土の沈下に追従して可動する。計測では、鋼製テープの先端に探索子を取り付け管内に送り込み、探索子が沈下板を感知した時のテープの送り長さからクロスアームの変位を求める。沈下板の位置は沈下板の磁気やパイプの継目の段差から感知する。探索子を用いる方法は手動計測が必要のため測定に手間がかかるのが難点である。この難点を解消するため、電気式変位計を用いた自動計測方法が開発されている。この方法では、基礎岩盤に固定した支柱を管内に垂直に立上げ、支柱に電気式変位計を固定してクロスアームの移動量

* 施設資源部構造研究室

** 坂田電機(株) 技術部設計課

平成20年12月15日受理

キーワード：地中変位測定, 低周波電磁波, 地中通信

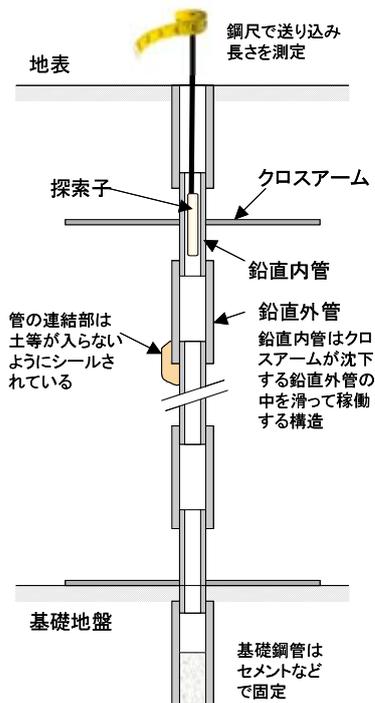


Fig. 1 クロスアームの概要図 (手動式)
Schematic view of cross arm pipe (Manual operation).

を計測する。つまり、基礎岩盤と支柱の変位量が等しいと仮定した計測が行われている。クロスアームの計測精度には探索子の精度 (1~2mm) が記載されている場合が多いが、テープなどの伸び、固定端の移動および読み取り誤差などを勘案すれば実際の精度は探索子の精度より低いと推定される。旧建設省土木研究所 (1994) の研究によればフィルダムの沈下量は最大でも堤高の2%程度である。つまり、堤高100mのダムでは最大200cm程度の沈下が予測される。一般的な土木計測器の精度が最大容量の1/100程度であることを考えれば、クロスアームについては1~2cm程度の精度が必要と考えられる。

Fig.2に岩盤変位計の構成の概要を示す。岩盤変位計は、基礎岩盤の相対変位を計測する。基盤表面からボーリングを行い、目標地点 (固定点) にロッドを固定する。基盤表面までロッドを伸ばし、その変位を測定することで、基盤表面と固定点の相対的な変位を求める。旧建設省土木研究所 (1994) が6ダムに設置された深度の異なる岩盤変位計の変位量 (上載盛土高37~112mの範囲) を調べた結果、変位量は5~350mmの範囲にあった。この調査結果から推定すれば、少なくとも岩盤変位計についてはmmオーダーの計測精度が必要と考えられる。

以上述べたようにフィルダムの現状の変位測定用埋設計器は構造が複雑でかつ手動計測が必要なものが多く、計測のためのコストもかさむ。このような現状を改善するための手段としてケーブルが無く寸法が小さい低周波電磁波を利用した地中変位測定法は有効と考

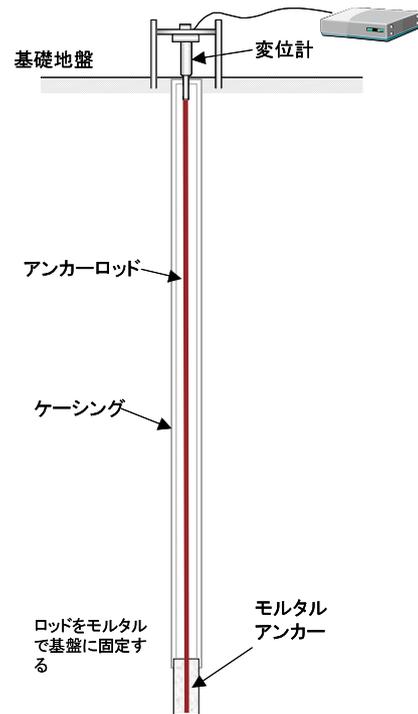


Fig. 2 岩盤変位計の概要図
Schematic view of rock extensometer.

