

農村工学研究所技報

第218号

目次

水路の維持管理における労力負担行動の継続性評価指標に関する簡易算出手法の検討	鬼丸竜治 1
Google Earthを活用した荒廃農地調査による荒廃農地の所在把握結果の検査手法	福本昌人・進藤惣治 19
東日本大震災の経済影響分析に関する試案 — 動学的確率的一般均衡モデルの適用 —	國光洋二 29
表層水および浅層地中を熱源とした温室暖冷房用ヒートポンプシステムの運転事例	奥島里美・石井雅久・森山英樹・岩田幸良・後藤眞宏・佐瀬勘紀・舘野正之・高杉真司 39
農業用水路トンネル壁面連続画像撮影技術の現地適用性の評価	森 充広・浅野 勇・川上昭彦・川邊翔平 51
平成26年8月豪雨被災ため池での流入土砂の実態	正田大輔・吉迫 宏・紺野道昭・井上敬資・鈴木尚登 65
農業水利施設における濁度の遠隔監視と浮遊物質、全リン、放射性Csの濃度推定	久保田富次郎・濱田康治・人見忠良・申文浩 77
模擬帯水層内に淡水レンズを再現する室内実験	石田 聡・有田智也・曹 英傑・唐 常源・白旗克志・土原健雄・吉本周平 89
堰下流河床低下時の護床工法の比較実験 — マット工法の効果 —	常住直人・高木強治・島崎昌彦・吉永育生 99
コンクリート水路の摩耗状態の変化を考慮した粗度係数評価手法	中矢哲郎・渡嘉敷勝・森 充広 107
地下水水位制御システムの機能発揮状況からみた導入条件	若杉晃介・原口暢朗・瑞慶村知佳 115

平成28年 3月



国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究所

農村工学研究所技報 第218号

所 長	小 泉 健
企 画 管 理 部 長	山 本 德 司
審 議 役	杉 本 正 俊
技 術 移 転 セ ン タ ー 長	奥 本 島 修 二
農 地 基 盤 工 学 研 究 領 域 長	小 林 宏 康
施 設 工 学 研 究 領 域 長	増 川 晋
水 利 工 学 研 究 領 域 長	白 谷 栄 作
資 源 循 環 工 学 研 究 領 域 長	増 本 隆 夫
農 村 基 盤 研 究 領 域 長	小 川 茂 男

編 集 委 員 会

編 集 委 員 長	山 本 德 司
委 員	宮 本 輝 仁
〃	井 上 敬 資
〃	田 中 良 和
〃	森 本 昌 淳
〃	福 本 昌 人
事 務 局	浜 田 善 幸

TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
No. 218

KOIZUMI Takeshi	Director-General
YAMAMOTO Tokuji	Director, Department of Planning and General Administration
SUGIMOTO Masatoshi	General Administration Coordinator
OKUSHIMA Shuji	Director, Technology Transfer Center
KOBAYASHI Hiroyasu	Director, Agricultural Environment Engineering Research Division
MASUKAWA Susumu	Director, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division
SHIRATANI Eisaku	Director, Hydraulic Engineering Research Division
MASUMOTO Takao	Director, Renewable Resources Engineering Research Division
OGAWA Shigeo	Director, Rural Development and Planning Research Division

EDITORIAL BOARD

Chairman	: YAMAMOTO Tokuji
Members	: MIYAMOTO Teruhito
	INOUE Keisuke
	TANAKA Yoshikazu
	MORI Atsushi
	FUKUMOTO Masato
Secretary	HAMADA Zenkou

〔農工研技報 218〕
1 ~ 18, 2016〕

水路の維持管理における労力負担行動の継続性評価指標に関する簡易算出手法の検討

鬼丸竜治*

*農村基盤研究領域事業評価担当

要 旨

水路の維持管理へ非農家住民に継続的に参加して貰うためには、彼らの労力負担行動の継続性が低い維持管理組織を選別し、所要の施策を講ずることが重要である。この観点から既往研究において、組織を選別するための、継続性を評価する指標が提案されている。しかし、指標の算出に約800人分の質問紙調査の回答データが必要であることから、適用できる組織が限られている。そこで、本報では、指標をより少ない人数分のデータで算出する手法を、2つの地域の非農家住民から得たデータを使って検討した。その結果、(1) 新たに構成した2つの因果モデルのうち、「農業用水に関する知識」と「労力負担意欲」の間の要因を省略したモデルの方が、データとの適合が相対的に良い傾向にあること、(2) (1) のモデルを使うと、必要なデータを800人分から390人分まで減らせる可能性があることを示した。

キーワード：用排水路、維持管理、労力負担行動、継続性評価指標、平均共分散構造分析

I 緒 言

農業集落にある水田用の用排水路（開水路）は、これまで地域の共同活動により維持管理されてきた。そして、そのような管理は、農業が有する多面的機能の適切かつ十分な発揮につながってきたと言われている。しかし、近年の農村地域の高齢化、混住化等の進行に伴う集落機能の低下により、地域の共同活動によって支えられてきた多面的機能の発揮に支障が生じつつある。また、共同活動の困難化に伴い、維持管理に対する担い手農家の負担の増加も懸念されている（農林水産省、2013, 2015）。

このような現状に対し、国は2007年度から、集落等を構成する区域において、農家、非農家等を構成員とする、「活動組織」と呼ばれる維持管理組織の設立促進を開始した。あわせて、当該組織等が行う共同活動に対する財政的な支援（以下「保全対策」という。）を始め、現在も多面的機能支払交付金として継続している（農林水産省、2015）。

共同活動により用排水路を維持管理するためには、新たに維持管理に参加する非農家住民を増やすことに加え、一旦参加した者に継続して参加して貰うことが鍵となる。ここで、以下本報では、用排水路の維持管理に参加して必要な労力を負担することを、「労力負担行動」と呼ぶことにする。また、本報で対象とする労力負担行動の具体的内容は、用排水路の泥さらい、ゴミ拾い、草刈りとする。

国家財政が厳しい中、今後、非農家住民に労力負担行動を継続して貰うためには、保全対策により維持管理を実施している組織の中から、彼らの労力負担行動の継続する見込み（以下「継続性」という。）が相対的に低い組織を選別し、所要の施策を講ずることが効果的であると考えられる。

この考え方に基づき、鬼丸（2013）は、統計手法の一つである平均共分散構造分析を使って、労力負担行動の継続性を評価する指標（以下「継続性評価指標」という。）を提案している。この指標には適用条件が示されており、指標を算出する際、1つの維持管理組織について、約800人分の質問紙調査の回答データが必要であるとされている（鬼丸、2014）。

このことに関して、一般に、維持管理へ参加する者は家から1人が基本とされている（長濱、2003）。また、水路の泥上げや草刈りといった、地域の資源保全活動は、集落を単位として行われる地区が多いと言われている（田中ら、2005）。さらに、上述した多面的機能支払交付金では、複数の集落を含む旧市区町村区域を単位として、活動が行われる地区もある（農林水産省、2015）。これらのことから、上記の指標の適用対象となる、非農家住民が800人以上いる維持管理組織とは、非農家世帯数が800戸以上の集落における組織、あるいは、合計で800戸以上となる複数の集落から構成される組織の、いずれかであると言える。

一方、2.3節で述べるように、非農家世帯数が800戸以上の農業集落は、平地農業地域と都市的農業地域を例

に見ると、農業集落総数の1割程度である。残り9割の、非農家世帯数が800戸より少ない集落を、単独で指標の適用対象とするためには、より少ない人数分の回答データで指標を算出することができるように、算出のやり方を工夫する必要がある。

そこで、本報では、より多くの維持管理組織に適用できるように、鬼丸 (2013) が提案した継続性評価指標を、より少ない人数分のデータで算出する手法 (以下「簡易算出手法」という。) について検討する。

II 方法

2.1 継続性評価指標の考え方

本節では、本報で簡易算出手法を検討する「継続性評価指標」の考え方を、当該指標を提案した鬼丸 (2013) に従って説明する。

労力負担行動とそれに影響を与える諸要因との関係 (以下「労力負担構造」という。) について、今、2つの要因A, Bが、労力負担行動に独立的に影響を与えているとする。その関係を、平均共分散構造分析を用いて表現したモデルがFig. 1である。Fig. 1において、楕円は要因を表し、要因名の後の文字 (F_A , F_B , F_C) は、要因の指標となる潜在変数を表す。 E は誤差変数を表す。なお、潜在変数を測定する観測変数については、表記を省略した。矢印は、始点の要因 (原因となる要因) が終点の要因 (結果となる要因) に影響を与える関係を表し、矢印の脇に示したパス係数 (p_A , p_B , p_E) は、関係の強さを表す。楕円の右肩の文字は、独立変数では平均値 (f_A , f_B , f_C) を、従属変数では切片 (f_C) を、それぞれ表す。切片は、原因となる要因の影響を排除した時の、結果となる要因の平均値を表す。そして、結果となる要因の平均値は、①原因となる要因の平均値とパス係数の積和、②切片、の総和として求めることができる (尾崎, 2007)。現実のデータを扱う場合には、誤差変数はその性質から平均値を0と定義する (豊田, 1998)。

ここで、尾崎 (2007) に従えば、Fig. 1において、労力負担行動の平均値の中で「要因Aの平均値とパス係数の積」分は、要因Aの影響によるものである。そこで、要因Aが、「平均値が下がらないと見込める要因」である場合、要因Aからのパス係数の値が変わらなるとすれば、労力負担行動の平均値は、少なくとも要因Aの影響分は下がらないと見込めることになる。このことは、労力負担行動の平均値が、要因Aの影響分と等しい値まで下がる可能性があることと同じ意味である。したがって、「労力負担行動の平均値の中で、平均値が下がらないと見込める要因の影響分が占める割合」を指標に用いれば、その値が低いほど行動が継続する見込みが低い、と判断できることになる。

次に、労力負担行動に影響を与える要因について、継続性評価指標を提案した鬼丸 (2013) では、構造方

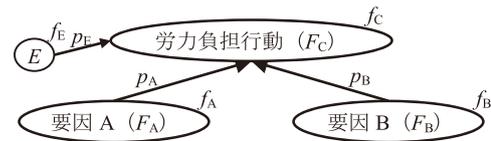


Fig. 1 平均共分散構造分析を用いて表現した労力負担構造の例
Example of the structure of participation in maintenance activities expressed by the Structure Equation Modeling with a mean structure

程式モデリングを用いて労力負担構造を分析した鬼丸 (2012) に依拠して、要因を取り扱っている。鬼丸 (2013) で取り扱った、平均共分散構造分析を用いて表現した労力負担構造のモデル (以下「モデル0」という。) が、Fig. 2である。モデル内の各要因の意味と要因間の関係は、次のとおりである。

まず、「労力負担行動」に影響を与える要因は、「労力負担意欲」と「労力負担能力」の2つである。ここで、労力負担意欲は、用排水路の維持管理に必要な労力を負担しようと思う気持ち、労力負担能力は、用排水路の維持管理に必要な労力を負担し得る力、を意味する。次に、労力負担意欲に着目すると、意欲に影響を与える要因は、①農業用水に対する受益意識、②労力負担の必要性意識、③農業用水に対する関心、④農業用水の利用に関する不安、⑤農業用水に対する所有者意識、⑥所属組織に対する義務感、⑦他者に対する信頼感、である。ここで、上記①～⑦の要因はそれぞれ、①農業用水から利益を受けているという意識、②用排水路の維持管理に必要な労力を負担しなければならないと理解していること、③農業用水に引き付けられたり、おもしろいと感じたりすること、④農業用水が使えなくなる事態を予想した時の漠然とした不快な気分、⑤農業用水を自分たちのものとして使えるという意識、⑥所属組織の規範に従おうという意識、⑦他の人も自分と同様に行動するであろうと信頼する気持ち、を意味する。さらに、労力負担意欲に影響を与えると考えられる要因のうち、農業用水に直接関わる5つの要因 (受益意識、必要性意識、関心、不安、所有者意識) には、「農業用水に関する知識」が影響を与える。ここで、農業用水に関する知識は、農業用水について知っている内容、を意味する。

Fig. 2において、図中の記号の意味はFig. 1に準ずる。ここで、モデル0を構成する要因の中で、「労力負担能力」は加齢に伴う体力の低下により、また、「他者に対する信頼感」と「所属組織に対する義務感」は他者や所属組織の態度により、それぞれ平均値が下がり得ると考える。これに対して、「農業用水に関する知識」は、上述した「平均値が下がらないと見込める要因」であろう。なぜなら、理論によって知識の捉え方は異なるが、その1つに「知識とは最終的には長期記憶に蓄積されるもの」 (菅井, 1999) があり、長期記憶は「ほぼ無限の容量を

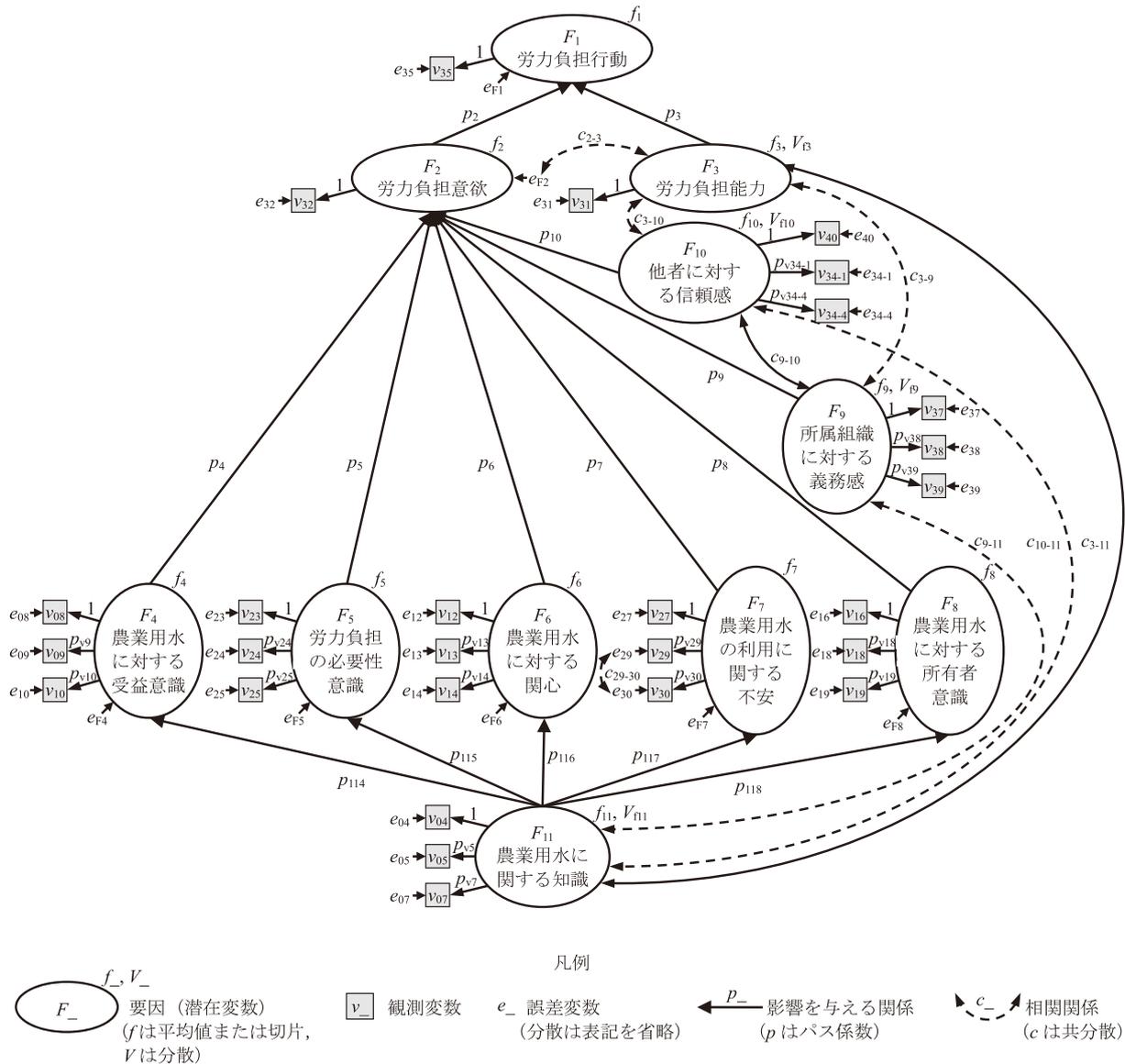


Fig. 2 平均共分散構造分析を用いて表現した労力負担構造のモデル (モデル0)

Model of the structure of participation in maintenance activities expressed by the Structure Equation Modeling with a mean structure (model 0)

もつ永続的な記憶」(森, 1999)であるため、知識は永続的に蓄積されると考えられるからである。

以上のことから、「労力負担行動の平均値の中で、農業用水に関する知識の影響分が占める割合」を、継続性評価指標 S とする。指標 S を、Fig. 2 に示した変数を用いた数式として表現すると、(1) 式になる。

$$S = \frac{\left(\sum_{i=4}^8 f_{11} p_{110+i} p_i \right) p_2}{\left(\sum_{i=4}^8 f_{11} p_{110+i} p_i \right) p_2 + \left(\sum_{i=4}^{10} f_i p_i + f_2 \right) p_2 + f_3 p_3 + f_1} \quad (1)$$

(1) 式を用いて指標 S を算出した例として、鬼丸 (2013) が用いた、2.2.4 節で述べる新潟県の新潟県民 800 人から得た質問紙調査の回答データ (鬼丸, 2012) を使用した例を、Table 1 に示す。同様に、複数の保全

対策実施地区において指標 S を算出すると、その値が他より低い地区は、継続性が相対的に低い地区であると判断することができる。

2.2 簡易算出手法の検討方法

2.2.1 検討方針

I 章で述べたとおり、継続性評価指標を算出する際には、1つの維持管理組織について、約 800 人分の質問紙調査の回答データが必要であるとされている (鬼丸, 2014)。ここで、「約 800 人分」の根拠は次のとおりである。

継続性評価指標を算出する際に使われる平均共分散構造分析は、構造方程式モデリングの一手法である。構造方程式モデリングを使った、質問紙調査の回答データの分析では、パス係数、分散、共分散等 (以下「パラメー

Table 1 労力負担行動の継続性評価指標の算出例 (新潟県の実験農家住民800人の事例)

Calculation of the value of an indicator to evaluate the sustainability of participation (case of 800 non-farmers in Niigata Prefecture)

連番	潜在変数	F_{11}		$F_4 \sim F_{10}$			F_2, F_3				F_1				継続性 評価指標 S = (4) / (4)+(5)+(6)
		平均値 f_{11}	パス 係数 p_{110+i}	切片 f_i	平均値 $f_{11}p_{110+i}+f_i$	パス 係数 p_i	F_{11} の 影響分 $f_{11}p_i$	F_{11} 以外 の影響分 $f_i p_i$	切片 f_2	平均値 (5点満点)	パス 係数 p_i	F_{11} の 影響分	F_{11} 以外 の影響分	切片 f_i	
i	F_i					①	②	③	①+②+③		④	⑤	⑥	④+⑤+⑥	(4)+(5)+(6)
11	F_{11}	2.35													
4	F_4		1.18	0.40	3.17	0.29	0.80	0.12							
5	F_5		1.03	0.53	2.95	0.86	2.08	0.46							
6	F_6		1.40	-0.38	2.91	0.27	0.89	-0.10							
7	F_7		1.17	-0.23	2.52	-0.79	-2.17	0.18							
8	F_8		0.90	0.90	3.02	0.01	0.02	0.01							
9	F_9				3.19 ^{注2)}	-0.27		-0.86							
10	F_{10}				2.88 ^{注3)}	1.02		2.94							
2	F_2					1.62 ^{注4)}	2.75 ^{注5)}	-1.55	2.82	0.44	0.71 ^{注7)}	0.53 ^{注8)}			
3	F_3								2.89 ^{注6)}	0.15		0.43 ^{注9)}			
1	F_1										0.71 ^{注10)}	0.96 ^{注10)}	0.73	2.40	0.30

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値。適合度指標のうちRMSEAは、妥当とされる0.08以下の0.060。
 注2) f_9 注3) f_{10} 注4) $F_4 \sim F_8$ の計 注5) $F_4 \sim F_{10}$ の計 注6) f_3 注7) ①× p_2 注8) ②+ f_2 p_2 注9) $f_3 p_3$ 注10) F_2 と F_3 の計

タ」という。)の推定を適切に行う観点から、モデル内のパラメータの総数(以下「パラメータ数」という。)の5~10倍の人数の被調査者のデータを確保することが勧められている(Bentler and Chou, 1987; 中村, 2003)。これに従うと、Fig. 2に示したモデル0では、パラメータ数は84(パス係数30, 平均値4, 切片7, 分散35, 共分散8)なので、安全側に見て、パラメータ数の10倍の人数の被調査者のデータ(以下「パラメータ数の10倍のデータ」という。)を使用する場合、被調査者の人数は840人(84×10倍)となる。そのため、十の位を四捨五入して、「約800人分」のデータが必要であるとされている。

このように、「約800人分」の根拠は、既往研究で勧められている、「パラメータ数の5~10倍のデータを確保する」ことにある。そこで、本報では簡易算出手法として、次の2点について検討することにした。

- ①パラメータ数を現在の84から削減する。
- ②パラメータ数の5倍の人数の被調査者のデータ(以下「パラメータ数の5倍のデータ」という。)を使用する。

2.2.2 パラメータ数の削減

Fig. 2のような、いわゆる因果モデルの分析について、豊田(1992)は、分析者が興味を持っている変数を規定している要因は数多く存在するから、限られた調査や実験の中で、採用すべき全要因をモデルに組み込んで分析することはできないと述べている。このことへの対処について、豊田(1992)は、社会・人文・行動科学のモデルでは原因の数が多いので、そのような複雑な現象を説明する場合には、誤差が大きくなることを覚悟の上で、原因の数および原因と結果の関係の記述について、大幅

な単純化を行うのが普通であると述べている。また、因果モデルでは、考慮すべき要因の数は少ない方が、結果の一般性は高まると述べている。その上で、単純化を行う場合に有効なのは、①原因として少数の主な特性だけをモデルに採用する、②原因と結果の関係の記述において途中経過を省略することであると述べている。

以上のことから、Fig. 2のモデルのパラメータ数を、現在の84から削減する手段の1つとして、上記②の「原因と結果の関係の記述において途中経過を省略する」ことが考えられる。そこで、本報では、Fig. 2における最初の原因である「農業用水に関する知識」と、最後の結果である「労力負担行動」の関係の記述において、途中経過を省略した新たなモデルを構成することにした。なお、このことは、上記①の「少数の主な特性だけをモデルに採用する」と、結果的に類似する。

具体的には、Fig. 2に示したモデル0をもとにして、Fig. 3に示した、「農業用水に関する知識」と「労力負担意欲」の間の要因を省略したモデル(以下「モデル1」という。)および、Fig. 4に示した、「農業用水に関する知識」と「労力負担行動」の間の要因を省略したモデル(以下「モデル2」という。)の、2つモデルを構成した。

各モデルのパラメータ数は、モデル0は前項で述べたとおり84、モデル1は39(パス係数11, 平均値4, 切片2, 分散15, 共分散7)、モデル2は35(パス係数10, 平均値4, 切片1, 分散14, 共分散6)である。

ここで、2.1節で述べたとおり、継続性評価指標は、「労力負担行動の平均値の中で、農業用水に関する知識の影響分が占める割合」と定義されている。この定義から明らかなように、計算上は、モデル0と同様に、新たに構成したモデル1・2を使って、継続性評価指標

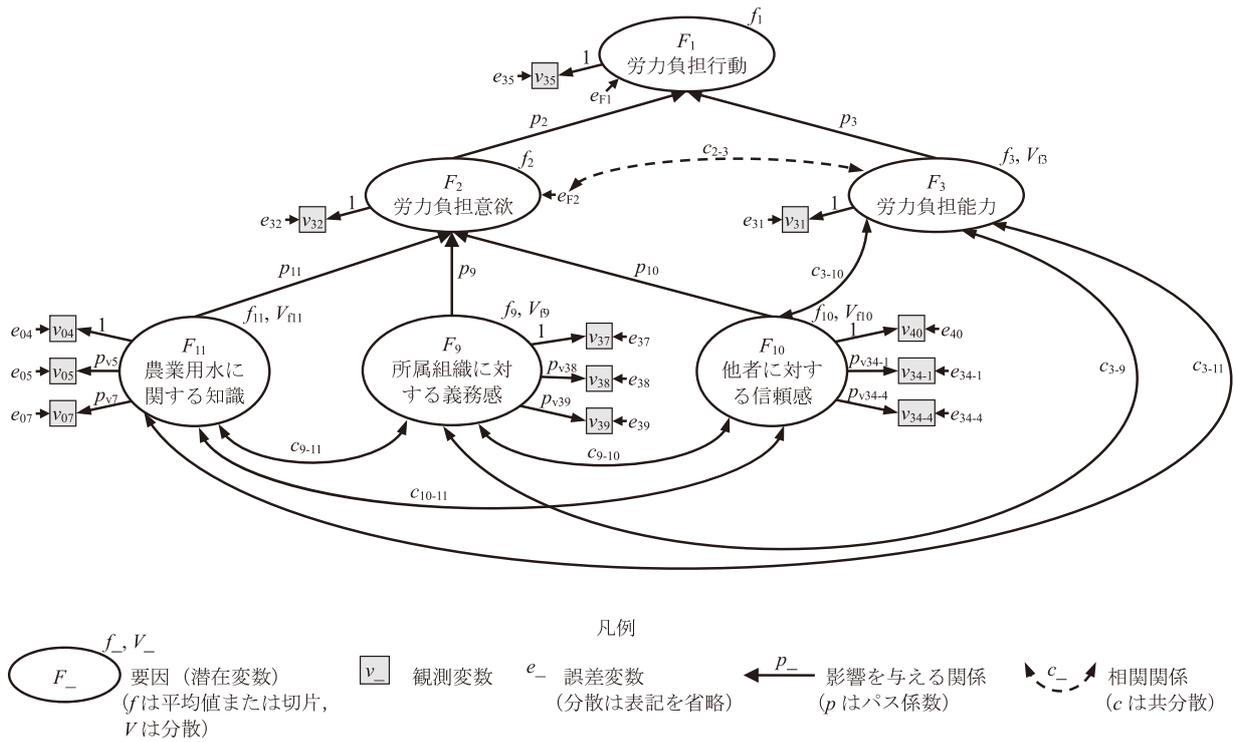


Fig. 3 「農業用水に関する知識」と「労力負担意欲」の間の要因を省略したモデル (モデル1)
 Model with the omission of some factors between “knowledge” and “willingness” (model 1)

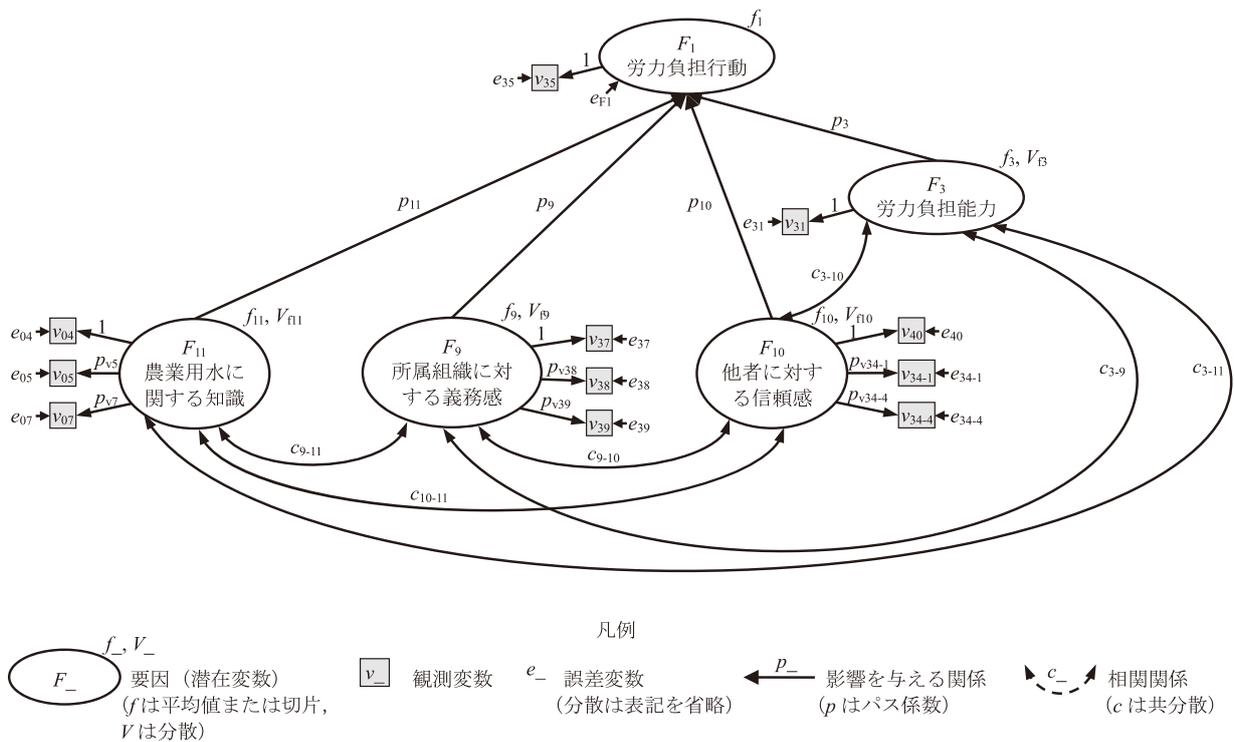


Fig. 4 「農業用水に関する知識」と「労力負担行動」の間の要因を省略したモデル (モデル2)
 Model with the omission of some factors between “knowledge” and “participation” (model 2)

を算出することができる。このことに関連して、豊田(1998)は、モデルは構成しただけではデータの性質を十分に表現している保証はなく、構成したモデルがデータに適合していることを確認する必要があると述べている。また、平均共分散構造分析を含む構造方程式モデリングでは、モデル全体が現実のデータに適合している度合い(以下「適合度」という。)を、適合度指標と呼ばれる指標を使って評価することができる。

そこで、本報では、新たに構成したモデル1・2の適合度を、適合度指標を使ってそれぞれ評価し、構成したモデルが現実のデータに適合していることを確認することができた場合に、「新たに構成したモデルを使って継続性評価指標を算出することができる」と判定することにした。具体的には、次のとおり「現実のデータ」を変えて、2段階の確認を行うことにした。

はじめに、継続性評価指標を提案した鬼丸(2013)が用いた、新潟県の非農家住民800人から得た質問紙調査の回答データ(鬼丸, 2012)(以下「既往研究のデータ」という。)を使用して、モデル1・2の適合度をそれぞれ評価することにした。これは、まずは、データの違いが適合度に与える影響を排除した上で評価するためである。すなわち、上記のデータは、既往研究(鬼丸, 2013)においてモデル0と適合していることが確認されている。また、上述したとおり、モデル0をもとにしてモデル1・2は構成されている。したがって、モデル1・2が適切なモデルであるならば、モデルが上記のデータに適合していることを確認できると考えたためである。

その上で、2.2.4節で述べる、A地域、B地域という2つの地域の非農家住民各400人から得た質問紙調査の回答データ(以下「新たに入手したデータ」という。)を使用して、モデル1・2の適合度をそれぞれ評価することにした。2つの地域のデータを使用する理由は、適合度の評価結果から得られる知見の適用範囲を広げるためである。

適合度指標は複数提案されているので、本報では、代表的なものと言われているCFI(Comparative Fit Index)およびRMSEA(Root Mean Square Error of Approximation)(大石・都竹, 2009)を用いることにした。代表的な適合度指標としては、他にもGFI(Goodness of Fit Index)やAGFI(Adjusted Goodness of Fit Index)が知られているが、本報で取り扱うような平均値と切片を推定するモデルでは、これらに代わってCFIを用いることが多いと言われている(大石・都竹, 2009)。また、適合度指標の計算を含めて、本報における平均共分散構造分析の実行には、代表的なソフトウェアの1つであるAmos Ver.22およびSPSS Statistics Base Ver.22を用いた。

なお、パラメータ数を削減する手段としては、上記の他にも、潜在変数を測定する観測変数の数を減らすことが考えられる。しかし、どの観測変数を削除し、どの観

測変数を残すことが適切であるのかの検討に、時間と紙幅を要することから、今回は検討対象から除外した。

2.2.3 パラメータ数の5倍のデータの使用

2.2.1項で述べたとおり、Bentler and Chou(1987)および中村(2003)は、パラメータ数の5~10倍の人数の被調査者のデータを確保することを勧めている。それに加えて中村(2003)は、一般論としては、標本が適切であればその数は多いほど良く、標準数を増やすことは標準誤差を小さくし、安定した推定を行うことに寄与する、と述べている。

上記の中村(2003)に従えば、一般論としては、パラメータ数の10倍のデータを使用した場合の方が、5倍のデータを使用した場合よりも、継続性評価指標の算出に必要なパス係数、平均値、切片を、安定して推定することができると思う。一方、パラメータ数の10倍のデータを使用した場合よりも、推定が不安定になることを許容すれば、5倍のデータを使用した場合であっても、パス係数等を推定することはできると考える。その場合、推定が不安定になることが、実用上の許容範囲にあることを確認することが重要である。このことについて、パラメータ数の5倍のデータを使用することにより推定が不安定になれば、推定したパス係数等を持つモデルが、現実のデータに適合しない事象の増えることが考えられる。

そこで、本報では、新たに構成したモデル1・2の適合度を、前項で述べた適合度指標を使ってそれぞれ評価し、構成したモデルがパラメータ数の10倍のデータに適合し、かつ、5倍のデータにも適合していることを確認できた場合に、「パラメータ数の5倍のデータを使用することにより推定が不安定になることが、実用上の許容範囲にある」と判定することにした。なお、構成したモデルがパラメータ数の10倍のデータに適合していない場合は、そもそも当該モデルを使って当該データを分析することは適切でない可能性があると考え、「実用上の許容範囲にない」と判定することにした。

具体的には、前項で述べた「新たに入手したデータ」の中から条件ごとに無作為抽出を1回行って得た、パラメータ数の10倍のデータおよび5倍のデータを使用して、モデル1・2の適合度をそれぞれ評価することにした。無作為抽出には、ソフトウェア(SPSS Statistics Base Ver.22)の無作為抽出機能を利用することにした。

2.2.4 観測変数のデータの入手

本報の目的は、個別の維持管理組織における継続性の評価ではなく、継続性評価指標の簡易算出手法を検討することである。そこで、費用面と時間面で有利であることから、2.2.2項および2.2.3項において使用するデータは、2.1節で引用した鬼丸(2012)と同様、Table 2に示した質問文と回答選択肢を使って、インターネット調査

Table 2 設定した変数、変数のデータ入手するための質問項目
Variables and items of questionnaire for collecting the data of variables

潜在変数 (要因)	観測 変数	質問項目	回答 選択肢	計測結果			
				A地域		B地域	
		質問文(要約)		平均 値	標準 偏差	平均 値	標準 偏差
F ₁ (労力負担行動)	v ₃₅	水路 ^{注1)} の管理作業 ^{注2)} に参加を求められた場合、作業の内容に不公平感や不都合がないとすれば、参加する可能性は何%くらいありますか	5件法 ^{注3)}	2.28	1.22	2.18	1.05
F ₂ (労力負担意欲)	v ₃₂	時間と体力に余裕がある時であれば、水路の管理作業に参加してもよいと思いますか	5件法 ^{注4)}	2.86	1.21	2.86	1.13
F ₃ (労力負担能力)	v ₃₁	水路の管理作業に参加を求められた場合、他の人と同じ程度の作業をすることができると思いますか	5件法 ^{注4)}	2.82	1.23	2.78	1.15
F ₄ (農業用水に対する受益意識)	v ₀₈	水路やその中を流れる水から生活する上で何らかの利益を受けていると思いますか	5件法 ^{注4)}	2.95	1.22	2.87	1.16
	v ₀₉	自宅の周辺にある農村の環境が将来実際に良くなれば良いと、当てにして待っていますか	5件法 ^{注5)}	3.18	1.11	3.10	1.17
	v ₁₀	水路を水が流れなかった場合、自分には何の影響も出ないと思いますか【逆転項目】	5件法 ^{注6)}	3.25	1.24	3.28	1.18
F ₅ (労力負担の必要性意識)	v ₂₃	水路の管理作業は、あなたが参加してでも続けていくべきことだと思いますか	5件法 ^{注4)}	3.06	1.13	3.02	1.05
	v ₂₄	水路の管理作業は、あなたが作業に参加できなければ費用の一部を負担してでも続けていくべきことだと思いますか	5件法 ^{注4)}	2.76	1.14	2.62	1.06
	v ₂₅	水路を使っている人は、度合に関わらず、管理作業に参加するべきだと思いますか	5件法 ^{注4)}	3.30	1.25	3.40	1.11
F ₆ (農業用水に対する関心)	v ₁₂	水路やその中を流れる水について、おもしろいと感じたり、ひきつけられたりすることがありますか	5件法 ^{注7)}	2.91	1.29	2.84	1.27
	v ₁₃	マスメディアで水田や水路の話題を見かけたら、積極的に見たりしようとしますか	5件法 ^{注8)}	2.63	1.17	2.64	1.16
	v ₁₄	水路について体験する無料のイベントが開催されたら参加してみたいと思いますか	5件法 ^{注4)}	2.50	1.20	2.57	1.24
F ₇ (農業用水の利用に関する不安)	v ₂₇	水路が無くなった場合、自分にも影響が及ぶかもしれないと思うものはどれですか	複数選択 ^{注9)}	2.36	1.02	2.36	1.02
	v ₂₉	水路やその中を流れる水が使えなくなる事態を予想して、漠然とした不快な気分になることがありますか	5件法 ^{注7)}	2.58	1.23	2.51	1.16
	v ₃₀	水路やその中を流れる水が、今までとは異なる状態になることを予想して、「そのようにならなければよいのに」と思ったことがありますか	5件法 ^{注7)}	2.79	1.24	2.79	1.19
F ₈ (農業用水に対する所有者意識)	v ₁₆	水路やその中を流れる水は、自分たちのものとして使えると思いますか	5件法 ^{注4)}	2.65	1.21	2.65	1.20
	v ₁₈	水路やその中を流れる水は、ご近所の人たちの共通の財産だと思いますか	5件法 ^{注4)}	3.08	1.28	3.04	1.23
	v ₁₉	水路の水を、あなたが使うことに大きな問題はないと思いますか	5件法 ^{注10)}	2.71	1.16	2.77	1.09
F ₉ (所属組織に対する義務感)	v ₃₇	町内会などのあなたが属している組織において、守るように期待されている規範(行動や判断の基準)に従うために、自分の利益を犠牲にすることがありますか	5件法 ^{注7)}	3.17	1.09	3.05	1.07
	v ₃₈	お住まいの地区には、あなたも含めたご近所の人たちが生活する上で守るように期待されている規範(行動や判断の基準)がありますか	5件法 ^{注11)}	3.32	1.04	3.20	1.04
	v ₃₉	お住まいの地区に規範(行動や判断の基準)があり、それがあなたの意に沿わない場合、その規範に従おうと思いますか	5件法 ^{注12)}	3.33	0.93	3.43	0.95
F ₁₀ (他者に対する信頼感)	v ₄₀	日常生活の問題や心配ごとについて、ご近所の人たちは頼りになりますか	5件法 ^{注13)}	2.86	1.12	2.81	1.07
	v ₃₄₋₁	親族、友人、知人から「できれば参加して欲しい」と言われていたら、労力負担意欲の質問に対するあなたの回答は、参加してもよいと思う方向に影響を受けていたと思いますか	5件法 ^{注4)}	3.30	1.23	3.32	1.16
	v ₃₄₋₄	参加を呼びかけるチラシが配られていたら、労力負担意欲の質問に対するあなたの回答は、参加してもよいと思う方向に影響を受けていたと思いますか	5件法 ^{注4)}	2.55	1.18	2.59	1.13
F ₁₁ (農業用水に関する知識)	v ₀₄	水路やその中を流れる水について、次の中でご存じであった役割はどれですか	複数選択 ^{注14)}	2.11	0.96	2.14	0.91
	v ₀₅	「自分は水路やその中を流れる水については知らない」と思いますか【逆転項目】	5件法 ^{注15)}	2.27	1.13	2.12	1.03
	v ₀₇	自宅の周辺にある水路を流れる水が、どこからきてどこへいくのか、ご存じですか	5件法 ^{注16)}	2.37	1.33	2.32	1.27

注1) 「水路」は、質問紙の原文では「農業用の水路」と記載した。また、「川や池の水を農地へ入れたり、農地に降った雨や余分な水を集めて川や池へ出したりするために人が作った水を送るみちは、「農業用の水路」と呼ばれています。」という説明文を記載した。

注2) 「管理作業」については、質問紙に「農業用の水路に溜まっている泥をさらったり、水路の中のゴミを拾ったり、水路の周りに生えている草を刈ったりする作業を、農業用の水路の「管理作業」と呼びます。」という説明文を記載した。

注3) 0%~20%未満, 20%以上~50%未満, 50%以上~70%未満, 70%以上~90%未満, 90%以上~100%【回答順が逆転項目】

注4) 思う, どちらかと言えば思う, どちらとも言えない, どちらかと言えば思わない, 思わない

注5) 待っている, どちらかと言えば待っている, どちらとも言えない, どちらかと言えば待っていない, 待っていない

注6) 出ないと思う, どちらかと言えば出ないと思う, どちらとも言えない, どちらかと言えば出ると思う, 出ると思う

注7) ある, どちらかと言えばある, どちらとも言えない, どちらかと言えばない, ない

注8) する, どちらかと言えばする, どちらとも言えない, どちらかと言えばしない, しない

注9) 水路に沿って散歩できない, 動植物の生息場所が減る, 風景が変わる, 水がなかなか引かなくなる, 水をかけることができない

注10) ないと思う, どちらかと言えばないと思う, どちらとも言えない, どちらかと言えばあると思う, あると思う

注11) ある, あると思う, どちらとも言えない, ないと思う, ない

注12) 従おうと思う, どちらかと言えば従おうと思う, どちらとも言えない, どちらかと言えば従おうと思わない, 従おうと思わない

注13) 頼りになる, どちらかと言えば頼りになる, どちらとも言えない, どちらかと言えば頼りにならない, 頼りにならない

注14) 動植物接触機会, 生活排水放流, 防火, 農業以外の生産活動, 消流雪, 雨水排除, 生態系保全, 水質保全, 観光資源

注15) 知らないと思う, どちらかと言えば知らないと思う, どちらとも言えない, どちらかと言えば知っていると思う, 知っていると思う

注16) 知っている, どちらかと言えば知っている, どちらとも言えない, どちらかと言えば知らない, 知らない

により入手することにした。

実際の調査では、2015年8月に楽天リサーチ株式会社を調査機関として、

①現在の居住地が、A地域は栃木県、長野県、宮崎県、
B地域は山形県、新潟県、兵庫県のいずれかである、

②20歳以上59歳以下である、

③自宅周辺に水田がある、

④自宅周辺に農業用の水路がある、

⑤農家ではなく、農地を所有しておらず、実家も農家ではない、

⑥1世帯1人の回答となっている、

という条件すべてを満たしていることを、事前調査において確認した被調査者を対象に、A地域、B地域各400人（計800人）からデータを入手した。

①の条件を設けた理由は、地域特性に差がある2つの地域のデータを入手するためである。すなわち、A地域とB地域を比べると、保全対策の対象農用地面積（田）に対する取組面積（田）の比率（以下「カバー率」という。）（農林水産省農村振興局、2015）が大きく異なることから、共同活動の実施状況といった地域特性に差があると考えた。具体的には、A地域の3県は、北海道と沖縄県、保全対策の実績のない東京都、復興中である福島県を除く、全国43府県の中から、カバー率が40%未満の16府県を抽出した上で、「カバー率の高い順位」と「対象農用地面積（田）の広い順位」の和が小さい3県とした。カバー率に加えて「対象農用地面積（田）の広い順位」を条件に加えた理由は、そのような府県の方が、被調査者の候補者が数多く存在し、必要な人数分のデータを確保しやすいと考えたからである。B地域の3県は、同様に、カバー率が60%以上の15府県を抽出した上で、「カバー率の高い順位」と「対象農用地面積（田）の広い順位」の和が小さい3県とした。