えられる。

III 低周波電磁波による地中変位測定原理

1 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要

低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要をFig.3に示す。計測に必要な計器は地上部の送受信装置と地中部に設置する変位測定センサである。送受信装置から低周波電磁波が変位測定センサに送信されると、電磁誘導によりセンサ内のアンテナコイルに電磁波の強さに比例した電圧が発生する。変位測定センサはこの電圧を測定し、その計測値を地上の送受信装置に地中通信で伝送する。得られた電圧値の変化からセンサの移動量が計算できる。

地中通信の通信可能距離はアンテナコイルの大きさに規定される。このため変位測定センサの寸法が重要な設計項目となる。センサの構造物に対する影響を考えればセンサの寸法はできるだけ小さい方が望ましいが、寸法が小さすぎると通信可能距離が低下する。今回は、変位測定センサの寸法をフィルダムへの埋設実績が豊富なワイヤレス間隙水圧計と寸法 (ϕ 120mm, H205mm) とすることとした。また、送信周波数も同じく8.5kHzとした。参考のためワイヤレス間隙水圧計の構造と外形をFig.4に示す。Fig.4で間隙水圧計を取り外した構造が変位測定センサの基本的な構造となる。

2 低周波電磁波の距離減衰の理論的考察

ここでは、低周波電磁波を利用した地中変位測定に

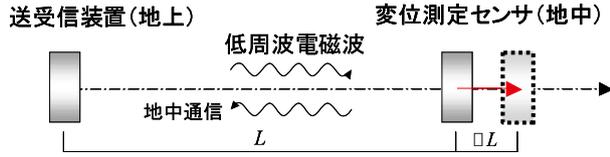


Fig. 3 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要
Outline of the measurement of internal deformations with a low frequency electromagnetic wave.

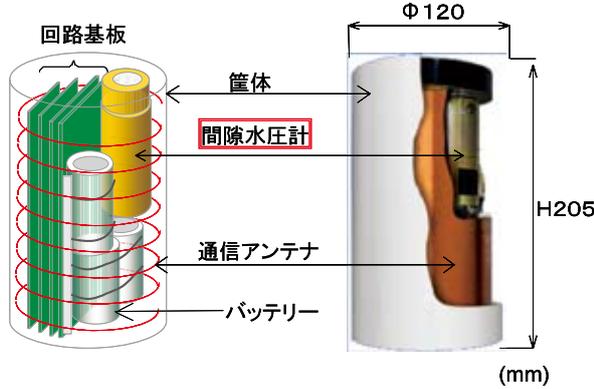


Fig. 4 ワイヤレス間隙水圧計の外形及び構造
Structure of a wireless pore water pressure transducer.

必要な低周波電磁波の強さの距離減衰特性について述べる。農業用フィルダムの地中変位測定を想定すれば、堤体表面から測定センサまでの通信距離は最大でも100m程度である。一方、送受信装置に搭載されるアンテナコイルの直径は最大でも30cm程度である。このようにアンテナコイルの直径は通信距離に較べると十分小さい。このため、アンテナコイルの周辺における電磁界はFig.5に示すような微小ループアンテナ周辺に発生する電磁界として表すことが可能である。ここでは、この微小ループアンテナ周辺の電磁界の理論式に基づき低周波電磁波の強さについて考察を行う。

空気中におかれた面積 $S[\text{m}^2]$ の微小ループアンテナに角速度 ω [Hz]、波長 λ [m] の電流 $I[\text{A}]$ が流れると、ループの中心から距離 $r[\text{m}]$ 離れた点、すなわち極座標 (r, θ, ϕ) には、Fig.5に示すような電磁界が発生する。特性インピーダンスを Z_0 とすると、この点の電界成分 E_ϕ および磁界成分 H_r (r 方向) 及び H_θ (r 方向と直交) は式 (1) ~ (3) で与えられる (高村ら, 2006)。ここで j は虚数単位である。

$$E_\phi = \frac{Z_0 \pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(1 - j \frac{\lambda}{2\pi r}\right) \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (1)$$

$$H_r = j \frac{2\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(0 + \frac{\lambda}{2\pi r} - j \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2\right) \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (2)$$

$$H_\theta = -j \frac{\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(1 - \frac{\lambda}{2\pi r} - j \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2\right) \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (3)$$

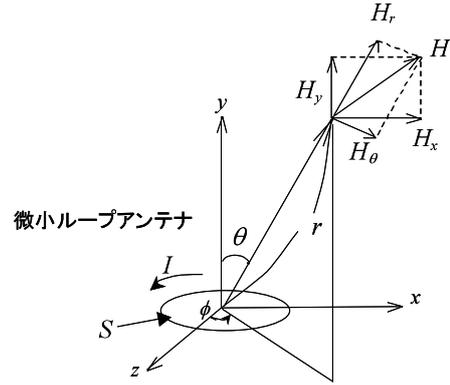


Fig. 5 微小ループアンテナ周辺の電磁界
Electromagnetic field emitted by a small loop current.

本研究で対象とする通信距離は高々100[m]程度であり、使用する波長が35[km]程度であることを考えれば、式(2)において $(\lambda/2\pi r)$ と $(\lambda/2\pi r)^2$ 項を比較した場合 $(\lambda/2\pi r)^2$ が主要な項となり、 H_r は以下の近似解として取り扱うことができる。

$$H_r = \frac{SI}{2\pi r^3} \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (4)$$

また、 E_ϕ は H_r に較べ微小となるため、微小ループアンテナ近傍の電磁界は r^3 に反比例する項、すなわち磁界成分が卓越する電磁界となる。このような磁界成分が卓越する電磁界を準静界と呼ぶ。地上部の送受信装置のアンテナコイルから低周波電磁波を発信し、準静界により地中部の受信アンテナに電磁誘導現象で励起された電気信号を読み取ることが地中通信の原理である。なお、詳細については割愛するが、透磁率及び導電率が均一である地盤中の電磁界は、空気中における電磁界と同様に距離の3乗に反比例し、磁界成分の卓越する準静界が、地盤の透磁率と導電率に応じた減衰を受けつつ伝播する (高村ら, 2006)。

3 地中変位の計算

実際の地中変位の測定では、送受信装置と地中部に設置する変位測定センサの間にリファレンス受信アンテナを設置し、リファレンス受信アンテナと変位測定センサの受信電圧の比 (以下電圧比と呼ぶ) から地中変位を求めることにした。これは、電圧の比を取ることで送信電流の変動や場所ごとに異なる可能性のある地盤の透磁率や導電率の影響をキャンセルするためである。高村ら (2006) が報告するように、土中の導電率は水分量に大きな影響を受けるため、このような比をとることで導電率の影響を完全にキャンセルできるかは不明であるが、花崗岩および堆積岩における低周波電磁波の伝播特性が空気中に比べてあまり低下しない研究結果 (高村ら, 2006) が示されており、土中における低周波電磁波の伝播特性がこのような岩盤と同じであれば電圧比を用いることが有効と考えた。

計測装置の構成を Fig.6 に示す。ここで、送受信装置からリファレンスアンテナまでの距離を $D[m]$ 、リファレンスアンテナから変位測定センサまでに距離を $E[m]$ 、リファレンスアンテナおよび変位測定センサの受信電圧をそれぞれ V_r 、 V_m とすれば、それぞれの受信電圧は H_r に比例するので、2つの受信電圧の比 A (以下電圧比と呼ぶ) と距離 D 、 E の間に以下 (5) 式が成り立つ。距離 D が既知であれば、電圧比 A を計測することにより (5) 式から距離 E を求めることができる。

$$A = \frac{V_r}{V_m} = \left(\frac{D+E}{D} \right)^3 \quad (5)$$

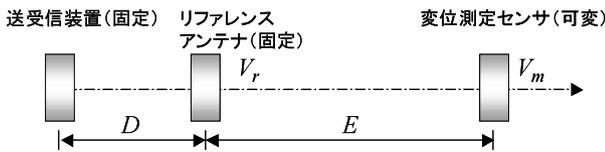


Fig. 6 計測装置の構成
Sensor installation.

IV 地上における低周波電磁波の送受信実験

空気中における低周波電磁波の変化と変位量の関係を求めるために、地上実験を(独)農研機構農村工学研究所構内の散水器性能試験圃場で実施した。この圃場を選定した理由は、周囲にノイズ発生源の電線などが比較的少なく、環境ノイズが小さいためである。フィルダムへの地中変位測定を想定し、計測距離 30m で変位測定精度

10mm が確保できるかを目標とし、実験水準を決定した。

1 実験装置

実験装置を Fig.7 に示す。また使用機材の仕様を Table 1 に示す。

2 実験方法

受信電圧比と変位測定センサの移動量の関係を求めるための電圧-変位測定実験および変位測定センサの回転などが受信電圧に与える影響を調べるための影響要因確認実験を行った。