②の条件を設けた理由は、さらなる労力負担が望まれる、現役世代（内閣府、2012）に相当する年代の者を対象とするためである。③および④は、水田用の開水路を対象とするためである。⑤は、非農家住民を対象とするためである。⑥は、維持管理へ参加する者は家から1人が基本とされている（長濱、2003）ので、世帯単位のデータを入手するためである。さらに、現実の年代別・性別人口分布を反映させるため、被調査者数を年代別・性別人口の割合によって割り付けた上で、調査を行った（Table 3）。

A地域、B地域から入手するデータ数をそれぞれ400人分（計800人分）とした理由は、パラメータ数がモデル2よりも多い、モデル1の「パラメータ数の10倍」に相当する390人分（39×10倍）以上で、かつ、費用面の制約から入手可能な上限の人数分としたためである。

観測変数のうち、回答選択肢が5件法の変数の値については、肯定的な回答から順に5、4、3、2、1を割り当てた。また、Table 2の「質問文」欄に「逆転項目」（他

Table 3 被調査者の年代別・性別の人数

Number of respondents by generation and sex

居住地	年代	性別	被調査者		居住地の人口 ^{注3)}	
			人数 ^{注1)}	割合 ^{注2)} (%)	人数	割合 ^{注2)} (%)
A地域 (栃木・長野・宮崎)	20歳代	男	40	10.0	253,947	9.9
		女	40	10.0	245,357	9.5
	30歳代	男	50	12.5	359,018	13.9
		女	50	12.5	343,231	13.3
	40歳代	男	50	12.5	329,972	12.8
		女	50	12.5	325,749	12.6
	50歳代	男	60	15.0	359,100	13.9
		女	60	15.0	359,035	13.9
	計	男	200	50.0	1,302,037	50.6
	計	女	200	50.0	1,273,372	49.4
	計		400	100.0	2,575,409	100.0
	B地域 (山形・新潟・兵庫)	20歳代	男	40	10.0	448,053
女			40	10.0	453,943	10.1
30歳代		男	50	12.5	606,202	13.5
		女	60	15.0	615,355	13.7
40歳代		男	50	12.5	574,234	12.8
		女	50	12.5	589,160	13.1
50歳代		男	50	12.5	587,097	13.1
		女	60	15.0	606,806	13.5
計		男	190	47.5	2,215,586	49.4
計		女	210	52.5	2,265,264	50.6
計			400	100.0	4,480,850	100.0

注1) 被調査者の年代別・性別の人数は、「被調査者人数計」と年代別・性別の「居住地の人口割合」の積を10人単位に丸めた目標値に基づき割付回収した結果である。

注2) 四捨五入の関係で計が一致しない箇所がある。

注3) 総務省統計局（2011a）

とは測定している方向が逆の項目）と表示した観測変数の値には、肯定的な回答から順に1、2、3、4、5を割り当てた。さらに、「回答選択肢」欄に「複数選択」と表示した観測変数の値には、選択された項目の数によって1～5を按分して割り当てた。

なお、構造方程式モデリングは、量的データを扱う手法として開発されたものであるが、本報で取り扱うような、5件法の質的データを量的データと見なして分析することは、問題ないとされている（豊田、1998）。

2.3 非農家戸数規模別の農業集落数

Table 4は、2010年世界農林業センサス（総務省統計局、2011b）のデータをもとに、北海道と沖縄県、保全対策の実績のない東京都を除く、全国44府県の平地農業地域と都市的農業地域における、非農家戸数規模別の農業集落数を推計・整理したものである。

Table 4の「非農家戸数規模」欄および「累計農業集

Table 4 非農家戸数規模別の農業集落数
Number of rural communities by the size of non-farm households per rural community

総戸数規模 (戸)	～9	10～29	30～49	50～99	100～149	150～199	200～299	300～499	500～	計
非農家戸数規模 (戸) (推計) ^{注2)}	～8	9～27	28～46	47～92	93～139	140～186	187～279	280～466	467～	
農業集落数 (集落) (推計) ^{注3)}	747	7,278	9,121	13,236	6,581	3,826	4,680	4,552	8,156	58,177
累計農業集落数 (集落)	747	8,025	17,146	30,382	36,963	40,789	45,469	50,021	58,177	-
累計農業集落数構成割合 (%)	1.3	13.8	29.5	52.2	63.5	70.1	78.2	86.0	100.0	-

注1) 上表は、北海道、沖縄県、東京都を除く44府県の平地農業地域と都市的農業地域を対象とした。

注2) 「1農業集落当たり平均戸数 (農家数・非農家数)」のデータ (総務省統計局, 2011b) を元に算出した非農家率 (93.4%) を、総戸数に乗じて推計した。

注3) 「総戸数規模別農業集落数」のデータ (総務省統計局, 2011b) に、府県別の「農業用排水路のある農業集落」の割合を乗じて推計した。

Table 5 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (新潟県の新潟県民800人の場合)

Results of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 800 non-farmers in Niigata Prefecture)

連番	潜在変数	F_{11}, F_9, F_{10}			F_2, F_3			F_1				継続性評価指標 S = (4) / (4)+(5)+(6)	
		平均値 f_i	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 $f_{11}p_{11}$	F_{11} 以外の影響分 $f_i p_i$	切片 f_2	平均値 (5点満点)	パス係数 p_i	F_{11} の影響分	F_{11} 以外の影響分	切片 f_i		平均値 (5点満点)
i	F_i			①	②	③	①+②+③		④	⑤	⑥	④+⑤+⑥	(4)+(5)+(6)
11	F_{11}	2.34	0.29	0.68									
9	F_9	3.19	-0.23		-0.73								
10	F_{10}	2.88	1.28		3.69								
2	F_2			0.68	2.96 ^{注2)}	-0.81	2.83	0.44	0.30 ^{注4)}	0.95 ^{注5)}			
3	F_3						2.89 ^{注3)}	0.15		0.43 ^{注6)}			
1	F_1								0.30	1.38 ^{注7)}	0.73	2.41	0.12

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) F_9 と F_{10} の計 注3) f_3 注4) ①× p_2 注5) (②+ f_2) p_2
注6) $f_3 p_3$ 注7) F_2 と F_3 の計

「農業集落構成割合」欄を見ると、非農家戸数が466戸までの集落が、全体の86%を占めることが分かる。このことから、I章で述べた非農家世帯が800戸以上の農業集落は、平地農業地域と都市的農業地域を例に見ると、農業集落総数の1割程度であろうことが分かる。

III 結果と考察

3.1 パラメータ数を削減した場合

3.1.1 既往研究のデータを使用した場合の適合度の評価

Table 5に、モデル1について、既往研究のデータを使用した場合の、パス係数等のパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果を示す。また、Table 6に、モデル2について、同様に行った結果を示す。さらに、Table 7に、上記2つのモデルの適合度指標の計測結果を示す。

Table 7について、「計測結果」の「モデル1」欄を見ると、CFIは、適合が良いとされる目安の0.9以上にほぼ達している0.896であり、RMSEAは、適合が妥当と

される目安の0.08以下の0.077である。同様に「モデル2」欄を見ると、CFIは、適合が良いとされる目安の0.9以上の0.913、RMSEAは、適合が妥当とされる目安の0.08以下の0.069である。このように、既往研究のデータを使用した場合、新たに構成したモデル1・2は、いずれも現実のデータに適合していることが確認された。

このことから、新たに構成したモデル1・2を使って、継続性評価指標を算出することができる可能性があると判定した。「可能性がある」とした理由は、上記の適合度の評価において使用したデータは、新潟県の新潟県民800人から入手したものであるため、結果の適用範囲は当該被調査者に限定されるためである。

ここで、各モデルの継続性評価指標 S の値を比べると、モデル0が0.30 (Table 1) であるのに対し、モデル1は0.12 (Table 5)、モデル2は0.14 (Table 6) となっている。このように、同じデータを使用した場合であっても、もとにしたモデル0に比べて、パラメータ数を削減したモデル1・2は、指標の値が小さくなっている。その理由について本報では分析していないが、継続性評価

Table 6 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (新潟県の新農家住民800人の場合)

Results of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 800 non-farmers in Niigata Prefecture)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀, F₃</i>	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁</i>			平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥	継続性評価指標 <i>S</i> = ④/ (④+⑤+⑥)
		平均値 <i>f_i</i>		<i>F₁₁</i> の影響分 <i>f₁₁p₁₁</i> ④	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 <i>f_ip_i</i> ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥		
11	<i>F₁₁</i>	2.34	0.14	0.33				
9	<i>F₉</i>	3.19	-0.14		-0.45			
10	<i>F₁₀</i>	2.87	1.14		3.27			
3	<i>F₃</i>	2.89	0.07		0.20			
1	<i>F₁</i>			0.33	3.02 ^{注2)}	-0.98	2.37	0.14

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は, Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*, *F₁₀*, *F₃*の計

Table 7 モデル1およびモデル2の適合度指標の計測結果 (新潟県の新農家住民800人の場合)

Results of the estimation of fitness indexes of the model 1 and the model 2 (case of 800 non-farmers in Niigata Prefecture)

指標名	値の範囲	適合が良いとされる 目安 ^{注)}	計測結果	
			モデル1	モデル2
CFI	通常0~1	0.9以上	0.896	0.913
RMSEA	0以上	0.05以下。0.08以下で 妥当, 0.1以上で不適	0.077	0.069

注) 室橋 (2007), 大石・都竹 (2009)

指標の値が小さいと、継続性が低い維持管理組織を選別するため複数の組織の指標の値を比べる際に、値の差も小さくなり、継続性の評価が難しくなる可能性が示唆される。また、上記のとおり、同じ既往研究のデータを使用している場合であっても、モデルが異なると継続性評価指標の値は異なることから、異なるモデルを使って算出した継続性評価指標の値を比較することはできないことに、留意が必要である。

3.1.2 新たに入手したデータを使用した場合の適合度の評価

Table 8~13に、モデル1・2について、A地域の非農家住民から得た質問紙調査の回答データを、それぞれ全数、パラメータ数の10倍、パラメータ数の5倍に相当する人数分使用した場合の、パス係数等のパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果を示す。また、**Table 14~19**に、B地域のデータを使用した場合の、同様に行った結果を示す。さらに、**Table 20**に、**Table 8~19**の各ケースの適合度指標の計測結果を、モデル1とモデル2を比較して示す。なお、2.2.2項で述べたとおり、パラメータ数はモデル1が39、モデル2が35なので、上記の全数、パラメータ数の10倍、パラメータ数の5倍に相当する人数は、モデル1がそれぞれ400人、390人、195人、モデル2がそれぞれ400人、350人、175人である。

Table 20について、はじめに、「A地域」の「CFI」欄を見ると、「モデル1」について「パラメータ数の10倍」のデータを使用した場合の値は0.897であって、前出の**Table 7**に示した「適合が良いとされる目安」の0.9以上に、ほぼ達している。これに対し、「モデル2」について「パラメータ数の10倍」のデータを使用した場合の値は0.881であって、適合が良いとされる目安の0.9以上に近いものの、モデル1よりは低い値である。このように、モデル1の方がモデル2よりも相対的に適合が良いことを、「適合が相対的に良いモデル」欄に「モデル1」と表記した。同様に、「パラメータ数の5倍」のデータを使用した場合の値は、モデル1が0.858、モデル2が0.834であって、モデル1の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。

「A地域」について、次に「RMSEA」欄を見ると、「モデル1」について「パラメータ数の10倍」のデータを使用した場合の値は0.087であって、前出の**Table 7**に示した「適合が妥当」とされる目安の0.08以下と、「適合が不適」とされる目安の0.1以上の、中間位の値となっている。これに対し、「モデル2」について「パラメータ数の10倍」のデータを使用した場合の値は0.088であって、モデル1の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。同様に、「パラメータ数の5倍」のデータを使用した場合の値は、モデル1が0.088、モデル2が0.101であって、モデル1の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。

次に、「B地域」の「CFI」欄を見ると、「パラメータ数の10倍」のデータを使用した場合は、A地域と同様にモデル1の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。一方、「パラメータ数の5倍」のデータを使用した場合は、モデル2の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。このことは、「B地域」の「RMSEA」欄を見ても同様である。

以上のように、新たに入手したデータを使用してモデル1・2の適合度を評価・比較した結果、8ケース中6ケースにおいて、モデル1の方が、適合が相対的に良いモデ

Table 8 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（A地域の非農家住民400人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 400 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀</i>			<i>F₂, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性 評価指標 <i>S</i> = ④/ (④+⑤+⑥)	
		平均値 <i>f_i</i>	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ①	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 <i>f_ip_i</i> ②	切片 <i>f₂</i> ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ④	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥		平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥
11	<i>F₁₁</i>	2.08	0.05	0.10									
9	<i>F₉</i>	3.17	-0.31		-0.98								
10	<i>F₁₀</i>	2.79	1.54		4.30								
2	<i>F₂</i>			0.10	3.32 ^{注2)}	-0.55	2.87	0.50	0.05 ^{注4)}	1.39 ^{注5)}			
3	<i>F₃</i>						2.82 ^{注3)}	0.18		0.51 ^{注6)}			
1	<i>F₁</i>								0.05	1.90 ^{注7)}	0.36	2.31	0.02

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*と*F₁₀*の計 注3) *f₃* 注4) ①×*p₂* 注5) (②+*f₂*) *p₂*
注6) *f₃p₃* 注7) *F₂*と*F₃*の計

Table 9 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（A地域の非農家住民390人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 390 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀</i>			<i>F₂, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性 評価指標 <i>S</i> = ④/ (④+⑤+⑥)	
		平均値 <i>f_i</i>	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ①	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 <i>f_ip_i</i> ②	切片 <i>f₂</i> ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ④	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥		平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥
11	<i>F₁₁</i>	2.07	0.06	0.12									
9	<i>F₉</i>	3.16	-0.28		-0.88								
10	<i>F₁₀</i>	2.79	1.49		4.16								
2	<i>F₂</i>			0.12	3.28 ^{注2)}	-0.55	2.85	0.50	0.06 ^{注4)}	1.37 ^{注5)}			
3	<i>F₃</i>						2.82 ^{注3)}	0.19		0.54 ^{注6)}			
1	<i>F₁</i>								0.06	1.91 ^{注7)}	0.33	2.30	0.03

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*と*F₁₀*の計 注3) *f₃* 注4) ①×*p₂* 注5) (②+*f₂*) *p₂*
注6) *f₃p₃* 注7) *F₂*と*F₃*の計

Table 10 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（A地域の非農家住民195人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 195 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀</i>			<i>F₂, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性 評価指標 <i>S</i> = ④/ (④+⑤+⑥)	
		平均値 <i>f_i</i>	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ①	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 <i>f_ip_i</i> ②	切片 <i>f₂</i> ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ④	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥		平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥
11	<i>F₁₁</i>	1.98	0.02	0.04									
9	<i>F₉</i>	3.02	-0.16		-0.48								
10	<i>F₁₀</i>	2.64	1.33		3.51								
2	<i>F₂</i>			0.04	3.03 ^{注2)}	-0.41	2.66	0.52	0.02 ^{注4)}	1.36 ^{注5)}			
3	<i>F₃</i>						2.66 ^{注3)}	0.18		0.48 ^{注6)}			
1	<i>F₁</i>								0.02	1.84 ^{注7)}	0.27	2.13	0.01

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*と*F₁₀*の計 注3) *f₃* 注4) ①×*p₂* 注5) (②+*f₂*) *p₂*
注6) *f₃p₃* 注7) *F₂*と*F₃*の計

Table 11 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（A地域の非農家住民400人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 400 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性 評価指標 <i>S</i> = ④/ (④+⑤+⑥)		
		平均値 <i>f_i</i>	パス 係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の 影響分 ①	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 <i>f_ip_i</i> ②	切片 <i>f₂</i> ③	平均値 (5点満点) ④	<i>F₁₁</i> 以外の 影響分 <i>f_ip_i</i> ⑤		切片 <i>f_i</i> ⑥	
11	<i>F₁₁</i>	2.08	0.16	0.33							
9	<i>F₉</i>	3.17	-0.14				-0.44				
10	<i>F₁₀</i>	2.81	1.05				2.95				
3	<i>F₃</i>	2.82	0.07				0.20				
1	<i>F₁</i>				0.33		2.71 ^{注2)}	-0.79		2.25	0.15

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*, *F₁₀*, *F₃*の計

Table 12 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (A地域の非農家住民350人の場合)

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 350 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 F_i	F_{11}, F_9, F_{10}, F_3			F_1			継続性評価指標 S = ④ / (④+⑤+⑥)
		平均値 f_i	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 $f_{11}p_{11}$ ④	F_{11} 以外の影響分 $f_i p_i$ ⑤	切片 f_i ⑥	平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥	
11	F_{11}	2.06	0.17	0.35				
9	F_9	3.12	-0.13		-0.41			
10	F_{10}	2.77	0.94		2.60			
3	F_3	2.77	0.11		0.30			
1	F_1			0.35	2.49 ^{注2)}	-0.64	2.20	0.16

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) F_9, F_{10}, F_3 の計

Table 13 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (A地域の非農家住民175人の場合)

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 175 non-farmers in area A)

連番 <i>i</i>	潜在変数 F_i	F_{11}, F_9, F_{10}, F_3			F_1			継続性評価指標 S = ④ / (④+⑤+⑥)
		平均値 f_i	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 $f_{11}p_{11}$ ④	F_{11} 以外の影響分 $f_i p_i$ ⑤	切片 f_i ⑥	平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥	
11	F_{11}	2.01	0.13	0.26				
9	F_9	3.03	-0.23		-0.70			
10	F_{10}	2.68	1.16		3.11			
3	F_3	2.71	0.11		0.30			
1	F_1			0.26	2.71 ^{注2)}	-0.84	2.13	0.12

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) F_9, F_{10}, F_3 の計

Table 14 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (B地域の非農家住民400人の場合)

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 400 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 F_i	F_{11}, F_9, F_{10}			F_2, F_3			F_1			継続性評価指標 S = ④ / (④+⑤+⑥)	
		平均値 f_i	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 $f_{11}p_{11}$ ①	F_{11} 以外の影響分 $f_i p_i$ ②	切片 f_2 ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 ④	F_{11} 以外の影響分 ⑤		切片 f_i ⑥
11	F_{11}	2.10	0.07	0.15								
9	F_9	3.06	-0.30		-0.92							
10	F_{10}	2.78	1.44		4.00							
2	F_2			0.15	3.08 ^{注2)}	-0.38	2.85	0.37	0.06 ^{注4)}	1.00 ^{注5)}		
3	F_3						2.78 ^{注3)}	0.21		0.58 ^{注6)}		
1	F_1							0.06	1.58 ^{注7)}	0.56	2.20	0.03

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) F_9 と F_{10} の計 注3) f_3 注4) ①× p_2 注5) (②+ f_2) p_2
注6) $f_3 p_3$ 注7) F_2 と F_3 の計

Table 15 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果 (B地域の非農家住民390人の場合)

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 390 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 F_i	F_{11}, F_9, F_{10}			F_2, F_3			F_1			継続性評価指標 S = ④ / (④+⑤+⑥)	
		平均値 f_i	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 $f_{11}p_{11}$ ①	F_{11} 以外の影響分 $f_i p_i$ ②	切片 f_2 ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス係数 p_i	F_{11} の影響分 ④	F_{11} 以外の影響分 ⑤		切片 f_i ⑥
11	F_{11}	2.11	0.09	0.19								
9	F_9	3.08	-0.29		-0.89							
10	F_{10}	2.79	1.43		3.99							
2	F_2			0.19	3.10 ^{注2)}	-0.43	2.86	0.36	0.07 ^{注4)}	0.96 ^{注5)}		
3	F_3						2.78 ^{注3)}	0.20		0.56 ^{注6)}		
1	F_1							0.07	1.52 ^{注7)}	0.58	2.17	0.03

注1) 上表中の f_i, p_i の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) F_9 と F_{10} の計 注3) f_3 注4) ①× p_2 注5) (②+ f_2) p_2
注6) $f_3 p_3$ 注7) F_2 と F_3 の計

Table 16 モデル1によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（B地域の非農家住民195人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 1 (case of 195 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀</i>			<i>F₂, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性評価指標 <i>S</i> = ④ / (④+⑤+⑥)	
		平均値 <i>f_i</i>	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の影響分 <i>f₁₁p₁₁</i> ①	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 <i>f_ip_i</i> ②	切片 <i>f₂</i> ③	平均値 (5点満点) ①+②+③	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の影響分 ④	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥		平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥
11	<i>F₁₁</i>	2.05	0.19	0.39									
9	<i>F₉</i>	3.13	-0.12		-0.38								
10	<i>F₁₀</i>	2.81	1.15		3.23								
2	<i>F₂</i>			0.39	2.85 ^{注2)}	-0.40	2.84	0.34	0.13 ^{注4)}	0.83 ^{注5)}			
3	<i>F₃</i>						2.91 ^{注3)}	0.28		0.81 ^{注6)}			
1	<i>F₁</i>								0.13	1.64 ^{注7)}	0.35	2.12	0.06

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*と*F₁₀*の計 注3) *f₃* 注4) ①×*p₂* 注5) (②+*f₂*)*p₂*
 注6) *f₃p₃* 注7) *F₂*と*F₃*の計

Table 17 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（B地域の非農家住民400人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 400 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性評価指標 <i>S</i> = ④ / (④+⑤+⑥)
		平均値 <i>f_i</i>	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の影響分 <i>f₁₁p₁₁</i> ④	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 <i>f_ip_i</i> ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥	平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥		
11	<i>F₁₁</i>	2.10	0.02	0.04					
9	<i>F₉</i>	3.06	-0.32			-0.98			
10	<i>F₁₀</i>	2.78	1.02			2.84			
3	<i>F₃</i>	2.78	0.06			0.17			
1	<i>F₁</i>			0.04	2.03 ^{注2)}	0.11	2.18	0.02	

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*, *F₁₀*, *F₃*の計

Table 18 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（B地域の非農家住民350人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 350 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性評価指標 <i>S</i> = ④ / (④+⑤+⑥)
		平均値 <i>f_i</i>	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の影響分 <i>f₁₁p₁₁</i> ④	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 <i>f_ip_i</i> ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥	平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥		
11	<i>F₁₁</i>	2.10	0.04	0.08					
9	<i>F₉</i>	3.11	-0.42			-1.31			
10	<i>F₁₀</i>	2.78	0.95			2.64			
3	<i>F₃</i>	2.81	0.10			0.28			
1	<i>F₁</i>			0.08	1.61 ^{注2)}	0.49	2.18	0.04	

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*, *F₁₀*, *F₃*の計

Table 19 モデル2によるパラメータの推定結果および継続性評価指標の算出結果（B地域の非農家住民175人の場合）

Result of the estimation of parameters and the calculation of the indicator to evaluate sustainability by the model 2 (case of 175 non-farmers in area B)

連番 <i>i</i>	潜在変数 <i>F_i</i>	<i>F₁₁, F₉, F₁₀, F₃</i>			<i>F₁</i>				継続性評価指標 <i>S</i> = ④ / (④+⑤+⑥)
		平均値 <i>f_i</i>	パス係数 <i>p_i</i>	<i>F₁₁</i> の影響分 <i>f₁₁p₁₁</i> ④	<i>F₁₁</i> 以外の影響分 <i>f_ip_i</i> ⑤	切片 <i>f_i</i> ⑥	平均値 (5点満点) ④+⑤+⑥		
11	<i>F₁₁</i>	2.09	0.17	0.36					
9	<i>F₉</i>	3.09	-0.22			-0.68			
10	<i>F₁₀</i>	2.76	0.82			2.26			
3	<i>F₃</i>	2.85	0.09			0.26			
1	<i>F₁</i>			0.36	1.84 ^{注2)}	-0.10	2.10	0.17	

注1) 上表中の*f_i*, *p_i*の値は、Amosで求めた非標準化推定値 注2) *F₉*, *F₁₀*, *F₃*の計

Table 20 モデル1およびモデル2の適合度指標の計測結果 (A・B地域の非農家住民の場合)
Results of the estimation of fit indexes of the model 1 and the model 2 (case of non-farmers in area A and area B)

区分	データ数	A地域				B地域							
		CFI		RMSEA		CFI		RMSEA					
		値	適合が相対的に良いモデル	値	適合が相対的に良いモデル	値	適合が相対的に良いモデル	値	適合が相対的に良いモデル				
	モデル1	モデル2	モデル1	モデル2	モデル1	モデル2	モデル1	モデル2					
パラメータ数の10倍	390	0.897	モデル1	0.087	モデル1	0.881	モデル1	0.085	モデル1				
	350	0.881		0.088		0.853		0.090					
パラメータ数の5倍	195	0.858	モデル1	0.099	モデル1	0.887	モデル2	0.081	モデル2				
	175	0.834		0.101		0.908		0.072					
参考 (全数)	400	0.897	0.884	モデル1	0.087	0.088	モデル1	0.886	0.867	モデル1	0.084	0.087	モデル1

注) 上表中, CFIとRMSEAは適合度指標を表す。

ルとなっている。このことから、簡易算出手法としては、モデル1の方が、モデル2に比べて、データとの適合が相対的に良い傾向にあることが示唆される。

なお、上述したように、「B地域」において「パラメータ数の5倍」のデータを使用した場合、モデル2の方が、適合が相対的に良いモデルとなっている。このことに関して、「参考 (全数)」に示したとおり、「B地域」において全数データを使用した場合の、CFIとRMSEAの「適合が相対的に良いモデル」欄を見ると、両者とも「モデル1」となっている。このことから、モデル2の適合が良かった理由の1つとして、データを無作為抽出した際に、データの偏りの発生した可能性が示唆される。

ここで、前出のTable 7に示したように、既往研究のデータを使用した場合には、モデル2の方がデータとの適合が相対的に良かった。Table 7に示した結果は、800人分という、パラメータ数の10倍を遙かに越える人数分のデータを使用したものである。そのため、本項の結果と単純に比較することは適切でないと考えられるものの、本項で述べた、新たに入手したデータを使用した場合とは、逆の結果になっていた。このことについて、本報ではその理由を分析していないが、適合度指標は、2.2.2項で述べたとおり、モデル全体が現実のデータに適合している度合いを評価する指標なので、「現実のデータ」が異なれば、適合が相対的に良いモデルも異なる可能性がある。モデル1・2の適合度について、より一般性のある考察を導くためには、さまざまな被調査者による分析結果を積み重ねていくことが重要であり、その観点から、本項でも2つの地域のデータを使用したところである。

3.2 パラメータ数の5倍のデータを使用した場合

Table 21に、Table 20に示した適合度指標の計測結果を再整理し、パラメータ数の10倍のデータを使用した場合と5倍のデータを使用した場合の計測結果を比較し

て示す。あわせて、Table 8～19に示した継続性評価指標Sの算出結果を、整理して示す。

Table 21について、はじめに、「A地域」の「CFI」欄を見ると、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル1」について使用した場合の値は0.897であって、前項で述べたとおり、適合が良いとされる目安の0.9以上にほぼ達している。これに対し、「パラメータ数の5倍」のデータを「モデル1」について使用した場合の値は0.858であって、適合が良いとされる目安の0.9以上との差は0.042である。このように、A地域のデータを使用してCFIにより評価した場合、モデル1は、パラメータ数の10倍のデータに適合しているものの、5倍のデータに適合しているとは言えなかった。このことから、当該ケースについては、「パラメータ数の5倍のデータを使用することにより推定が不安定になることが、実用上の許容範囲にない」と判定した。このことを、「実用上の許容範囲」欄に「なし」と表記した。

同様に、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル2」について使用した場合の値は0.881であって、適合が良いとされる目安の0.9以上に近い値である。これに対し、「パラメータ数の5倍」の値は0.834であって、適合が良いとされる目安の0.9以上との差は0.066である。このことから、当該ケースについても、「実用上の許容範囲」欄に「なし」と表記した。

「A地域」について、次に「RMSEA」欄を見ると、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル1」について使用した場合の値は0.087であって、前項で述べたとおり、適合が妥当とされる目安の0.08以下と、適合が不適とされる目安の0.1以上の、中間位の値となっている。これに対し、「パラメータ数の5倍」の値は0.099であって、適合が不適とされる目安の0.1以上とほぼ等しい値である。このことから、当該ケースについても、「実用上の許容範囲」欄に「なし」と表記した。

同様に、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル2」

Table 21 パラメータ数の10倍のデータを使用した場合および5倍のデータを使用した場合の適合度指標の計測結果（A・B地域の非農家住民の場合）

Results of the estimation of fit indexes using the data 10 times as many as the number of parameters and the data 5 times of parameters (case of non-farmers in area A and area B)

区分	データ数	A 地域						S	B 地域						
		CFI			RMSEA				CFI			RMSEA			
		パラメータ数の10倍	パラメータ数の5倍	実用上の許容範囲	パラメータ数の10倍	パラメータ数の5倍	実用上の許容範囲		パラメータ数の10倍	パラメータ数の5倍	実用上の許容範囲	パラメータ数の10倍	パラメータ数の5倍	実用上の許容範囲	
モデル1	390	0.897		なし	0.087		なし	0.03	0.881		あり	0.085		あり	0.03
	195		0.858			0.099		0.01		0.887			0.081		0.06
	参考(400)	0.897		-	0.087		-	0.02	0.886		-	0.084		-	0.03
モデル2	350	0.881		なし	0.088		なし	0.16	0.853		なし	0.090		あり	0.04
	175		0.834			0.101		0.12		0.908			0.072		0.17
	参考(400)	0.884		-	0.088		-	0.15	0.867		-	0.087		-	0.02

注) 上表中, CFIとRMSEAは適合度指標を表し, Sは継続性評価指標を表す。

について使用した場合の値は0.088であり、「パラメータ数の5倍」の値は0.101である。このことから、当該ケースについても、「実用上の許容範囲」欄に「なし」と表記した。

次に、「B地域」の「CFI」欄を見ると、「パラメータの10倍」のデータを「モデル1」について使用した場合の値は0.881、「パラメータ数の5倍」の値は0.887であって、いずれも、適合が良いとされる目安の0.9以上に近い値である。このことから、当該ケースについては、「パラメータ数の5倍のデータを使用することにより推定が不安定になることが、実用上の許容範囲にある」と判定した。このことを、「実用上の許容範囲」欄に「あり」と表記した。

同様に、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル2」について使用した場合の値は0.853であって、適合が良いとされる目安の0.9以上との差は0.047である。これに対し、「パラメータ数の5倍」の値は0.908であって、適合が良いとされる目安の0.9以上である。このように、パラメータ数の10倍のデータに適合していないので、2.2.3項で述べたとおり、そもそもモデル2を使ってB地域の当該データを分析することは適切でない可能性がある。このことから、当該ケースについては、「実用上の許容範囲」欄に「なし」と表記した。

「B地域」について、次に「RMSEA」欄を見ると、「パラメータの10倍」のデータを「モデル1」について使用した場合の値は0.085であって、適合が妥当とされる目安の0.08以下と、適合が不適とされる目安の0.1以上の、中間位の値となっている。これに対し、「パラメータ数の5倍」の値は0.081であって、適合が妥当とされる目安の0.08以下に、ほぼ達している。このことから、当該

ケースについては、「実用上の許容範囲」欄に「あり」と表記した。

同様に、「パラメータ数の10倍」のデータを「モデル2」に使用した場合の値は0.090であって、適合が妥当とされる目安の0.08以下と、適合が不適とされる目安の0.1以上の、中間位の値となっている。これに対し、「パラメータ数の5倍」の値は0.072であって、適合が妥当とされる目安の0.08以下である。このことから、当該ケースについても、「実用上の許容範囲」欄に「あり」と表記した。

以上のように、パラメータ数の10倍のデータを使用した場合と5倍のデータを使用した場合の適合度を評価・比較した結果、8ケース中5ケースにおいて、パラメータ数の5倍のデータを使用することにより推定が不安定になることが、実用上の許容範囲にないと判定した。このことから、簡易算出手法としてパラメータ数の5倍のデータを使用することは、必ずしも適切でないことが示唆される。

なお、上述したように、「B地域」の「CFI」の値は、「パラメータ数の5倍」のデータを「モデル2」について使用した場合、適合が良いとされる目安の0.9以上(0.908)となっている。また、「B地域」の「RMSEA」の値は、「パラメータ数の5倍」のデータを「モデル2」について使用した場合、適合が妥当とされる目安の0.08以下(0.072)となっている。これらのことに関して、「参考(400)」欄に示したとおり、全数データを使用した場合のCFIの値は0.867であり、RMSEAの値は0.087である。このことから、当該2ケースにおいて適合が良かった理由の1つとして、データを無作為抽出した際に、データの偏りの発生した可能性が示唆される。

ここで、Table 21に示した継続性評価指標について、B地域でCFI, RMSEAともに「実用上の許容範囲」欄が「あり」である「モデル1」の「S」欄を見ると、パラメータ数の10倍のデータを使用した場合の値が0.003、パラメータ数の5倍のデータを使用した場合の値が0.006となっている。単純に比べると2倍の差であるが、有効数字末尾で3の差であることから、差は大きくないと考える。

3.3 簡易算出手法を用いることによる継続性評価指標の適用範囲の拡大

3.1.1項で述べたとおり、新たに構成したモデル1・2を使って、継続性評価指標を算出することができる可能性があることが判定された。また、3.1.2項で述べたとおり、簡易算出手法としては、モデル1の方が、モデル2に比べて、データとの適合が相対的に良い傾向にあることが示唆された。さらに、3.2節で述べたとおり、パラメータ数の5倍のデータを使用することは、必ずしも適切でないことが示唆された。

以上のことから、簡易算出手法としては、モデル0では89であったパラメータ数を、39まで削減したモデル1に、パラメータ数の10倍に相当する390人分のデータを使用することが考えられる。また、この手法を用いることにより、継続性評価指標の算出に必要なデータを、約800人分から390人分まで減らせる可能性がある。

上記のことは、非農家世帯数が390戸以上の集落であれば、継続性評価指標を算出できる可能性のあることを意味する。ここで、前出のTable 4を見ると、非農家戸数規模が467戸以上の農業集落の数は、全体の集落数の14.0% (100.0% - 86.0%) を占め、280戸以上の集落は、21.8% (100% - 78.2%) を占める。このことから、按分して求めると、非農家世帯数が390戸以上の集落は、全体の17%程度あるものと考えられる。I章で述べたように、現行の指標は農業集落の1割程度に適用できたが、上記の簡易算出手法を用いることにより、17%程度まで適用範囲を拡大することができる可能性がある。また、Table 4に示した集落数の計は58,177集落なので、上記のことは、指標を適用可能な集落数が約4千増える((17% - 10%) × 58,177集落) 可能性のあることを意味する。

なお、本報で分析に使用したデータは、質問紙調査により入手したものであるため、本章で記述した結果と考察の適用範囲は今回の被調査者に限られる。より一般性のある結論を導くためには、さまざまな被調査者による分析結果を積み重ねていくことが重要であるが、本報はそのための情報の1つになる。

IV 結 言

農業集落にある水田用の用排水路の維持管理へ非農家

住民に継続的に参加して貰うためには、彼らの労力負担行動の継続性が相対的に低い維持管理組織を選別し、所要の施策を講ずることが重要である。この観点から既往研究において、組織を選別するための、継続性評価指標が提案されている。しかし、指標の算出に約800人分の質問紙調査の回答データが必要であることから、適用できる組織が限られている。

そこで、本報では、指標をより少ない人数分のデータで算出する手法を、2つの地域の非農家住民から得たデータを使って検討した。その結果、(1) 新たに構成した2つのモデルのうち、「農業用水に関する知識」と「労力負担意欲」の間の要因を省略したモデル1の方が、データとの適合が相対的に良い傾向にあること、(2) モデル1を使うと、必要なデータを800人分から390人分まで減らせる可能性があることを示した。

一方、本報で分析に使用した質問紙調査の回答データは、インターネット調査により入手したものであり、インターネット調査には、母集団を明確に反映することができないという限界がある(日本マーケティング・リサーチ協会, 2006)。そのため、結果と考察の適用範囲は今回の被調査者に限られる。また、検討に用いた適合度指標の中には、適合が良いことを明確に示す値となっていないものが複数あった。そのため、より一般性のある結論を導くためには、さまざまな被調査者による分析結果を積み重ねていくことが重要である。さらに、本報で示した簡易算出手法を用いた場合、継続性評価指標の適用範囲は現行の1割程度から17%程度まで拡大するものの、依然として、適用できない多くの集落が存在する。

それでも、本報は、指標の算出に必要なデータ数を半減できる可能性のある手法を示し、そのことによる指標の適用範囲の拡大効果が約4千集落に及ぶと見込まれることから、中間的な研究成果で速報的な内容として、農村工学研究所技報にとりまとめたものである。そのため、今後、まずは、継続性評価指標の適用範囲を一層拡大させる可能性があることから、パラメータ数を削減する手段として、潜在変数を測定する観測変数の数を減らすことを検討することが求められる。さらに、無作為抽出した際にデータの偏りの発生した可能性に対処するため、ブートストラップ法を用いた再無作為抽出についても検討することが求められる。

このように、残された課題はあるものの、本報は、継続性評価指標の簡易算出手法を検討した最初の研究であり、今後の研究や現場での取り組みを進める上で有益な知見を提供していると考えられる。

引用文献

Bentler, P. M. and Chou, C. P. (1987) : Practical Issues in Structural Modeling, Sociological Methods & Research, 16(1),

- 90-91.
- 森 敏昭 (1999)：記憶，“中島義明，安藤清志，子安増生，坂野雄二，繁榎算男，立花政夫，箱田裕司編，心理学辞典”，有斐閣，p.150.
- 室橋弘人 (2007)：適合度指標の読み方 基準比較に基づく指標，“豊田秀樹編著，共分散構造分析 [Amos編]”，東京図書，p.245.
- 長濱健一郎 (2003)：地域資源管理の主体形成 「集落」新生への条件を探る，日本経済評論社，p.30.
- 内閣府 (2012)：平成24年版高齢社会白書，内閣府，p.6.
- 中村健太郎 (2003)：少ない標本数の問題，“豊田秀樹編著，共分散構造分析 [疑問編]”，朝倉書店，60-61.
- 日本マーケティング・リサーチ協会 (2006)：インターネット調査に関する品質保証ガイドライン，p.2.
- 農林水産省 (2013)：農地・水保全管理支払交付金実施要綱，p.1.
- 農林水産省 (2015)：多面的機能支払交付金実施要綱，p.1，3，30，33.
- 農林水産省農村振興局 (2015)：平成26年度多面的機能支払交付金の実施状況，p.16.
- 大石展緒，都竹浩生 (2009)：Amosで学ぶ調査系データ解析，東京図書，196-197.
- 鬼丸竜治 (2012)：用排水路の維持管理における非農家住民の労力負担構造の分析－働きかけが可能な要因に着目して－，農業農村工学会論文集，**281**，81-90.
- 鬼丸竜治 (2013)：水路の維持管理における労力負担行動の継続性評価指標，農業農村工学会論文集，**284**，89-90.
- 鬼丸竜治 (2014)：用排水路の維持管理における非農家住民の労力負担行動の継続性評価指標，平成25年度農村工学研究所成果情報，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所，29-30.
- 尾崎幸謙 (2007)：平均共分散構造分析，“豊田秀樹編著，共分散構造分析 [Amos編]”，東京図書，90-97.
- 菅井勝雄 (1999)：知識，“中島義明，安藤清志，子安増生，坂野雄二，繁榎算男，立花政夫，箱田裕司編，心理学辞典”，有斐閣，576-577.
- 総務省統計局 (2011a)：平成22年国勢調査 人口等基本集計第3-1表 年齢 (各歳)，男女別人口，年齢別割合，平均年齢及び年齢中位数 (総数及び日本人)，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001034991> (閲覧日：2015年7月22日).
- 総務省統計局 (2011b)：2010年世界農林業センサス 第7巻 農山村地域調査報告書－都道府県編－，第2部 農山村地域調査 (農業集落用調査票関係)，7 [農業地域類型別]，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001034607> (閲覧日：2015年7月17日).
- 田中秀明，豊 輝久，丸太雅博，田澤裕之 (2005)：地域における農地・農業用水等の資源保全活動の実態，農業土木学会誌，**73(5)**，11-14.
- 豊田秀樹 (1992)：SASによる共分散構造分析，東京大学出版会，49-56，119-120.
- 豊田秀樹 (1998)：共分散構造分析 (入門編)，朝倉書店，p.170，229，278.

受理年月日：平成27年9月17日

Simplified Calculation Techniques as an Indicator to Evaluate the Sustainability of Non-farmer Participation in Activities for Maintaining Irrigation/Drainage Canals

ONIMARU Tatsuji*

*Laboratory of Project Evaluation, Rural Development and Planning Research Division

Abstract

In rural communities of Japan, an aging population and increases in mixed inhabitation have reduced the workforce available to maintain irrigation/drainage canals, so cooperation of non-farmers is required. To encourage the continued participation of non-farmers in maintenance activities, organizations for maintenance activities in rural communities with low sustainability of non-farmer participation need to be sorted and supported. From this view point, a previous study proposed an indicator to evaluate the sustainability of non-farmer participation in maintenance activities using "Structure Equation Modeling with a mean structure". However, the application conditions for this indicator (calculation of the indicator requires 800 data sets collected from 800 non-farmers) limit users. Therefore, this study developed a simplified calculation technique as an indicator that can be calculated with less than 800 data sets. The following results were observed: (1) in two newly developed causality models, fitness indexes of one model that skipped some factors between "knowledge" and "willingness" showed a better fit than the other, (2) the model developed in this study can reduce the number of data sets necessary for calculations of the indicator from 800 to 390.