電圧-変位測定実験では、リファレンス受信アンテナの位置を $D=5m$ と固定し、リファレンス受信アンテナと変位測定センサ間の距離を $E=10, 15, 25m$ と変化させ、それぞれの距離で変位測定センサを送信軸方向に 0, 5, 10, 20, 50mm 変位させて電圧比を計測した (Fig.7)。送信軸方向のみの移動としたのは、送信軸の傾きやセンサの回転の影響を排除するためである。これらの影響については影響要因確認実験で検討した。

影響要因確認実験では通信距離 15m の 1 ケースのみ実験を行った。式 (2), (3) から準静界の強さは、(1) 送受信機の出力 (I)、(2) 送信軸のずれ (θ の影響)、(3) センサの回転 (θ) の影響を受ける。これらの影響を確認するために以下の実験を行った。

- (1) 電圧変動実験：送受信機の電源電圧が変動した場合を想定し、電源電圧を 7.5V, 10.5V, 12.5V と変化させ受信電圧の変動を測定する。

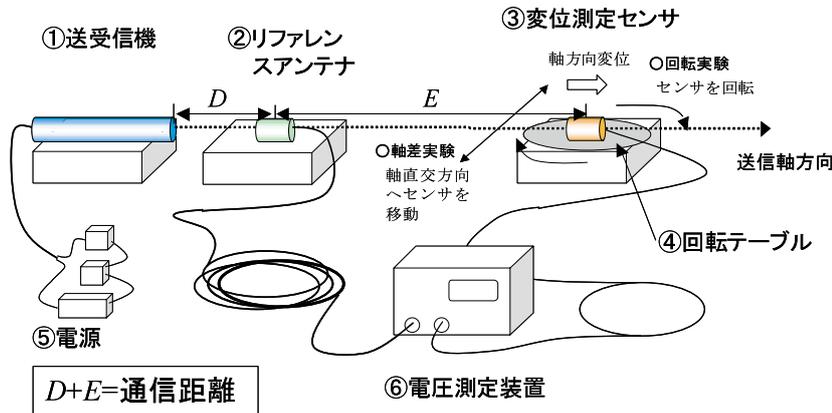


Fig. 7 実験装置
Schematic view of experimental equipment.

Table 1 使用機材の仕様
Specification of equipment.

機材名	仕様	機材名	仕様
①送受信機	孔内地中通信システム送信機 φ 48mm, H550mm	④回転テーブル	変位測定センサを回転させるためのテーブル
②リファレンスアンテナ	ワイヤレス間隙水圧計相当 φ 48mm	⑤電源	乾電池を組み合わせて、7.5V, 10.5V, 12.0V を供給
③変位測定センサ	ワイヤレス間隙水圧計相当 φ 48mm	⑥電圧測定装置	2つのアンテナの受信電圧を μsec 単位で同期測定

Table 2 実験条件
Experimental conditions.

実験シリーズ名	実験名	概要	実験水準				
			D[m]	E[m]	通信距離D+E [m]	センサ移動量 電圧変化量回転角	
電圧-変位測定実験	電圧変位測定実験	電圧比とセンサ移動量の関係を求める	5	10,15,25	15,20,30	0.5,10,20,50[mm]	
影響要因確認実験	電圧変動実験	電源電圧が電圧比に与える影響を調べる		10	15	15	7.5,10.5,12.5[V]
	軸差実験	送信軸のズレが電圧比に与える影響を調べる					0,10,20,40[cm]
	回転実験	センサの回転が電圧比に与える影響を調べる					0.5,10,30[°]

- (2) 軸差実験：変位測定センサが送信軸からずれた場合を想定し，変位測定センサが送信軸と直交方向に0, 10, 20, 40cm ずれたときの受信電圧の変動を測定する (Fig.7)。
- (3) 回転実験：変位測定センサが回転した場合を想定し，変位測定センサが送信軸に対して0, 5, 10, 30° 回転した場合の受信電圧の変動を測定する (Fig.7)。

実験条件を Table 2 にまとめる。

3 実験結果

a 電圧変位測定実験

電圧-変位測定実験の結果を Fig.8 に示す。ここで電圧比は3回の測定の平均値である。各グラフには実線で

式 (2) ~ (3) に基づき計算した理論値を追加した。グラフの縦軸の目盛りは軸方向変位 10mm に対応する電圧比変化の倍数に設定してある。Fig.8 より，通信距離が 15m の場合は電圧比と変位量の間には正の相関関係があり，その増加量は理論的な増加量とほぼ一致した。一方，距離が 20m 以上になると電圧比と変位量の間には明確な相関関係は認められなかった。距離 15m における実測電圧比のバラツキが標準偏差程度と仮定すると変位測定精度は 3 ~ 4cm 程度と推定できる。