Key words: Irrigation/Drainage canal, Maintenance, Participation in maintenance activity, Indicator to Evaluate the Sustainability, Structure Equation Modeling with a mean structure

〔農工研技報 218〕
〔19 ~ 28, 2016〕

Google Earthを活用した荒廃農地調査による荒廃農地の 所在把握結果の検査手法

福本昌人* 進藤惣治**

* 農村基盤研究領域資源情報担当

** 農村基盤研究領域地域計画担当

要 旨

荒廃農地調査で間違っただけで荒廃農地として把握された可能性のある農地、および、実際には荒廃している可能性があるが、同調査で荒廃農地として把握されなかった農地をGoogle Earthを用いて検出する手法を考案し、A市において適用性を検討した。まず、5月の衛星データを用いて植生指数NDVIに基づいて目視判読の対象農地を絞り込み、次に、Google Earth画像を用いて目視判読により荒廃している可能性のある農地の農地筆ポリゴンを抽出した。また別途、荒廃農地調査の個票データを用いて荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンを抽出した。最後に、それらのポリゴンを照合し、把握ミスや把握漏れの可能性のある農地の筆ポリゴンを抽出した。検討の結果、農地台帳データを用いて農地台帳に記載されている農地の筆ポリゴンを抽出して利用する必要があることや、把握ミスに関しては、別途、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンのすべてを対象に目視判読を行う必要があることがわかり、検査手法を改良した。

キーワード：荒廃農地、衛星データ、NDVI、Google Earth、目視判読、GIS

I 緒 言

政府の規制改革会議は、2015年6月に182項目にわたる規制改革案を答申し、その中で、遊休農地の発生抑制や農地流動化の促進を図るため、遊休農地等に係る課税の強化・軽減等を検討するよう政府に求めた。それが実現されれば、遊休農地の所在を高い精度で把握する必要がある。

遊休農地の所在は、農地法に基づく「農地の利用状況調査（以下、利用状況調査と称す）」（実施主体は農業委員会）によって把握されている。遊休農地は、農地法において、「①現に耕作の目的に供されておらず、かつ、引き続き耕作の目的に供されないと見込まれる農地（1号遊休農地；耕作なし）、または、②その農業上の利用の程度がその周辺の地域における農地の利用の程度に比し、著しく劣っていると認められる農地（2号遊休農地；耕作あり）」と定義されている。

一方、農林水産省農村振興局長通知に基づく「荒廃農地の発生・解消状況に関する調査（以下、荒廃農地調査と称す）」（実施主体は市町村と農業委員会）によって、荒廃農地の所在が把握されている。荒廃農地は、その調査要領において、「現に耕作に供されておらず、耕作の放棄により荒廃し、通常の農作業では作物の栽培が客観的に不可能となっている農地」と定義され、再生利用が

可能な荒廃農地（A分類）と再生利用が困難と見込まれる荒廃農地（B分類）に区分されている。荒廃農地調査と利用状況調査は一体的に毎年実施されている。また、定義は異なるが、A分類の荒廃農地と1号遊休農地は調査上同じものとされている。

遊休農地と荒廃農地は土地の現況に基づくものであるが、農林業センサスで把握されている耕作放棄地（以下、センサス耕作放棄地と称す）は、「以前耕作していた土地で、過去1年以上作物を作付けせず、この数年の間に再び作付けする意思のない土地」と定義されており、所有者の意志に基づくものである。2014年の遊休農地と荒廃農地の全国面積（実績値）はそれぞれ15.3万ha（1号遊休農地が13.0万ha、2号遊休農地が2.3万ha；農林水産省経営局農地政策課、2015）、27.3万ha（A分類が13.0万ha、B分類が14.3万ha；農林水産省、2015）、2010年のセンサス耕作放棄地の全国面積は39.6万ha（総農家が21.4万ha、土地持ち非農家が18.2万ha）である。

荒廃農地調査・利用状況調査において、荒廃農地・遊休農地の所在の把握は、現地踏査によって行われている。市町村内のすべての農地が対象であるため、多大な労力をかけて踏査を行っても所在の把握に間違いや漏れが生じる可能性がある。荒廃農地の全国面積がセンサス耕作放棄地の全国面積よりかなり小さい（前者は後者の67%）ことから、実際に所在の把握に漏れが多く生

じている可能性が高い、と推察される。また、総務省の「農地の保全及び有効利用に関する行政評価・監視結果報告書」(総務省行政評価局, 2013)において、「調査結果は耕作放棄地解消のための取組みの基礎データとして重要であることから、調査結果のより高い精度の確保に努めることが望まれる」と指摘されている。そこで、本研究では、荒廃農地調査による荒廃農地の所在の把握結果をGoogle Earth (以下、GEと略す)を用いて検査する手法について検討した。検査結果を次年度の荒廃農地調査において活用すれば、調査結果の精度の向上と信頼性の確保を図ることができる、と考えている。

GEは、Google社が無償で配布している地図ソフトである。GEを使えば、高解像度の衛星画像や航空写真画像(オルソ画像)を無償で見ることができる(以下、GEに掲載されている画像をGE画像と称す)。近年、都市域だけでなく農業地域においても撮影時期の新しい航空写真画像がGEに掲載されつつある。また、GEに装備されているストリートビュー機能を使えば、現地の写真(以下、ストリートビュー写真と称す)も見ることができる。

筆者らは、これまでにGEを活用して荒廃農地調査で把握された荒廃農地を可視化する手法を提案した(福本・進藤, 2015)。その手法は、所在地(大字+地番)情報に基づいて地番図の筆データの属性テーブルに同調査の個票データを結合させて荒廃農地のGISデータを作成し、そのファイル形式をGEが対応しているKMZファイルに変換する、というものである。GEに撮影時期の新しい航空写真画像が掲載されていれば、その手法により同調査で把握された荒廃農地の位置をGE画像上に表示し、GE画像を目視して同位置の地表面状況を判読(目視判読)することにより、間違っ荒廃農地として把握された可能性のある農地を検出(把握ミスに関する検査)することができる。しかし、この方法では、実際には荒廃している可能性があるが、荒廃農地として把握されなかった農地を検出(把握漏れに関する検査)することは難しい。そこで、それらの農地を同時に検出する検査手法(把握ミスと把握漏れに関する検査手法)を考案し、その適用性を検討した。なお、本手法では、衛星データを用いて目視判読の対象農地の絞り込みを行うが、その絞り込みは、福本・吉迫(2014)が荒廃農地調査の踏査の省力化を図るために提案した、多時期の衛星データを用いた踏査対象田のスクリーニング(絞り込み)手法を参考にして行った。

II 方法

2.1 考案した荒廃農地の所在把握結果の検査手法

考案した検査手法は、衛星データやストリートビュー写真等を補助的に用いてGE画像の目視判読により荒廃している可能性のある農地(以下、荒廃可能性農地と称

す)を抽出し、それを荒廃農地調査で把握された荒廃農地と照合する、というものである。本手法の作業の流れをFig. 1に示す。まず作業①で、衛星データを用いて植生指数NDVIに基づいて目視判読の対象農地を絞り込み、次に作業②で、GE画像を用いて目視判読により荒廃可能性農地の農地筆ポリゴンを抽出する。また別途、作業③で、荒廃農地調査の個票データを用いて荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンを抽出する。最後に作業④で、それらのポリゴンを照合し、「荒廃農地調査で荒廃農地として把握されたが、目視判読で荒廃可能性農地と判定されなかった筆ポリゴン(把握ミスの可能性のある筆ポリゴン)」の抽出、および、「目視判読で荒廃可能性農地と判定されたが、荒廃農地調査で荒廃農地として把握されなかった農地筆ポリゴン(把握漏れの可能性のある農地筆ポリゴン)」の抽出を行う。抽出された(農地)筆ポリゴンの農地については、次年度の荒廃農

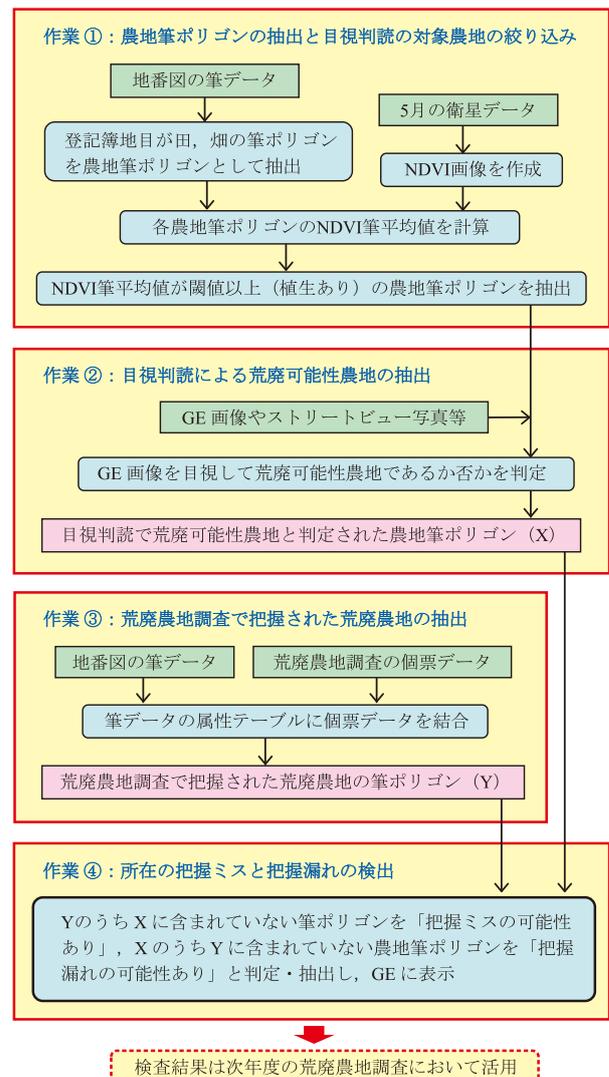


Fig. 1 考案した荒廃農地の所在把握結果の検査手法
Devised method to check mistakes and omissions of survey data for locations of abandoned farmlands

地調査において確実に調査し、荒廃農地であるか否かを現地確認する。

2.2 対象地域

本手法の適用性の検討は、A市を対象地域にして行った。A市では、農地のほとんどは平坦地に位置し、また、水稲の他、転作田や畑地において芝の栽培が広く行われている。A市における耕地、荒廃農地等の面積を Fig. 2 に示す。2010年のセンサス耕作放棄地の面積は1,322 haであり、耕作放棄地面積率は14.7%である。また、2013年の荒廃農地の面積は262 haであり、2010年のセンサス耕作放棄地の面積と比べるとかなり小さい(前者は后者の20%)。

A市では、荒廃農地調査・利用状況調査の現地踏査は、農業委員と市の職員により、地番図のプリントのみを用いて行われている。

● 2013年の耕地及び作付面積統計による耕地面積： 10,960ha (田 4,810ha, 畑 6,150ha)
● 2010年の農林業センサスによる所有耕地面積 (①)： 7,677ha (総農家 5,886ha, 土地持ち非農家 1,791ha)
● 2010年の農林業センサスによる耕作放棄地の面積 (②)： 1,322ha (総農家 692ha, 土地持ち非農家 629ha) 耕作放棄地面積率：14.7% (=②/(①+②)×100)
● 2013年の利用状況調査による遊休農地の面積： 230ha (田 91ha, 畑 139ha)
● 2013年の荒廃農地調査による荒廃農地の面積： 262ha (A分類 230ha, B分類 32ha)

Fig. 2 A市における耕地、荒廃農地等の面積
Acreage of arable lands and abandoned farmlands in A-city

2.3 使用データ

作業①と作業③では、農林水産省の水土里情報利活用促進事業で整備された地番図の筆データ (Shape ファイル形式のGISポリゴンデータ; Fig. 3) を用いた。

作業①では、2013年5月14日撮影のRapidEye衛星データ (解像度6.5 m; 5バンド; Fig. 3) を用いた。なお、RapidEye衛星は5機体制で運用されており、同じエリアを毎日撮影することができる。

作業②では、2014年3月22日撮影のGE画像 (航空写真画像; 解像度0.15 m程度; Fig. 4(a)) を用いた。必要に応じて、ストリートビュー写真 (Fig. 5) の他、2012年3月16日撮影のGE画像 (航空写真画像; 解像度0.15 m程度)、2011年3月29日撮影のGE画像 (航空写真画像; 解像度0.15 m程度)、2010年5月8日撮影のGE画像 (WorldView-2衛星画像; 解像度0.5 m; Fig. 4(b))、および、水土里情報利活用促進事業で整備された2008年11月20日撮影の航空写真画像 (解像度0.4 m; Fig. 4(c); 以下、水土里情報オルソ画像と称す) も用いた。また、林状態であっても昔は農地であったことを確認するために、国土地理院の電子国土 Web システムで国土画像情報として配信されている1974年~1978年撮影の空中写真 (航空写真) 画像 (解像度1 m未満; Fig. 4(d)); 以下、国土画像情報オルソ画像と称す) も用いた。

作業③では、2013年の荒廃農地調査 (調査日は2013年10月1日) の個票データ (EXCEL ファイル) を用いた。その個票データは、農業委員会から入手した荒廃農地調査の個票ファイルから、2013年に荒廃農地であると判定された農地の所在地 (大字+地番) 等の情報を抽出して作成した。

2.4 作業①の手順

作業①では、まず、地番図の筆データから登記簿地目が田または畑である筆ポリゴンを農地筆ポリゴンとして

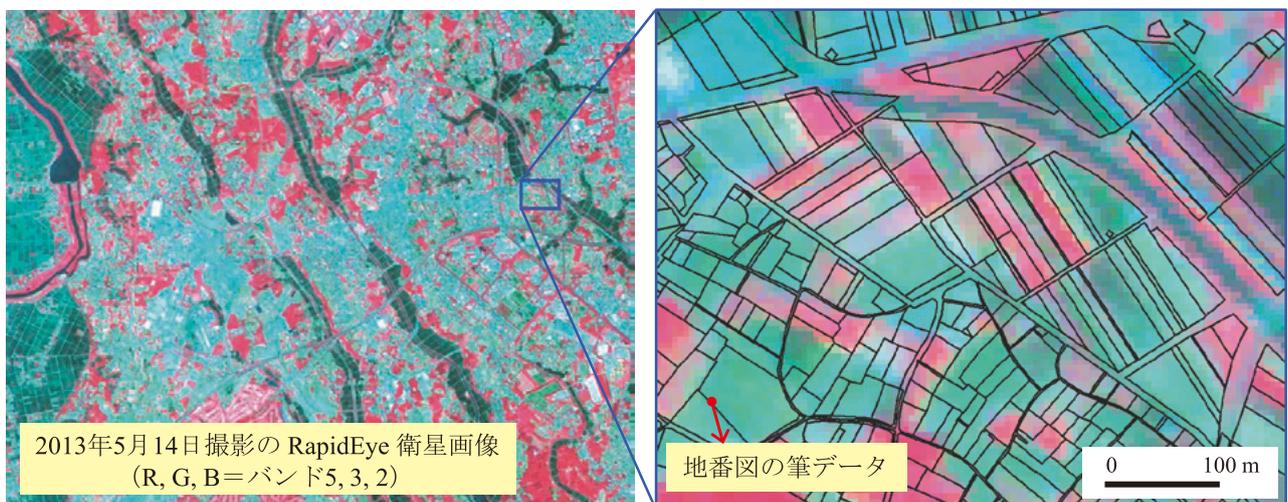


Fig. 3 RapidEye衛星データと地番図の筆データ
RapidEye satellite image data and GIS data of parcel boundaries in a lot number map



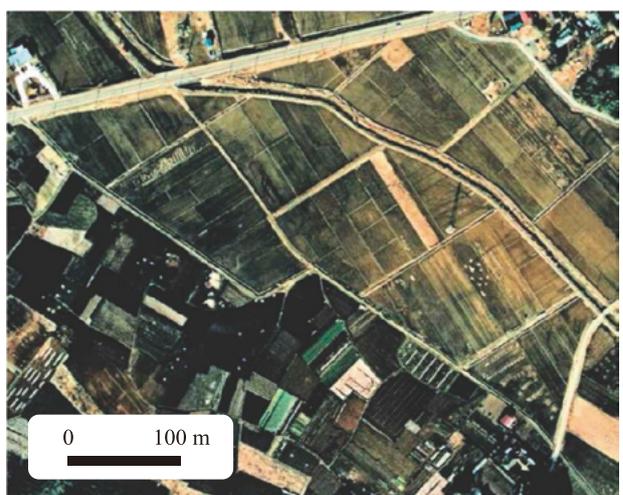
(a) 2014年3月22日撮影のGE画像 (航空写真画像)



(b) 2010年5月8日撮影のGE画像 (衛星画像)



(c) 2008年11月20日撮影の水土里情報オルソ画像



(d) 1974年～1978年撮影の国土画像情報オルソ画像

Fig. 4 Google Earth画像, 水土里情報オルソ画像および国土画像情報オルソ画像
 Images of Google Earth, Midori Information, and National Land Image Information

抽出した。ここで、登記簿地目が空白である筆ポリゴンが見られたので、それを水土里情報オルソ画像に重ねて農地（雑草が繁茂した状態の荒廃農地を含む）であるか否かを目視により判定し、その結果、農地と判定された筆ポリゴンも農地筆ポリゴンとした。

次に、福本・吉迫（2014）と同じように、水土里情報オルソ画像を参照して2013年5月14日のRapidEye衛星データを幾何補正した後、デジタル値を換算して求めた赤バンドの大気上端反射率（R）と近赤外バンドの大気上端反射率（IR）を用いてNDVI（ $= (IR - R) / (IR + R)$ ）を算出し、NDVI画像を作成した。なお、NDVIは植生量を示す指標であり、値が大きいくほど植生が多い。最後に、NDVI画像に農地筆ポリゴンを重ね、各ポリゴン内に位置するピクセルのNDVI値の平均値（以下、NDVI筆平均値と称す）を計算し、5月に植生のあった

NDVI筆平均値が0.34以上の農地筆ポリゴンを目視判読の対象農地として抽出した。その0.34という閾値は、福本・吉迫（2014）が荒廃農地調査の踏査対象田を絞り込むために2010年5月21日撮影のRapidEye衛星データに対して設定した閾値（0.38）を参照して設定した。

2.5 作業②の手順

作業②では、まず、作業①で抽出された農地筆ポリゴンをGEとGIS（ESRI社のArcGIS）に同時に表示した。ここで、GEへの農地筆ポリゴンの表示は、農地筆ポリゴンのファイル形式をShapeファイルからGE対応のKMZファイルに変換して行った。また、GE側では2014年3月22日撮影のGE画像、GIS側では主に1974年～1978年撮影の国土画像情報オルソ画像を農地筆ポリゴンの背景に表示した。

次に、GE側で2014年3月22日撮影のGE画像を目視して農地筆ポリゴンが荒廃可能性農地であるか否か（荒廃している可能性があるか否か）を一筆毎に判定し、GIS側で荒廃可能性農地と判定された農地筆ポリゴンを抽出した。

2.6 荒廃可能性農地であるか否かの判定方法

荒廃可能性農地であるか否かの判定は、次のようにして行った。

Fig. 5の黄色のラインで示した農地筆ポリゴンのように、太陽光による陰影に伴って形成された立体感がGE画像に見られ、GE画像から枯れた多年生雑草が地面を覆った状態にあると判読された場合、荒廃可能性農地と判定した。立体感が明瞭でなく判定に迷った場合には、他の時期のGE画像等を目視して2013年以前の雑草の繁茂状態を判読する、ストリートビュー写真が掲載されていれば、それを見てストリートビュー写真の撮影時（主に2012年12月）における雑草の繁茂状態を確認する、といった作業を行い、その結果も参考にして判定した。

GE画像から樹木が生えた状態であると判読された場合、1974年～1978年撮影の国土画像情報オルソ画像を目視し、1974年～1978年に農地（雑草が繁茂した状態の荒廃農地を含む）であったと判読されれば、荒廃可能性農地と判定した。ただし、落葉した樹木が整列して生えている場合には、その樹木は栗・柿等の果樹である可能性が高いので、ストリートビュー写真を見て果樹か否かを確認し、果樹であれば荒廃可能性農地ではないと判定した（ストリートビュー写真が掲載されていないければ、基本的に荒廃可能性農地ではないと判定した）。

上記以外の土地、すなわち、(a)耕作が行われている農地、(b)耕起・草刈り等の保土管理が適切に行われ、

多年生雑草が繁茂していない農地、(c)独立行政法人都市再生機構・茨城県による街づくりの大規模開発エリアや高速道路等の造成予定地に位置する農地、(d)農業以外の利用がなされている宅地・道路・資材置き場等の土地等は、「荒廃可能性農地ではない」と判定した。

なお、1筆の農地筆ポリゴン内に荒廃可能性農地とそれ以外が混在していた場合、荒廃可能性農地が50%以上の面積を占めていれば荒廃可能性農地と判定した。

2.7 作業③の手順

作業③では、所在地（大字+地番）情報に基づいて地番図の筆データの属性テーブルに個票データを結合し、個票データに所在地が記載されていた筆ポリゴン、つまり、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンを抽出した。

2.8 作業④の手順と適用性の検討方法

作業④では、まず、作業②で抽出された、荒廃可能性農地と判定された農地筆ポリゴン（X）と作業③で抽出された、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴン（Y）をGISで照合し、YのうちXに含まれていない筆ポリゴンを「把握ミスの可能性あり」、XのうちYに含まれていない（農地）筆ポリゴンを「把握漏れの可能性あり」と判定し、それぞれを抽出した。

次に、ファイル形式をShapeファイルからKMZファイルに変換し、抽出した筆ポリゴンをGEに表示した。

最後に、GE画像の目視判読等により、抽出した筆ポリゴンの実態を調べ、適用性を検討した。

Ⅲ 結果と考察

3.1 抽出結果

各作業における抽出結果をFig. 6に示す。図中の面積は、各ポリゴンのGIS計測面積を集計した値である。まず、作業①により、地番図の筆データ（345,854筆）から125,794筆の農地筆ポリゴンが抽出され、その中から35%にあたる43,979筆の農地筆ポリゴンが目視判読の対象農地として抽出された。続いて、作業②により、その中から25%にあたる10,851筆の農地筆ポリゴンが目視判読により荒廃可能性農地として抽出された。また、作業③により、荒廃農地調査で把握された荒廃農地として3,291筆の筆ポリゴンが抽出された。最後に作業④により、669筆の筆ポリゴンが「把握ミスの可能性あり」と判定され、8,229筆の筆ポリゴンが「把握漏れの可能性あり」と判定された。

3.2 「把握ミスの可能性あり」と判定された筆ポリゴンの実態

「把握ミスの可能性あり」と判定された669筆の筆ポリゴンは、荒廃農地調査で荒廃農地として把握されてい

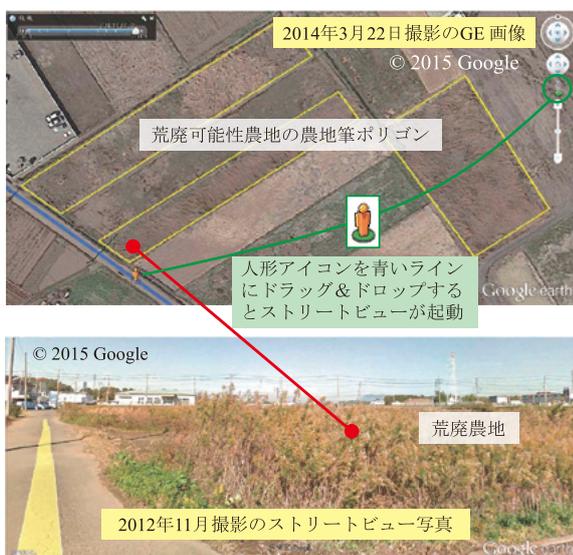


Fig. 5 Google Earth画像とストリートビュー写真
Google Earth image and Google Street View photo

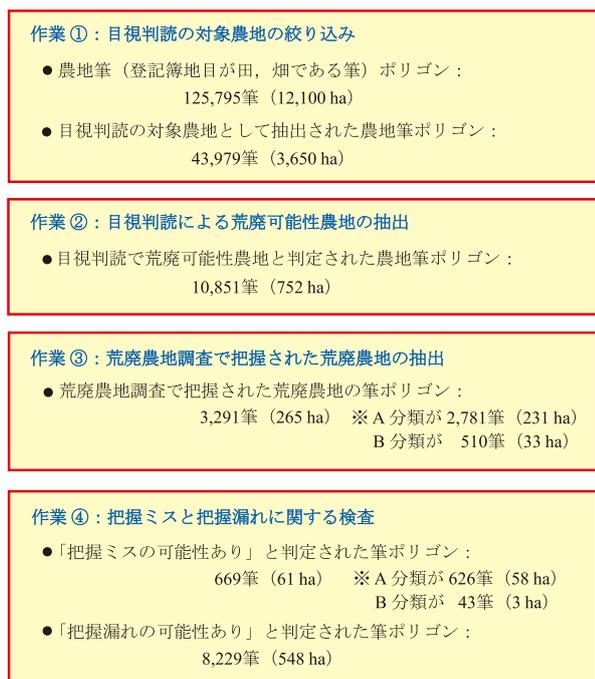


Fig. 6 各作業における抽出結果
Results for each extraction operation

たが、作業①～②で荒廃可能性農地と判定されなかったものである。荒廃可能性農地と判定されなかった理由を調べたところ、次のことがわかった。

(A) 2%にあたる12筆の筆ポリゴンは、登記簿地目が山林，原野等であったため、作業①で農地筆ポリゴンとして抽出されず、その結果、荒廃可能性農地と判定されなかった。この12筆の筆ポリゴンを対象として、2.5に記した方法で荒廃可能性農地であるか否かを判定した結果、すべて荒廃可能性農地と判定された。したがって、「把握ミスの可能性あり」と判定されたこの12筆の筆ポリゴンは、次年度の荒廃農地調査で現地確認されれば、荒廃農地である可能性が高い。

(B) 69%にあたる464筆の筆ポリゴンは、NDVI筆平均値が0.34以上という条件を満たさなかったため、作業①で目視判読の対象農地として抽出されず、その結果、荒廃可能性農地と判定されなかった。別途、その絞り込み条件を満たさなかった464筆の筆ポリゴンを対象として、2.5に記した方法で荒廃可能性農地であるか否かを判定した結果、288筆の筆ポリゴンが荒廃可能性農地と判定された。したがって、「把握ミスの可能性あり」と判定されたこの288筆の筆ポリゴンは、次年度の荒廃農地調査で現地確認されれば、荒廃農地である可能性が高い。また、この288筆の筆ポリゴンが荒廃可能性農地でありながら絞り込み条件を満たさなかった理由を調べたところ、衛星データの解像度に対してポリゴン区画が非常に小さいことに起因（周囲にあるNDVIの小さい土地の影響が大）してNDVI筆平均値が0.34未満であった筆

ポリゴンは非常に少なく（35筆）、ほとんどの筆ポリゴンは、衛星撮影日（2013年5月14日）に植生量が少なかったためにNDVI筆平均値が0.34未満であった。その植生量が少なかった理由として、前年の雑草が刈り払われたまま放置されていたため、地面が枯れた刈り草に被覆され、新しい雑草の初期生長に遅れが生じていたこと等が考えられた。

(C) 29%にあたる残る193筆の筆ポリゴンは、作業②で目視判読により荒廃可能性農地でないとして判定されたものである。そのうち76筆の筆ポリゴンは、耕作が行われている（果樹栽培を除く）と判読されたため荒廃可能性農地でないとして判定された。この76筆の筆ポリゴンのうち45筆の筆ポリゴンは、2012年3月16日撮影のGE画像では耕作が行われていないと判読されたことから、荒廃農地調査の調査日（2013年10月1日）以降に再生利用（営農再開）が行われた可能性がある。

3.3 「把握漏れの可能性あり」と判定された筆ポリゴンの実態

「把握漏れの可能性あり」と判定された8,229筆の筆ポリゴンは、作業①～②で荒廃可能性農地と判定されたが、荒廃農地調査で荒廃農地として把握されていなかったものである。その筆ポリゴンの分布をFig. 7に示す。29%にあたる2,373筆の筆ポリゴンは、北東部の山麓部エリア（Fig. 7の緑ライン）に位置していた。そのうちの959筆の筆ポリゴンについて、次のような実態がわかった。

「森林の様相を呈しているなど農地に復元するための物理的な条件整備が著しく困難なもの、または、周囲の状況から見て、その土地を農地として復元しても継続して利用することができないと見込まれるもの」は、農地法上の「農地」に該当しない、とされている。このことに対応して、荒廃農地調査では、その基準に当てはまる荒廃農地をB分類（再生利用が困難と見込まれる荒廃農地）に区分している。B分類に区分された荒廃農地は、調査終了後に農業委員会によって「非農地」と判断され、農地台帳に「×」印等が記されれば、次回から調査が行われなくなる。A市の農業委員会によれば、2011年の調査（荒廃農地調査の前身である耕作放棄地全体調査）終了後にB分類（耕作放棄地全体調査の「赤」）に区分された荒廃農地の大部分を「非農地」と判断し、所有者に通知した、とのことであった。そこで、まず、荒廃農地調査の個票ファイルから、2011年に荒廃農地であると判定され、かつ2012年以降に調査が行われなかった農地の所在地情報を抽出し、次に、2.7に記した方法でその筆ポリゴンを抽出し、GEに表示して分布を調べたところ、ほとんど（94%）の筆ポリゴンは山麓部エリアに位置していた。その筆ポリゴンと照合した結果、前述の山麓部エリアに位置していた959筆の筆ポリゴンは、「非農地」と判断されて調査対象外になっていたもので

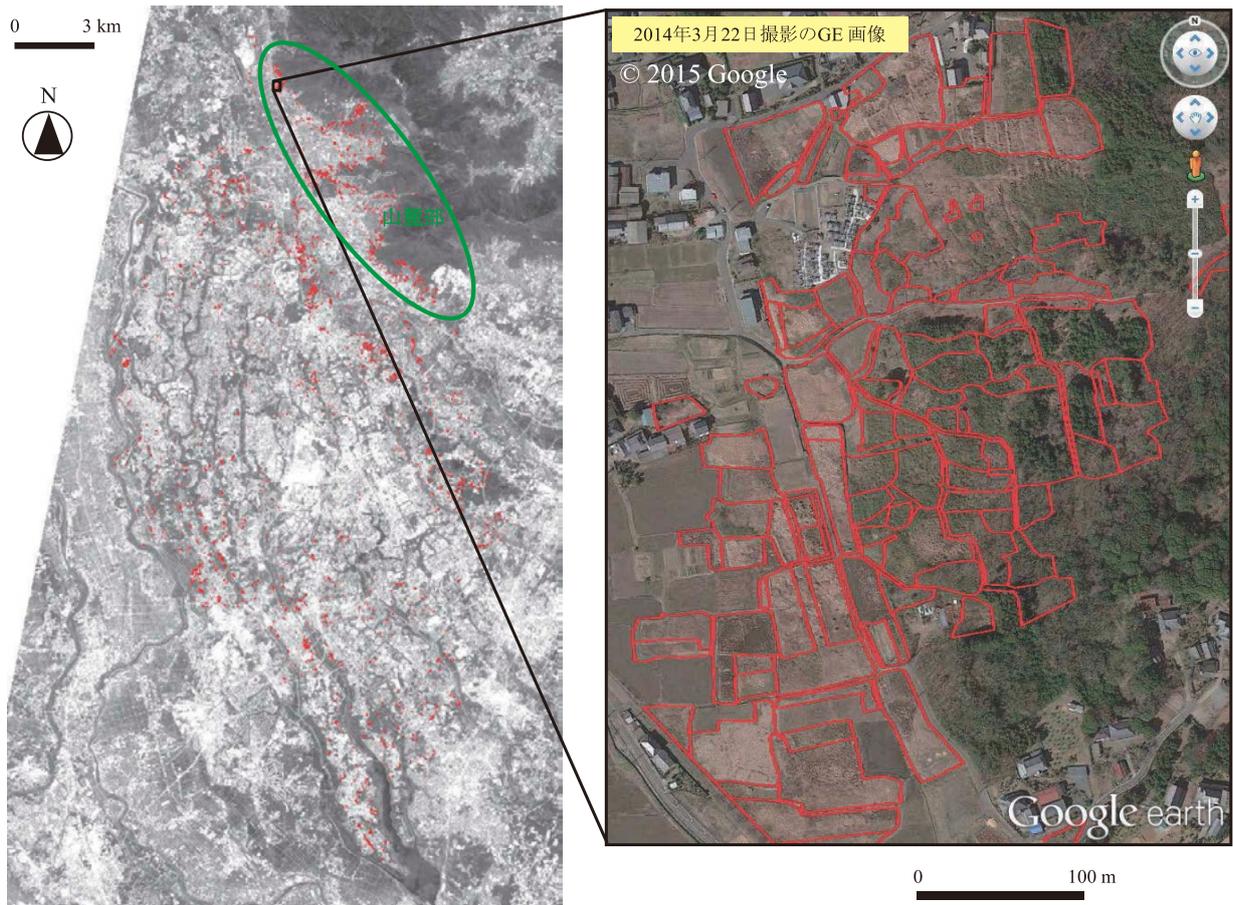


Fig. 7 「調査漏れの可能性あり」と判定された筆ポリゴンの分布
Distribution of parcel polygons of farmlands that may actually be abandoned although not identified in the survey

あることがわかった。すなわち、この959筆の筆ポリゴンは、非農地であり、次年度の荒廃農地調査で現地確認する必要のないものであった。

3.4 農地筆ポリゴンに関する問題点と改善策

本研究では、地番図の筆データから登録簿地目が田、畑である筆ポリゴンを農地筆ポリゴンとして抽出し、それを利用した。その結果、3.3に記したように、「非農地」と判断されて調査対象外になっていた筆ポリゴンまで「把握漏れの可能性あり」と判定されてしまった。この問題を解決するために、農地台帳データを利用する必要がある、と判断される。具体的な農地台帳データの利用方法は、次の通りである。

2015年4月より農地法に基づき、農地台帳の一部データのインターネット公開が農地情報公開システム（全国農地ナビ）を通じて行われている。そのシステムに関して農業委員会が提出した農地台帳データ（公開用CSVファイル）を入手し、2.7に記した方法で、農地台帳に記載されている農地の筆ポリゴンを抽出する。それを農地筆ポリゴンの代わりに利用すれば、作業①の段階で調査対象外の筆ポリゴンを除外することができる。

なお、農地台帳に記載されている農地の筆ポリゴンを利用すれば、3.2に記した、登録簿地目が山林、原野等であったために荒廃可能性農地と判定されなかった、という問題も解決できる。また、荒廃可能性農地であるか否かを判定する際に国土画像情報オルソ画像の目視判読（1974年～1978年に農地であったことの確認）を行う必要もなくなる。

3.5 目視判読の対象の絞り込みに関する問題点と改善策

本研究では、目視判読の作業負担を軽減するため、衛星データを用いて目視判読の対象農地の絞り込みを行った。その結果、3.2の(B)に記したように、目視判読すれば荒廃可能性農地として判定されるような筆ポリゴン（288筆）まで「把握ミスの可能性あり」と判定されてしまった。この問題を解決するために、少なくとも把握ミスに関しては、別途、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンのすべて（3,291筆）を対象に目視判読を行い、そのうち「荒廃可能性農地ではない」と判定されたものを「把握ミスの可能性あり」と判定する必要がある、と判断される。

目視判読の対象の絞り込みは、把握ミスだけでなく、

把握漏れにも影響している、と考えられる。絞り込みを行った結果、81,816 (= 125,795 - 43,979) 筆の農地筆ポリゴンが目視判読されなかったが、それらの中にも、目視判読すれば荒廃可能性農地として判定されるような筆ポリゴンが少なからず含まれている可能性がある。しかし、把握漏れに関しては、どう対処するかは、目視判読の作業負担との兼ね合いで決める必要がある。本研究では、0.34を閾値としたが、さらに小さい値、例えば0.29（この値は、植生量が少なかったことに起因して絞り込みの条件を満たさなかった筆ポリゴンのNDVI筆平均値の平均値）を閾値とすれば、実際には把握漏れであるが、「把握漏れの可能性あり」と判定されなかった筆ポリゴンの数はより少なくなるが、目視判読の対象は43,979筆から58,642筆に増え、目視判読の作業負担が増すことになる。もちろん、絞り込みは行わず、125,795筆すべてを対象に目視判読を行う、という選択肢もあり、作業負担はかなり大きい、そのようなものが理想的である。なお、目視判読は経験的な手法であり、判定精度や作業負担は作業者の熟練度に依存している。判別精度の向上や作業負担の軽減を図るために、今後、荒廃農地の目視判読性に関する知見を蓄積していく必要がある。

3.6 改良した荒廃農地の所在把握結果の検査手法

3.4に、農地台帳データを用いて農地台帳に記載され

ている農地の筆ポリゴンを抽出して利用する必要があることを記した。また、3.5に、把握ミスの把握にあたっては、別途、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンのすべてを対象に目視判読を行う必要があることを記した。これらを踏まえてFig. 1に示した作業の流れを修正すると、Fig. 8ようになる。最終的に、この改良した検査手法を、荒廃農地の所在把握結果の検査手法として提案する。A市では、現地踏査は地番図のプリントのみを用いて行われているが、本手法で検出した、把握ミスの可能性のある農地と把握漏れの可能性のある農地をGEに表示して印刷し、次年度の荒廃農地調査の際にそのプリントも用いて現地踏査すれば、調査結果の精度は大きく向上するであろう。

IV 結 言

本研究では、荒廃農地調査による荒廃農地の所在の把握結果をGoogle Earth (GE)を用いて検査する手法を考案し、A市を対象地域にしてその適用性を検討した。本手法は、GE画像の目視判読により荒廃している可能性のある農地（荒廃可能性農地）を抽出し、それを荒廃農地調査で把握された荒廃農地と照合することにより、把握ミスの可能性のある農地と把握漏れの可能性のある農地を検出する、というものである。

GE画像の目視判読を行う前に、地番図の筆データか

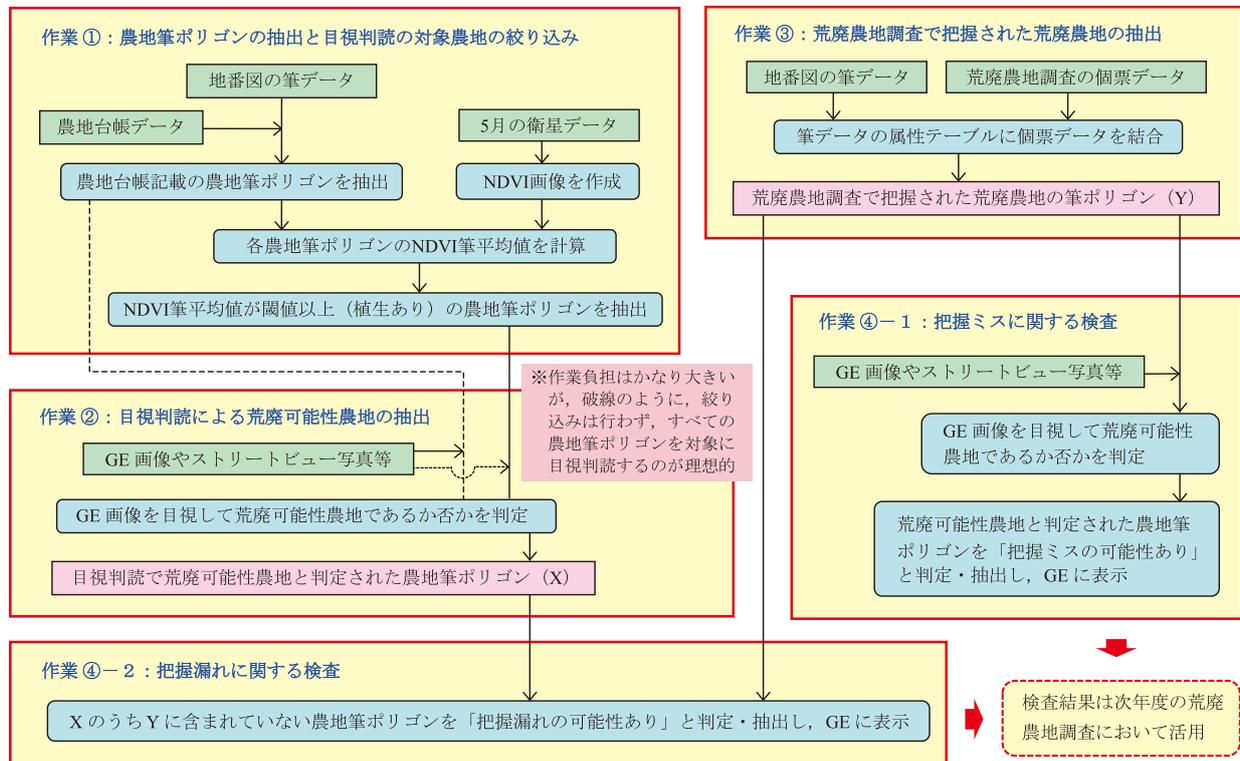


Fig. 8 改良した荒廃農地の所在把握結果の検査手法

Improved method to check mistakes and omissions of survey data for locations of abandoned farmlands

ら登記簿地目が田、畑である筆ポリゴンを農地筆ポリゴンとして抽出し、衛星データを用いてその中から目視判読の対象農地を絞り込むことにした。しかし、その農地筆ポリゴンを用いた結果、荒廃農地調査の調査対象外であった筆ポリゴンまで「把握漏れの可能性あり」と判定されてしまった。この問題を解決するために、農地台帳データを用いて農地台帳に記載されている農地の筆ポリゴンを抽出して利用する必要がある、と判断された。また、衛星データを用いて目視判読の対象農地を絞り込んだ結果、目視判読すれば荒廃可能性農地として判定されるような筆ポリゴンまで「把握ミスの可能性あり」と判定されてしまった。この問題を解決するために、把握ミスに関しては、別途、荒廃農地調査で把握された荒廃農地の筆ポリゴンのすべてを対象に目視判読を行う必要がある、と判断された。最終的に、これらを踏まえて改良した検査手法を、荒廃農地の所在把握結果の検査手法として提案した。本手法は荒廃農地調査の調査結果の精度向上に有用である、と考える。

なお、A市では、撮影時期の新しい航空写真画像がGEに掲載されていたので、それを利用したが、撮影時期の新しい航空写真画像がGEに掲載されていない場合は、別途、航空撮影を行って航空写真画像を用意し、GIS側

でそれを目視して荒廃可能性農地であるか否かの判定を行う必要がある。その場合でも、GE側でも筆ポリゴンを表示し、判定に迷った場合に他の時期のGE画像やストリートビュー写真を参照すると良いであろう。

引用文献

- 福本昌人, 吉迫 宏 (2014) : 多時期の衛星データと水田区画データを用いた荒廃農地調査の踏査対象田のスクリーニング手法, 農業農村工学会論文集, **293**, 55-62.
- 福本昌人, 進藤惣治 (2015) : Google Earthを活用した荒廃農地の可視化, 農村振興, **788**, 32-33.
- 農林水産省 (2015) : 平成26年の荒廃農地の面積について, http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/pdf/kouhyo27_tougou.pdf (2015年11月13日閲覧)
- 農林水産省経営局農地政策課 (2015) : 農地の利用状況調査の結果について (平成26年), <http://www.maff.go.jp/j/keiei/koukai/pdf/26riyou.pdf> (2015年11月13日閲覧)
- 総務省行政評価局 (2013) : 農地の保全及び有効利用に関する行政評価・監視結果報告書, http://www.soumu.go.jp/main_content/000218152.pdf (2015年11月13日閲覧)

受理年月日：平成27年9月25日

Method to Check Mistakes and Omissions of Survey Data for Locations of Abandoned Farmlands Utilizing Google Earth

FUKUMOTO Masato* SHINDO Soji**

*Resources Information Technology, Rural Development and Planning Research Division

**Regional Planning, Rural Development and Planning Research Division

Abstract

We devised a method to detect farmlands that may have been mistaken as abandoned farmlands by a survey (mistakes of the survey data), and farmlands that may actually be abandoned although not identified by a survey (omissions of the survey data) utilizing Google Earth, and examined the applicability of this method in A-city. First, parcel polygons (parcel boundaries from a lot number map) of farmlands targeted in visual interpretation of aerial photos were narrowed based on values of the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from satellite data acquired in May. Subsequently, the parcel polygons of farmlands considered abandoned by the visual interpretation of aerial photos in Google Earth were extracted. Next, we extracted parcel polygons of abandoned farmlands that had been identified by the survey using the survey data for locations of abandoned farmlands. Finally, the parcel polygons of farmlands that may not actually be abandoned although determined abandoned by the survey, and parcel polygons of farmlands that may actually be abandoned although not identified by the survey were examined by collating the parcel polygons. As a result, we found that it is necessary to use the parcel polygons of farmlands listed in the farmland ledgers instead of parcel polygons whose land category in registers are rice fields or upland fields, and it is also necessary to perform visual interpretations for all parcel polygons of abandoned farmlands identified by a survey to check mistakes of the survey data.