Fig.9 に実測電圧比のバラツキを示す。各棒グラフの高さは3回の実測電圧比の平均からの偏差を表す。また，グラフに追加した四角形の網掛け領域は，変位測定センサが送信軸方向に ± 10mm 変位した場合の理論的な電圧比変動範囲を示す。Fig.9 から，実測電圧比のばらつ

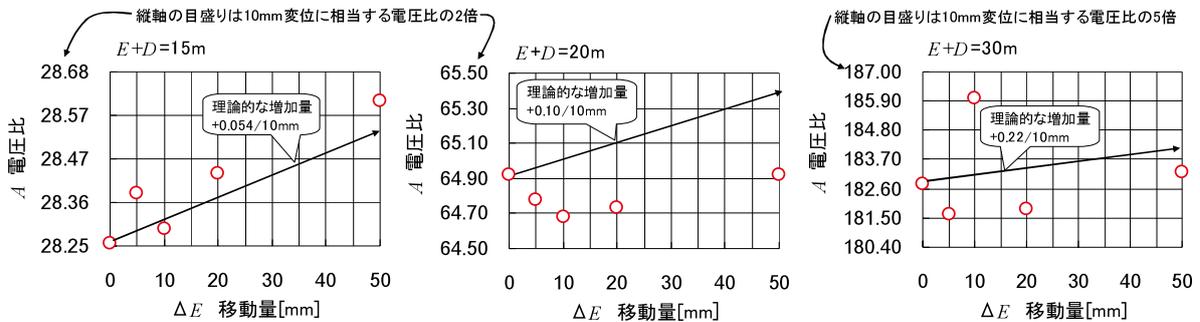


Fig. 8 変位測定センサの移動量と電圧比の関係
Relationship between the displacements of internal deformation sensor and the voltage ratios.

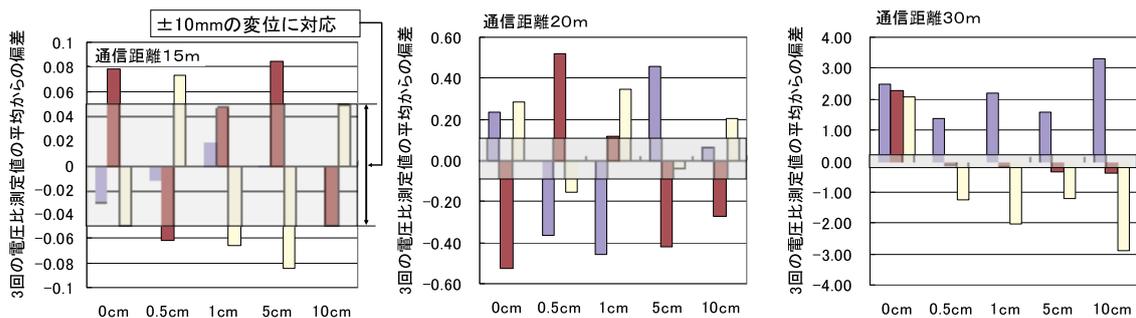


Fig. 9 実測電圧比のバラツキ
Differences in the measurement voltage ratio data.

きは大きく、通信距離が20m以上になると後で述べるように±10mmの軸方向変位量に相当する電圧比変化量の4~10倍の範囲でばらつく。すなわち、通信距離が20m以上では実測電圧比のばらつきが大きく、変位測定精度を±10mm以内に確保することは難しい。

各実測電圧比のばらつきが軸方向変位量10mmに相当する電圧比変化の何倍程度発生しているのか試算してみる。通信距離15, 20, 30mにおける実測電圧比の標準偏差の平均は、それぞれ0.066, 0.395, 2.244であった。一方、通信距離15, 20, 30mにおける変位測定センサの軸方向変位量10mmに相当する理論電圧比変動量は、それぞれ0.054, 0.10, 0.22である。実測電圧比のバラツキがその標準偏差の平均で代表できると仮定すれば、標準偏差の平均を変位量10mmに相当する理論電圧比変動量で割ることにより、軸方向10mmの変位量に対する測定値のバラツキが推定可能である。計算を行うと、通信距離15, 20, 30mに対して実測電圧比は軸方向変位量10mmに相当する電圧比変動量の1.2, 4.0, 10倍程度ばらつくことが分かった。

Fig.10に理論的な電圧比と実測電圧比を比較したグラフを示す。実測電圧比は通信距離が15, 20, 30m(それぞれセンサの移動距離=0cm)の値である。グラフには実測S/N比(受信信号の大きさ/ノイズの大きさ)も同時に示した。理論値の算出は式(5)を用いた。グラフ