Key words: Abandoned farmlands, Satellite data, NDVI, Google Earth, Visual interpretation, GIS

東日本大震災の経済影響分析に関する試案

—動学的確率的一般均衡モデルの適用—

國光洋二*

*農村基盤研究領域 上席研究員

要 旨

大規模な震災の後の復旧・復興投資は、地域の総生産を増加させるが、住民の消費は回復が遅れる。このような生産と消費の間の時間的な不整合性を説明する理論モデルとして動学的確率的一般均衡モデル（DSGEモデル）がある。本研究は、東日本大震災が生じた岩手県沿岸部の経済動向を念頭に、震災の影響を考慮したDSGEモデルを試作し、そのモデルが震災後の復興過程をどの程度説明できるのかを試的に示すことを目的とする。分析の結果、①総生産は震災直後に減少のピークを示すが、消費は数期遅れて落ち込みのピークが生じること、②復旧・復興投資が終了すると、生産が急速に落ち込み自力回復の水準に戻ることに、③復旧・復興投資による資本ストック水準の早期回復は、当該地域にとっては投入費用を上回る効果をもたらすことが明らかとなった。

キーワード：復旧・復興投資、生産・消費の時間的不整合、費用便益比、資本ストックの回復

I 緒 言

2011年に起きた東日本大地震とそれともなう津波により、東北の沿岸部は多大な被害を受けた。特に、大規模な津波は、沿岸部の中心産業であった水産加工業や製造業の資本ストック（工場施設等）に壊滅的な被害を与え、地域の交通インフラである鉄道、道路の交通網を破壊して財・サービスの流通に多大な影響を与えた。震災後に、政府や民間企業の支援により復興投資が実施され、徐々にではあるが経済は回復に向かっていく。しかし、現在もお復興住宅で暮らす人は多く、水産業や製造業では、震災前の水準にまで生産が回復していない。

大規模地震による経済への影響については、日本政策投資銀行（2011）による阪神淡路大震災の地域経済分析がある。それによれば、震災直後（1995年）から2年間は、復旧復興に向けた設備投資により地域の総生産（兵庫県のGRP）が増加するものの、復興が一段落した2002年には生産の回復が止まり、GRPは震災直前の1994年対比で0.91倍にとどまることが示されている。東日本大震災の影響については、公表されている岩手県沿岸部の市町村純生産の値からある程度推測することができる。これによれば、2011年と2012年の沿岸部の純生産が、復興需要の増加により、震災前の2010年よりも増加している。この2年間のみを見れば、阪神淡路大震災と同様な経済経路をたどりはじめているとみなすこともできる。今後、東日本大震災の被災地の経済がど

ようになるのか、また、より一般的に、震災が地域経済に及ぼす影響はどのような経過をたどるのかを明らかにすることは、震災の多発する日本において、重要な研究課題であると考えられる。

Keen and Pakko（2007）は、人々の経済行動をベースにマクロ経済を分析する動学的確率的一般均衡モデル（Dynamic Stochastic General Equilibrium Model; DSGEモデル）を適用し、ハリケーン「カトリーナ」が地域経済に及ぼす影響を分析している。モデルのシミュレーションの結果から、災害後のインフレへの対処のため、連邦準備制度（FRB）が金融引き締めを行うのが最適政策であったと結論づけられている。

DSGEモデルは、ミクロ経済理論に裏付けされた消費者行動と生産者行動をもとに、マクロ経済状況を分析するモデルであり、ミクロ経済学的基礎付けのない従来のマクロ経済モデルに代わって、政策分析での導入が進められている（経済社会総合研究所、2015）。東日本大震災について、DSGEモデルを適用した分析は、筆者の知る限り行われていないが、東北の沿岸地域の経済動向を分析する上で有効なツールであると考えられる。

本研究は、震災による経済ショックとその後の復旧・復興投資が地域経済に及ぼす影響をDSGEモデルにより描写し、復旧・復興投資の経済効果を定量的に明らかにすることを目的とする。特に、従来の経済モデルでは描写が困難であった所得と消費の動向の乖離と、復旧・復興投資が終了した後の地域経済への影響を示すとともに

に、復旧・復興投資が実施された場合と実施されずに地域の自力回復に任せた場合を比較することにより、復旧・復興投資の経済効果を定量的に示す。

II 先行研究のレビューと課題の抽出

林田他 (2011) は、マクロ計量経済モデルを用いて東日本大震災のマクロ経済影響をシミュレーション分析により定量化している。その結果、震災が生じなかった場合に比べ、震災により実質GDPが2011年度に1.3%減少し、2012年度には復興需要により0.1%増加する結果が示されている。一方、中期影響の試算では、短期の影響の場合と異なり、震災のマクロ経済影響はほとんどないことが示されている。ただし、ここで用いられているマクロ計量経済モデルは、消費者の将来を見通した経済行動を考慮したモデルになっておらず、その点でルーカス批判 (すなわち、政府投資の効果は、将来の増税を考慮して決定される消費への影響を考慮する必要があるが、多くのモデルがそのような構造になっていないとの批判) を回避できないという問題を抱える。

中野 (2011) は、産業連関分析を用いて東日本大震災の生産・雇用への影響を分析し、震災による生産減少が2005年比で1.05%になることを示している。ただし、産業連関分析では、時系列的な経済の動きを追うことが難しく、震災後の復興過程が十分に分析できていないという課題も残されている。

東日本大震災の影響、特に、震災の復興過程を応用一般均衡モデルにより分析した研究として、徳永・沖山 (2014) がある。ここでは、復興財源の調達と移転が及ぼす効果を、被災地と他地域の2地域、多産業からなる応用一般均衡モデル (Computable General Equilibrium Model; CGEモデル) のシミュレーション分析により評価している。分析結果で興味深い点は、政府が震災の復旧・復興事業の財源確保のために過度に直接税増税に依存すると、その他地域の経済厚生を大きく悪化させること、被災地域の地方政府への財政移転だけの施策では、被災地域の製造業を中心に負の波及効果をもたらすとともに、被災地の毀損した資本ストックの回復に繋がらないことが示されている点である。ただし、分析で用いられたCGEモデルは、現在及び過去の状況のみを参照しながら消費者が行動するというバックワードルッキングなモデルであり、その点で、消費者行動を十分に説明できていない可能性がある。

これらの研究で用いられているモデルに対し、DSGEモデルは、将来の状況を見据えた消費者行動を考慮して市場均衡を分析できる。具体的には、消費者、生産者、政府の行動を数式で表し、市場における消費 (需要) と生産 (供給) の均衡を前提にマクロ経済指標の時系列的な動向を定量化できる。2004年にプレスコットとキッドランドがノーベル経済学賞を受賞したことを契機に、

世界的な注目が集まっている。彼らは、DSGEモデルを用いて、経済政策の時間的整合性とビジネスサイクルの背後にある推進力を解明している。

日本経済に関するDSGEモデルの適用研究としては、消費税増税の影響に関する分析 (林田他, 2014)、財政当局の支出ショックと資金調達の経済影響に関する分析 (Iwata, 2009)、財政の持続可能性に関する分析 (Sakuragawa and Hosono, 2011)、日本経済における公共投資の波及効果の分析 (江口, 2011)、さらには、法人税の帰着状況に関する分析 (土居, 2010) 等がある。しかし、日本経済に関するDSGEモデルの適用は緒に就いたばかりであり、決して多いとは言えない。もちろん、震災の日本経済に対する影響をDSGEモデルで分析した先行研究は、筆者の知る限り行われていない。

III 分析の方法

3.1 DSGEモデルの構築

本稿で用いるDSGEモデルは、Torres (2013) で解説しているモデルをもとに、東日本大震災と復旧・復興を表現できるように改良を施したものである。ここでは、内需のみに着目し、外需 (移輸出 - 移輸入) の変化は無視 (すなわち、震災で移輸出が増えると同額だけ移輸入が増えると仮定) して分析する。

DSGEモデルにおいて、平均的な消費者は、毎年の所得制約の下で、現在及び将来の消費の現在価値から労働投入に伴う不効用を差し引いた効用を最大化すると仮定する。このとき、消費者の動学的最適化問題は、以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} \max_{\{C_t, L_t\}_{t=0}^{\infty}} & \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t [\gamma \ln C_t + (1-\gamma) \ln(1-L_t)] \\ \text{s.t.} & (1+\tau_t^C)C_t + S_t = (1-\tau_t^L)W_t^e + (1-\tau_t^K)R_t^K K_t + \bar{G}_t \\ & S_t = I_t \\ & I_t = K_{t+1} - (1-\delta^K)K_t \end{aligned} \quad (1)$$

ここにおいて、 β は時間選好にともなう割引ファクターで $\beta \in (0, 1)$ の値をとる。 γ は、消費者が労働による所得獲得と余暇を選択するときの選好の程度を表すパラメータであり、 $\gamma \in (0, 1)$ である。 C_t 、 L_t 、 K_t 、 S_t 、 I_t 、及び G_t は、それぞれ t 時点の消費、労働投入、資本投入、貯蓄、投資及び他地域からの資金移転を表す。このうち \bar{G}_t が、復旧・復興投資を表すが、震災地域の消費者にとっては、外生変数 (すなわち、自分たちで水準を変更できない変数) であると仮定する。 W_t^e と R_t^K は、賃金と資本のサービス価格に対する家計の期待値である。 τ と δ は、それぞれ税率 (上付き添え字の C 、 L 、 K はそれぞれ消費税、所得税、資本税を表す) と資本の除却率 (資本ストックのうち当該年に廃棄されるものの割合) を表す係数である。

(1)式にラグランジュ未定乗数法を適用して導出した最適化の1階の条件 (First Order Condition; FOC) を解けば、消費者の合理的な行動にもとづく将来の消費経路と消費と賃金の関係が以下のように導出できる。

$$\frac{1}{1-L_t} = \frac{\gamma}{(1-\gamma)} \frac{(1-\tau_t^L) W_t^e}{(1+\tau_t^C) C_t} \quad (M1)$$

$$\frac{(1+\tau_t^C) C_t}{(1+\tau_{t-1}^C) C_{t-1}} = \beta \left[(1-\tau_t^K) (R_{t+1}^e - B\delta^K) + 1 \right] \quad (M2)$$

ここに、 B は地震のショックを表す変数 (後述) である。なお、これ以降で式に M がつくものは、最終的にDSGEモデルの関数式として用いた式を表し、 M のつかない式は、導出過程である関数式を表すこととする。

平均的な生産者については、コップダグラス型の生産関数を仮定し、生産関数で表現される技術制約の下で、利潤を最大化すると仮定する。すなわち、

$$\begin{aligned} \max_{\{W_t, R_t\}} & Y_t - W_t L_t - R_t K_t \\ \text{s.t.} & Y_t = A_t K_t^{\alpha_1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3} + \bar{G}_t \end{aligned} \quad (2)$$

である。ここに、 Y_t は t 時点の総生産を表し、 A_t は生産の総合的な効率性を表す全要素生産性である。 K と L は資本と労働の投入を表し、 Z は社会資本の投入を表す。 α は、生産要素に対する生産弾力性を指すパラメータで、1次同次 ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$) であれば、各要素のコストシェアに一致する。

(2)式のFOCから、資本、労働とそれぞれの価格、すなわち労賃と資本サービス価格の関係が以下の様に導出できる。

$$W_t = \alpha_3 A_t K_t^{\alpha_1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3-1} \quad (3)$$

$$R_t = \alpha_1 A_t K_t^{\alpha_1-1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3} \quad (4)$$

社会資本については、政府が供給するものの、それを利用する企業は直接対価を支払うことはないと考えることとする。この場合、社会資本が生み出す価値は、企業の余剰収益となるが、その収益が企業で雇用される労働と資本に、生産に対する貢献度 (労働と資本の α) に比例して配分されると仮定する (Feehan and Batina, 2007)。すなわち、

$$W_t^e = (1-\alpha) A_t K_t^{\alpha_1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3-1} \quad (5)$$

$$R_t^e = \alpha A_t K_t^{\alpha_1-1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3} \quad (6),$$

である。ここで $\alpha = \alpha_1 \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_3} \right)$ 及び

$$1 - \alpha = \alpha_3 \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_3} \right) \text{ である。}$$

上記の生産者に関する定式化は、完全競争市場を前提

としたものである。しかし、現実の経済では、独占、寡占がすすんでいると考えられる。そこで、Dixit-Stiglitz (1977) にしたがって、中間投入財を生産する企業について、独占状態における賃金と資本サービス価格を表すように、(5)と(6)式を以下のように改良する。

$$W_t^e = (1-\alpha) \frac{\xi-1}{\xi} A_t K_t^{\alpha_1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3-1} \quad (M3)$$

$$R_t^e = \alpha \frac{\xi-1}{\xi} A_t K_t^{\alpha_1-1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3} \quad (M4)$$

ここに、 ξ は、中間投入財における独占の程度を表し、 $\xi > 1$ で、独占の程度が高まれば、大きな値をとる。

$\frac{\xi-1}{\xi}$ が賃金及び資本サービス価格におけるマークアップ率 (独占利潤の程度) を表す。

生産効率性を表す全要素生産性に関しては、革新的な発明は確率的にしか生じないと仮定し、以下のような1回の自己相関過程を有する動学式を想定する。

$$\ln A_t = (1-\rho_A) \ln \bar{A} + \rho_A \ln A_{t-1} + \varepsilon_t^A; \quad \varepsilon_t^A \sim N(0, \sigma_A^2) \quad (7)$$

ここに、 ρ_A は全要素生産性の自己相関係数、 \bar{A} は全要素生産性の定常均衡値 (= 1) である。

マクロ経済における需給の均衡式は、

$$Y_t = C_t + CZ_t + I_t + IZ_t \quad (M5)$$

と表せる。ここに、 CZ は政府消費、 IZ は政府投資である。また、政府については、税収による財政収支と政府投資、政府消費による財政支出をバランスさせることを前提に、以下のような財政均衡を仮定する。

$$\tau_t^C C_t + \tau_t^L W_t^e L_t + \tau_t^K (R_t^e - B_t \delta^K) K_{t-1} + \bar{G}_t = IZ_t + CZ_t \quad (8)$$

この政府消費は、社会保障費や公務員の給与等からなり、総生産と比例すると考える。すなわち、

$$CZ_t = \theta Y_t \quad (M6)$$

である。ここに、 θ は総生産に占める政府消費の割合である。したがって、(8)式から政府投資の決定式が以下のように導出できる。

$$IZ_t = \tau_t^C C_t + \tau_t^L W_t^e L_t + \tau_t^K (R_t^e - B_t \delta^K) K_{t-1} + \bar{G}_t - CZ_t \quad (M7)$$

さらに、政府投資は、それが蓄積されて公的社会資本ストックを構成する。すなわち、

$$Z_{t+1} = (1-\delta^G) Z_t + IZ_t \quad (10)$$

である。同様に、民間資本についても、

$$K_{t+1} = (1-\delta^K) K_t + I_t \quad (11)$$

のように定式化できる。 δ^G と δ^K は、資本の除却率を表す。これらをもとに、震災の影響を考慮するため、震災

によるショックが確率的に生じると考えて、以下のよう
な式を考える。

$$\ln B_t = \ln \bar{B} + \varepsilon_t^B; \quad \varepsilon_t^B \sim N(0, \sigma_B^2) \quad (M8)$$

この式で表される震災のショックは、民間資本と社会資本にダメージを与え、これら資本の除却率 (δ) を上昇させる (より多くの資本が使えなくなる) と考えて、資本蓄積式を以下のように変更する。

$$Z_{t+1} = (1 - B\delta^Z)Z_t + IZ_t \quad (M9)$$

$$K_{t+1} = (1 - B\delta^K)K_t + I_t \quad (M10)$$

さらに、震災は、地域の全要素生産性を低下させると考えて、(5)式を以下のように変更する。

$$\ln A_t = (1 - \rho_A)\ln \bar{A} + \rho_A \ln A_{t-1} + \varepsilon_t^A - 0.3\varepsilon_t^B; \quad \varepsilon_t^B \sim N(0, \sigma_B^2) \quad (M11)$$

ε_t^B の前についている係数については、本来は、実証分析により決めるべき値であるが、統計データが不足しているため、そのような実証分析が実施できない。そこで、達観的ではあるが、0.3 (すなわち、発明の効果の3割のマイナス効果) と仮定した。

さらに、復旧・復興投資にともなう他地域からの移転を考慮した生産水準を表すため、(2)式の生産関数をモデルに含める。

$$Y_t = A_t K_t^{\alpha_1} Z_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3} + \bar{G}_t \quad (M12)$$

シミュレーションでは、(M1) ~ (M12) の12本からなる動学式を用いる。

3.2 データ

被災地における実際の経済の動きを示すため、岩手県が公表している岩手県沿岸部の市町村に関する産業別の市町村民純生産額の推移 (2006 ~ 2012年) を用いる。ただし、この統計では、総生産額や消費、投資の動向が不明なので、各産業における総生産は、産業別市町村民純生産額の年次変化と同率で変化すると仮定し、産業別総生産額の時系列の値を求め、これをコントロールトータルとして2005年の産業連関表にRAS法を適用して各年の総生産額、消費額、投資額、雇用者所得額、資本の減価償却費の推移を求める。なお、各産業の付加価値額及び最終需要額は、総額としてはRAS法で求まるが、項目ごとには求まらないので、2005年の産業連関表の各項目のシェアが変わらないと仮定し、時系列的に変動する産業別の付加価値額にシェアを乗じて項目ごとの時系列の値を産業別に求め、それを合計して地域全体の項目別の付加価値額を算定する。

3.3 カリブレーション

推定した産業連関表をもとに、労働と資本に関する技術パラメータ (生産弾力性) の値を求めた。また、先行

研究 (Torres, 2013) をもとに、他のディープパラメータ (経済主体の行動を規定し、他の主体の行動によって変わらないパラメータ) の値を Table 1 のように決定した。

また、(M1) から (M12) 式からなる動学モデルをもとに、定常状態 (全ての変数が同率で成長する収束状態) における各変数の値を求めた結果を Table 2 に示す。この定常状態における水準とパラメータの値を用いて、モデルの収束可能性を判断する Blanchard-Kahn 条件をチェックした結果、モデルの係数からなる行列の固有値のうち実数をとるものが2個存在し、B-K条件を満足し

Table 1 岩手県沿岸部におけるモデルのパラメータの設定
Parameter settings for the coastal area in Iwate prefecture.

パラメータ	内 容	値
α	民間資本の技術パラメータ (生産弾力性)	0.40
α_2	社会資本の技術パラメータ (生産弾力性)	0.10
β	割引ファクター	0.99
δ^K	民間資本ストックの除却率	0.03
δ^Z	社会資本ストックの除却率	0.02
γ	労働供給に対する諸費者の選好パラメータ	0.40
ζ	差別化された中間投入財に対する代替弾力性	5.00
ρ_A	全要素生産性の自己相関係数	0.95
ρ_B	資本の除却率に関する自己相関係数	0.00
ε_A	全要素生産性ショック (標準偏差: 0.01)	0.01
ε_B	地震ショック (標準偏差: 0.15)	0.50
τ^C	消費税率	0.08
τ^L	所得税率	0.34
τ^K	資本税率 (法人税)	0.25
G	他地域からの資金の転移	0/0.07

(注) 下線を引いたパラメータは、推定した産業連関表から計算し、その他は先行研究を参考に設定した。

Table 2 定常状態における内生変数の値
Steady state values for endogenous variables

変数	内 容	定常均衡値
Y	総生産	1.173
C	民間消費	0.611
I	民間投資	0.301
K	民間資本ストック	5.021
IZ	公共投資	0.144
Z	社会資本ストック	7.191
L	労働投入	0.318
W	賃金率	1.770
R	資本のサービス価格	0.075
CZ	政府消費	0.117
A	全要素生産性に対するショック	1.000
B	地震ショック	1.000

て、モデルに経済的なショックが加わっても、定常状況に収束することが確認できた。

IV 分析結果

4.1 岩手県沿岸部の生産額、消費額の動向

Fig. 1は、岩手県沿岸部の市町村民純生産額における産業別の動向を示したものである。純生産額のうち、建設部門は、復旧・復興投資の増加を受けて震災年である2011年には前年の3倍近くまで増加している。しかし、他の産業、特に水産業や製造業では、震災の影響で生産が落ち込んでいる。合計すれば、復旧・復興投資の増加が大きいため、震災後に地域全体の純生産額が増加する結果となっている。

Fig. 2は、総生産、消費、投資について、震災前後の動向を示したものである。総生産は、先にも述べたとおり、復旧・復興がなければ大幅に減少（Y_震災無）していたはずであるが、震災によりかえって増加（Y_震災）する結果となっている。しかし、消費（C_震災）は震災後に減少している。一般的な経済モデル（例えば、計量経済モデル）では、総生産が増加すれば、直ちに消費が増加する結果を導くことから、地震の影響は一般的な経済モデルの予測とは異なっているとみなせる。これは、消費や投資がタイムラグを有して変化するとともに、消費者や企業が将来の生産動向を勘案して現在の行動を調整しているためと考えられる。したがって、震災の影響を分析するためには、本研究で用いるDSGEモ

デルのような消費者や企業の将来行動を考慮した経済モデルの適用が不可欠である。

4.2 DSGEモデルによるシミュレーションの結果

Fig. 3は、DSGEモデルを用いて、震災後（ $B_{2011.1} = 0.5$ ）^{*1}の経済の動きを10年間にわたってシミュレートした結果である。この図では、震災後に実施された外部からの復旧・復興支援を考慮せず、経済が自力で回復する状況（変数に「_1」がついているもの）と外部からの支援による復旧・復興費を増加（RAS法により求めた震災有りの値とトレンドから求めた震災無しの値の差である2.1～2.6千億円/年を増加）した場合（変数に「_2」がついているもの）の経済動向を示す。

Fig. 3の自力回復が示すように、震災と同時に総生産は大きく落ち込み、消費も減少する。総生産は震災の次の期から回復に向かう。しかし、消費は、震災後数年間継続する生産の落ち込みをあらかじめ見込んで、震災年よりも次の年のほうが顕著な減少となる。消費が回復するのは、2013年の第2四半期以降、すなわち、震災後2年以上経過した後である。このような消費水準の推移パターンは、ハンプシェイプといわれ、DSGEモデルの結果によく見られ、また、現実の経済でもしばしば観察される動向である。資本ストックは、総生産の減少を受けて投資が減少するため、震災後しばらくの間は減少する。工場施設の被災により働く場所が少なくなり、労働投入も減少すると同時に、労賃も減少する。このような状況は、常識と照らしても妥当な結果であると考えられ

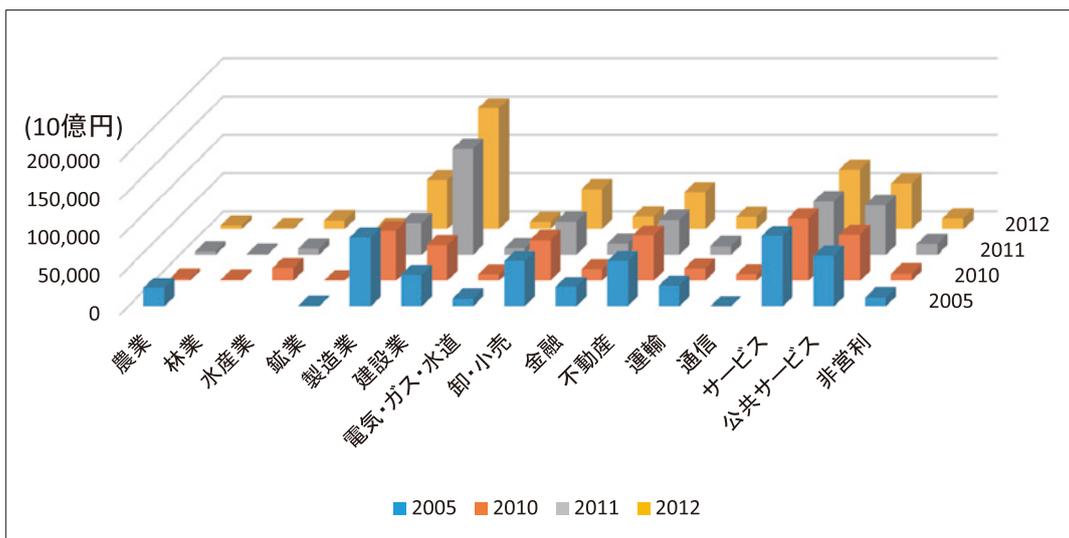


Fig. 1 市町村民純生産の産業部門別動向
Net residents' production by industrial sectors

*1 震災のショックの平均と標準偏差は、0と0.15と仮定しているため、 $B=0.5$ のショックは、2300年に1度の確率で起こるショックが生じた場合を想定していることになる。

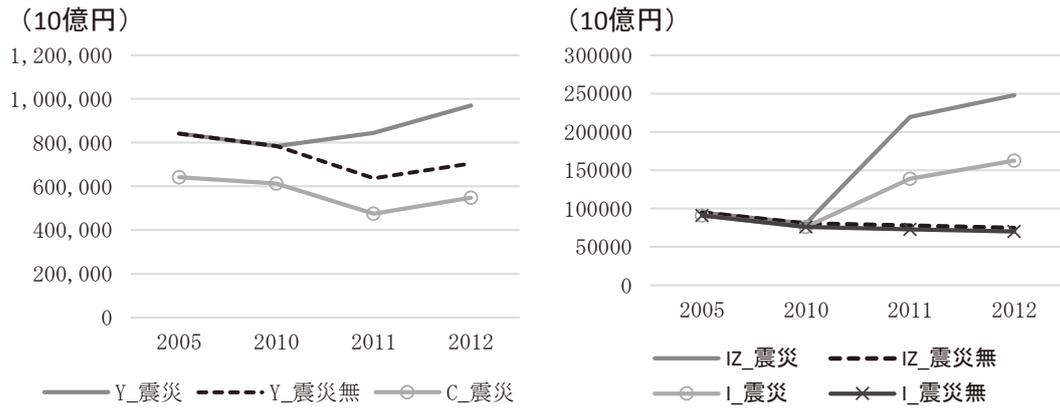


Fig. 2 時系列的な経済指標の推定結果
Estimation results of chronological economic indexes

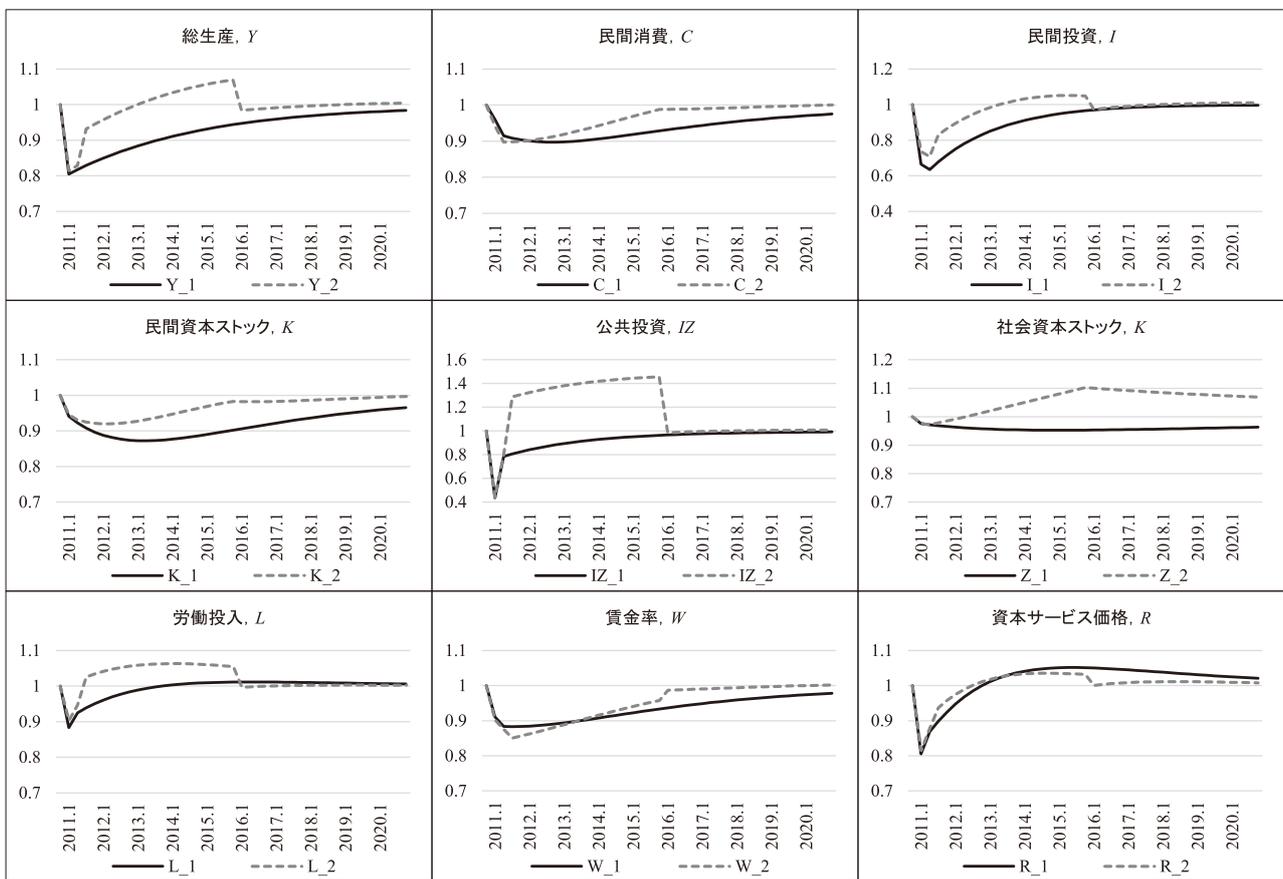


Fig. 3 震災の確率的ショックによる経済指標の動向 (自力回復ケースと復興支援ケース)

Chronological changes in economic indexes by the stochastic shocks of the earthquake (self-recovery case)

(注)「_1」のつく変数は、自力回復 (多地域からの支援による復興投資がない) ケース, 「_2」のつく変数は復興支援があるケースである。

る。

Fig. 3の実線のように、自力のみで回復した場合は、震災前の水準に総生産が戻るまでに10年以上の歳月を要する。もちろんこの期間は、モデルのパラメータをア prioriな仮定を入れて設定した部分があることか

ら、必ずこうなるという確証のあるものではないし、既に復旧・復興支援がなされているので、実データによって検証できるものでもない。しかし、モデルの推定値は、外部からの支援がなければ、十分に起こり得る状況であると考えられる。

Fig. 3の点線のように外部から復旧・復興支援（2011年の第3四半期から5ヵ年間で想定）を入れた場合は、民間投資、公共投資が増加し、資本ストックの水準がFig. 3よりも早く増加する。この点を詳細に見るため、実線と点線の差をとって描いたのがFig. 4である。この図に見られるように、総生産、民間投資、公共投資、労働投入は、支援に対してダイレクトに反応することが見て取れる。一方、資本ストックやその影響を受ける消費は、支援の効果が徐々に現れ、復興が終了する直前に復興あり、なしの差が最大になる。その後、復興支援が終了すると同時に効果が減少するものの、長期にわたって効果が継続する。

復旧・復興支援が始まる前の2期間については、消費が支援なしの場合よりもさらに減少する（ ΔC がマイナス）。つまり、もう少し待てば必ず支援（返済が必要のない譲渡）がもらえるので、それまで消費を控えて我慢しようというインセンティブが働いている。さらに、総生産は、復旧・復興支援終了後に急速に減少し、復興投資の反動が生じる。減少後の水準は、支援無しの場合よりも若干高い生産水準を維持できる（ ΔY はプラス）。これは、支援により資本ストックが早期に回復し、支援

終了時点で、より高い資本ストックの水準が達成できているからである。ただし、その後の生産の成長率は自力回復より低く、長期的には自力回復の水準と同じになる。

労賃は、復旧・復興支援後の数期間は低下する（ ΔW がマイナス）。実際には、建設部門の労働者が不足して、賃金の高騰が生じているといわれており、モデルの結果はこれと逆の状況を示す。これは、モデルでは、労働力の産業部門間の移動がフレキシブルであると仮定しているのに対し、現実には、非弾力的であることが影響している。ただし、支援による所得の移転があれば、無理して不本意な部門で働かなくとも良いと考える人々が増える可能性も否定できない。その点を考慮すれば、モデルの結果は極端ではあるものの、示唆的な結果であると考えられる。復旧・復興が継続されれば、労賃も自力回復の場合よりは高くなり、労働市場の競合が生じる結果となっている。

4.3 復旧・復興支援の費用便益

Fig. 3が示すように、経済には自力回復の能力が備わっている。そうであれば、あえて復旧・復興支援を

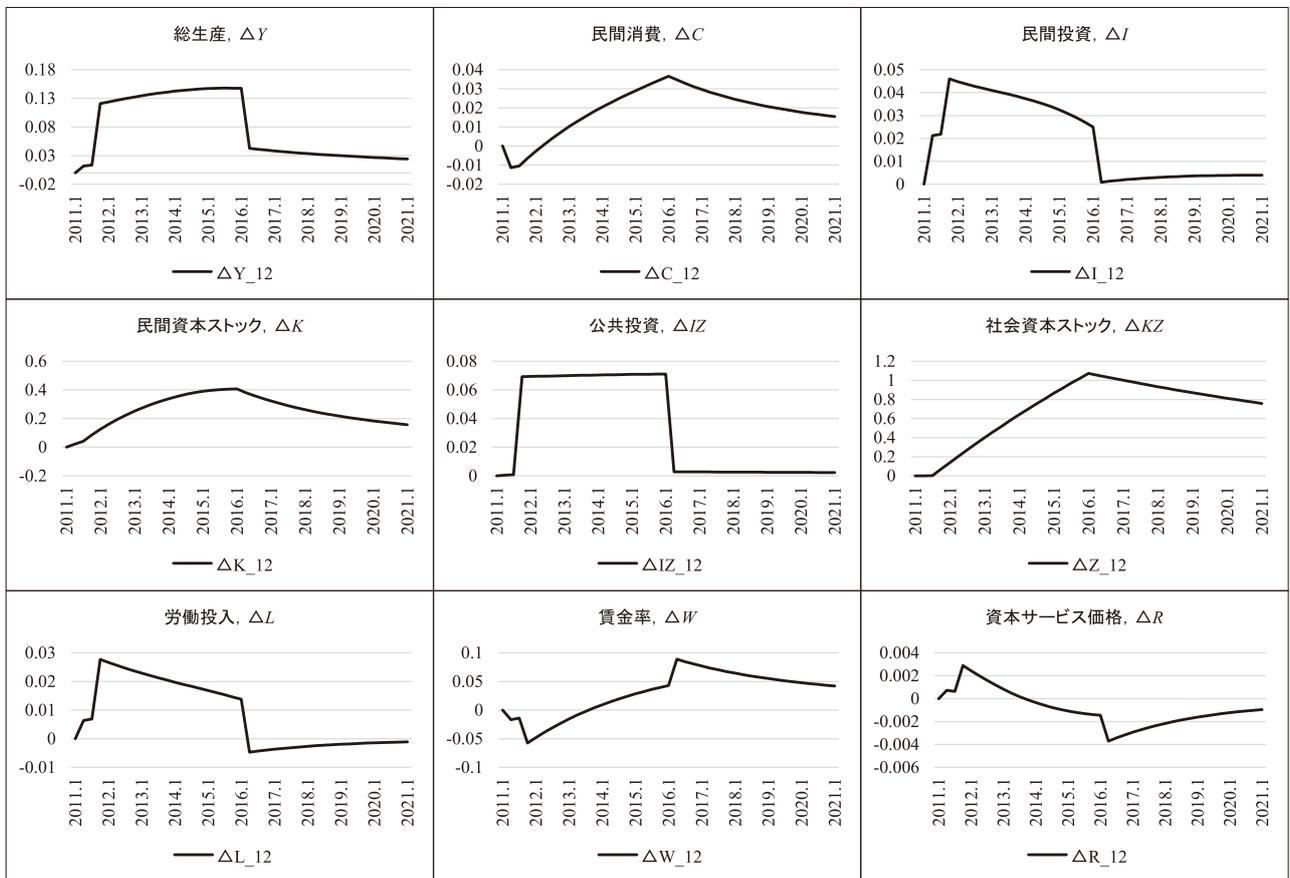


Fig. 4 復旧・復興投資のある場合と無い場合（自力回復ケース）の差
Difference between with and without recovery investment from outside (self-recovery case)

行う必要性、特にそれを無償で実施する必要性はどこにあるのかという疑問が浮かび上がる。本稿で想定している復旧・復興支援は、被災した施設の回復時期を早めるための支援である。この点を定量化するため、支援のあり、なしで総生産や消費の時系列的な水準の変化を求め、それらの現在価値と、支援に要する費用の現在価値を比較して、前者が後者を上回っているか否かを見ることとする。

Fig. 4の支援あり、なしの差をもとに、経済が自力で回復する期間である10年間を対象に国民経済的な効果と費用の現在価値を計算した。割引率は、(M2)式の割引ファクターで想定している年率4%（四半期毎には1%）を用いた。その結果、総生産（他地域からの資金移転分を除く、 $Y - \bar{G}$ ）で効果を計算した場合のB/Cは1.42、民間消費+民間投資（ $C + I$ ）で効果を計算した場合のB/Cは1.14となった。これは、単なる所得の譲渡（その場合は、資金を提供する側のマイナス分を考慮してB/Cは0）よりも高い効果が期待される結果と言える。

V 結 言

本稿では、経済主体の行動に関するミクロ経済理論の裏付けをベースに構築した動学的確率的一般均衡モデル（DSGEモデル）を用いて、東日本大震災の影響とその後実施された復旧・復興支援の効果についてシミュレーション分析を行った。分析により、以下の3点が明らかとなった。

第1に、震災は地域の総生産を大きく減少させるが、外部からの復旧・復興支援がなくとも、震災の翌年から回復が始まる。しかし、消費は、震災後3年間は減少が継続する。また、外部の支援なくして経済が自力回復するには、10年以上を要することが明らかとなった。

第2に、復旧・復興を助長するため、被災施設の復興投資を増加させる外部支援により、総生産や投資が増加し、資本蓄積が促進されて消費水準の早期回復につながる。消費面での効果は、支援がなくなった後も長期にわたり継続する。支援が終了すると生産は自立回復の水準に急減するものの、消費の減少は徐々にしかすすまない。このような復旧・復興終了による揺り戻しは、阪神淡路大震災の後の復興過程でも見られたもので、今後、東北地方の沿岸地域でも生じる可能性が高い。

第3に、投資を助長して資本蓄積を前倒しに支援するという外部からの復旧・復興支援の費用便益比は、1を越えて効果が高いことが示された。支援が終了した後の揺り戻しを考慮しても、支援がない場合よりも地域経済にとって有効である。もちろん、支援を行った支出先の地域では、その分の投資や消費が削減されて、経済的にはマイナス効果が生じるはずである。本来であれば、そのマイナス効果を含めて議論すべきであろうが、相互扶

助の観点からは、少々のマイナス効果であっても、被災地における費用便益比が高い限りは、支援を行う地域の住民の合意が得られるものと考えられる。

このように、人々の行動様式に沿った定式化を行うDSGEモデルは、わずか数本の方程式で、震災やその後の地域経済の動向をある程度模写することが可能である。その点で、今後の政策分析において有効な分析手法であると言えよう。

ただし、本稿で実施したシミュレーションは、ごく初歩的なものにとどまる。また、モデルそのものも簡単な構造である。最近では、DSGEモデルの高度化の研究も進められており、今後そのような知見を踏まえて農業政策分野への適用を図ることが興味深い研究課題と考えられる。

補 論

分析は、Matlab (R 2015 a, MathWorks Co.Ltd.) 及び Dynare (Collard and Juillard, 2001 ; Schmitt-Grohe and Uribe, 2002) を用いた。モデルのコードは以下の通りである。

```
// Endogenous variables
var Y, C, I, K, IZ, Z, L, W, R, CZ, A, B;

// Exogenous variables
varexo e, u, tauc, taul, tauk, trans;

// Parameters
parameters alpha, alpha 1 , alpha 2 , alpha 3 , beta, deltak,
deltag, gamma, zhi, rho1, rho2;

// Calibrated parameters
alpha = 0.4;
alpha2 = 0.10;
alpha1 = alpha*(1-alpha2) ;
alpha3 = (1-alpha) * (1-alpha2) ;
beta = 0.99;
deltak = 0.06;
deltag = 0.02;
gamma = 0.40;
zhi = 5.0;
rho1 = 0.9;
rho2 = 0;

// Equations of the model economy
model;
(1 + tauc)*C = (gamma/(1-gamma))*(1-L)*(1-taul)*
(1-alpha)*Y/L;
1 = beta*(((1 + tauc)*C)/((1 + tauc)*C(+1)))
*((1-tauk)*alpha*Y(+1)/K + (1-B*deltak));
Y = A*(K(-1)^alpha1)*(Z(-1)^alpha2)*(L^alpha3)
+ trans;
K = 1 + (1-B*deltak)*K(-1);
Z = IZ + (1-B*deltag)*Z(-1);
```

```

Y = C + I + CZ + IZ;
IZ = tauc*C + taul*W*L + tauk*(R-B*deltak)
      *K + trans - CZ;
CZ = 0.1*Y;
W = (1-alpha)*((zhi-1)/zhi)*A*(K(-1)^alpha1)
      *(Z(-1)^alpha2)*(L^(alpha3-1));
R = alpha*((zhi-1)/zhi)*A*(K(-1)^(alpha1-1))
      *(Z(-1)^alpha2)*(L^(alpha3));
log(A) = rho1*log(A(-1)) + e-u*0.3;
log(B) = rho2*log(B(-1)) + u;
end;
// Initial values
initval;
    tauc = 0.08;
    tauk = 0.1;
    taul = 0.344;
    trans = 0;
    Y = 1;
    C = 0.75;
    L = 0.3;
    K = 3.5;
    I = 0.1;
    Z = 2;
    W = (1-alpha)*Y/L;
    R = alpha*Y/K;
    CZ = 0.1*Y;
    IZ = tauc*C + taul*W*L + tauk*(R-B*deltak)*K-CZ;
    A = 1;
    B = 1;
    e = 0;
    u = 0;
end;

// Steady state
    steady;

// Blanchard-Kahn conditions
    check;

// Temporary shocks in deterministic models
shocks;
    var u;      periods 1;      values 0.5;
end;
shocks;
    var trans;  periods 3:20;  values 0.07;
end;

```

引用文献

- Collard, F. and Juillard, M. (2001) "Accuracy of stochastic perturbation methods: The case of asset pricing models," *Journal of Economic Dynamics and Control*, **25**, pp.979-999.
- Dixit, A. and Stiglitz, J. (1977) "Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity," *American Economic Review*, **67(3)**, pp.297-308.
- 土居丈朗 (2010) 「法人税の帰着に関する動学的分析」RIETI Discussion Paper Series, 01-J-034.
- 江口允崇 (2011) 『動学的一般均衡モデルによる財政政策の分析』東洋経済新報社
- Feehan, J. and Batina, R. (2007) "Labor and capital taxation with public inputs as common property," *Public Finance Review*, **35**, pp.626-642.
- Iwata, Y. (2009) "Fiscal Policy in an Estimated DSGE Model of the Japanese Economy: Do Non Ricardian Households Explain All?," *ESRI Discussion Paper Series No.216*.
- Keen, D.B. and Pakko, R.M. (2007) "Monetary Policy and Natural Disaster in a DSGE Model," Federal Reserve Bank of St. Louis, Working Paper Series, 2007-025D.
- 経済社会総合研究所 (2015) 「次世代短期マクロ計量モデル (DSGEモデル) の開発」
http://www.esri.go.jp/prj/current_research/dsge/dsge.html
- 林田実, 大野裕之, 安岡匡也 (2014) 「DSGEモデルを用いた、消費税増税がわが国の経済に与える影響の分析」The University of Kitakyushu Working Paper Series, No 2013-5
- 林田元就, 浜渦純大, 中野一慶, 人見和美, 星野優子 (2011) 「東日本大震災のマクロ経済影響について - 電中研マクロ計量経済モデルによる試算 -」(財)電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー, SERC11024.
- 中野諭 (2011) 「東日本大震災が雇用に与えるマクロ的影響の試算」労働政策研究・研修機構, 特別コラム, http://www.jil.go.jp/tokusyusai/column/04_nakano.pdf
- 日本政策投資銀行 (2011) 「大地震が地域経済に与える影響について - 阪神・淡路大震災をケーススタディとして -」http://www.dbj.jp/pdf/investigate/area/kansai/pdf_all/kansai1112_01.pdf
- 徳永澄憲, 沖山充編著 (2014) 『大震災からの復興と地域再生のモデル分析：有効な財政措置と新産業集積の形成』文真堂
- Sakuragawa, M. and Hosono, K. (2011) "Fiscal sustainability in Japan," *Journal of the Japanese and International Economies*, **25(4)**, pp.434-446.
- Schmitt-Grohe, S. and Uribe, M. (2002) "Solving Dynamic General Equilibrium Models Using a Second-Order Approximation to the Policy Function," technical working paper, Rutgers University.
- Torres, L. J. (2013) "Introduction to Dynamic Macroeconomic General Equilibrium Models," Vernon Press, USA.