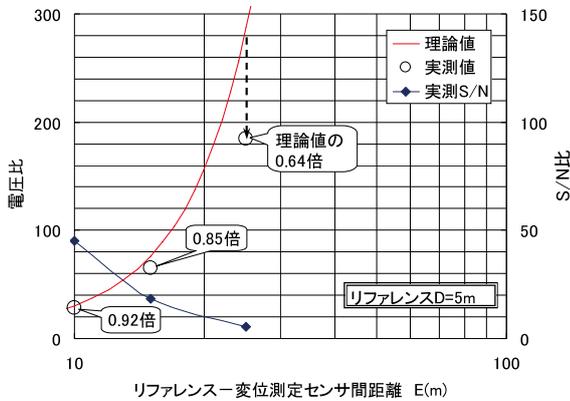


Fig. 10 理論的な電圧比と実測値の比較
Comparison of theory values and voltage ratio data.

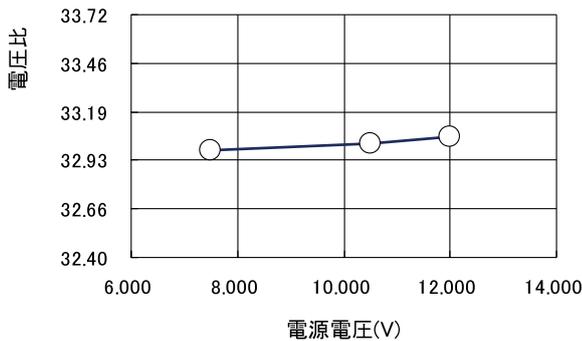


Fig. 11 電源電圧と電圧比の関係
Relationship between the voltages of power supply and the voltage ratios.

から、通信距離20mまでは理論値と計測値はほぼ整合した。実測S/N比は通信距離が長くなるに従い急激に低下した。

b 電圧変動実験

送受信機の電源電圧を7.5V, 10.5V, 12.0Vと変化させた場合の電圧比の変化をFig.11に示す。電源電圧が増加すると電圧比も増加し、電源電圧1V当たりの電圧比の増加は0.017であった。これは、軸方向変位量に換算すると約3mmの変動に相当する。

c 軸差実験

変位測定センサを送信軸に対して直交する方向に0, 10, 20, 40cm平行移動したときの電圧比の変化をFig.12に示す。図には実線でデータを2次関数で近似した推定曲線を追加した。開始時の軸合わせが十分でなく、送信軸から10cm離れた点が極小値となったが、電圧比の変化は2次関数で近似することが可能であった。理論電圧比から換算すると、変位測定センサの送信軸に対して直交する方向へのずれが±100mmの範囲であれば軸方向変位の変動を±10mm以内に収めることができる。

d 回転実験

変位測定センサを送信軸に対して5, 10, 30°傾けたときの電圧比の変化をFig.13に示す。図には実線でデータを2次関数で近似した推定曲線を追加した。理論電圧比から換算すると、変位測定センサの回転が送信軸対

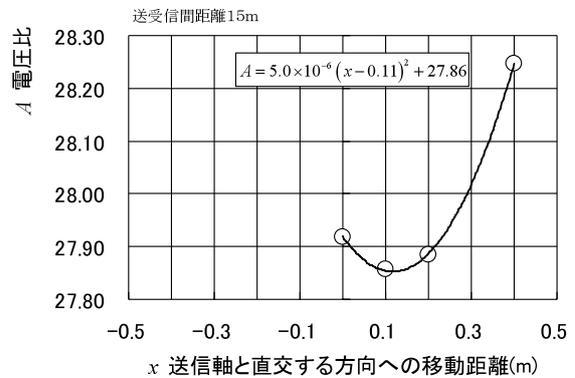


Fig. 12 送信軸に直交する変位と電圧比の関係
Relationship between the sensor displacements in direction orthogonal to the transmission axis and the voltage ratios.

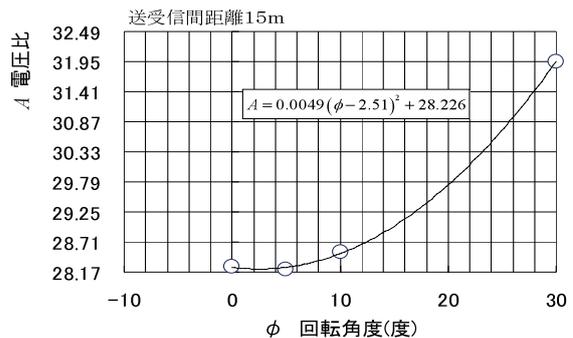


Fig. 13 変位測定センサの回転と電圧比の関係
Relationship between the sensor rotations and the voltage ratios.