A research note about analysing the economic influence of East Japan earthquake disaster

— Application of Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) Model —

Yoji KUNIMITSU*

*Rural Development Planning Division Chief Researcher

Abstract

Recovery investment after big earthquake and tsunami can improve regional production, but recovery of residents' consumption is usually delayed relative to production. Conventional economic model cannot reproduce such chronological nonconformity between production and consumption. This study aims to show whether DSGE model duplicates chronological nonconformity, and to measure efficiency of recovery investment in Iwate coastal region where east Japan earthquake occurred. The analytical results show that (i) consumption after the earthquake followed the hump-shaped path, on which reduction of production peaked with some delays after the incident and then recovered, (ii) production rapidly decreased and return to the self-recovery case when recovery construction ended, and (iii) recovery investment benefited via accelerating reconstruction of capital stocks damaged, and it was 1.4 times more than investment costs.

Key words: Recovery investment, chronological nonconformity between production and consumption, benefit cost ratio, reconstruction of capital stocks

表層水および浅層地中を熱源とした 温室暖冷房用ヒートポンプシステムの運転事例

奥島里美* 石井雅久* 森山英樹* 岩田幸良** 後藤眞宏***
佐瀬勘紀**** 舘野正之***** 高杉真司*****

* 農地基盤工学研究領域農業施設工学担当

** 農地基盤工学研究領域畑地工学担当

*** 資源循環工学研究領域エネルギーシステム担当

**** 日本大学生物資源学部

***** ジオシステム株式会社

要 旨

水槽あるいは浅層地中を熱源とした水熱源-温冷風供給方式のヒートポンプを小型温室に設置し、暖冷房空調運転を実施することにより、ヒートポンプの運転性能と水槽および地中との熱交換量のデータを得た。その結果、実験水槽において2 kWヒートポンプを運転した場合の年平均COP（成績係数, Coefficient of performance, 暖房または冷房量をヒートポンプの電力消費量で除した無次元数）は暖房で4.6, 冷房で3.7であった。また、浅層地中熱でのCOPは暖房で4.4, 冷房で3.5であった。シート型熱交換器1枚の水槽での熱交換効率は589~1302 W°C⁻¹であり、水槽内の水流の有無によって幅があった。実験期間中のヒートポンプの循環水と水槽水温の差は平均3°Cであったので、熱交換器1枚で2.4~6 kWの能力のヒートポンプに対応することができると考えられた。一方、地中での熱交換量はその1/5~1/4であった。熱交換器の浅層地中での熱抵抗は、暖房運転で平均8.4~287.4 m K kW⁻¹, 冷房運転で5.4~138.0 m K kW⁻¹であり、運転時のヒートポンプの循環水温と自然地温の差が大きいかほど熱抵抗も比例して大きくなる傾向が見られた。

キーワード：水槽水, 地中熱, 熱交換器

I 緒 言

農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター農業機械化研究所（2010）によれば、わが国の農林水産業におけるエネルギー消費の約4割を施設園芸が占めている。そのうちの8割は化石燃料による温室暖房である。近年の燃油価格の高騰や地球温暖化に対し、施設園芸では温室の省エネの推進が喫緊の課題となっており、理想的には、化石燃料によらない、再生可能エネルギー・自然エネルギーの活用が望まれている。

温室暖房に現在最も多く使われている燃焼加温機の燃料であるA重油価格が70円/Lを超えるとヒートポンプによる温室暖房の電気代の方が有利になるとの佐藤ら（2013）による試算がある。ヒートポンプの場合は燃焼加温機と違って、暖房だけでなく冷房・除湿が行なえる点から、冷房効果が収量や品質に現れやすい花き栽培温室への導入はこれまでもあったが、2008年にA重油価格が120円/Lに高騰した時に温室暖房へのヒートポンプの導入が大きく進んだ。

ヒートポンプの熱源として、自然エネルギーである空

気、地下水などが利用できるが、現在温室の冷暖房に使用されているヒートポンプ熱源のほとんどは空気（外気）である。空気はどこにでもあるので、その導入のしやすさは大きなメリットである。しかし、外気温が低い地域では空気との熱交換を行なう室外機に着霜が生じ、利用効率が低下するといった点が報告されるとともに、水熱源式のヒートポンプの代表的な熱源である地下水（井戸水）は、年間を通して年平均気温程度の水温で安定しているので、空気熱源のような利用効率の急激な低下がないことが古野（2014）により実証されている。ただし、地下水のくみ上げが困難な地域や排水規制があるところでは利用が困難であり、別の選択肢として、どこにでもあり、かつ、安定した温度の熱源として、表層水や地中が期待される。特に、我が国の基幹的農業用水路は全長4万 km以上に達しており、ため池も21万個と数多く点在することから、熱源候補になる可能性がある。さらに、10 kW能力のヒートポンプで必要な熱源水量は60 L/min程度であることから、約40万 kmにも及ぶ末端の農業用水路でも活用できる場合があるかもしれない。また、農地の作土層よりも下の地中も熱源として利用できる可能性がある。

このように農村地域にはヒートポンプの熱源が豊富に賦存していると思われるが、これら熱源の温室への適用事例は少なく（地中熱利用促進協会，2013；山本ら，2012），ため池や地中が温室暖冷房用の熱源として利用できるか，合理的に判断するためのデータがまだ十分ではないのが実状である。ここでは，小規模ため池を想定した水槽および深さ1.5 m程度の浅層地中を熱源としたヒートポンプによる小型温室の冷暖房運転を行ない，計測データを得たので結果を報告する。

II 実験システムの概要

水槽あるいは地中を熱源とした水熱源-温冷風供給方式のヒートポンプ（HP）を小型温室に設置し，暖冷房空調運転を行なう以下の3つの実験システムを用意した。

2.1 低水槽実験システム (Fig. 1)

水熱源として農村工学研究所（つくば市）内の低水槽を用いた。低水槽は北西～南東方向に37 m，北東～南西方向に35 mの矩形で，深さは最浅部で2.1 m，最深部で3.9 mである。表面積は1300 m²，容積は約3600 m³である。低水槽には送水ポンプ5機が設けられており，低水槽と研究所内の水理実験施設間において0～700 L s⁻¹の流量で用水を循環することができる。

この低水槽脇に幅2.7 m，奥行き4.0 m，軒高1.76 m，棟高2.2 mの移動式ビニールハウス（BH-33，南榮工業株式会社）を建設し，中に水熱源・送風一体方式の2 kWおよび12 kW相当のヒートポンプ（ECO07およびECO42，FHP Manufacturing, FL, USA）を設置した。カタログ性能表（Table 1）でのECO07の冷房能力は1.8～2.1 kW，暖房能力は1.3～2.3 kW，ECO42は冷房12.3～13.1 kW，暖房6.4～15.5 kWである。ECO07は7000 Btuh，ECO42は42000 Btuhの能力を表しており，これは2 kW，12 kWに相当するので，以降2 kWヒートポンプ，12 kWヒートポンプと称する。

採熱（冷房時は排熱）用の熱交換器には，幅0.91 m×長さ5.95 mのシート型熱交換器（G-カーペット，ダイ

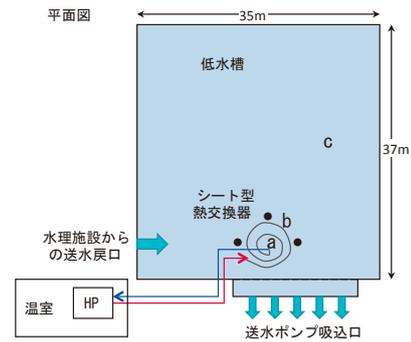
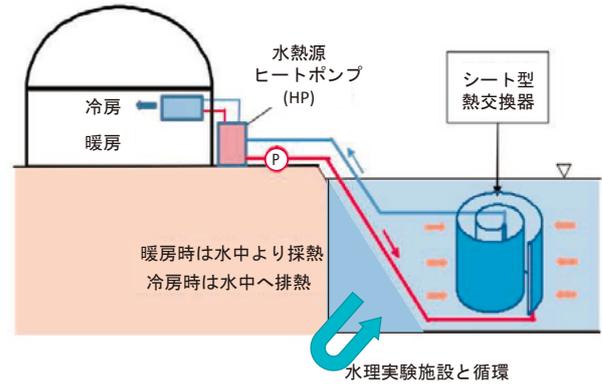


Fig. 1 低水槽実験システム概要

カポリマー株式会社）1枚をロール状にして使用した。本熱交換器はHDPE（硬質ポリエチレン）製のチューブ（径6.5 mm）が117本長さ方向に並列に配置された形状で，表面積は約12.42 m²である。熱交換器内には水または不凍液（ウェストンプラインPB，シーシーアイ株式会社）を充填した。

2.2 実験水槽実験システム (Fig. 2)

水熱源として農村工学研究所内の実験水槽を用いた。実験水槽は南北方向30 m×東西方向20 m×深さ2.3～2.4 mである。これが南北方向に2列×東西方向に3列連結している。注水口のある最も南西の区画を使用した。

Table 1 使用したヒートポンプの認定性能データ*

ヒートポンプ 型式	表層水 Closed Loop				地中熱 Closed Loop				(参考) 地下水 Open Loop			
	入口水温30℃		入口水温20℃		入口水温25℃		入口水温0℃		入口水温15℃		入口水温10℃	
	冷房能力 (kw)	COP	暖房能力 (kw)	COP	冷房能力 (kw)	COP	暖房能力 (kw)	COP	冷房能力 (kw)	COP	暖房能力 (kw)	COP
EC 007	1.8	3.7	2.3	5.1	1.9	4.4	1.3	3.2	2.1	5.9	1.8	4.0
EC 042	12.3	3.8	15.5	4.2	12.8	4.2	6.4	3.3	13.1	5.4	12.3	3.8

ARI/ISO 13256-1による性能データ

(EC007は循環流量7.6 L min⁻¹，送風量8.5 m³ min⁻¹，EC042は37.9 L min⁻¹，42.5 m³ min⁻¹にて運転時。)

*http://restricted.fhp-mfg.com/files/download/Literature%20Archives/EC/EC_Series_Res.pdf，ここではU.S. Unitsをmetric unitsに変換。

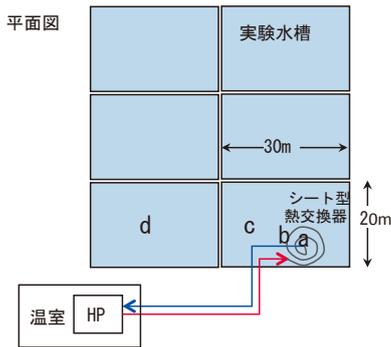
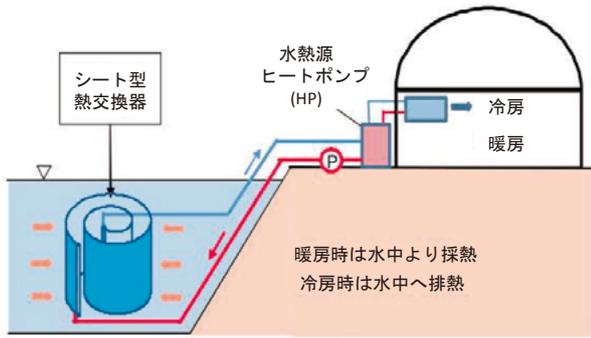
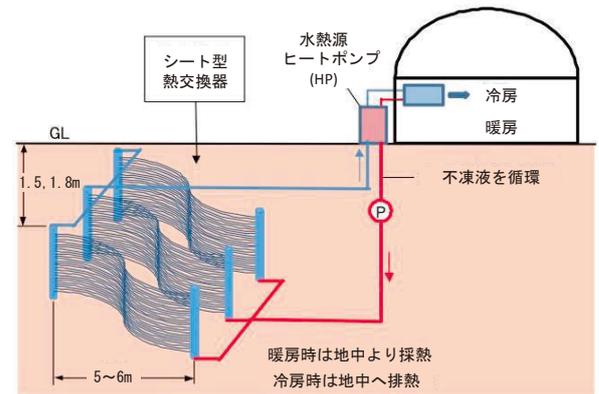


Fig. 2 実験水槽実験システム概要



地中熱を熱源とするヒートポンプを利用した温室

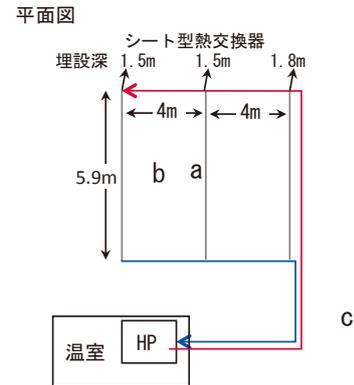


Fig. 3 地中熱実験システム概要

なお、不定期な注水のみで、低水槽と違い用水は循環しない。

実験水槽からの採熱用の熱交換には低水槽実験システムと同じシート型熱交換器1枚を同じくロール状にして水中に設置した。熱交換器内には不凍液（同上）を充填した。実験水槽脇に熱の需要側として小型温室（GH05-08-08，大樹トレーディング，間口2.49 m × 奥行2.54 m × 高さ2.6 m）を設置した。温室被覆材は厚さ0.6 mmの透明ポリカーボネイトである。温室内には2 kWヒートポンプ（ECO07，FHP Manufacturing，FL，USA）を設置した。

2.3. 地中熱実験システム (Fig. 3)

地中熱実験システムは農村工学研究所内の農業施設研究棟南側ほ場に設置した。浅層地中からの採熱には上記と同じシート型熱交換器を用いた。シート型熱交換器は3枚使用し、2枚は幅35 cm，深さ1.5 mの溝に，残り1枚は幅35 cm，深さ1.8 mの溝（小型温室の南側）に縦置したのち，溝を砂で充填した。熱交換器のシート幅は約1 mであるので，埋設中央深はそれぞれ1 m，1.3 mとなる。3枚は4 m間隔で埋設した。熱交換器には水槽実験システムと同じ不凍液を充填した。小型温室とヒートポンプも実験水槽実験システムと同型を設置した。

III 運転と測定方法

3.1 低水槽実験システム

2012年3～4月に2 kWヒートポンプによる暖房運転データを収集した。また，2012年5～6月に2 kWヒートポンプでの冷房運転データを収集した。次に，12 kWヒートポンプでの冷房運転を2012年7～8月に，暖房運転を2013年1～2月に実施した。暖冷房運転ができるだけ長く続くように暖房運転は温室気温32℃まで，冷房運転は7℃までヒートポンプが稼働するように設定した。運転時の低水槽，熱交換器，ヒートポンプ1，2次側の各温度変化およびヒートポンプの電力消費量等を測定した（Table 2）。サンプリングは1分間隔とし，データはロガー（GL220，グラフテック）に収録した。その他，低水槽内流速を電磁流速計（VP1200，KENEK co.）にて適宜測定した。

3.2 実験水槽実験システム

2 kWヒートポンプにて2013年4月19日～2014年4月13日まで運転を行なった。ヒートポンプは暖冷房自動切り替え運転とし，暖房設定気温20℃，冷房設定気

温30℃とした。この時の測定項目とセンサーを **Table 3** にまとめた。サンプリングは1分間隔とし、データはロガー (GL220, グラフテック) に収録した。なお、ヒートポンプ吹出・吸込口温湿度だけは小型データロガー (RTR-53A, T&D) に収録した。

3.3 地中熱実験システム

実験水槽実験と同様に、2 kW ヒートポンプにて2013年4月19日～2014年4月13日まで運転を行なった。ヒートポンプも同じく暖冷房自動切り替え運転とし、暖房設定気温20℃、冷房設定気温30℃とした。ただし、2014年5月27日～7月23日の期間は熱交換器内の空気が十分に抜けておらず流量が少なかった埋設深1.8 mの1枚を除き、熱交換器2枚で運転した。夏期冷房による排熱で熱交換器埋設区の地温が50℃近くに上昇したため、7

月8日～10月15日の冷房運転は9:45～15:45の間休止し送風のみとした。また、冬期は暖房時の採熱により熱交換器埋設区の地温が零度以下に低下したため、2014年1月18～30日は運転を休止した。さらに、2014年2月21日～3月21日は冷房設定気温25℃で日中冷房のみを行うようにし、地温の上昇を図った。2014年3月21日～4月2日までは暖房設定気温15℃、冷房設定気温25℃での暖冷房自動切り替え運転を行なった。2014年4月2日～13日は、暖房設定を20℃、冷房設定30℃とした。測定項目とセンサーを **Table 4** に示す。対照区地温は熱交換器埋設地とは小型温室を介して反対の北西側にて、深さ0.5 m, 1.0 m, 2.0 mに熱電対を設置し、測定した。サンプリングは1分間隔とし、データはロガー (GL220, グラフテック, Campbell Scientific 21X, 太陽計器およびRTR-53A, T&D) に収録した。

IV 測定結果

4.1 低水槽実験システム

4.1.1 暖房運転

2 kW ヒートポンプ使用時の3月8～9日の暖房運転 (**Fig. 4a**) では、曇天のため外気温は終日7～8℃程度であった。一方、水槽水温は9～10℃と外気温よりわずかに高かった。ヒートポンプ (HP) の出口水温は約6℃、水槽での採熱後、入口に戻った水温は約8℃で、水槽水との熱交換で約2℃水温が上昇していた。ヒートポンプの循環水量は11.2 L min⁻¹でほぼ一定していた。ヒートポンプのCOP (成績係数, Coefficient of performance,

Table 2 低水槽実験システムにおける測定項目一覧

測定項目	使用センサー
温室内乾球温度	熱電対 (C-C)
温室内湿球温度	熱電対 (C-C)
熱交換器中心温度 (水深1.5 m) Fig.1 の a 点	〃
熱交換器周囲温度 (水深1.5 m) Fig.1 の b 点	〃
ヒートポンプ吸込口気温	〃
ヒートポンプ吸込口湿度	〃
ヒートポンプ流入水温	白金抵抗
ヒートポンプ流出水温	〃
消費電力量	積算パルスカウンタ
低水槽水温 (水深1.5 m) Fig.1 の c 点	熱電対 (C-C)

Table 3 実験水槽実験システムにおける測定項目一覧

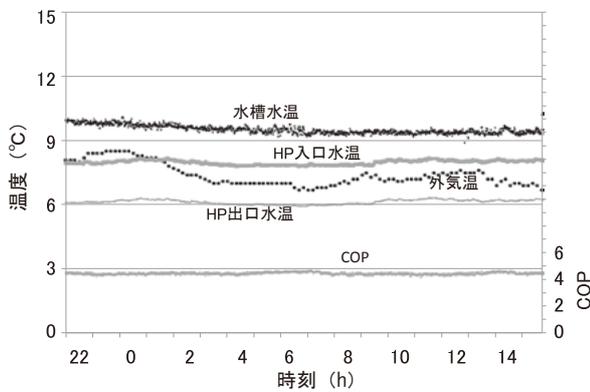
測定項目	使用センサー
外気温	通風型熱電対 (C-C)
実験水槽水温 (水深0.5 m) Fig.2 の c 点	熱電対 (C-C)
実験水槽水温 (水深1.0 m) Fig.2 の c 点	〃
実験水槽水温 (水深1.5 m) Fig.2 の c 点	〃
熱交換器周囲温度 Fig.2 の b 点	〃
熱交換器中心温度 Fig.2 の a 点	〃
実験水槽隣接区画水温 Fig.2 の d 点	〃
ヒートポンプ流入水温	白金抵抗
ヒートポンプ流出水温	〃
ヒートポンプ循環流量	電磁流量計
ヒートポンプ吹出口気温	温度・湿度記録用 小型データロガー
ヒートポンプ吹出口湿度	〃
ヒートポンプ吸込口気温	〃
ヒートポンプ吸込口湿度	〃
消費電力量	積算パルスカウンタ

Table 4 地中熱実験システムにおける測定項目一覧

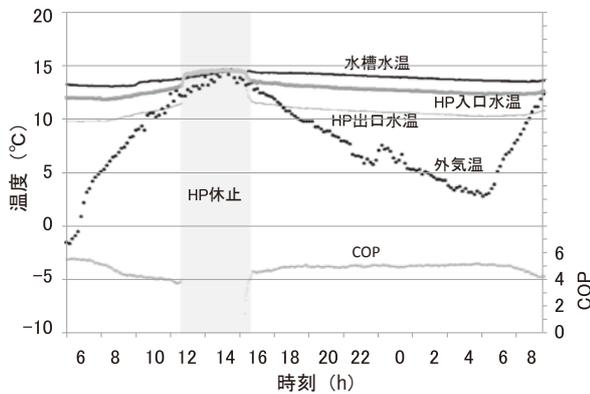
測定項目	使用センサー
対照区地温 (深さ2 m) Fig.3 の c 点	熱電対 (C-C)
〃 (深さ1 m) Fig.3 の c 点	〃
〃 (深さ0.5 m) Fig.3 の c 点	〃
熱交換器近傍温度 (深さ1.3 m) Fig.3 の a 点	〃
〃 (深さ1.0 m) Fig.3 の a 点	〃
熱交換器間地温 (深さ1.0 m) Fig.3 の b 点	〃
熱交換器近傍熱流 (深さ1.0 m)	熱流センサー
〃 (深さ1.0 m)	〃
〃 (深さ1.3 m)	〃
ヒートポンプ流入水温	白金抵抗
ヒートポンプ流出水温	〃
ヒートポンプ循環流量	電磁流量計
ヒートポンプ吹出口気温	温度・湿度記録用 小型データロガー
ヒートポンプ吹出口湿度	〃
ヒートポンプ吸込口気温	〃
ヒートポンプ吸込口湿度	〃
消費電力量	積算パルスカウンタ

暖房または冷房量をヒートポンプの電力消費量で除した無次元数)は4.5程度で終日稼働した。4月8～9日(Fig. 4b)は、晴天のため外気温は昼間15℃以上に達する一方、夜間は0～3℃にまで低下した。水槽水温は4月になり13～14℃に上昇し、夜間は外気温に比べて高めで暖房に有利な熱源となっていた。それに対応してヒートポンプの出口水温も約10～11℃、入口水温は約12～13℃であった。3月8～9日と同様に水槽水との熱交換による水温回復は約2℃であった。なお、この時のヒートポンプの循環水量は約11.4 L min⁻¹であった。昼の12:00～15:30は晴天のため温室内気温が32℃以上となりヒートポンプの運転が停止したが、それ以外はCOP4～5でヒートポンプが稼働した。

12 kW ヒートポンプ使用時の1月30～31日の暖房運転(Fig. 5)を見ると、外気温は-5～12℃と1日の変動が大きい。一方、水槽水温は約6℃と3、4月に比べると低いが、1日の変動幅は外気温に比べて小さく、夜間は外気温よりも高い。ヒートポンプの出口水温は0℃前後、水槽での採熱後の入口に戻った水温は約4℃で、その水温差は約4℃であった。2 kW ヒートポンプでの水温差は2℃であった(Fig. 4)ので、12 kW ヒートポン



(a) 3月8～9日, 2012年 (曇天)



(b) 4月8～9日, 2012年 (晴天)

Fig. 4 低水槽実験システムにおける2 kW ヒートポンプ (HP) での暖房運転状況の日変化

プになったことで水温差は倍になった。ヒートポンプの循環水量も11 L min⁻¹から16 L min⁻¹に増えているので採熱能力は倍以上に増えている。1月の厳寒期で水槽水温が低いため、ヒートポンプのCOPは3、4月に比べて低下し、3.5程度であった。

4.1.2 冷房運転

2 kW ヒートポンプ使用時の5月24～25日の冷房運転(Fig. 6)では、5月の水槽水温は22～23℃と、日中以外は外気温のほうが水槽水温よりも低く、冷房熱源としては空気の方が有利と思われる。外気温は16～28℃なので、実際はヒートポンプによる冷房は不要と考えられる(換気で外気を取り込むだけでよい。)が、ヒートポンプを稼働させたところ、ヒートポンプの出口水温は約25℃であった。水槽へ排熱後、入口に戻った水温は約23℃で安定しており、約2℃水温が低下していた。この

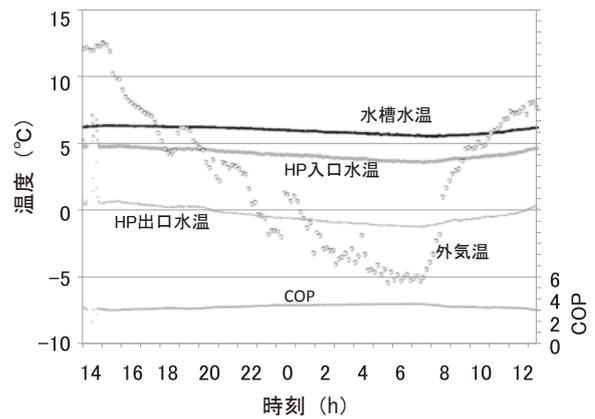


Fig. 5 低水槽実験システムにおける12 kW ヒートポンプ (HP) での暖房運転状況の日変化 (1月30～31日, 2013年)

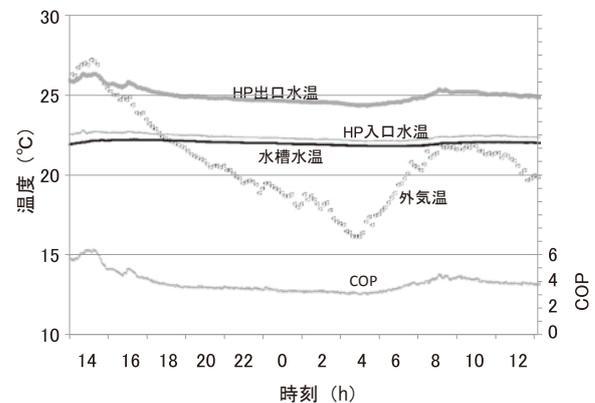


Fig. 6 低水槽実験システムにおける2 kW ヒートポンプ (HP) での冷房運転状況の日変化 (5月24～25日, 2012年)

場合のヒートポンプのCOPは約3~6であった。

12 kW ヒートポンプ使用時の8月13~14日の冷房運転 (Fig. 7) では、外気温が夜間最低24℃、日中最高34℃の暑い日であった。水槽水温は約30℃になっていた。日中10~18時の間、ヒートポンプは連続稼働していたが、夜間は断続的であった。これは、温室が小さく、また冷房負荷も昼間に比べて夜間は小さいため、12 kW ヒートポンプ能力は過大であり、短時間稼働しただけで温室気温が設定気温以下に低下し、ヒートポンプが止まってしまうためである。そのため、Fig. 7でもヒートポンプ出入口水温とCOPが夜間ばらついている。昼間の連続稼働時のヒートポンプ出口水温は37~42℃となり、水槽での排熱後、入口に戻った水温は約33~36℃で、その水温差は約5℃であった。ヒートポンプのCOPは3~4程度であった。

4.2 実験水槽実験システム

8月15日 (Fig. 8a) は6:30から20:00頃まで約12時間冷房運転が稼働した。水槽へ排熱量は27.7 kWh d⁻¹、消費電力は5.96 kWh d⁻¹、COPは3.6であった。水槽水温は30.5℃、熱交換器の周囲は日平均30.6℃であった。1月15日 (Fig. 8b) は終日ヒートポンプによる暖房運転が続き、水槽からの採熱量は35.3 kWh d⁻¹、消費電力は10.3 kWh d⁻¹、COPは4.4であった。実験水槽の水温は6℃であったが、熱交換器の周囲は1日で4.6℃から3.9℃に低下し、循環水温も日平均で3℃であった。

ほぼ通年での運転 (Fig. 10a) では、熱交換器近くの水温は年間を通して最低外気温と最高外気温の間に入っており、熱源としては外気よりも安定していた。データの欠測はあるが、ほぼ通年稼働でき、シート型熱交換器1枚で年間総採熱量は、4645.41 kWh y⁻¹、総排熱量は3419.76 kWh y⁻¹となった。ヒートポンプのCOPは年平均で暖房時4.6 (3.7~6.2)、冷房時3.7 (2.8~4.5) であった。

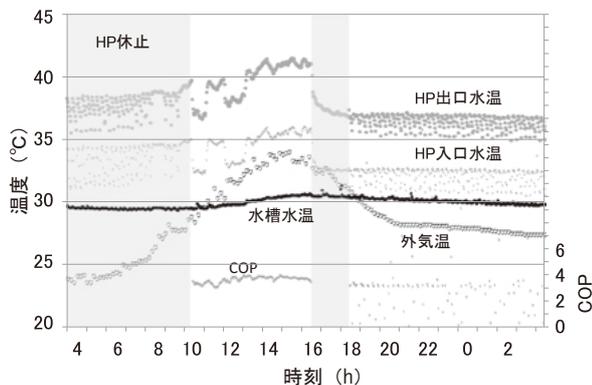
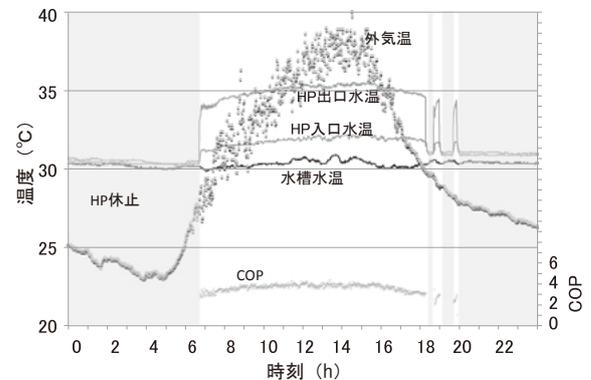


Fig. 7 低水槽実験システムにおける12 kWヒートポンプ (HP)での冷房運転状況の日変化 (8月13~14日, 2012年)

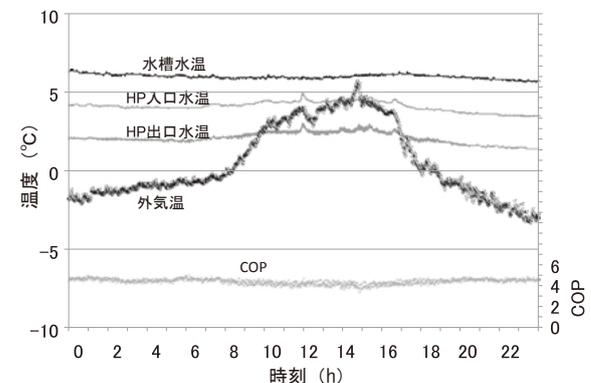
4.3 地中熱実験システム

8月15日の冷房運転 (Fig. 9a) では、9:45~15:45の間はヒートポンプによる冷房運転は行わず、送風のみとした。6:30から20:00頃までの約5.6時間ヒートポンプが稼働した。地中への排熱量は13.3 kWh d⁻¹、消費電力は2.95 kWh d⁻¹、COPは3.5であった。地温は深さ1 mで22.5℃であったが、熱交換器の周囲は日平均37℃と高温になった。一方、1月15日の暖房運転 (Fig. 9b) では、終日ヒートポンプが稼働し、地中からの採熱量は26.7 kWh d⁻¹、消費電力は10.1 kWh d⁻¹、COPは3.6であった。熱交換器周囲の地温は1日で-2.0℃から-2.8℃に低下し、循環水温も日平均で-2.3℃と氷点下であった。

地中熱実験システムでも実験水槽実験システムと同様にほぼ通年の運転 (Fig. 10b) を行なったが、地中は実験水槽と比べて熱交換器周囲の地温の変化が早かった。すなわち、酷暑期 (6~8月) には熱交換器近傍の地温は最高外気温より高く、また、厳寒期 (12~2月) には最低外気温と同程度まで地温が低下した。そのため、夏期の日中は冷房を停止したり、厳寒期には一時的に終日暖房を停止するなど、熱需要に制限を設けるざるを得なかった。その結果、シート型熱交換器2~3枚での年間総採熱量は2285.10 kWh y⁻¹、総排熱量

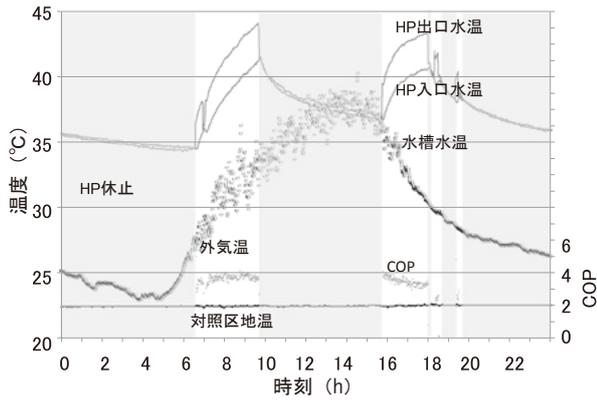


(a) 冷房運転 (8月15日, 2013年)

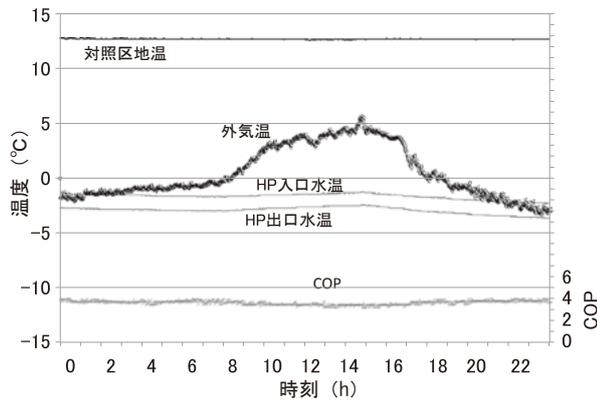


(b) 暖房運転 (1月15日, 2014年)

Fig. 8 実験水槽実験システムにおける2 kWヒートポンプ (HP)での運転状況の日変化



(a) 冷房運転 (8月15日, 2013年)



(b) 暖房運転 (1月15日, 2014年)

Fig. 9 地中熱実験システムにおける2 kWヒートポンプ (HP) での運転状況の日変化

は1949.41 kWh y⁻¹にとどまった。1枚当たりに換算すると採熱で914 kWh y⁻¹、排熱で780 kWh y⁻¹と、実験水槽での1枚当たりの採熱量4645 kWh y⁻¹、排熱量で3419 kWh y⁻¹に対してその1/5~1/4の熱交換量であった。ヒートポンプの年平均COPは暖房時4.4 (3.4~5.9)、冷房時3.5 (2.2~4.3)であった。

このような状況下で、4月初め運転を開始しておよそ1年後の熱交換器近傍地温は11~12℃となり、何とか対照区の自然地温とほぼ同程度に戻っていた。なお、3~5月、11月は熱交換器近傍の地温は最低外気温より高く、最高外気温よりは低く保つことができ、外気を熱源とするよりもやや有利になっていたものと思われる。

V 考察

5.1 各システムにおけるヒートポンプCOPの比較

カタログ性能表 (Table 1) と本実験でのCOPを比べると、低水槽実験システムでの2 kWヒートポンプ (EC007) の暖房COPは5.4~6.4と、認定性能COP5.1以上の値が得られた。12 kWヒートポンプ (EC042) の暖房COPは2.7~4.3と、認定値4.2と同程度の性能が発揮できていた時もあったが、ほとんどは認定性能より

低かった。実験水槽実験システムでは、ヒートポンプ (EC007) の年平均COPは暖房で4.6、冷房で3.7であり、暖房冷房ともCOPは性能表の値 (暖房5.1、冷房3.8) より小さかった。性能値は入口水温20℃での値であるが、実験水槽の入口水温はほとんどが10℃以下であったため、実験のCOPが低めになったと考えられる。冷房では、性能値は入口水温30℃での値で、実験水槽での入口水温と大きくは変わらないので、実験でのCOPは性能値にやや近い結果になったと考えられる。

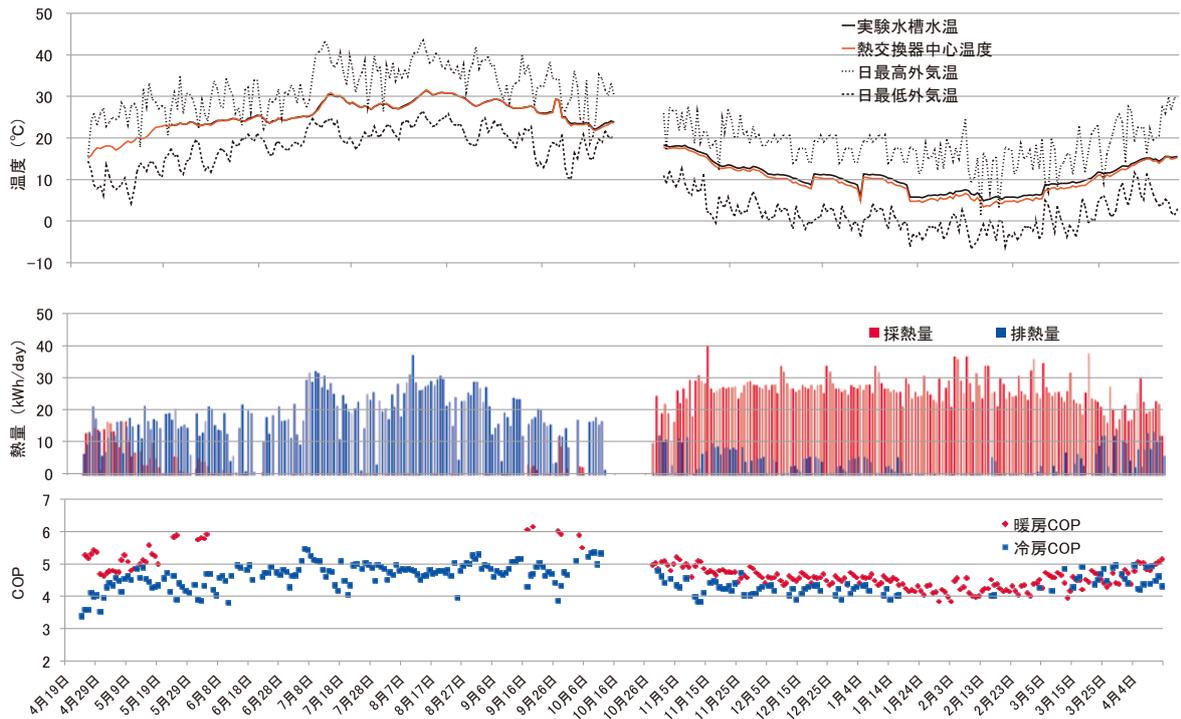
地中熱実験システムの冷房COP (8月15日) は4.5と、性能表値の4.4とほぼ同程度の値であった。暖房COP (1月15日) は3.6で、性能表の3.2よりわずかに大きかった。年平均COPは暖房で4.4、冷房で3.5と、カタログ性能値 (暖房3.2、冷房4.4) と大きく異なる結果となった。冷房での違いは、ヒートポンプ運転時の地温の上昇が大きく、性能値での入口水温条件 (25℃) よりもかなり高かったためと考えられる。また、暖房で性能値よりも高くなったのは、地温が低下した段階で運転休止の期間を設けたため、比較的地温の高い運転期間の数値が反映されたためと思われる。

5.2 水槽における熱交換効率

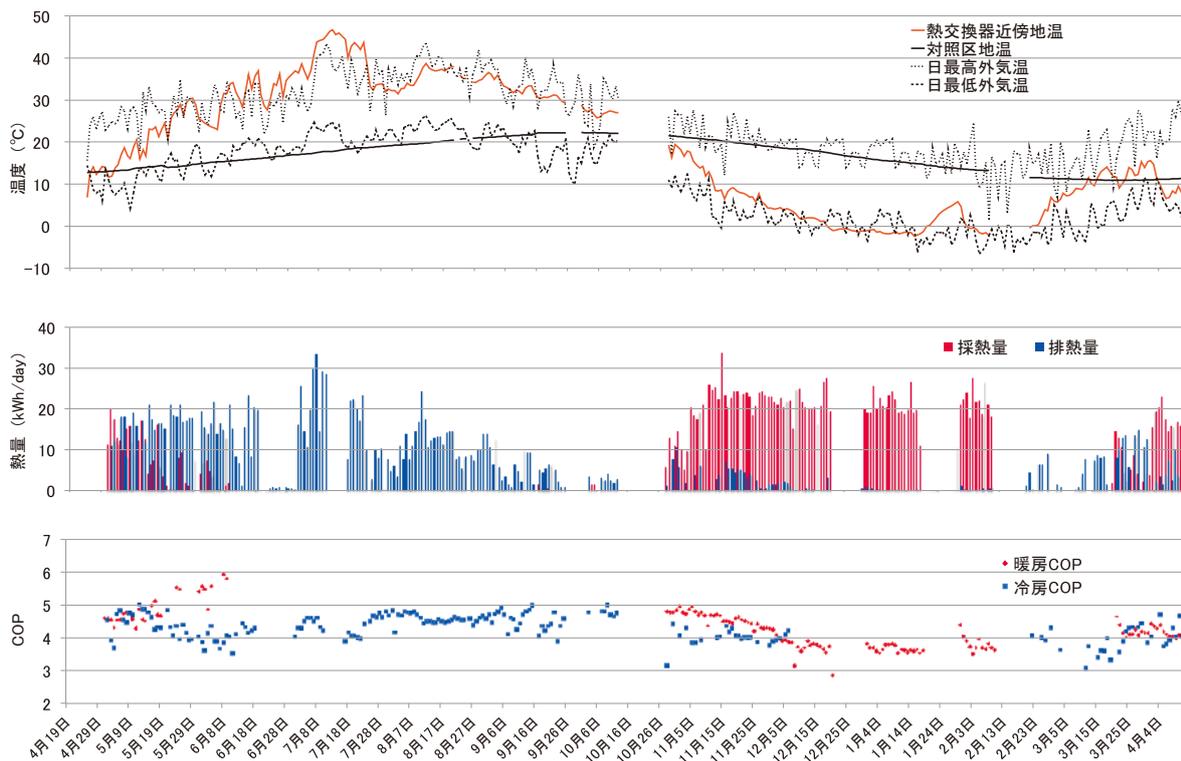
低水槽と水理実験施設間の循環水量 (以降、低水槽送水量と記述) を変えた暖房運転 (ハウス内平均気温16.6~31.6℃) での測定結果 (Table 5) から、2 kWヒートポンプではシート型熱交換器1枚で実験水槽からの採熱量 (= (ヒートポンプ循環水の入口水温 - 出口水温) × 流量) は1.4~1.6 kWだった。12 kWヒートポンプではシート型熱交換器1枚で実験水槽から4.6~6.0 kWの熱を採ることができた。

パイプハウスの冷房運転 (ハウス内平均気温11.1~30.0℃) での測定結果 (Table 6) から、2 kWヒートポンプではシート型熱交換器1枚で低水槽から1.7~2.6 kWの冷熱を採る (すなわち、低水槽へ排熱する) ことができた。12 kWヒートポンプではシート型熱交換器1枚で低水槽から9.6~11.6 kWの冷熱を採ることができた。

低水槽送水量と熱交換器の熱交換率の関係を Fig. 11 に示す。低水槽と水理施設間で水が循環していない場合 (送水量が0 Ls⁻¹) の熱交換率 (= 水槽水温とヒートポンプ循環平均水温の温度差1℃当たりの採熱量) は熱交換器1枚で589~1302 W℃⁻¹であった。これらの熱交換効率は、暖房時の方が冷房時よりもやや小さい傾向が見られた。これは、冷房時は熱交換器から低水槽へ排熱されるため、温度差による熱交換器近傍での熱対流が発生しやすいが、暖房時は熱交換器周辺での採熱により冷塊ができ、対流が生じにくくなっているためと考えられる。送水がある場合の熱交換率は798~2191 W℃⁻¹と、水槽水が循環していない場合よりもやや大きい。ヒートポンプの循環水温と水槽水温の差は Table 5, 6 のデータでは平均3.8℃ (暖房時), 3.0℃ (冷房時) であったこ



(a) 実験水槽実験システム (実験水槽利用)



(b) 地中熱実験システム (浅層地中熱利用)

Fig. 10 暖冷房運転状況の年変化 (2013～2014年)

とから、水温差3℃が確保できるとすると、熱交換器1枚で2.4～6 kWの能力のヒートポンプに対応することができると考えられる。すなわち、2 kWヒートポンプでは熱交換器1枚でも余力があったものと考えられる。

なお、Fig. 12に示す循環水量と熱交換器周囲の流速の関係に照らし合わせると、低水槽の循環水量が100 L s⁻¹で熱交換器周辺流速は0.05 m s⁻¹におおよそ対応すると思われる。Fig. 11によれば、低水槽の循環水量が

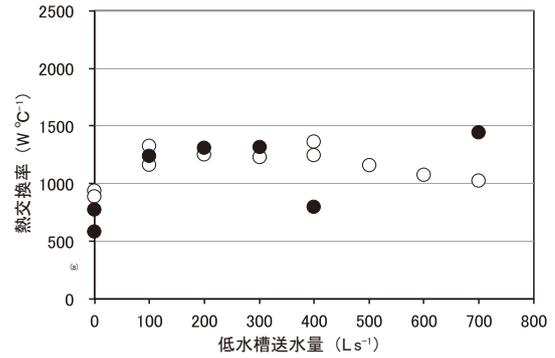
Table 5 暖房運転での測定データ（稼働時平均値）

HP	水槽 水温 (°C)	低水槽 送水量 (Ls ⁻¹)	熱交換 器温度 (°C)	HP循環 水温 (°C)	採熱 (kW)	熱交換器 熱交換率 (W°C ⁻¹)	運転日 (2012 -13年)
EC 007	9.5	0	8.3	7.1	1.4	589	3/8-9
	13.8	0	13.0	11.7	1.6	772	4/8-9
	14.3	100	14.1	13.0	1.6	1241	4/2-3
	13.8	200	13.7	12.6	1.6	1305	4/3-4
	13.6	300	13.6	12.4	1.6	1313	4/4-5
	14.2	400	13.4	12.2	1.6	798	4/5-6
	13.7	700	13.7	12.7	1.5	1448	3/30-31
EC 042	6.9	0	3.3	0.4	4.6	736	2/2-3
	6.4	0	3.3	0.5	4.6	1091	2/1-2
	6.6	200	5.2	2.3	5.6	1295	2/8-9
	6.8	300	6.5	3.8	6.0	2021	2/6-7
	6.0	400	4.9	1.9	5.1	1290	1/30-31
	7.2	500	6.6	3.9	5.4	1585	2/7-8

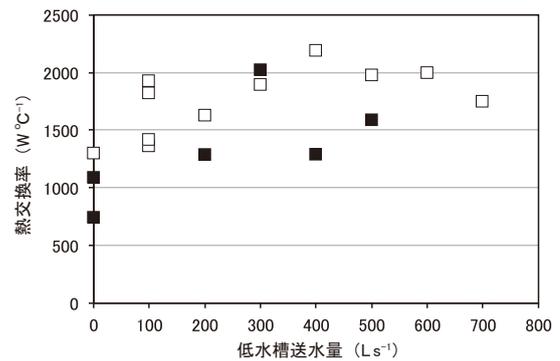
Table 6 冷房運転での測定データ（稼働時平均値）

HP	水槽 水温 (°C)	低水槽 送水量 (Ls ⁻¹)	熱交換 器温度 (°C)	HP循環 水温 (°C)	採熱 (kW)	熱交換器 熱交換率 (W°C ⁻¹)	運転日 (2012 -13年)
EC 007	21.8	0	22.1	23.7	-1.7	891	5/21-22
	22.0	0	22.1	24.1	-2.0	947	5/19-21
	20.6	100	20.7	22.8	-2.6	1174	5/23
	20.6	100	20.7	22.0	-1.8	1326	5/22-23
	21.1	200	21.1	22.7	-2.0	1256	5/23-24
	22.0	300	22.0	23.7	-2.1	1233	5/24-25
	22.9	400	23.0	24.5	-1.9	1252	5/28-29
	20.9	400	21.0	22.7	-2.3	1347	5/8
	20.8	400	20.8	22.3	-2.1	1369	5/9
	23.5	500	23.5	25.2	-2.1	1166	5/29-30
	23.6	600	23.7	25.5	-2.0	1075	5/30-31
23.7	700	23.9	25.7	-2.0	1027	5/31-6/1	
EC 042	30.0	0	31.1	38.0	-10.4	1302	8/10
	28.5	100	30.1	36.5	-11.0	1366	7/26
	29.2	100	30.9	37.0	-11.1	1423	7/27
	27.3	100	27.9	33.3	-11.6	1927	7/11
	30.8	100	31.6	36.9	-11.2	1828	7/30
	29.9	200	30.2	35.3	-9.9	1635	8/14
	29.8	300	29.9	34.9	-9.6	1894	8/15
	30.5	400	30.5	35.0	-9.8	2191	8/13
	30.3	500	30.5	35.4	-10.0	1983	8/16
	31.2	600	31.4	36.2	-9.9	1996	8/20
31.8	700	32.2	37.8	-10.6	1752	8/21	

100 Ls⁻¹以上ある場合の熱交換率は水流が無い場合の1.5倍程度になっている。以上から、熱交換器周辺に0.05 ms⁻¹程度のわずかな流速があれば、水流がない場合にくらべて熱交換効率は1.5倍になると期待される。



(a) 2kWヒートポンプ (EC 007), ●暖房時, ○冷房時



(b) 12kWヒートポンプ (EC 042), ■暖房時, □冷房時

Fig. 11 低水槽の循環水量と熱交換器の熱交換率の関係

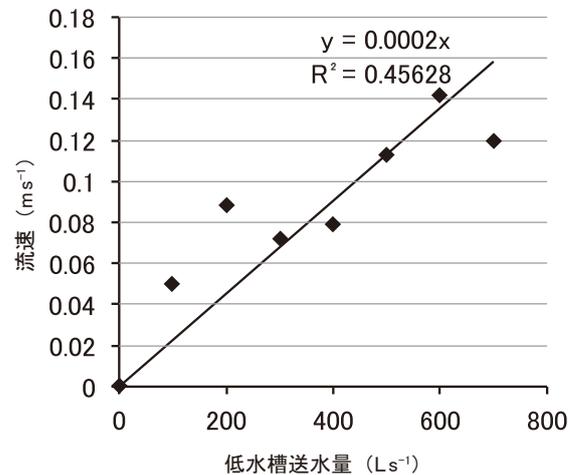


Fig. 12 低水槽の循環水量と熱交換器の周辺流速の関係

5.3 浅層地中における熱交換効率

地中においては、水と違って均質でない土壌との熱交換となるので、正確な熱交換効率を求めるには、空間的にも時間的にも厳密な測定や解析（山本ら，2014）が必要であるが、ここではSaidら（2009）の簡易な指標、 R_{total} にて浅層地中における熱交換効率を評価することとした。 R_{total} は、地中の熱交換器をFig. 13に示すように、縦方向の違いは考えず、熱交換器の埋設されたトレンチ

方向を x 方向とする1次元の形状体に見立てた場合の熱交換器材料や土壌条件等, すべての要素を含めた熱抵抗値である。(具体的な算出式は付録に記載。)

地中熱実験システムで, ヒートポンプが1日 (0:00~24:00) のうち1時間以上暖房運転を行った日 (本測定期間では113日) の平均 R_{total} は $8.4 \sim 287.4 \text{ m K kW}^{-1}$ であった (Fig. 14a)。運転時の循環水温と対照区地温の差 (絶対値) (ΔT) が大きいほど R_{total} も大きくなる傾向となった。

同じく冷房運転で1日 (0:00~24:00) のうち1時間以上ヒートポンプ稼働した日 (本測定期間では161日) の平均 R_{total} は $5.4 \sim 138.0 \text{ m K kW}^{-1}$ であった (Fig. 14b)。暖房と同様, 運転時の循環水温と対照区地温の差が大きいほど熱抵抗もおおよそ比例して大きくなる傾向となった。すなわち, 冷暖房ともに, 熱交換量 $\propto (1/R_{total}) \times \Delta T$ なので, ΔT が大きいほど熱交換量は増えるはずであるが, Fig. 14 に示すように ΔT が大きいほど R_{total} が大きくなるので, 熱交換量はむしろ減少することになると考えられる。

暖房運転で循環水温が 0°C , 熱交換器埋設深さと同じ深さの自然地温が 15°C とすると, 温度差は -15°C なので, R_{total} は3.5になるであろうと推測される。これを用いて付録の式から逆算すると, $\text{COP} = 3$, 循環水量 12.6 L min^{-1} とする暖房定格能力 2.4 kW のヒートポンプの性能を十分発揮させるには, トレンチ長さが約 24 m (シート型熱交換器長さは約 6 m のため, 熱交換器4枚に相当) 必要と推定される。さらに, 自然地温が 15°C ではなく 10°C しかなければ, 必要なトレンチ長さは 37 m に伸びると見積もられる。

VI 結言

本研究では, 水槽あるいは浅層地中を熱源とした水熱源-温冷風供給方式のヒートポンプを小型温室に設置し, 暖冷房空調運転を実施することにより, ヒートポンプの運転性能と水槽および地中との熱交換量のデータを得た。その結果,

(1) 実験水槽実験システムにおいて, 2 kW ヒートポ

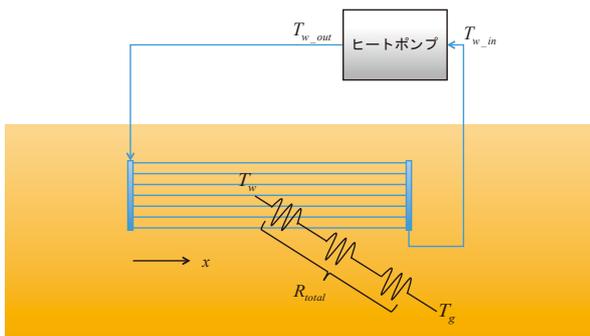


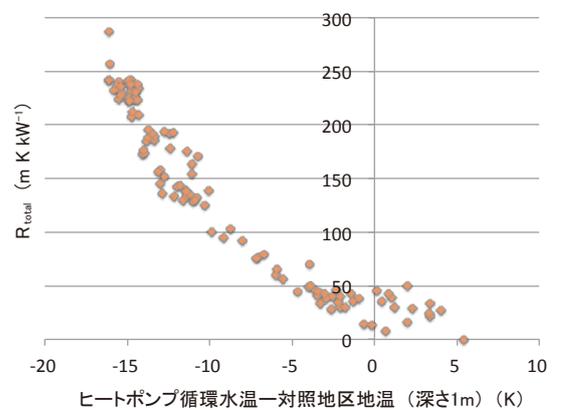
Fig. 13 地中熱交換器の熱抵抗 R_{total} の概念図

ンプでのほぼ通年運転でのCOPは暖房で4.6, 冷房で3.7であり, カタログ性能値 (暖房5.1, 冷房3.8) より小さかった。また, 地中熱実験システムでの年平均COPは暖房で4.4, 冷房で3.5と, カタログ性能値 (暖房3.2, 冷房4.4) と大きく異なった。これらは, 性能値での入口水温条件と実際の水温が異なることが影響したものと考えられた。

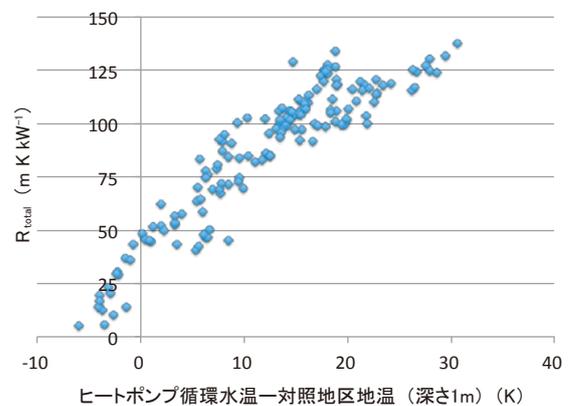
(2) シート型熱交換器1枚の水槽での熱交換効率は $546 \sim 1351 \text{ W}^\circ\text{C}^{-1}$ であり, 本実験データではヒートポンプの循環水と水槽の水温差が平均で 3°C 程度あったので, 熱交換器1枚で $2.4 \sim 6 \text{ kW}$ の能力のヒートポンプに対応することができると考えられる。地中熱実験システムでのシート型熱交換器1枚と地中との熱交換量は実験水槽実験システムでの水槽との熱交換量の $1/5 \sim 1/4$ 程度であった。

(3) 地中熱実験システムでもほぼ通年の運転を行なったが, 酷暑期には熱交換器近傍の地温は最高外気温より高く, また, 厳寒期には最低外気温と同程度まで地温が低下した。そのため, 夏期の日中は冷房を停止したり, 厳寒期には一時的に終日暖房を停止するなど, 熱需要に制限を設けるざるを得なかった。

(4) 熱交換器の浅層地中での総合的な熱抵抗値 R_{total} は, 暖房運転で平均 $8.4 \sim 287.4 \text{ m K kW}^{-1}$, 冷房運転で



(a) 暖房時



(b) 冷房時

Fig. 14 地中熱実験システムにおける熱抵抗値

5.4～138.0 m K kW⁻¹であった。運転時の循環水温と自然地温の差が大きいほどR_{total}も比例して大きくなる傾向となった。このデータから、本試験地で暖房定格能力2.4 kWのヒートポンプの性能を十分発揮させるには、熱交換器4枚が必要と推定された。

以上より、水槽での熱交換効率の方が地中よりも高かったので、水路やため池のような表層水が利用できる場合は浅層地中よりも先に表層水を熱源として検討した方が良いと思われる。

将来、温暖化による酷暑・大寒波の頻発が懸念されている。現時点では、ヒートポンプ、熱交換器ともに高価であるため、表層水および浅層地中を熱源としたヒートポンプシステムを温室冷暖房に導入するのは経営上容易でないが、温暖化の進行度合や燃油のさらなる高騰によっては、有効な温室冷暖房システムとなる可能性が高まると思われる。それに備えるには、今後、低コスト化や利用効率の改善、排熱と採熱がため池や地中熱源に及ぼす影響、安全性等について調べて行く必要がある。

謝辞：本研究は農村工学研究所強化研究費で実施した。低水槽の流速測定にあたっては農村工学研究所の樽屋上席研究員、浪平主任研究員に、低水槽の送水には同農村技術支援チームに、また、システム設置は同資産管理チームの協力を頂いた。実験水槽実験システムと地中熱実験システム構築に支援いただいた農村工学研究所業務推進室はじめ関係各位に感謝の意を表す。

付 録

Fig. 13にて、

T_w ：熱交換器を埋設するトレンチ長さ方向の位置 x における熱交換器内水温 [°C]

T_g ：熱交換器と同じ深さの対照区の自然地温 [°C]

m_w ：循環水の流速 [kg s⁻¹]

c_w ：循環水の比熱 [kJ kg⁻¹K⁻¹]

R_{total} ：熱抵抗 [m K kW⁻¹]

L ：熱交換器埋設トレンチ長さ [m]

T_{w_out} ：ヒートポンプ出口水温 (= 熱交換器入口水温) [°C]

T_{w_in} ：ヒートポンプ入口水温 (= 熱交換器出口水温) [°C]

自然地温で基準化した循環水温を

$$\theta_w = T_w - T_g \text{ [K]}$$

と定義する。

これにより、

$$\theta_{w_out} = T_{w_out} - T_g \text{ [K]}$$

$$\theta_{w_in} = T_{w_in} - T_g \text{ [K]}$$

となる。

また、トレンチ長さ方向の位置は次式で無次元化する。

$$X = \frac{x}{m_w c_w R_{total}} \text{ [-]}$$

これにより、無次元位置 X での基準水温 θ_w は

$$\frac{d\theta_w}{dX} = \theta_w \text{ が成立する。}$$

$$\text{変形して、} \frac{1}{\theta_w} d\theta_w = dX$$

両辺を積分すると、

$$\int \left(\frac{1}{\theta_w} \right) \cdot d\theta_w = \int dX$$

$$\log(\theta_w) = X + C$$

よって、

$$\theta_w = e^{X+C} = e^C \cdot e^X$$

$x = 0$ で $\theta_w = \theta_{w_out}$ をあてはめて解くと、

$$\frac{\theta_w}{\theta_{w_out}} = EXP \left(\frac{-x}{m_w c_w R_{total}} \right)$$

$x = L$ で $\theta_w = \theta_{w_in}$ を代入すれば、

$$L = (m_w c_w R_{total}) \ln \left(\frac{\theta_{w_in}}{\theta_{w_out}} \right)$$

以上より、 L が既知なら R_{total} を、 R_{total} が既知なら L を、測定データから求めることができる。

引用文献

- 地中熱利用促進協会 (2013)：地中熱利用促進協会、ニュースレター、No.197、4p.
- 古野伸典 (2014)：地下水熱を利用できる施設園芸用ヒートポンプシステムの開発と評価、施設と園芸、No.164、58-61.
- 農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター農業機械化研究所 (2010)：平成22年度試験研究成績22-1農業機械における省エネルギー化と温室効果ガス抑制に関する研究成果と研究方向、19p.
- 佐藤展之、守谷栄樹、安井清登、野々下知泰 (2013)：空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機とのハイブリッド運転によるバラ栽培の暖房費削減効果、植物環境工学、25(1)、19-28.
- S.A. M. Said, M.A. Habib, E.M.A. Mokheimer, N. Al-Shayea and M. Sharqawi (2009): Horizontal Ground Heat Exchanger Design for Ground-Coupled Heat Pumps, *Ecologic vehicles renewable energies* 23009, 8p.
- 山本和哉、長野克則、中村真人 (2012)：地中熱ヒートポンプを用いた加温・冷却システムの農業用ハウスへの適用、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、589-592.
- 山本和哉、長野克則、中村真人、岡本 淳、生方雅男 (2014)：地中熱ヒートポンプを用いた加温・冷却システムの農業用ハウスへの適用 (第3報) 数値解析による最適設計手法の検討、空気調和・衛生工学会北海道支部 第48回学術講演会、4p.

Greenhouse Heating and Cooling Tests with the Geothermal Heat Pump Systems using the Shallow Surface Waters and the Shallow Underground

OKUSHIMA Limi*, ISHII Masahisa*, MORIYAMA Hideki*, IWATA Yukiyoishi**,
GOTO Masahiro***, SASE Sadanori****, TATENNO Masayuki*****, TAKASUGI Shinji*****

*Controlled Environment Agriculture, Agricultural Environment Engineering Research Division

**Farmland Soil and Water Management, Agricultural Environment Engineering Research Division

***Renewable Energy Systems, Renewable Resources Engineering Research Division

****College of Bioresource Sciences, Nihon University

*****GeoSystems co.

Abstract

The water - air heat pumps with the heat sources of the shallow water pond and the shallow underground were heating and cooling the small greenhouses. The experimental data of the heat pumps and the heat sources were collected. The COP (Coefficient of Performance) of the 2 kW heat pump with the shallow pond heat source was 4.6 at heating mode and 3.7 at cooling mode. The COP with the shallow underground was 4.4 at heating and 3.5 at cooling. The heat exchange efficiency of the one sheet type heat exchanger in the pond showed from 589 to 1302 W °C⁻¹ depending on the presence or absence of the water flow around the heat exchanger in the pond. It was considered that the heat exchanger could supply 2.4 to 6.0 kW to the heat pump when the temperature difference between the heat pump circulating water and the pond water was 3 °C, which was the averaged value during this test periods. The heat exchange efficiency of the sheet type heat exchanger under the ground was one fifth to one fourth folds of efficiency in the pond. The total heat resistance between the heat exchanger and the underground soil was 8.4 to 287.4 m K kW⁻¹ at heating and 5.4 to 138.0 m K kW⁻¹ at cooling, and those heat resistance proportionally increased as the larger temperature difference between the circulating water and the natural soil temperature.

Key words: *pond water, geothermal source, heat exchanger*

〔農工研技報 218〕
〔51 ~ 63, 2016〕

農業用水路トンネル壁面連続画像撮影技術の 現地適用性の評価

森 充広* 浅野 勇* 川上昭彦* 川邊翔平*

*施設工学研究領域 施設機能担当

要 旨

農業用水路トンネルのひび割れなどの変状を効率的かつ高精度に記録するための点検手法として、レーザー壁面画像連続撮影装置および壁面自動追尾型画像連続撮影装置を開発した。レーザー壁面画像連続撮影装置は、短時間でも断水が可能な場合に適用可能であり、レーザー光を覆工に照射したときの反射強度から、ひび割れなどの変状を連続的に高精度デジタル画像としてスキャンニングする。一方、壁面自動追尾型画像撮影装置は、通水中の水路トンネル内部を流下しながら点検が可能であり、装置に搭載した3台の高精度CCDカメラにより、内部の変状を動画として記録する。実証試験の結果、これらの技術は農業用水路トンネルの目視調査の代替として適用できることを確認した。

キーワード：農業用水路トンネル、機能診断、ひび割れ、壁面画像連続撮影装置、レーザー、壁面自動追尾

I 緒 言

農業用水を送水している農業用水路トンネル（以下、水路トンネル）は、全国で2,000 km以上整備されており、道路トンネル約3,600 km、鉄道トンネル約2,400 km、発電用水路トンネル約4,700 km（土木学会, 2015）に匹敵する膨大なストックを有している。しかし、トンネル構造物も劣化が進行し、近年では、新幹線トンネルの覆工崩落、広島県の送水トンネル崩落、中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落など、突発的な事故が発生している。こうした背景から、水路トンネルにおいても、適時適切な診断と対策が求められている。特に、一部の水路トンネルでは、農業用水のみならず、上水、工業用水等と兼用されている重要な社会インフラとなっている場合もあり、定期的な点検・診断が不可欠である。

トンネルの構造的な安全性は、トンネル周辺の地質、地盤と密接に関係している。地山が安定していれば、トンネル覆工に作用する外力も小さい。一方、膨張性の地山など地質、地盤条件によっては、トンネル完成後も徐々に外力を受け、覆工にひび割れなどの変状が発生する恐れがある。このため、トンネル構造物の安全性を把握するためには、地盤状況を把握することが最も有効であると考えられる。しかし、トンネル周辺の地盤の状況をトンネル内から点検することは非常に困難であるため、現状では、トンネル覆工に発生する変状を定期的にモニタリングし、その進行性を把握することが重要となる。ただし、水路トンネルにおいては、道路トンネルのように電灯などの維持管理用の設備が整備されてい

ない。また、水路トンネルへのアクセスも容易ではないため、高頻度の点検は困難である。

筆者らは、2002年から農林水産省農村振興局の「官民連携新技術研究開発事業」の補助を受け、水路トンネルの変状を正確にかつ迅速に把握すること、また、断水が困難な水路トンネルにおいて、簡易的な一次調査を実施して変状を把握することを目的としたいくつかの点検技術の研究に取り組み、既に、実証試験の報告を行っている（森ほか, 2008, 森ほか, 2012）。本報では、これらを総括するとともに、新たに追加した実証試験の結果を報告する。IIでは、水路トンネルの調査、点検に必要な条件について、現地調査事例や水路トンネルに見られる具体的な変状から考察する。IIIでは、レーザー壁面画像連続撮影装置、IVでは、壁面自動追尾型画像撮影装置の原理を説明し、新たに実施した実証試験の結果を報告する。Vでは、両技術の適用限界を示し、本技術の適用性を示す。

II 水路トンネル変状点検技術の具備すべき条件

2.1 水路トンネルの調査結果事例

2.1.1 水路トンネルの調査事例

平成19年に、ストックマネジメントの概念が提唱され、「農業水利施設の機能保全の手引き」（以下、手引き）に基づいた農業水利施設の一斉点検が開始された。水路トンネルにおける調査事例も数多く報告されている。

上野らは、断水が困難な延長約14 kmの水路トンネルのうちの8.6 km区間を2日間で調査した事例を報告し

ている（上野ら，2008）。ただし，断水できる期間が短かったため，点検内容は，目地ごとにバレルNoをつけ，10バレルごとにマーキング，20バレルごとに写真撮影，100バレルごとにリバウンドハンマー試験という限定的なものになっている。

一方，断水期間に余裕がある場合には，変状の原因を究明することを目的とした様々な調査が実施されている。曾我は，水路トンネルにひび割れなどの変状が確認された区間において，ボーリング調査，覆工の圧縮強度試験，衝撃弾性波探査による空洞調査などを実施した結果を報告している（曾我，2012）。これらの調査では，変状が確認された区間全体で，覆工天端背面の空洞や緩みが確認されている。さらに，ひび割れの挙動をデータロガーで連続観測し，今後の変状の進行性を確認している。

これらの事例のように，水路トンネルの機能診断においては，まずは目視調査を実施し，変状が見られた区間においては覆工背面の空洞等の原因究明を行うための詳細調査を実施するのが基本となっている。

2.1.2 現状の変状点検とその問題点

「手引き」に基づく機能診断は，コンクリート構造物のひび割れ等の目視調査やコンクリートコアの圧縮強度確認，中性化試験などに主眼を置いたものである。目視調査は，農業水利コンクリート構造物の点検・変状調査手法として基本的かつ最も重要な調査手法である。しかし，目視調査には，①変状の確認に個人差が発生する，②機能診断に必要とされる精度での目視調査には時間がかかる，③水路トンネル等の暗所での調査では，見落と

しなどの可能性がある，④得られるデータが紙ベースでしか保存されず，変状の進行性を定量的に判断することが難しい，などの問題点がある。さらに，ひび割れなどの変状は記録されているものの，それらが「いつ」発生したか，あるいは「経年的に進行しているか」という情報はほとんどない（Fig. 1）。この一因として，水路トンネルにおいては，維持管理用の設備が整備されておらず，人による目視調査の場合，どうしても点検に時間や手間がかかること，上工水と兼用になっている水路トンネルでは，容易に断水できないことなどが背景にある。また，土地改良区の統合などにより，1改良区当たりの点検すべき農業水利施設の数が増えるとともに，土地改良区職員の高齢化など，調査人員の不足も要因のひとつと考えられる。

2.2 水路トンネルの特異性

JRが管理する鉄道トンネルの変状として，ひび割れ・目地切れ（34%），漏水（32%），表面欠落・剥落（23%）が主たる変状として報告されている（鉄道総合技術研究所，1990）。道路トンネルでは，漏水，ひび割れ，剥離，施工目地の開きなどが主たる変状となっている（日本道路協会，1993）。

これまでに筆者らが調査した水路トンネルでは，道路トンネルや鉄道トンネルと同様，ひび割れが多く見られた（Fig. 2a～d）。水路トンネルにおいては，日々の日常点検作業が不可能であり，通常，毎年1回程度にしか調査できない。一方で，道路，鉄道トンネルとは異なり，覆工コンクリート塊のはく離・はく落による第三者に対する安全性や，走行の

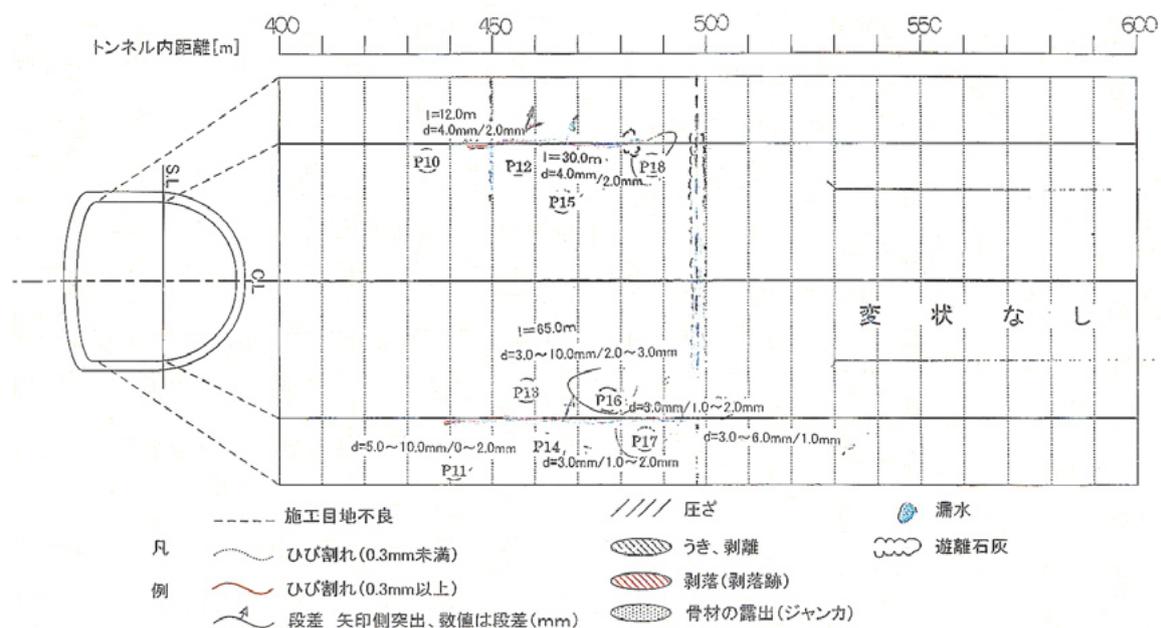


Fig. 1 トンネル目視調査結果の一例

An example of tunnel lining deformation by visual inspection

障害となる天端からの漏水などは、特別な事情がない限り考慮する必要は小さいと思われる。

さらに、上工水と兼用されている水路トンネルでは、どうしても断水できない、あるいは断水できるとしても数時間という、調査に制約があるものが多いのが特徴である。また、水路トンネルにおいては、通水面以下の覆工からの漏水は、通水量を減少させる要因となり、水利用機能の低下を招くことになる。漏水により地盤が浸食されると、水路トンネルの構造性能にも悪影響を及ぼす。

2.3 水路トンネルの変状点検技術に要求される性能

以上の点から、水路トンネルの機能診断に際しては、①調査頻度が確保できないことから、ひび割れなどの目視情報を1回の調査時に確実にかつ正確に記録できること、②短い断水期間においても調査できる効率性を有すること、③通水状態においても点検できる柔軟性を有すること、が要求される。

そこで、本研究では、断水できる場合には、水路トンネル覆工全面に発生している様々な変状を、効率的かつ高精度に記録すること、一方、断水が困難な場合には、「断水して調査点検する必要があるかどうか」を判断するための一次情報を得ることを目的として、水路トンネル変状点検技術を開発することとした。

以下では、開発した2種類の調査システムおよびその検証結果を示す。

Ⅲ レーザー壁面画像連続撮影装置の開発

短時間でも断水できる場合の水路トンネルでは、1回の調査で覆工に発生している変状を正確に記録できることを目的として、覆工に発生しているひび割れなどの変状を高精度デジタル情報として記録するレーザー壁面画像連続撮影装置を開発した。既に道路トンネルでの利用を目的としたシステムが構築されていた（日比野ら、1993）が、本研究開発では、それを水路トンネルに適用できるように、小型化を図るとともに、壁面の湿潤状況の相違による色調の濃淡差に対応できるよう、改良を加えた。以下にその原理や実証試験において確認した性能を示す。

3.1 原理

レーザー光を壁面に照射し、壁面で反射する光量の強弱をフォトマルと呼ばれる光検出器でとらえることにより、ひび割れなどの変状情報を連続的に検出する。本装置の概要を Fig. 3, 4 に示す。レーザー光は装置から真後ろに照射されるが、ミラーに反射させて水路トンネル壁面に向きを変えられる。このミラーが回転することに



Fig. 2 (a)～(d) 水路トンネルに発生しているひび割れの事例
Examples of cracks occurred in a tunnel lining

より、レーザー光は、水路トンネルの横断面を高速で回転することになる。4台のフォトマルにより、壁面全面からのレーザー光の反射強度を連続的に計測する。レーザー光がひび割れに当たった場合には、反射する光量が小さくなる。本装置を水路内を牽引していくことによって、縦断方向の反射光量の大小が連続画像として記録される。この画像をパソコンに読み込み、ひび割れなどの長さや位置を人が確認して展開図にトレースする。

3.2 本装置の特徴および仕様

本装置の仕様は Table 1 に示すとおりである。本装置の利点は、以下の点である。

- ①調査速度は最大1.44 km/hと迅速な調査が可能である
 - ②覆工全面を高精度デジタル情報として記録可能であり、見落としがない
 - ③調査時に照明が不要である
- 一方、レーザー光は水面で乱反射してしまうので、底

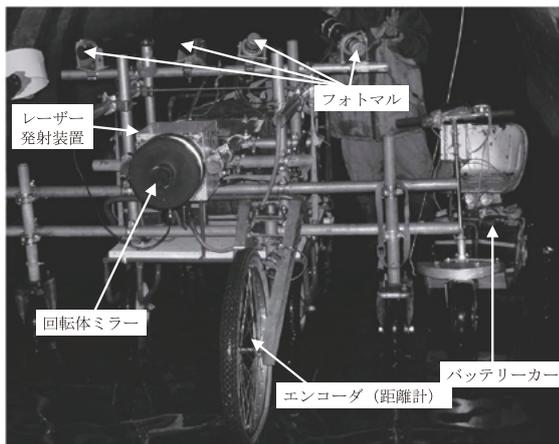


Fig. 3 レーザー壁面画像連続撮影装置の概要
Continuous digital scanning system



Fig. 4 覆工内面に放射されたレーザー光
Emitted laser light around a tunnel lining

版にたまり水が残っている場合には、その部分のデータは取得できない。

3.3 実証試験による検証

開発したレーザー壁面画像連続撮影装置による実証試験を実施した。以下に、その方法および検証結果を示す。

3.3.1 実験対象地区

水路トンネルにおいて、実証試験を行った。対象地区の水路トンネルの規模は、 $R = 0.85 \text{ m}$ のほろ形水路トンネルで、延長は791 mである。本地区は、上水と兼用されており、断水時間が約6時間に限定された水路トンネルである。

3.3.2 方法

調査は、午前9時～午後3時までの6時間で実施する計画とした。まず、本装置を分解した状態で水路トンネル内に持ち込み、内部で組み立てた。次に、坑口近傍で予備的な撮影を行った。この目的は、適切な露出で壁面画像が撮影できるように、4台のフォトマルの向き、角度、ダイナミックレンジなどを調整することである。調整完了後、本調査を実施した。調査では、水路トンネル内部に段差や堆積物の有無を確認するために装置の前を先導する作業員1名、装置の牽引やバッテリー交換等を行うための作業員1～2名、画像の確認を行う技術者1名の、合計3～4名で実施した。

なお、対象水路トンネルに直結する開水路区間に敷地の余裕があれば、Fig. 5に示すように、断水開始前に装置を組み立てておき、断水直後にユニックで搬入することにより、さらに調査時間の短縮を図ることが可能である。

3.3.3 結果

Fig. 6に、撮影した水路トンネルの壁面画像の一例を示す。また、図中、四角の枠で囲まれた部分を拡大した画像をFig. 7に示す。図中の数値は、クラックスケール

Table 1 レーザー壁面画像連続撮影装置の仕様
Specifications of continuous digital scanning system

撮影デバイス	フォトマル
レーザー光	スポット径0.36 mm 波長532 nm
ひび割れ検出能力(理論値)	0.1 mm
スキャン速度(最大)	200 断面/秒
計測スピード	1.44 km/h
画像	4,096階調(表示256階調)
記録断面	360° (全周)
記録フォーマット	12bit
照明	不要

で計測したひび割れ幅（単位：mm）を示している。

Fig. 7に示されるように、幅0.2～0.3 mm程度のひび割れも十分に撮影できる解像度を有していることが示された。本技術の利点は、展開図のみからはイメージしにくい湧水の状況や、湿潤面の広がり、遊離石灰の状況などを画像として確認できる点である。また、画像は高精度デジタル画像として保存しているため、特定部分を拡大して変状を詳細に確認できる。このため、定期的に行われる調査結果と比較することにより、変状の進行が確認できる。

また、調査時間については、断水時間6時間以内に終了することができ、その効率性も確認できた。



Fig. 5 装置の搬入状況

Continuous digital scanning system carried into a canal

3.3.4 課題

Fig. 7に示すように、詳細に画像を見ると、本来直線であるはずの覆工コンクリートの型枠の痕跡が直線ではなく、ゆがみが生じている。これは、装置を牽引するときの段差等の影響によるものである。特に水路トンネルでは、底版が摩耗により凹凸状態となっていたり、砂礫が堆積していたりするため、道路トンネルと比べると安定して本装置を走行させることが難しく、どうしても画像にゆがみが発生する。

このゆがみをなくすため、画像中の直線部分を利用した画像補正技術（森ほか、2006）を適用し、展開図を作成するときには、可能な範囲でゆがみの少ない画像とする工夫なども行っている。

底版など、水が貯まっている部分は、本技術では撮影できない。レーザー壁面画像連続撮影装置を牽引しながら、可能な範囲で人が目視確認することになる。

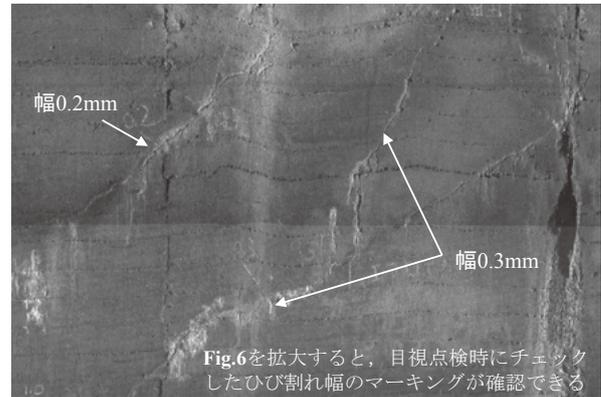


Fig.6を拡大すると、目視点検時にチェックしたひび割れ幅のマーキングが確認できる

Fig. 7 Fig. 6四角部分の拡大画像

Extended image surrounded in a white line in Fig. 6

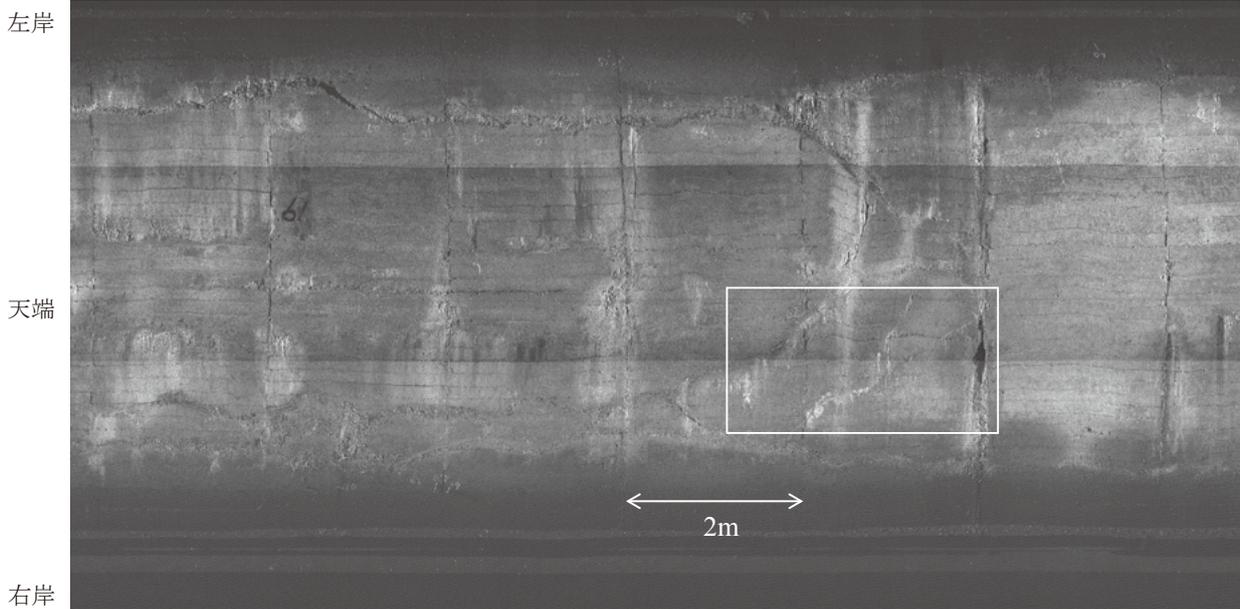


Fig. 6 レーザーによる壁面画像

Digital image taken by continuous digital scanning system

IV 壁面自動追尾型画像撮影装置の開発

通水状態において水路トンネルの機能診断を行うための様々な技術が開発されている。通水状態での調査方法は、大別すると、①流水中に装置を浮かべ、流下しながら内部の情報を得る方法、と、②制御用ケーブルで接続した状態で、人が機器を手元で操作しながら点検する方法、とに区分される。しかし、①の方法では、制御装置がほとんど組み込まれておらず、安定した画像などを得るためには、流水中を直進させる装置や治具が必要となる。一方、②の方法では、制御や情報通信用にケーブルが必要となるため、調査できる延長にどうしても制限がある。