して $\pm 3.5^\circ$ 以内であれば軸方向変位に対する変動を $\pm 10\text{mm}$ 以内に収めることができる。

V 考察

地上実験から、低周波電磁波の強さの変化を利用した地中変位計測は、提案したシステムの仕様では計測距離 30m で変位測定精度 10mm を確保することが難しいことが示された。以下にその理由を示す。

電圧-変位測定実験の結果から、送信距離が 20m 以上になると電圧比と変位測定センサの移動量の間に明確な相関関係が見られないこと、送信距離 15m では両者に正の相関関係が認められるものの変位測定精度は $3\sim 4\text{cm}$ 程度であることが明らかになった (Fig.8)。フィルダムにおける地中変位測定では少なくとも通信距離 30m で 1cm 程度の測定精度が必要であるが、提案した計測システムの測定精度はこの条件を満たさない。さらに、実際のフィルダムにおける計測を想定した場合、地盤の透磁率および導電率の影響を受け低周波電磁波は空気中よりさらに減衰すると推測されるため (向後ら, 2006), 地中変位測定法の精度は今回の地上実験より低下すると予想され、必要な精度を確保することは現実的に難しいと考えられる。

一方、変位測定センサの受信電圧に影響を与える要因を調べた影響要因確認実験の結果から、通信距離 15m の条件下で、(1) 電源電圧 1V の変化は測定電圧比に対して軸方向変位量に換算して約 3mm の変動を与える、(2) 変位測定センサの送信軸直交方向へのずれが $\pm 100\text{mm}$ 以内であれば測定電圧比に対する変動は軸方向変位量換算で $\pm 10\text{mm}$ 以内に収まる、(3) 変位測定センサの回転が $\pm 3.5^\circ$ 以内であれば測定電圧比に対する変動は軸方向変位量換算で $\pm 10\text{mm}$ 以内に収まることが明らかになった。変位測定センサの測定精度を 10mm 以内に確保するためには、これらの影響要因による電圧比変動を少なくとも測定精度の 10% 以内 (= 変位換算 1mm 以内) に収める必要がある。このためには通信距離 15m の条件下で、電源電圧変化 0.3V 以内、送信軸のずれ $\pm 10\text{mm}$ 以内、測定センサの回転角 $\pm 0.35^\circ$ 以内を確保する計器設置条件が必要である。電源電圧の条件を除けば、これらの条件を満足する変位測定センサの地中設置は極めて難しい。

次に、なぜ今回の計測システムを用いて低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることが困難であったかその理由について考察する。

実験から、通信距離が長くなると実測電圧比のバラツキは急激に増大する (Fig.9)。これは通信距離が長くなるにつれて受信信号レベルは急激に低下するがノイズレベルはほとんど変化しないため相対的にノイズの影響を強く受けるためと推測できる。一方、Fig.10 から低周波電磁波の距離減衰は、通信距離が 20m まではほぼ理論

値と実測値が一致するが、通信距離が 30m になると実測値と理論値の乖離が大きくなる。この理論値と実測値の乖離の傾向は実測 S/N 比が低下するほど顕著である。すなわち、S/N 比の低下が理論値と実測値の乖離の原因と推定できる。つまり、今回の実験では、低周波電磁波の距離減衰はほぼ理論通りであったが、距離に比例して急激に S/N 比が低下し、そのために測定値のバラツキが大きくなり、理論値と実測値の乖離や測定精度の低下を生じさせた可能性が高いと考えられる。通信距離が 15m の実験では実測 S/N 比が 45 であり、実測値と理論値がほぼ一致し、測定精度も高い結果が得られていることもこの仮説を裏付けるものである。