そこで、これらの課題を克服するため、水路トンネル内部を自然流下しながら、覆工の状態を記録する技術開発を行った。

4.1 原理

基本原理は、高感度CCDカメラを搭載した船体を水路トンネル上流坑口から放流し、下流坑口で回収することにより、無人で水路トンネル内部の動画を撮影するものである。本装置は、水路トンネル内部を流下しながら、水路トンネル内の変状を装置内部のSDカードに動画として記録する。下流で回収後、ノートPC等によってSDカード内の情報を読み出し、その場で映像を確認できる。

高感度CCDカメラを船体に固定して流下させた場合、船体が回転するとカメラも同時に回転してしまい、見落としなどが発生した(藤原ほか, 2009a)。そこで、船体をカメラを搭載する上部と、フロートの役割をする下部とに分割した。すなわち、流水の影響を受けて下部が回転しても、上部のカメラは常に壁面と正対するシステムを考案した(森ほか, 2013)。

装置の概要を Fig. 8 に示す。船体下部には、リング状

のレールギアが設置されており、船体上部が回転する構造となっている。船体上部には、水路トンネル側壁までの距離を計測する赤外線距離計を4箇所設置している。

壁面自動追尾の原理を Fig. 9 に示す。例えば、船体が反時計回りに回転し始めたとする。このとき、赤外線距離計により計測したD2およびD4は、壁面との距離が近づき、D1およびD3は、壁面との距離が離れるように変化する。感度をより敏感にするために、(D1 + D3) の値と、(D2 + D4) を計算し、この値を比較することによって、船体がどちらの向きに回転し始めているかを100 msごとに判定する。そして、(D1 + D3) と (D2 + D4) の出力電圧値に比例して回転用モータへの通電時間を制御する。すなわち、距離の差が大きくなるほど、

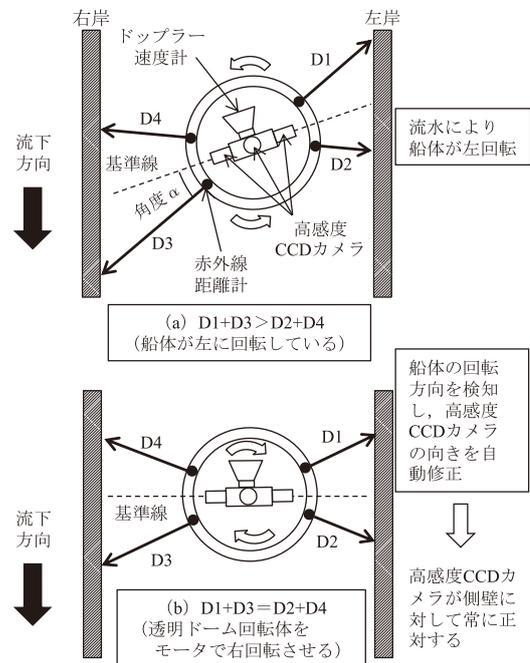


Fig. 9 壁面自動追尾の原理
Principle of automatic lining surface tracking

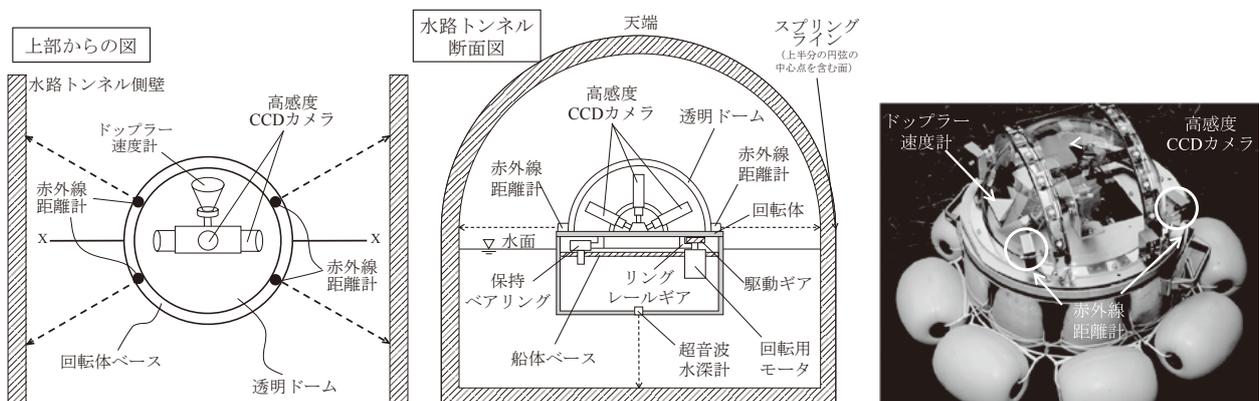


Fig. 8 開発した壁面自動追尾型画像撮影装置
Outline of automatic lining surface tracking system for taking continuous digital movies

回転用モータの作動時間が長くなり、結果的に回転量が大きくなる。この機構によって、下側の船体が回転しても、カメラは常に壁面を向き続けることになる。

4.2 本装置の特徴および仕様

本装置の仕様はTable 2に示すとおりである。水路トンネル覆工のひび割れ等の変状を撮影する高感度CCDカメラ以外にも、坑口からのおよその流下距離を計測するドップラー速度計を搭載している。また、水理機能の低下などを判断するための参考情報のひとつとして、よどみや土砂の堆積状況等を計測する超音波水深計を搭載している。

本装置の長所は、以下のとおりである。

- ①通水状態で点検可能である。
- ②壁面に対して正対した画像が得られるため、展開図の自動作成が可能である。
- ③無人での調査が可能であり、安全性が高い。

4.3 実証試験による検証

開発した壁面自動追尾型画像撮影装置による実証試験を実施した。以下に、その方法および検証結果を示す。

4.3.1 実験対象地区

農業用水と工業用水が共有されている水路トンネル

Table 2 壁面自動追尾型画像撮影装置の仕様
Specifications of automatic lining surface tracking

部位	項目	規格その他
本体	大きさ	735 × H528 mm
	重量	35 kg
CCD	素子	1/3 インチ CCD インターライン 転送個体撮像素子
	有効画素数	768 (H) × 494 (V)
	最低被写体照度	0.0002lx F1.4
	レンズ	パリアフォーカルレンズ
	焦点距離	2.6 ~ 6.0 mm 可変
	画角	TELE 47.1° × 35.4° WIDE 111.3° × 83.5°
水深計	超音波周波数	200 kHz
	測深範囲	0.5 ~ 99.9 m
	指向角	15°
	測定精度	± 2%
ドップラー 速度計	周波数	10.5 GHz
	電力	8 dBm
	アンテナ	8.2 ~ 12.4 GHz ホーンアンテナ
	開口部	75 × 95 (mm)
	ゲイン	17 dBi
	半値角	25°
	通過帯域	6 ~ 180 Hz
	速度換算	0.15 ~ 4 m/s 相当

を対象として調査を行った。水路トンネルの形状はR = 0.95 mの2R標準馬蹄形トンネルであり、トンネル延長は224.6 mである。上流投入から下流で回収するまでの時間から求めた流速は、約1.2 m/sであった。

4.3.2 方法

本装置による調査は、以下の手順で実施した。まず、下流坑口において、確実に装置を回収できるように、ネット等の防護柵を設置した。続いて、水路トンネル内にゴミなどの通水阻害箇所がないか、また、事前に計測した流速および水路トンネル延長から想定される流下時間と、実際の流下時間が一致するか、などを確認し、装置が水没することや回収不能になることを未然に防ぐことを目的として、浮き袋等の模擬体による流下テストを行った。模擬体流下テストにより、調査に支障がないことを確認できた後、装置を上流坑口に投入し、装置を流下させた。

4.3.3 結果

得られた画像の一例をFig. 10~12に示す。Fig. 10は、壁面自動追尾型画像撮影装置によって得られた動画から、フレーム単位で静止画を抜き出してつなぎ合わせ、展開図にしたものである。遊離石灰の状況、ひび割れ、漏水による湿潤状況などの全体像を確認することができる。Fig. 10の黒色四角で囲んだ部分の拡大図をFig. 11に示す。この部分に見られるひび割れは、目視点検により幅2 mmと評価されたひび割れ部分である。このことから、本装置による調査により、R = 0.95 m程度の規模の水路トンネルであれば、幅2 mmのひび割れは、十分確認できることが分かった。

これ以外に見られた変状の事例として、覆工欠損部の事例をFig. 12に示す。過去、断水時に目視点検調査した結果では、この欠損部の大きさは76 cm × 63 cm × 深さ58 cmであることが確認されている。Fig. 12では、地山まで照明が届いていないため、深さの情報は画像だけでは判別できなかった。

また、本実証試験では、Fig. 13に示すように、白色用紙に、ひび割れに見立てた太さの異なる黒色の線を描いた疑似クラックシートによって、検出できる幅を求めた。その結果、今回の水路規模では、幅1 mmの黒色線も十分確認できることが分かった。現地で確認できた幅1 mm以下のひび割れの事例をFig. 14に示す。遊離石灰を伴っていたり、水が滲み出したりしているようなひび割れでは、黒矢印で示したように幅1 mm未満のひび割れであっても周辺覆工とのコントラストが明瞭となり、認識できるものが存在した。

4.3.4 課題

本地区では、上述した水路トンネルに加え、他の7箇所の水路トンネルにおける調査を実施した。その中に

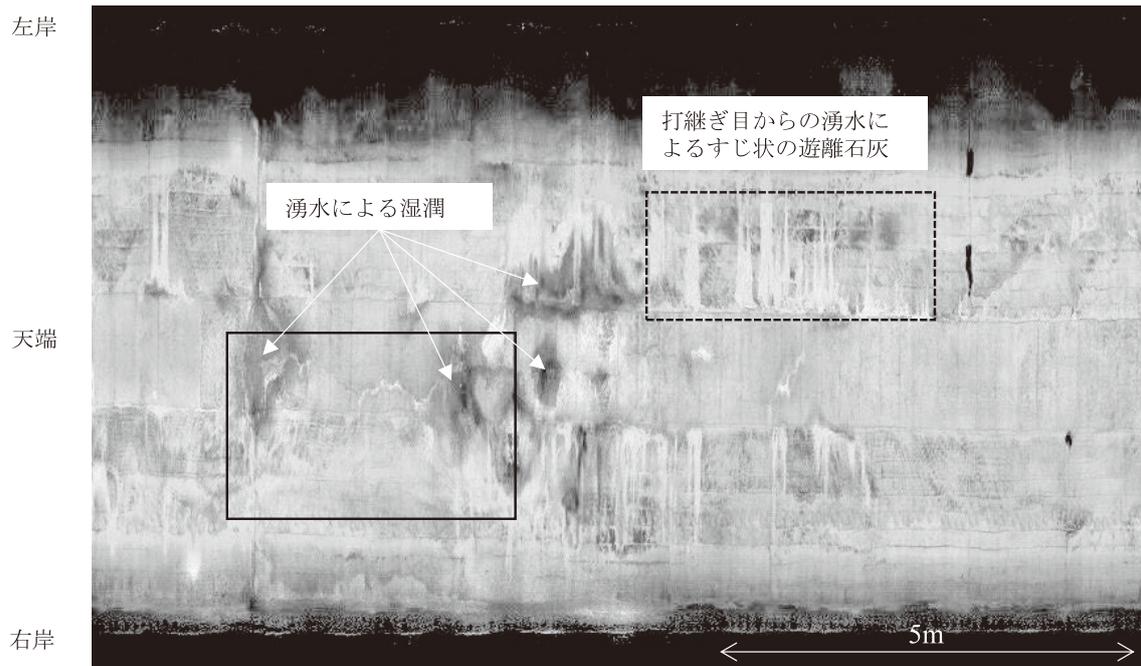


Fig. 10 壁面自動追尾型画像撮影装置によって得られた動画から作成した水路トンネル展開図の例
An example of tunnel lining development view which was made from movies taken by automatic lining surface tracking

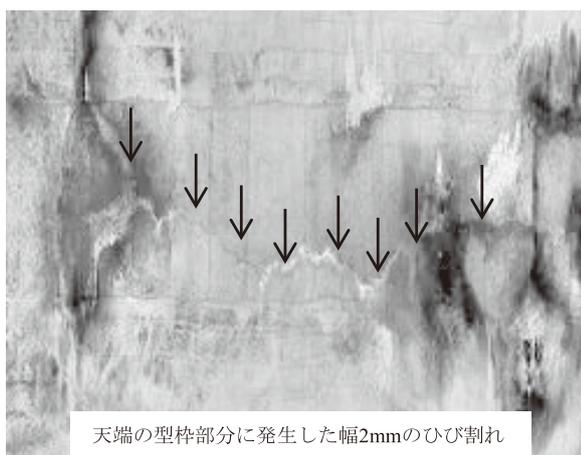


Fig. 11 得られた画像の一例
An example of digital picture

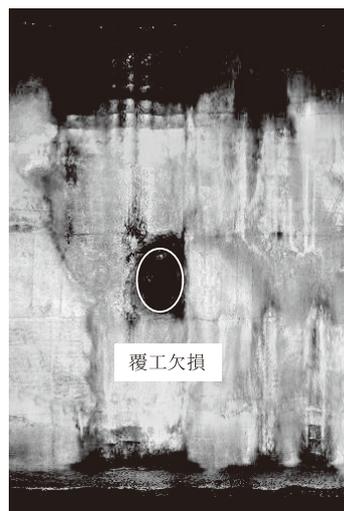


Fig. 12 覆工の欠損箇所
A defect of concrete lining

は、流速が1.5 m/sを越える水路トンネルもあった。これらの調査の結果、次に示す課題が抽出された。

まず、流速が1.52 m/sの水路トンネルの一部区間で、壁面自動追尾がうまく機能しない区間があった。この区間は、ちょうどトンネル断面変化点になっており、流況が変化した区間と考えられる。流速が速い水路トンネルでは、今後このように壁面に追従しない可能性もある。CCDカメラの追尾速度は、任意の速度に修正可能であるが、あまりに回転速度を上げすぎると、画像がぶれてしまう危険性がある。今後さらに適用事例を増やし、適切なパラメータに修正していくことで、対応できる可能性がある。

また、一部の水路トンネルにおいて、搬入口が狭く、

搬入困難な場合があった。今回は、装置を分解して搬入し、水路トンネル内で再度組み立てて調査を実施したが、さらなる小型化が必要となる。

また、天端付近からの湧水が大量にある場合、高感度CCDカメラを覆う透明ドーム部に水滴がつき、画像がうまく撮影できない可能性も考えられる。

V 壁面画像連続撮影技術の現地適用性検証

開発した2種類の点検技術は、水路トンネル覆工の状況を効率的に記録できることが実証試験で確認された。

ここでは、それぞれの技術の特徴や適用限界を示すとともに、本技術の有効性を発揮できる活用方法を提案する。

5.1 各技術の特徴および適用限界

本報で報告した2種類の点検技術の適用範囲、適用条件を、目視調査と比較した一覧表を **Table 3** に示す。ただし、それぞれの数値に関しては、実証試験で得られたデータを根拠として記述している。例えば、壁面自動追尾型画像撮影装置において検出できるひび割れ幅は、調査対象の水路トンネルの規模と、搭載している CCD カメラの画素数や、流下速度により変化する。したがって、条件の組み合わせによっては、所定の性能が発揮できない可能性もあることに留意する必要がある。

断水できる場合、最も簡便に実施できるのは、レーザー壁面画像連続撮影装置である。特に大規模な水路トンネルでは、近接目視しなければならない目視調査と比較すると、足場などが必要ないため、調査は効率的であ

り、また得られる画像も高精度である。一方、断水が困難な場合には、壁面自動追尾型画像撮影装置が有効である。目視調査やレーザー壁面画像連続撮影装置と比較すると精度は落ちるものの、断水して本格的な調査を実施する必要があるかを判定する一次的な点検手法として有効である。また、トンネルの径が小さい場合にも、レーザー壁面画像連続撮影装置と比べて機材が搬入しやすく、また無人であるため、安全性が高いというメリットもある。

目視調査の利点は、対象規模、対象施設等の制約がほとんどないことである。例えば、サイフォンなど充水状態個所でも、潜水夫などによって調査することができるという柔軟性を有する。ただし、調査後の記録の保存という面では、正確性に乏しいという問題がある。変状発生位置、規模は、ラフなメジャー計測値となったり、変状記録は、スケッチや局所の写真となるためである。したがって、変状の進行性を明瞭に把握することが困難となる。

それに対し、開発した技術は、適用範囲は限定されるものの、覆工の状態を画像として記録できる。通常、目視調査で確認された各種の変状は、展開図に示される。それ以降行われる目視調査では、過去の展開図をもとに変状の再確認や、新たな変状の抽出が行われる。このとき、新たに見つかった変状や、展開図と同じ位置にあるひび割れにもかかわらず、幅や延長が異なっているものなどが確認された場合には、実際新しく発生したのか、進展したのか、あるいは過去の目視点検結果の誤記や見落としなのか、が明確に判別できないという問題がある。画像として記録していれば、これらを区別できるという利点がある。

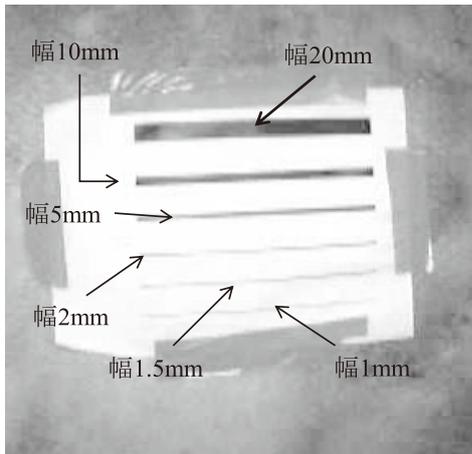


Fig. 13 ひび割れ検出能力の確認
Detection sheet to evaluate detection capability

5.2 各技術の適用方法の提案

以下では、どのような場面で開発技術が有効に活用で

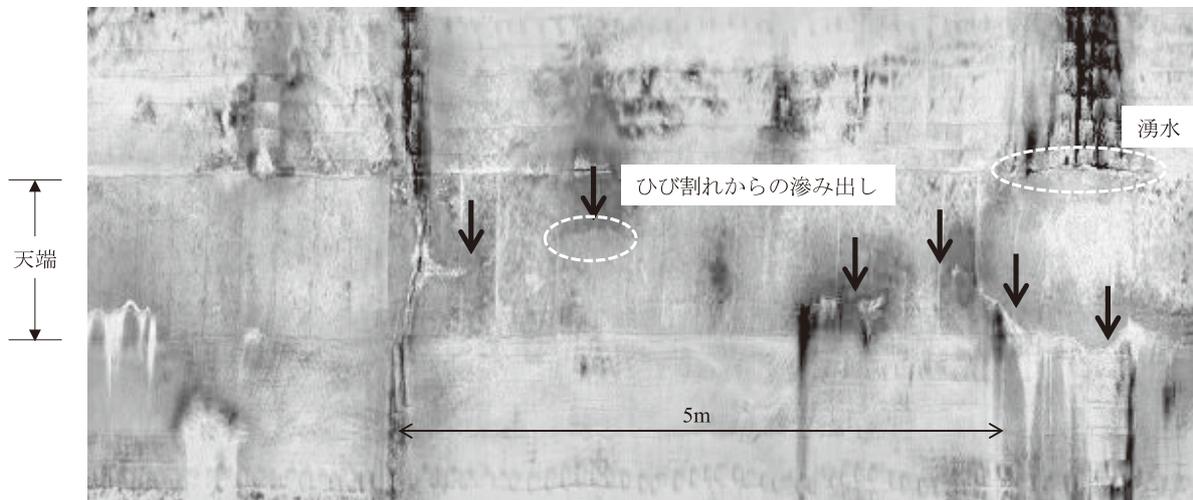


Fig. 14 検出された幅1mm未満のひび割れ（天端部分の拡大図）
Detected crack less than 1 mm width

Table 3 各手法の適用範囲および適用条件

Scope and application of each methods

	目視調査	レーザー壁面画像連続撮影	壁面自動追尾型画像撮影
対象規模	0.8 m ~ (足場等を活用すれば制約なし)	直径1.5 ~ 8.0 m	直径1.5 ~ 2.0 m
検出できる 最小ひび割れ幅	0.05 mm ~ (クラックスケールによる)	0.1 mm ~ (実証試験による)	1.0 mm ~ (実証試験による)
調査時間	変状の程度により変化	最大1.44 km/hr	最大3.6 km/hr (流速1.0 m/sとした場合)
許容通水環境	水深40 cm以下 ^{*1)} (流速1.0 mのとき)	水深50 cm以下 ^{*2)} 流速1 m/s以下程度	水深50 cm以上 流速1.5 m/sまで
搬入に必要な規模	φ800 mm以上	最小通過径900 × 900 mm	最小通過径750 × 750 mm
トンネル内での作業 に必要な明るさ	懐中電灯等の明かりが必要	照明不要	照明 LED (0.002lx)
主な特長	・安価 ・打音などの調査も同時に可能 ・サイフォン等、構造物の形状 によらず対応が可能	・高精度 ・調査速度が迅速 ・見落としがない ・画像が記録として残る	・通水状態でも可能 ・無人で調査でき、安全 ・画像が記録として残る
現状の課題	・変状の位置、規模に誤差 ・見落としの可能性あり ・点検精度に個人差	・水面下の情報が得られない ・目視調査に比べると高価 ・ひび割れ幅は推定値	・サイフォンは通過できない ・目視調査に比べると高価 ・ひび割れ幅は推定値

※1) 国土交通省「洪水避難時に水中歩行できる領域」による

※2) 藤原ほか (2009b) による

きるかを提案する。

5.2.1 レーザー壁面画像連続撮影装置

本技術の最大の利点は、高精度なデジタル画像を短時間で取得できることである。このため、本技術の活用方法としては、冬季に通水していない水路トンネルや、数時間程度であれば断水が可能な水路トンネルの目視調査の代替として活用できる。一方で、通常、人が行う目視調査と比較するとコストがかかる。このような状況を加味した上で、本技術は、次のような現地で貢献できると考えている。

①断水時間が十分でない水路トンネルにおける機能診断

断水時間が限定される場合には、時間的な制約により点検すべき項目が限られる。しかし、本技術では、短時間に覆工表面の変状情報を高精度に記録できる。変状の確認は、得られたデジタル画像上で行うことができるため、見落としなどは発生しない。

ただし、このような高精度の調査は、何度も行う必要はないと考える。一度、本技術により、覆工全体の正確な目視情報を収集すれば、その後の点検は、人による目視調査でも、十分な精度での点検が可能であると考えられる。すなわち、本手法で得られた画像を基礎となる初期データとし、「著しい変状の進行」や、「新たな変状の発生」を追跡することが可能となるためである。

②新設あるいは補修補強対策直後の竣工検査

現在の水路トンネルの機能診断の問題点のひとつが、確認される変状がいつ発生したのかが分からないことで

ある。覆工コンクリートには温度応力、乾燥収縮等により、どうしても施工直後にひび割れが発生してしまう。しかし、これらの変状は、経年的にはほとんど進行しない。こうしたひび割れと、まさに外力によって発生する構造的なひび割れとを区別する必要がある。そこで、竣工検査時に、これらの初期欠陥の情報を本技術により記録することを提案する。これにより、供用後の点検で確認されたひび割れ等の変状が、初期から発生していたのか、供用後に新たに発生したのかを区別することが可能となる。また、あらかじめ初期欠陥の情報を収集しておくことで、新たに発生したひび割れなどの変状発生の原因を絞り込みやすくなる、という利点もある。

5.2.2 壁面自動追尾型連続撮影装置

本技術の最大の利点は、断水しなくても水路トンネル内部の情報が得られることである。一方で、通常人が行う目視調査と比較するとコストがかかる。したがって、本技術は、次のような現地で貢献できると考えている。

①断水による損失コストが大きい調査

わずかの時間でも断水できる場合には、精度が高いレーザー壁面画像連続撮影が適切である。しかし、短時間でさえも断水できない水路トンネルの調査には、壁面自動追尾型画像撮影装置が有効である。例えば、先述した実証試験事例においては、8箇所、合計延長約3.6 kmの水路トンネル調査を行っている。調査には、技術者4名で4日間を要し、データ処理を含めて120万円/km程度のコストがかかっている。

一方、同規模のトンネルを断水して調査した場合には、とりまとめを含めて70～100万円/km程度である。このように、壁面自動追尾型画像撮影装置による調査費用は必ずしも低コストではないが、原水単価と断水期間から算定される社会的損失を考慮すると、本技術は、コスト縮減に貢献しているといえる（藤原，2014）。このように、断水に伴う損失コストを考慮する場合、本技術は有効となる。

②災害時の応急点検

東日本大震災では、農地や多くの農業水利施設に被害が発生した（農村工学研究所，2015）。過去の地震においても、水路トンネルの崩落などが報告されている（常住ら，2009）。こうした災害時の応急点検では、人命尊重を優先し、無人で調査可能な本技術の適用が有効である。

③過去に一度も点検したことがない水路トンネル

過去に点検記録があれば、少なくとも人による調査が可能と判断できる。しかし、場所によっては、有毒ガスなどで水路トンネル内部への立ち入りが不可能な場合も想定される。このような水路トンネルでは、本装置にあらかじめガス検知機などを搭載して流下させることにより、画像とともに水路トンネル内の有毒ガス発生箇所等を検知することができ、有人調査の可否を判断する目安となる。

5.3 留意点

開発したこれらの技術適用に関して、以下に留意すべき事項を示す。

①あくまで目視調査の代替技術である

本技術は、基本的に目視情報の代替である。したがって、壁面が泥や水草で覆われている場合には、その画像しか得られない。

水路トンネルの構造的な安全性を目視情報から得ようとする、ひび割れの幅だけでなく、ひび割れの段差、発生箇所などの情報も不可欠である。このことから、本技術により、水路トンネルの構造的な安全性を直接評価することができない。構造的な安全性評価に結びつけるためには、変状の発生に加え、断面の変形、覆工背面の空洞分布や、その限界値を明らかにする必要があると考える。なお、断水できる場合には、内空断面計測や、近年では3次元レーザースキャニングなどにより、水路トンネルのひび割れの段差や全体の変形を捉える技術も開発されている。覆工背面空洞調査には、電磁波レーダなどの技術が実用化されており、水路トンネルの構造的な安全性を評価するためには、これらの技術と組み合わせることが必要である。

②本技術で得られるひび割れ幅は推定値である

実証試験においては、あらかじめ、あるいは後日行われた目視調査との比較によって、「どれくらいの幅のひび割れを検出できたのか」ということに着目して評価し

た。しかし、実際の調査では、得られた画像のみからひび割れ幅や欠損の大きさなどを特定する必要がある。

現状では、画像中に写る距離表示標識の間隔、型枠跡の大きさ、トンネルのスパン長などから相対的な比率によって求める、あるいは坑口近傍のひび割れなどを計測しておき、計測で得られた画像との比較から、ひび割れ幅を推定する。つまり、本技術で得られた「ひび割れ幅」を指標としたモニタリングは、精度面から困難であるといえる。したがって、本技術は、ひび割れの長さが進展したり、新しくひび割れが発生したりする事象を発見することが目的であり、仮に、進展しつつある個所が検出された場合には、その部分に局所的に亀裂変位計などのセンサーを取り付けてモニタリングすることが重要である。

VI 結 言

本研究では、水路トンネルの覆工に発生している変状を点検する技術として、2種類の調査技術を開発し、その有効性を検証した。その結果、以下のことが示された。

- (1) 水路トンネル覆工に発生した変状などの情報を、高精度デジタル画像として記録できる、レーザー壁面画像連続撮影装置を開発した。実証試験の結果、ひび割れの段差の有無の確認は難しいものの、幅0.2 mm以上のひび割れは記録できることが確認できた。
- (2) 断水して調査することが困難な水路トンネルの変状を調査する技術として、壁面自動追尾型画像撮影装置を開発した。2Rおよび3R = 1.8～1.9 mの標準馬蹄形水路トンネルにおける調査の結果、幅2 mm以上のひび割れは十分検出できること、疑似クラックシートによる検証では、幅1 mm以上のひび割れを検出できる能力を有すること、また、幅1 mm未満のひび割れについても、遊離石灰や湧水等により周辺壁面とのコントラストが明瞭であれば、十分検出できること、が確認された。

開発したレーザー壁面画像連続撮影装置は、これまでに230 km以上の水路トンネルの調査に活用されている。金平・江崎は、水路トンネルの受益面積、断水時の影響などから重要度区分を設定し、その重要度に応じた水路トンネルの調査項目およびその方法の案として、重要度の高い水路トンネルの覆工調査に壁面画像撮影を提案している（金平・江崎，2012）。また、2006年に発生した広島県送水トンネル崩落事故後の課題検討会報告書「広範囲に影響を及ぼす施設事故に関する課題検討会」では、今後のトンネル点検のあり方として示したガイドラインの中で、おおむね5年に1回程度の頻度で、開発したレーザー壁面画像連続撮影装置を図ることが提案される（(社)日本水道協会，2007）など、技術が普及しつつある。一方の壁面自動追尾型画像撮影装置は、当初水路

トンネルを対象としたものであったが、企業局、水道局からの問い合わせがあり、実際、東日本大震災後、仙台市水道局からの依頼を受け、水道トンネルの緊急点検を行った。水路トンネルについては、平成25年度に、中国四国農政局管内のストックマネジメント技術高度化事業として採択されるなど、徐々に現地への適用事例が増えつつある。

今後の課題として、このような点検で検出された変状が、どの程度水路トンネルの構造、水理、水利用機能を低下させているのかを定量的に評価することが挙げられる。水路トンネルがどの程度構造的に危険な状態なのかを判定できれば、補強対策の必要性、対策時期、具体的な補強工法などを検討することが可能となる。水路トンネルの構造的な安全性とひび割れ発生位置、ひび割れ幅などを明らかにすることができれば、本技術の有効性はさらに高まると考えられる。

謝辞：本研究は、平成14～18年度に実施した官民連携新技術研究開発事業効率的な農業用水路維持管理のための非破壊調査技術および劣化診断システムの開発」および平成19～23年度に実施した「農業用水路トンネル・サイホンの不断水調査・診断技術の開発」により得られた研究成果の一部をとりまとめたものである。研究開発にご協力頂きました農村工学研究所の増川晋施設工学領域長、渡嘉敷勝業務推進室長、中矢哲郎主任研究員、現島根大学長東勇教授、現東北農政局石村英明氏、現石川県立大学森丈久准教授、官民連携新技術研究開発事業に参画して頂きました日本工営(株)、(株)ウォールナット、(株)小松製作所、日本シビックコンサルタント(株)の関係者各位にお礼申し上げます。

引用文献

(社)土木学会 (2015)：地下構造物のアセットマネジメント - 導入に向けて -，地下空間・ライブラリー1
藤原鉄朗 (2014)：水路トンネルの診断技術の高度化によるライフサイクルコストの改善，農業農村工学会誌，**82**(4)，15-18。
藤原鉄朗，齋藤 豊，森 丈久，森 充広，渡嘉敷勝 (2009a)：通水状態での農業用水路トンネル点検手法の開発，農業農村工学会誌，**77**(4)，25-28。
藤原鉄朗，小谷 拓，永吉洋之，吉田典明 (2009b)：減量通水

条件での水路トンネル調査診断技術の開発，こうえいフォーラム，**17**，59-65。

日比野悦久，野村智浩，太田資郎 (1993)：レーザーを利用したトンネル内面クラック探査装置の開発，電力土木，**248**，74-79。

金平修祐，江崎正美 (2012)：水路トンネル診断技術検証事例について，水と土，**166**，18-23。

国土交通省：避難行動における限界条件の設定 洪水避難時に水中歩行できる領域，(オンライン)，入手先<http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/saigai/tisiki/chika/pdf/g-11_g-14.pdf>，(参照2015.9.28)

森 充広，藤原鉄朗，齋藤 豊，増川 晋，渡嘉敷勝 (2008)：農業用水路変状調査システムの開発，農業農村工学会論文集，**253**，71-78。

森 充広，増川 晋，渡嘉敷勝，藤原鉄朗，財部伸一 (2006)：CCDおよび赤外線による同時ライン計測システムの開発，コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集，**2**，71-78。

森 充広，森 丈久，渡嘉敷勝，中矢哲郎，藤原鉄朗，齋藤 豊 (2012)：通水状態での農業用水路トンネル調査・点検技術の開発，農業農村工学会論文集，**278**，9-17。

森 丈久ほか15名 (2013)：壁面自動追尾型水路トンネル撮影装置，特許第5487409号

(社)日本道路協会 (1993)：道路トンネル維持管理便覧 第2編 トンネル本体内工，9-58。

(社)日本水道協会 (2007)：広範囲に影響を及ぼす施設事故に関する課題検討会報告書，(オンライン)，入手先<http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/pdf/case_study/case_study_all.pdf>，(参照2015.9.15)

農業食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 (2015)：研究者からみた東日本大震災と復旧・復興，農工研技報，ISSN1882-3289

曾我 力 (2012)：群馬用水の水路トンネルの機能調査と評価について，水と土，**165**，71-78。

(財)鉄道総合技術研究所 (1990)：トンネル補強・補修マニュアル 参考資料2，325-331。

常住直人，森 丈久，田中良和，高木強治 (2009)：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理施設被災状況に関する調査，農工研技報，**209**，139-152。

上野直也，土屋 司，福士将児 (2008)：長大水路トンネルの現況調査について，水と土，**154**，15-21

受理年月日：平成27年10月6日

Evaluation of Applicability of the Continuous Scanning System for Irrigation Tunnel Lining

MORI Mitsuhiro*, ASANO Isamu*, KAWAKAMI Akihiko* and KAWABE Shohei*

*Laboratory of Facilities Engineering, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division

Abstract

Authors developed two types of digital scanning system to take visual information in agricultural irrigation tunnels quickly, efficiently, and accurately. One is a continuous digital laser scanning system, and the other is an automatic lining surface tracking system. The laser scanning system can be applied for a survey of a tunnel lining when a water supply is stopped even in a short time. This system can detect all defective events in a concrete lining as a continuous digital image using the distribution of reflected laser. Automatic lining surface tracking system can survey a tunnel lining surface under water servicing. This system can also detect all defective events as a digital movie by three CCD cameras. In this report, we describe technical summaries of these methods and show a result of onsite experiment. As a result, we confirmed that these techniques could be applied as an alternative technology for a visual investigation.

Key words: *tunnels for irrigation, Functional diagnosis, cracks, continuous digital scanning system, laser, automatic lining surface tracking system*

〔農工研技報 218〕
〔65 ~ 76, 2016〕

平成26年8月豪雨被災ため池での流入土砂の実態

正田大輔* 吉迫 宏* 紺野道昭* 井上敬資* 鈴木尚登**

*施設工学研究領域広域防災担当

**企画管理部

要 旨

発生件数の増加する短時間強雨による土砂災害で、農業用ため池の被災する事例がある。本報告では、平成26年8月豪雨時に発生した土砂流入により、京都府福知山市と兵庫県丹波市で被災したため池を対象として以下のことを実施した。土砂災害警戒情報の算出手法の一つであるRBFネットワークによる、ため池周辺での被災日における土砂災害発生危険度の把握を行った。また、踏査を基本とする被災状況の調査を実施し、ため池被災時の事象とため池の機能について整理を実施した。さらに、「砂防基本計画策定指針」による流入土砂量の目安について試算を行った。

キーワード：ため池，土石流，平成26年8月豪雨，調査，土砂量の試算

I 緒 言

時間雨量50 mm以上の短時間強雨の発生件数が約30年前の約1.4倍に増加し、日降水量100 mm, 200 mm以上の発生日数も増加している。また、伊豆大島や広島市においては大規模な土砂災害が発生するなど、全国各地で水害・土砂災害が頻発し、甚大な被害が発生している(気象庁(2015a))。

農業用ため池においては、農林水産省(2014)の調べで、平成16年～25年度の被害の約90%が豪雨によるものとされており、地震等に比べて被害が多い。また、豪雨によって土砂が流入することによるため池の被害事例がある。このような事例について、以下のような報告がこれまでにされている。

平成9年7月に鹿児島県出水市針原川で発生した土石流では、上流からの土石流の影響でため池が決壊しており、この事例対象に深層斜面崩壊の数値解析が行われた(中川ら, 1998)。平成16年台風23号においては、兵庫県のため池決壊の特徴として、土砂が貯水池に流入したことや土石流による親子池の決壊事例について報告がされている(堀ら, 2015)。平成21年7月中国・九州北部豪雨においては、被害が甚大だった防府市で、全ため池の9割で土砂流入があった(田上, 2010)。また、同豪雨では、山陽新幹線の上流50mほどの位置に堤体があるため池について、洪水吐の機能により貯水上昇が低減され、ため池下流への土砂災害の低減事例もあった(毛利ら, 2015)。平成26年8月の豪雨では、広島市での豪雨で発生した土石流に対してため池による減災効果を、災害前後の標高差分により評価している(正田ら, 2015a)。また、洪水吐天端と堤頂天端の差が大きい、つ

まりバッファ容量が大きかったため池の土砂流入被害の抑止効果について言及している(堀ら, 2015)。同じく平成26年8月の豪雨でため池への土砂流入のあった丹波市の事例においては、築造時期不明の古いため池が、洪水吐改修により決壊を免れた(小田ら, 2015)。

本報は、平成26年8月豪雨のうち、京都府福知山市と兵庫県丹波市で土砂災害のあったため池を対象に実施した調査を報告するものである。平成26年8月15日から20日にかけて、前線が本州付近に停滞し、西日本と東日本の広い範囲で大気の状態が非常に不安定となった。15日から18日までに観測された最大48時間降水量が、京都府福知山市福知山で341.0 mm、兵庫県丹波市柏原で278.5 mmとなり、それぞれ観測史上1位の値を更新した(気象庁, 2014)。上記の豪雨時の土砂災害で被災した近畿地方のため池8ヵ所を対象として、以下の、①土砂災害警戒情報の算出手法の一つであるRBFネットワークによるため池周辺での被災日における土砂災害発生危険度の把握、②現地調査により、ため池被災時の事象とため池の機能について整理、③ため池への流入土砂の定量化するため、ため池上流からの流入土砂量の試算を実施した。

II 対象ため池の概要

調査や土砂量の試算を行った本報の対象ため池の場所をFig. 1に、ため池の諸元をTable 1に示す。洪水吐の断面図についてはFig. 2に示す。Fig. 1の背景図は国土地理院 地理院地図 写真判読図を使用しており、8月19日撮影垂直写真及び斜め写真から、土砂流出範囲を赤の範囲ように判読したものである。図中①～⑧が対象ため池

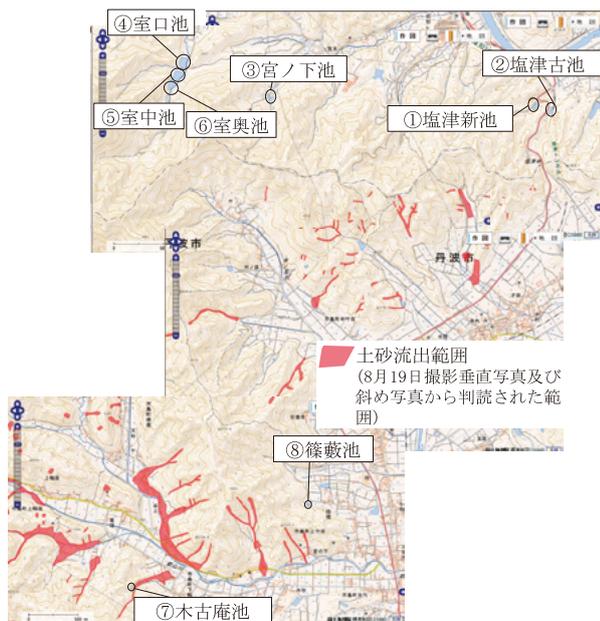


Fig. 1 調査ため池の場所 (引用 国土地理院 地理院地図 写真判読図 (8月19日撮影垂直写真及び斜め写真の範囲から土砂流出範囲を判読したもの))
Survey sites of small earthfill dams

Table 1 調査ため池の諸元
Dimension of the dams

	堤高 (m)	貯水量 (m ³)	堤長 (m)	洪水吐
①塩津新池	6.7	10,000	31	側水路流入型 幅1.9 m × 高さ0.8 m
②塩津古池	4.8	3,000	22	水路流入型 幅1.0 m × 高さ0.6 m
③宮ノ下池	5	4,000	45	正面越流型 幅3.8 m × 高さ1.1 m
④室口池	9.3	21,000	82	側水路型 幅3.0 m × 高さ3.6 m
⑤室中池	8	16,000	153	正面越流型 幅3.1 m × 高さ1.6 m
⑥室奥池	6.8	36,000	64	水路流入型 幅3.6 m × 高さ0.8 m
⑦木古庵池	4	3,000	43	水路流入型 幅1.0 m × 高さ1.5 m
⑧篠藪池	4.5	500 (推定)	55	水路流入型 幅2.0 m × 高さ0.7 m

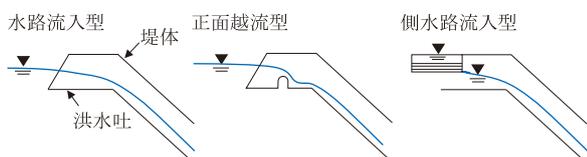


Fig. 2 洪水吐の断面図 (農林水産省, 2015)
Cross section of spillway

であり、ため池の位置と崩壊判読位置を比較すると、⑦を除くため池については、判読されていない小規模な崩壊あるいは判読対象にならなかった地域においてため池が被災したことがわかる。また、①池と②池は近接しているが、重ね池ではない。④～⑥池は⑥が上流、④が下流に位置する重ね池である。

Ⅲ ため池周辺での土砂災害発生の危険度

3.1 土砂災害発生危険度の算出

気象庁では、土砂災害発生の危険度について土砂災害警戒情報として防災情報を発信している。住民や行政機関で一般的な防災情報として利用されている土砂災害警戒情報は、土砂災害発生の危険度を5段階に区分した判定結果を表示している。本項では、区分前の元データを算出し、ため池周辺での被災日における土砂災害の危険度について把握を試みた。

土砂災害警戒情報の算出手法の一つとして、RBFネットワーク (たとえば、倉本ら, 2001) を用いた土砂災害発生基準線がある。本報では、福知山市と丹波市におけるそれぞれ1箇所のため池③宮ノ下池と⑦木古庵池周辺において、土砂災害発生基準線の基となる応答曲面を「RBFネットワークを用いたCL作成プログラム」により求めた。この応答曲面から、ため池周辺の土砂災害の危険性について把握した。解析に用いたデータは、対象ため池周辺の災害発生時のレーダーアメダスと、過去の雨量 (気象庁の5 kmメッシュの1時間レーダーアメダス 2001～2014年分) をため池DBハザードマップにより抽出した。ここで、「ため池DBハザードマップ」は、平成7年より現 (一財)日本水土総合研究所と(株)ジーンアンドエス、現農研機構農村工学研究所により開発された「ため池防災データベース」を逐次改良したものである。また、土壌雨量指数については、直列3段のタンクモデルを使用した。(気象庁, 2015b)