そこで、上で述べた測定精度の低さが S/N 比の低さに起因するという仮説が正しいとした場合、提案するシステムに対してどのような改良を行えば良いのか考察する。通信距離 15m における実測 S/N は 45 である。通信距離 15m での測定精度を 3cm と仮定すれば、測定精度 1cm を満たすためにはノイズの影響を $1/3$ 以下に低減する必要がある。つまり、現状の 3 倍の S/N 比 135 が必要となる。同様に通信距離 30m で測定精度 1cm を満たすためには、 30m 地点での S/N 比が 135 になる必要がある。 30m 地点での実測 S/N 比は 5.6 であるので $135/5.6=24 \approx 25$ 、つまり S/N 比を少なくとも 25 倍以上に向上させる必要がある。S/N 比を向上させるためには、(1) 送信出力を増強する、(2) 受信ノイズを低減する、ことが必要である。しかし、送信出力を 25 倍以上にするためには送受信器のアンテナの体積を 25 倍以上にしなければならず、これは寸法的に不相当である。また、電波法の上限を超える可能性があり、使用が制限される可能性もある。一方、受信ノイズを $1/25$ に低減するためには、計測基盤のノイズを低減する必要があり設計の見直しが必要なる。つまり、現時点の技術水準では S/N 比を向上させる改良は極めて困難である。

VI 結言

検討の結果、現状の計測システムの構成では低周波電磁波の強さの変化からフィルダムの地中変位を求めることは困難であることが分かった。しかし、空気中ではあるが、低周波電磁波の強さがほぼ理論どおり距離の 3 乗に比例して減衰すること、 15m と短い通信距離の条件下ではあるが測定精度 $3\sim 4\text{cm}$ 程度で変位計測が可能であることが示された。このように、理論的には低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることが可能と考えられる。すなわち、現状の仕様を用いた場合、通信距離が長くかつノイズが多い環境では測定精度を確保することは難しいが、通信距離が短くノイズが少ない環境では必要な精度を得られる可能性がある。たとえば、ダムの模型実験などで堤体の変位をケーブル無しで計測した場合など、地中通信を利用した変位測定センサは十分

魅力的な計測手法となりうる。通信距離が短い場合はセンサ自体の寸法も小さくできるためそのような応用も可能と考えられる。また、室内であればノイズを遮断する電磁シールドなどの使用が可能であることも低周波電磁波の利用では有利な点である。

一方、フィルダムなどの通信距離が長くかつノイズが多い現場に対しては、低周波電磁波を利用した地中変位測定法を適用するための技術的なハードルは高い。しかしながら、何個かの変位測定センサを狭い間隔で設置し、個々が送受信機となりお互いの相対距離を低周波電磁波の強さの変化から求めるようなシステムであれば現在の技術を用いても変位計測が可能の場合もあると想定している。電子技術は日々進歩しており、本システムもその進歩に合わせて改良が進むと考えられる。今後も、地中変位測定以外についても低周波電磁波を利用した計測方法について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 社地盤工学会 (2004) : 地盤調査の方法と解説, pp.605-651.
- 2) 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室 (1994) : フィルダムの挙動解析 (その2) - 変位, 浸透 -, 土木研究所資料第3225号, pp.46-73.
- 3) 向後雄二, 浅野勇, 林田洋一, 遠目塚良一 (2006) : ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測, ダム工学, Vol.16, No. 3, pp.165-176.
- 4) 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, Vol.12, No.1-2, pp.21-23.
- 5) 安中正実 (1996) : 挙動観測による施設安全監視の重要性, 農土誌 64(2), pp.1-5.

A Study On The Measurement Of Internal Soil Deformation by A Low Frequency Electromagnetic Wave

ASANO Isamu, HAYASHIDA Yoichi, MASUKAWA Susumu,
TAGASHIRA Hidekazu and TOHMETSUKA Ryoichi

Summary

The aim of this research is to explore a method for measuring internal deformations by the field strength of a low frequency electromagnetic wave. Some experimental tests were conducted to investigate the basic characteristics of the low frequency electromagnetic wave in the air.

The results are as follows: (1) It is possible to obtain the deformation data at a 15m transmission distance, but it is impossible to measure over 20m transmission distances. The reason why we could not obtain the data were probably caused by noise factor at receiving points. The error of deformation measurements at a 15m transmission distance is approximately 3-4cm.

(2) In order to keep the deformation error within $\pm 10\text{mm}$ at a 15m transmission distance, the sensor displacements in direction orthogonal to the transmission axis must be within $\pm 10\text{mm}$, and the sensor rotations must be within $\pm 3.5^\circ$.

In conclusion, since the accuracy of this method is not higher than conventional system and the installation conditions are very severe, it is very difficult to apply the proposed measurement method to the field measurement with the present specifications. But we think that there are some possibilities left for the proposed method because the method can be used for the short transmission distance, for example, laboratory model tests. We plan more study about the application of a low frequency electromagnetic wave for the field measurement in future.

Keywords : Measurement of internal deformation, A low frequency electromagnetic wave, Wireless transmission