3.2 応答曲面の算出結果

得られた応答曲面の出力値を、60分間積算雨量と土壌雨量指数の最大値で縦軸・横軸に平行になるようデータを補正 (国土交通省, 2005) した。ため池周辺の雨量データによる応答曲面を **Fig. 3** に示す。2つのため池とも被災したのは8月17日未明であり、0.1の曲面より小さい領域でプロットされている。60分間積算雨量と土壌雨量指数のデータが密にプロットされる領域ではRBFネットワークの出力値が高くなり、疎の領域では出力値が低くなる。よって、数値が小さいほど土砂災害の危険性が高くなる。このことから、対象ため池周辺においても、被災日時において土砂災害の危険性が高かったことがわかる。

IV 被災ため池の調査

平成26年8月に発生した台風11号の豪雨により、京都府、兵庫県においてため池が多数被害を受けた。被災原因の究明や今後の防災対策等のため、農林水産省防災課から農村工学研究所に対して災害対策支援要請があった。これを受け平成26年9月26日に、Fig. 1およびTable 1に示す被災ため池の調査を実施した。踏査を基本とする調査結果について以下に記載する。

4.1 ①塩津新池

Fig. 4に①塩津新池の撮影位置図を示す。Fig. 4中の1

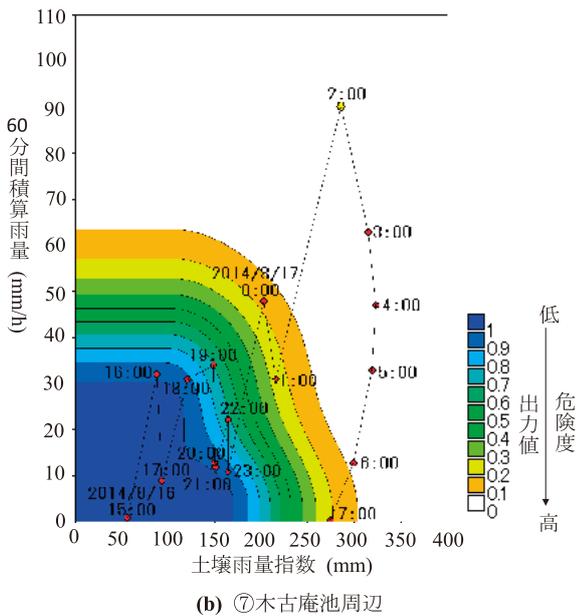
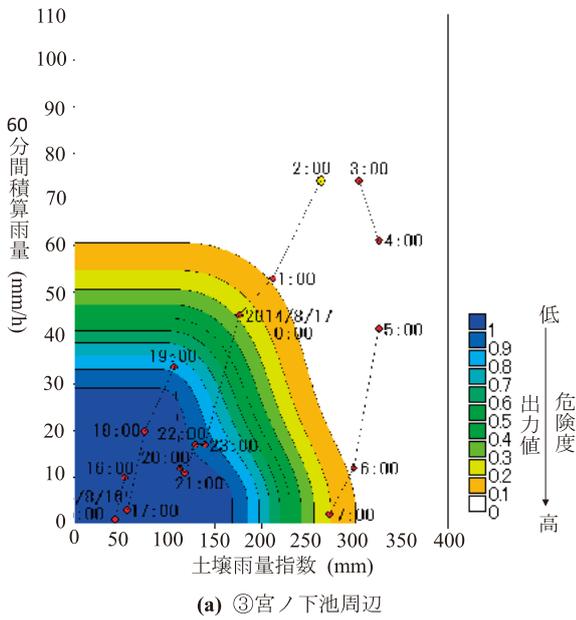


Fig. 3 ため池周辺の雨量データによる応答曲面

Critical line of slope failure during heavy rain around small earthfill dams

にあたる Fig. 5のため池貯水池左岸側に沿う道路面（舗装なし）が侵食されていたこと、堤体天端と約0.4 mの標高差（道路側の貯水池法面が低い）があることから、

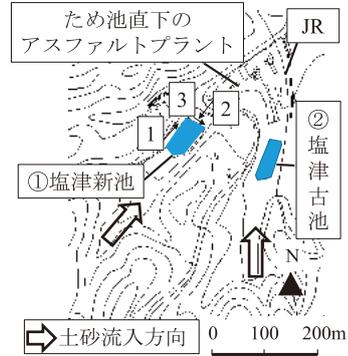


Fig. 4 ①塩津新池の撮影位置図（国土地理院基盤地図情報）
Location map of photographs at ① Shioitsu shin-ike



Fig. 5 ①池の左岸側に沿う道路
Road along left side of ① ike



Fig. 6 ①池の貯水池内に流入した土砂
Sand and wood flowed into ① ike



Fig. 7 ①池の洪水吐の状況
Spillway of ① ike

上流側からの土砂や水が左岸側に沿う道路面を流下したものと推察される。堤体には決壊等の大きな被災はなかった。

調査日においても、本池上流からの土砂や流木が Fig. 6 のように堆積していた。下流側法面に越流による流木ならびに侵食跡があり、越流があったと判断できる。Fig. 7 のように洪水吐には流木が堆積していたものの、閉塞はしていなかった。地元では、被災一か月前に間伐を行ったとのことだった。この際、間伐材の搬出は行っていないとのことだったので、この影響が示唆される。

本池から流出した土砂や水の影響で、堤体直下にあった道路の舗装面がめくれ、またその下流にあるアスファルトプラント (Fig. 4 中記載) へ土砂が流れ込んだ。本池では越流が発生し、下流に対して被災を招いたものの、流入土砂の多くはため池で受け止められたと判断できる。

洪水吐が正面越流型であったことや、堤体に変形が生じていないことから判断して、塩津新池のため池施設は比較的最近に改修が行われているものと考えられる。また、堤体下流側と道路法面が接していて、腰ブロックは底樋の出口付近に一部設置されている。堤体の草刈りが行われていることから、ため池管理者による日常的な維持管理は行われているものと考えられる。

4.2 ②塩津古池

Fig. 8 に②塩津古池の撮影位置図を示す。堤体左岸側が Fig. 9 のように決壊していた決壊部の堤体断面の観察から、堤体材料は粘性土である。また、堤体が残っていた右岸側の貯水池堤体付近には上流側から流出した土砂はほとんど見られなかった。

洪水吐は石積であり、取水施設は場所打ちコンクリートで作られ木栓を用いた古い形式であった。堤頂幅が狭いなど堤高に対して堤体断面が小さく、張ブロックはない。また、腰石垣もないことから、土地改良事業設計指針「ため池整備」に準じて整備されたため池よりも堤体強度は小さかったと考えられる。また、洪水吐の放流能力や余裕高が不足していた可能性が高く、未改修であったことが堤体の決壊を招いた素因の一つとして考えられる。さらに、上流側法面は波浪による侵食跡が見られ、下流側法面には小さな横穴が生じているなど、堤体の老朽化が進んでいた。

草丈が短く、灌木類の侵入が無いことから草刈りが行われていると判断できること、上流側法面の一部が土のうで補修されているなど、ため池管理者による日常的な維持管理は行われていると考えられる。

ため池下流には、貯水や土砂の影響により、下流にあったプラントへ土砂流入があった。調査日にはすでに大部分は撤去されていたが、高さ約 1.4 m の位置に土砂の痕跡があった。ただし、左岸側直下流の地山でも、土

砂の崩壊が見られ、ため池下流にあったこの斜面崩壊の土砂もプラントへ流出している。

ため池上流部の勾配は、緩勾配であったため、Fig. 10 のように貯水池上流側で土砂の一部が堆積していた。貯水池流入部を緩勾配にすることで、流入土砂の減勢や流出土砂の抑制につながると考えられる。

4.3 ③宮ノ下池

Fig. 11 に③宮ノ下池の写真位置を示す。Fig. 12 (Fig. 11 の 1 の位置) に示すように左岸側の洪水吐のコンクリート構造物と堤体土の境界部が決壊位置であった。Figs. 13, 14 のように貯水池内には上流からの土砂が洪水吐吐端まで堆積していた。調査日には、決

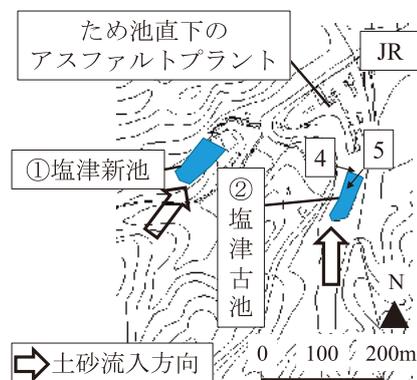


Fig. 8 ②塩津古池の撮影位置図 (国土地理院基盤地図情報)
Location map of photographs at ② Shioitsu furu-ike



Fig. 9 ②池の決壊断面
Cross section of failure part at ② ike



Fig. 10 ②池の貯水池内に流入した土砂
Sand and wood flowed into ② ike

壊部と堤体の上にそれぞれ土嚢が積み、ため池上流部とため池貯水部のそれぞれの土砂流出に対する応急対策が施されていた。洪水吐が正面越流型であることや、堤体下流側に抑え盛土がされていたことから、比較的最近

に改修が行われたものと考えられる。決壊の程度が小規模であった要因として、洪水吐天端まで土砂が達していることから、改修された洪水吐からの土砂・水を流出させることにより堤体越流量が抑えられたことが考えられる。

ため池下流側については、堤体天端と下流側法面に流木等が堆積していたこと、下流側法面に侵食跡があることから、越流が発生したと判断できる。洪水吐に接続する下流水路には溢水の痕跡が認められたが、本ため池においては、流入土砂・流木の大部分をため池で止めたあるいは減勢したと考えられる。流木に関しては、堤体側で確認され、洪水吐周りでは確認されなかった。仮に、流木が流入した場合には洪水吐が閉塞され、さらに被害が拡大した可能性があり、ため池における流木対策も今後の検討課題として考えられる。また、ため池の上流部に砂防堰堤が1か所確認でき、砂防堰堤周辺でFig. 13のように流木が多く堆積していたことから、この施設による減勢効果もあり、ため池での越流や堤体への衝撃力を緩和したと考えられる。

堤体の草刈りが行われていることから、ため池管理者による日常的な維持管理はなされているものと考えられる。

4.4 ④室口池（三連下池）

Fig. 15に④室口池の撮影位置図を示す。調査日においては、貯水位は下げて管理されていた。以下の⑤室中池・⑥室奥池も同様である。室口池は、最近改修されたため池で、堤体には腰ブロックが設置され、洪水吐（Fig. 16）も改修されていた。堤体や洪水吐に対しても損傷が認められなかった。

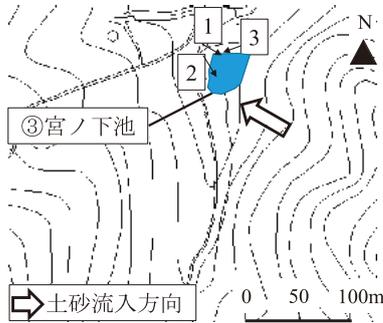


Fig. 11 ③宮ノ下池の撮影位置図（国土地理院基盤地図情報）
Location map of photographs at ③ Miyanoshta-ike



Fig. 12 ③池の土砂流入による被災状況
Disaster site of ③ ike due to debris flow



Fig. 13 ③池の貯水池内に流入した土砂
Sand and mud flowed into ③ ike



Fig. 14 ③池の洪水吐天端まで達した土砂
Sand and mud above spillway of ③ ike

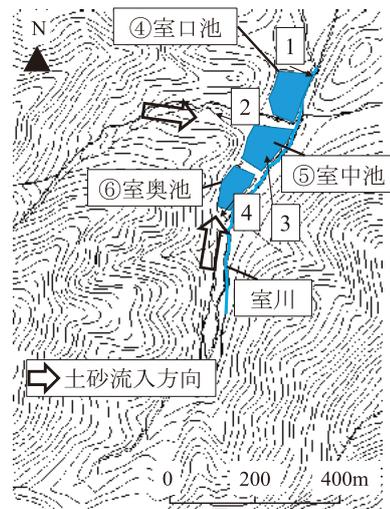


Fig. 15 ④室口池⑤室中池⑥室奥池の撮影位置図（国土地理院基盤地図情報）

Location map of photographs at ④ Murokuchi-ike, ⑤ Muronaka-ike and ⑥ Murooku-ike

ため池左岸にある地山からも、ため池貯水池内に土砂が流入した (Fig. 17)。ため池と接する地山斜面にはレキ分が多く堆積していた。細流分を除き、下流河川への土砂や流木の流出が認められないことから、ため池で土砂を受け止めたと考えられる。

降雨と土砂の流入があったが、越流は生じなかった。このことから、洪水吐の放流能力や堤体の余裕高が、防災上十分なものであったと推察される。また、上述のことから減災機能の検討にあたっては、流入水量のみならず流入土砂量についても推定する必要性が示唆される。

調査日においては、ため池右岸上流部で崩壊した河川堤防部の仮復旧がなされていた。堤体は草刈りが行われていたことから、ため池管理者による維持管理はなされているものと考えられる。

4.5 ⑤室中池 (三連中池)

室中池では、Fig. 18のように流木や礫等の流入はほとんど見られず、水と一緒に流入した細流分が主に流入したのと考えられる。また、池底にある全ての土砂が本災害によって堆積したかは不明である。

堤体や洪水吐の損傷は無かった。但し、取水施設が傷んでおり、仮設サイホンによる取水を行っていた。取水施設の傷みと災害の関係は不明である。下流側法面には表面が洗われて石が露出した箇所があるものの、越流の存在を明確に認める痕跡は存在しなかった。

目視により洪水吐コンクリートは打設から年数が経過

していたことや取水施設の現状から、比較的最近に改修は行われていないと考えられる。また下流側法面下部に盛土部 (地山の可能性あり) があることから、腰石垣・張ブロックの設置はされていない。

草刈りが行われていたことから、ため池管理者による維持管理はなされているものと考えられる。

4.6 ⑥室奥池 (三連上池)

貯水池最奥部は谷の出口にあたり、右岸側の川を通じて上流から流れてきた土砂と流木が貯水池内に流入した (Fig. 19)。土砂と流木は河道だけでなく、谷幅一杯に流れた痕跡がある。

草の傾きと土粒子の痕跡から、室川側に越流が発生したと判断できる。川から貯水池への取水口は土砂で完全に閉鎖していた。但し、堤防の損傷はない。ため池堤体については越流を認める痕跡は存在しなかった。

細流分を除き、ため池堤体下流側への大量の土砂や流木の流出が認められないことから、ため池で土砂を受け止めたと考えられる。取水施設が巻上げハンドル付きの斜樋工であること、堤体の斜面勾配から、比較的最近に改修がおこなわれているものと考えられ、ため池内に土砂を留めた要因と考えられる。また、ため池上流に砂防堰堤があったことも、ため池での越流防止や堤体への衝撃力の緩和の要因と考えられる。

ため池上流側においては、危険渓流の把握や、流入土砂量の推定、流入土砂による衝撃力の試算、貯水池上流



Fig. 16 ④池の洪水吐
Spillway of ④ ike



Fig. 18 ⑤池貯水池内の堆砂状況
Sand and mud flowed into ⑤ ike



Fig. 17 ④池左岸上流部から流入した土砂
Sand and mud flowed from left side bank upstream of ④ ike



Fig. 19 ⑥池上流部の状況
Upstream of ⑥ ike

の砂防堰堤の把握等により、ため池による減災効果や貯水池手前での減勢効果・方法について検討することが重要になると考えられる。

草刈りが行われていたことから、ため池管理者による維持管理はなされているものと考えられる。

4.7 ⑦木古庵池

Fig. 20 に⑦木古庵池の撮影位置図を示す。堤体左岸側が決壊しており、流木が多く堆積していた (Fig. 21)。堤体上にも流木と土砂が堆積しており、また下流側法面には浸食跡があることから、越流が発生していると判断できる (Fig. 22)。堤頂幅が狭く、堤高に対して堤体断面が小さく、腰石垣が設置されていなかったことから、土地改良事業設計指針「ため池整備」に準じて整備されたため池よりも堤体強度は小さかったと考えられる。また、洪水吐の放流能力や余裕高が不足していた可能性もあり、未改修であったことが堤体の決壊を招いた素因の一つとして考えられる。

越流で堤体表面が Fig. 22 のように侵食されていることから、草刈りなどの現況に基づくため池管理者による管理状況は判断できなかった。洪水吐についても、流木と土砂が堆積しており、越流発生時には閉鎖していた可能性が高い。洪水吐の形式等から、最近の改修は行われていないと見られる。なお、張ブロックの設置はされて

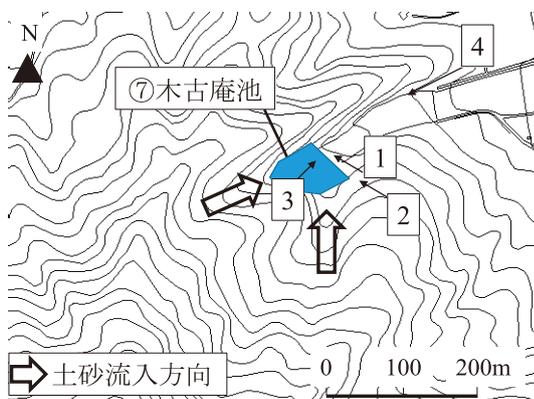


Fig. 20 ⑦木古庵池の撮影位置図 (国土地理院基盤地図情報)
Location map of photographs at ⑦ Kikoan-ike



Fig. 21 ⑦池の決壊断面
Cross section of failure part at ⑦ ike

いなかった。

貯水池内には上流側から流れ込んだ土砂が水平に堆積していた (Fig. 23)。貯水池内は水を貯めるために勾配が緩くなっており、また、貯水池内には土砂の流入当時水が存在していたことから、流下する土砂のエネルギーは減勢されたことが考えられる。

直下流は地形から元農地であったと考えられる。堤体が決壊し、下流側へ一部土砂の流出が発生していた (Fig. 24)。

氾濫水は谷に沿う水路を通じて流下している。水路のコンクリートフリユームは水流と土砂でほぼ破損した状態にあった。

4.8 ⑧篠藪池

Fig. 25 に⑧篠藪池の撮影位置図を示す。土砂と流木が流入し、堤体の天端高さまで埋没していた (Fig. 26)。



Fig. 22 ⑦池の侵食された下流法面
Eroded downstream slope of ⑦ ike



Fig. 23 ⑦池の貯水池内の流入土砂
Sand and wood flowed into ⑦ ike



Fig. 24 ⑦池下流部の堆積土砂
Deposited sand at downstream part of ⑦ ike

堤体天端の流木と土粒子の痕跡の状況から、堤体の越流が発生したと判断される。洪水吐にも土砂の堆積が認められた。堤体に大きな破損は認められない。洪水吐の破損もない。

ため池下流の水田にもため池を越流した土砂が流れ込んでいるものの、水田への流入土砂量は少ない (Fig. 27)。また、水田への流入土砂は細流分が主体である。下流側への大量の土砂や流木の流出が認められないことから、ため池で土砂の大部分を受け止めたと考えられる。

洪水吐は新しい形式に改修されているものの、放水路の下部は石積のままであることから、部分改修が行われた可能性がある。また、腰石垣や張ブロックは確認できなかった。

草刈りが行われていたことから、ため池管理者による

維持管理はなされているものと考えられる。

V 被災事象とため池機能の整理

本調査対象ため池において、改修・越流・決壊・土砂流入・上流からの土砂流出抑制の項目ごとの整理を Table 2 に示す。3連ため池の中池で、土砂流入の痕跡や大きな損傷が見られなかった⑤池を除いている。

改修については、洪水吐と取水施設の形式、堤体の形状等から現場で判断して、表中に整理しており、④池のみ近畿農政局からの情報に基づいている。本調査のため池においては改修されたため池4か所のうち1箇所 (③池) が決壊している。しかしながら、前述のとおり下流域への被害は軽微で、貯水池内で土砂を留めていた。

ため池の堤体越流については、現地調査時の堤体上部の痕跡あるいは聞取りから区分している。越流した4か所のうち2か所で決壊しており、決壊したため池3箇所のうち2箇所で越流している。

調査実施した全てのため池について土砂の流入は確認された。決壊した3箇所の池のうち2箇所については、下流のプラント (②池) や農地 (⑦池) へ土砂が堆積した。残りの池 (③池) については決壊したが、ため池貯水池内で土砂を受け止めて、下流への被害は上述2か所と比較して軽微であった。なお、決壊ため池の貯水量は 3,000 m³ ~ 4,000 m³ である。

ため池貯水池内にある堆砂の状況から判断すると、いずれの池にも上流から発生した土砂が堆積していることから、下流への流出を抑制したと考えられる。一方で、傾斜地にある小規模なため池の堤体が決壊した場合には被害が拡大する可能性がある。土石流流速においてはマニング型の式で定式化されている (国土交通省国土技術政策総合研究所, 2007)。

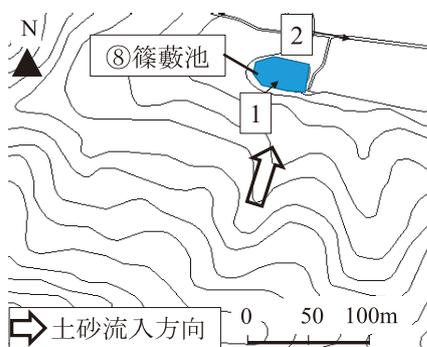


Fig. 25 ⑧篠藪池の撮影位置図 (国土地理院基盤地図情報)
Location map of photographs at ⑧ Shinoyabu-ike



Fig. 26 ⑧池貯水池内の堆積土砂
Deposited sand of ⑧ ike



Fig. 27 ⑧池の下流部
Downstream site of ⑧ ike

Table 2 本調査での項目ごとの整理
Arrangement of each content on this survey

	改修	越流	決壊	土砂流入	上流からの土砂流出抑制
①塩津新池	○	○		○	○
②塩津古池			○	○	△**
③宮ノ下池	○	○	○	○	○
④室口池	○			○	○
⑥室奥池	○			○	○
⑦木古庵池		○	○	○	○
⑧篠藪池	△*	○		○	○

* : ⑧池は、洪水吐と堤体内の導水路部についてはコンクリートで改修されていたが、放水路の一部は石積みのみであった。

** : ②池は、決壊部分の堤体土は流出したが、貯水池上流側に流入土砂は堆積していた。

$$U = \frac{1}{K_n} D_r^{2/3} (\sin \theta)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 U (m/s)は土石流の流速、 D_r (m)は土石流の径深、 θ は溪床勾配、 K_n ($s\ m^{-1/3}$)は粗度係数である。つまり、上流からの土砂がため池貯水と混じり、流下土砂の容積・径深が増えて、粗度係数が小さくなった場合には、被害の範囲を広げる可能性もある。ため池の土砂流出抑制に関しては、これまでの災害事例収集や今後の事例収集、さらにこれまでの事例において上流側の地形勾配や土質、雨量等から知見の整理が必要である。

Ⅵ 流入土砂量についての試算

6.1 土砂量の算出方法

ため池直上流の勾配やため池の貯水容量、洪水吐の排水能力等によっては、ため池下流への土砂流出を抑制する砂防堰堤的な機能が期待される。この機能を評価するためには、ため池上流から流入土砂量の目安を把握することが重要と考えられる。

土石流対策および流木対策の基本的な考え方と河川砂防技術基準計画における必要最小限準拠すべき事項が、砂防基本計画策定指針において示されている。本報では、⑦と⑧ため池上流を対象に、上述の砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説（国土交通省国土技術政策総合研究所（2007））で示されている試算式による土砂量と、航空レーザデータから求めた侵食量、ため池の貯水量を比較した。なお、調査対象ため池上流溪流では巨礫を含む土石流災害は発生していないが、「砂防基本計画策定指針」（国土交通省国土技術政策総合研究所，2007）の中で、保全対象の一つに「土石流危険溪流」があり、調査対象池については1箇所の池以外で「土石流危険溪流」内もしくは下流に位置したため、流入土砂量の試算は土石流対象の式を用いて行った。

計画流出土砂量の算出にあたっては流域内の移動可能土砂量 V_{dy1} と計画規模の年超過確率の降雨量によって運搬できる土砂量 V_{dy2} を比較して小さい方を採用することとしている。しかしながら、 V_{dy1} の算出にあたっては、土石流発生時に侵食が予想される平均溪床幅や、土石流発生時に侵食が予想される溪床堆積土砂の平均深さ、現地調査、近傍溪流における土石流時の洗掘状況等の参考情報が必要であり、調査を実施しなければ算出が困難である。そこで、本報においては V_{dy2} を算出することにより、発生する土砂量について試算した。試算式は以下の式である。

$$V_{dy2} = \frac{10^3 \cdot P_p \cdot A}{1 - K_v} \left[\frac{C_d}{1 - C_d} \right] K_{J2} \quad (2)$$

ここで、 V_{dy2} (m^3)は計画規模の年超過確率の降雨量によって運搬できる土砂量、 P_p (mm)は計画規模の年超過確率の降雨量、 A (km^2)は流域面積、 C_d は流動中の土石流濃度、 K_v は空隙率、 K_{J2} は流出補正率である。また、

式(2)中の流動中の土石流濃度 C_d の算出式は以下の通りである。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} \quad (3)$$

σ (kg/m^3)は礫の密度、 ρ (kg/m^3)は水の密度、 ϕ は溪床堆積土砂の内部摩擦角、 θ は溪床勾配である。

未知数については、国土交通省国土技術政策総合研究所（2007）において、参考値が示されており、この値を用いた。

この中で示されていない溪床勾配 θ 、流域面積 A 、降雨量 P_p (mm)については、対象ため池及び災害時の値を用いた。

6.2 航空レーザデータを用いた侵食量の推定

試算値と比較するため、災害前後の2時期の航空レーザデータ（兵庫県庁県土整備部土局砂防課提供）の差分をすることで、ため池の上流域における侵食量について推定した（正田ら，2015b）。災害前は平成25年1月～3月、災害後は平成26年9月、この2時期のデータがある⑦池と⑧池を対象としている。差分の結果、⑦池流入域の侵食量 E は $5,832\ m^3$ 、⑧池流入域の侵食量 E は $2,762\ m^3$ であった。本報ではこの値の土砂が下流のため池へ流出したものと考察を行った。

6.3 土砂量の算出結果

⑦池と⑧池における溪床勾配 θ と、流域面積 A 、降雨量、土砂量 V_{dy2} 、6.2で求めた侵食量 E を **Table 3** に示す。降雨量は決壊日2014年8月17日のデータを使用し、この日の最大雨量を記録した2:00までの24時間雨量をそれぞれのため池で用いた。また、溪床勾配は、約200 m上流の谷筋に点をいくつか設け、その2点間距離の重み付き平均値として以下の式で求めた。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4)$$

ここで、 L_i は2点間距離、 θ_i は2点間勾配である。

算出結果は、⑦池の土砂量 V_{dy2} は $33,856\ m^3$ 、⑧池上流の土砂量 V_{dy2} は $9,905\ m^3$ であった。いずれのため池においても侵食量 E よりは大きくなっていった。また、それぞれのため池の V_{dy2} は、侵食量 E の約6倍（⑦池）、約3倍（⑧池）となっており、算出結果は安全側の試算値と

Table 3 侵食土砂量の算出結果
Calculation result of eroded transportable debris flow

	平均溪床 勾配 θ (°)	流域面積 A (km^2)	24時間 雨量 (mm)	土砂量 V_{dy2} (m^3)	侵食量 E (m^3)
⑦木古庵池	15.2	0.1	346.1	33,856	5,832
⑧篠藪池	20.0	0.03	337.5	9,905	2,762

なり、ため池上流からの流入土砂量の目安として使用できると考えられる。

実際の災害現場適用例ではないが、嶋(2007)の試算でも流域内の移動可能土砂量 V_{dy1} に比して計画規模の年超過確率の降雨量によって運搬できる土砂量 V_{dy2} が9.3倍大きな算出結果となっており、 V_{dy2} が大きな算出結果になる場合を示している。

一方で、中瀬ら(2004)は土石流発生履歴のある3溪流で試算した結果、2溪流において災害記録での流出土砂量より試算値が小さい結果となった。数式(式(2))から算出結果を考察すると、溪床勾配 θ が試算値に与える影響が大きい。本報の適用した2溪流は 15° 以上であり、土石流の発生区間内であった。中瀬ら(2004)の対象とした3溪流の溪床勾配は 3.89° 、 10.66° 、 9.52° であり、本報の勾配より小さいことが影響していると考えられる。また、流出補正率 K_p は、本報では上限値0.5を使用した。ため池上流域の流出補正率がどの程度かを検討する必要がある。

試算値とため池の貯水量(Table 1)を比較すると、試算値の方が1オーダー程度大きくなっている。現地での調査や聞き取りなどから、試算値ほどの土砂の流出は見られなかった。当該ため池については「土石流危険溪流」内もしくは下流に位置しているため、ため池上流からの流入土砂量の目安として試算値は使用できると考えられるが、設定雨量や地形勾配、流域面積の決定について、今後適用事例を増やす必要がある。特に設定雨量については、「土砂災害警戒情報」を土砂災害発生の危険度が高まったときに、都道府県と気象庁が共同で発表している。この発表時の雨量を用いて推定土砂量を算出することで精度の高い算出結果となることが考えられる。

Ⅶ 結 言

平成26年8月豪雨のうち、京都府福知山市と兵庫県丹波市で土砂災害のあったため池を対象に、RBFネットワークによる土砂災害発生危険度の把握、現地調査(平成26年9月26日)、侵食土砂量の試算をそれぞれ実施し、以下の結論を得た。

1. RBFネットワークを用いて土砂災害発生基準線の基となる応答曲面を算出した結果、ため池が被災した8月17日未明において、対象ため池周辺において土砂災害の危険性が高かった。
2. 本調査対象のため池のうち、3箇所のため池において決壊を確認した。
3. 洪水吐と取水施設の形式、堤体の形状等から現場で改修の有無を判断し、ため池4か所が改修されていた。そのうち1箇所が決壊しているが、下流域への被害は軽微で、貯水池内で土砂を留めていた。
4. 越流した4か所のうち2か所で決壊しており、決壊したため池3箇所のうち2箇所越流している。

5. ため池貯水池内にある堆砂の状況から判断すると、いずれの池にも上流から発生した土砂が堆積していることから、下流への流出を抑制したと考えられる。
6. ため池の減災機能の検討にあたっては、流入水量のみならず流入土砂量についても推定する必要性が本調査から示唆される。
7. 一方、ため池の堤体が決壊し、上流からの土砂が貯水と混ざった場合、土石流流速式から判断すると、被害の範囲を広げる可能性もあり、上流側の地形勾配や土質、雨量等から知見の整理が必要である。
8. 既往の試算式からの流入土砂量と、災害前後の2時期の航空レーザーデータの差分からの侵食量とを比較すると、算出量は侵食量の約3~6倍となり、算出結果は安全側な試算値となり、ため池上流からの流入土砂量の目安として使用できると考えられる。
9. 流出補正率は、上限値0.5を使用した。ため池上流域の流出補正率がどの程度であるか等、ため池上流域での土砂量試算について検証が必要である。
10. 試算土砂量とため池貯水量を比較すると、試算値の方が1オーダー程度大きくなっている。現地での調査や聞き取りなどから、試算値ほどの土砂の流出は見られなかった。当該ため池については「土石流危険溪流」内もしくは下流に位置しているため、試算値はため池上流からの流入土砂量の目安として使用できると考えられるが、地形勾配や流域面積の決定について、今後適用事例を増やす必要がある。

謝辞：本報での被災ため池調査に際しては、近畿農政局から2名の同行いただいた。また、京都府・兵庫県等の行政部局に、現場等での対応ならびに情報提供を賜った。

土砂災害発生基準となる応答曲面の算出には、(有)山口ティー・エル・オーの「RBFネットワークを用いたCL作成プログラム」を使用した。また、航空レーザーデータについては、兵庫県国土整備部土木局砂防課より借用した。

本研究の一部は、総合技術会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人JST)によって実施された。関係者各位へ感謝申し上げます。

引用文献

- 堀 俊和, 正田大輔, 中里裕臣, 鈴木尚登, 渡辺博之, 新保義剛(2015): 土石流が流入した場合のため池の安全性および下流域に与える影響, 基礎工, 43(6), 101-104.
- 国土交通省(2005): 国土交通省河川局砂防部と気象庁予防部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法, 8-9.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所(2007): 国土技術政策総合研究所資料 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 7, 32-37.

- 倉本和正, 鉄賀博己, 東 寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平 (2001) : RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50, 117-132.
- 気象庁(2014) (参照2015.9.14) : 前線による大雨 平成26(2014)年8月15日～8月20日, (オンライン), 入手先 < http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2014/20140815/jyun_sokuji20140815-20.pdf >
- 気象庁(2015a) (参照2015.9.8) : 気候変動に適応した治水対策検討小委員会, (オンライン), 入手先 < http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinhonbun.pdf >
- 気象庁(2015b) (参照2015.9.14) : 土壌雨量指数, (オンライン), 入手先 < <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html> >
- 中川 一・高橋 保・里深好文・立川康人・市川 温・吉田義則・中村行雄 (1998) : 平成9年鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害について, 京都大学防災研究所年報, **41 (B-2)**, 287-298.
- 中瀬有祐・藤本睦・江頭進治・伊藤隆郭 (2004) : 流出土砂量予測に関する一考察 - 既存手法とシミュレーションとの比較 -, 第53回平成16年度砂防学会研究発表会概要集, 44-45.
- 農林水産省(2014) (参照2015.9.8) ため池の災害, (オンライン), 入手先 < http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/ >
- 農林水産省(2015) 土地改良事業設計指針「ため池整備」, 63.
- 小田哲也, 三輪 顕, 野村純数, 田中丸治哉 (2015) : 平成26年8月豪雨に伴う兵庫県丹波市の土砂流入ため池被災, 農業農村工学会誌, **83 (8)**, 39-42.
- 嶋 大尚 (2007) (参照2015.9.11) 土石流・流木対策の技術指針に関する講習会 - 計画例・設計例 -, (オンライン), 入手先 < http://www.stc.or.jp/13present/file/071211_jirei.pdf >
- 正田大輔, 吉迫 宏, 堀 俊和, 中里裕臣, 山岸雄一, 鶴殿俊昭 (2015a) : 平成26年度広島豪雨災害におけるため池の土砂被害調査, 平成27年度農業農村工学会講演要旨集, 832-833.
- 正田大輔, 吉迫 宏, 井上敬資, 鈴木尚登, 西川泰史, 本間信一 (2015b) : 平成26年豪雨での土砂流入時におけるため池の被災実態, 土木学会第70回年次学術講演会, 467-468.
- 田上愛仁 (2010) : 平成21年7月中国・九州北部豪雨におけるため池被害対策およびため池の土石流防御・貯留効果, 農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, **65**, 38-40.
- 毛利栄征, 有吉 充, 林 貴史 (2015) : 豪雨時の土砂崩壊とため池の新たな機能, 基礎工, **43 (6)**, 35-38.

受理年月日：平成27年10月27日

Survey of Small Earthfill Dam Damaged by Debris flow due to Concentrated Heavy Rain in August 2014

SHODA Daisuke*, YOSHISAKO Hiroshi*, KONNO Michiaki*,
INOUE Keisuke* and SUZUKI Hisato**

*Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Disaster Prevention

**Department of Planning and General Administration, Senior Disaster Prevention Research Coordinator

Abstract

This study aimed to survey and analyze the small earthfill dams for agriculture in a case of sediment disaster due to concentrated heavy rain. In this paper, subjected to the disaster of sediment flowed into small earthfill dams by heavy rain in 2014, the following three survey and analysis were completed. 1. The danger of sediment disaster was calculated. 2. The survey of broken small earthfill dams was conducted. 3. The volume of sediment was calculated. As the result, the sites around the small earthfill dams were also at increased risk from the analysis result. 3 dams out of 8 surveyed dams were broken by this rain. Verifying the disaster reduction function of small earthfill dams, the function to catch the water, mud, sand and debris should be considered. The amounts of transportable debris flow due to rainfall of yearly exceedance probability of plan scale were larger than the volume of dams. The calculated amount could offer the potential for a better prediction by verifying the parameters in details.

Key words: *Small earthfill dam, Concentrated heavy rain in August 2014, Debris flow, Survey, Calculation of transportable debris flow*

農業水利施設における濁度の遠隔監視と 浮遊物質、全リン、放射性Csの濃度推定

久保田富次郎* 濱田康治* 人見忠良* 申文浩**

*水利工学研究領域水環境担当

**東北農業研究センター農業放射線研究センター

要 旨

近年の情報通信技術の発達に伴い、農業用水の遠隔監視や制御はより低コストで導入ができるようになってきているが、水質保全のような環境配慮を含めた水管理が求められる中で、農業用水の水質遠隔監視はほとんど普及していない。本研究では、水質モニタリングのための低コスト遠隔監視システムの紹介を行うとともに濁度センサーを用いた浮遊物質、全リン、放射性Csの濃度推定について検討を行った。遠隔監視システムの特徴は、1) アナログ8ch、デジタル2chのセンサー入力、2) PCやスマートフォンによる任意時間の採水、3) 携帯通信回線の利用、4) デフォルトで10分間隔の観測、などの特徴を持つ。また、水質濃度の推定では、濁度観測によって浮遊物質濃度が精度よく観測できることが確認されるとともに、全リンや放射性Csの簡易推定が可能となった。その他、現地における長期の濁度観測における問題点についてまとめた。

キーワード：濁度、浮遊物質、全リン、放射性セシウム、遠隔監視

I 緒 言

河川や農業用排水中の懸濁物質は、農業水利施設等への堆積・堆砂の問題を引き起こすとともに、重金属や栄養塩、放射性物質など様々な汚染物質のキャリアとなるため、その動態を把握することは重要である。しかし、懸濁物質は、イオン態などの溶存性物質と比較すると、沈降や巻き上げといった現象により、局所的なシンクやソースの存在や、降雨増水時の集中的な物質移動の影響などのため、物質フローの動態把握には労力を要する重点的な調査を必要とする。

その際に分析が必要となる懸濁物質もしくは浮遊物質 (Suspended Solids = SS) は、水分析の視点からは、「2 mm のふるいを通し、孔径 1 μm の濾過材上に残留する物質」として定義されており (国土交通省, 2009)、一般には現地で採水を行い、実験室に持ち帰って処理したのちに値が判明する。一方、濁度は、カオリンやホルマジン標準液を基準として環境水の濁りの程度を数値化するものであり、センサーを用いて現地で速やかに値を知ることができ、また、センサーを現地に据え付けることで、無人で連続的に観測を行うことができる。一般に濁度が増加すればSS濃度も増加する傾向にあるため、以前より濁度計を用いたSS濃度や土砂流出量の推定 (長沢ら, 1987; 山口ら, 2000; 横山ら, 2008) が行われているとともに、懸濁態栄養塩負荷量の推定 (山本ら: 2003) が試みられている。しかし、濁度とSSや懸

濁態栄養塩との関係は、経験的なものであり、一般に濁度計の種類や地域、水域によって異なると考えられるため、観測地点毎に検討を行う必要がある。また、濁度センサーは、微細ゴミの付着や堆積物、センサー窓の汚れなどの影響を受けるため、長期モニタリングを行う際にはこれらの問題についてあらかじめ検討を行うことが望ましい。

本研究では、これらの課題について、タイプの異なる農村地域の水域を対象として、濁度観測によるSS濃度や栄養塩類の一つである全リン (T-P) 濃度、そして、東日本大震災以降、福島県の一部地域を中心に課題となっている放射性Cs濃度の推定への活用について検討を行う。また、併せて、近年の情報通信技術 (ICT) の進展により導入が容易になってきた遠隔観測を含めて、濁度センサーや遠隔観測機器の運用上の問題についても述べる。これにより、農業農村分野における濁度の遠隔/自記観測を活用した水質モニタリング技術の向上に資する。

II 浮遊物質の動態把握手法

2.1 開水路における土砂と浮遊物質の流れ

我が国では、土砂災害・洪水災害等の問題を抱えていることから総合的な土砂管理の推進が課題の一つとなっており、近年、流域を対象とした土砂動態の実態把握が進められている (末次ら, 2005)。流水で移動する土砂

いわゆる流砂は、粒径や運動形態から一般にウォッシュロード (wash load)、浮遊砂、掃流砂に分類される。掃流砂は流速が限界掃流力を超えた際に、河床近くを滑動、転動、小跳躍などにより移動する大粒径の土砂で構成され、浮遊砂は、掃流力が增大したときに水面付近まで運動範囲を広げた土砂をいう。これらは総称してベッドロードマテリアルと呼ばれ、河床の土砂移動に主体的な役割を果たす。一方、ウォッシュロードは、河川を流下する中で沈降・堆積を生じにくい細粒分でおおよそ0.1 mm以下の微細な土粒子で構成され、通常河床にはほとんど存在しない(黒木, 2006)。浮遊砂量や掃流砂量は、掃流力の大きさによって、空間的には急流部で掃流砂が、緩流部では浮遊砂やウォッシュロードが卓越し、沖積河川では概ね7~8割がウォッシュロードや浮遊砂である(末次ら, 2005)。山口ら(2000)は、石狩川流域の流量観測地点において土砂輸送量の観測と濁度の連続観測から、総浮遊砂量が掃流砂の500~1000倍程度となることを示した。また、末次ら(2005)は、茨城県酒沼川において年間土砂移動量の約9割がウォッシュロードと浮遊砂であることを明らかにした。このように、土砂輸送においてウォッシュロードと浮遊砂が卓越することから総流出量を知る上ではこれらの把握が重要である。

2.2 農村地域における浮遊物質を巡る問題と今後の課題

傾斜地や中山間地が多い我が国では、降雨時や融雪時を中心として森林、農地、市街地等から土砂流出と併せて浮遊物質の流出が生じる。農地の土壌浸食や農林地からの土砂流出に関する研究は、塩野ら(2004)、大澤ら(2008)、池田ら(2012)など多くの研究者によって実施されている。流域を対象とした研究では、長澤ら(2000)は、降雨時の浮流土砂の実態を濁度観測から検討を行い、流域の農地面積率や土地利用が重要な影響因子であることを指摘した。

一方、傾斜地に立地する造成畑地から流出する浮遊土砂は、農地保全や下流域の環境保全の観点から極力低減する必要があるため、中ら(1992, 2008)は掃流砂を排除するための渦動排砂管や微細土砂の制御のための浸透性沈砂池の技術を開発した。その他、圃場の土壌侵食防止技術として多くの技術が開発されている(山本ら, 1995; Shiono et al., 2007)。例えば、長年、河川や海域への赤土流出が課題となっている沖縄県の国頭マージ地帯においては、土壌流出量の実測とその推定方法の改良(酒井ら, 2000)が進められるとともに、土砂に含まれる栄養塩流出とその制御が、サンゴなどの海域の生態系保全上重要であることから観測が行われている(久保田ら, 2011)。また、浮遊物質は重金属の輸送担体としても重要である。松尾ら(2008)は、都市河川における亜鉛の流出特性や存在形態を検討する中で河川水中の懸濁態亜鉛濃度がSS濃度に比例することを示している。

近年、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の放射性物質放出事故の影響で、放射性物質、とりわけ放射性Csの流出、再移動、堆積などの動態把握が大きな課題となっている。これまで実施された放射性物質の移行メカニズム調査において、放射性核種の流出は、土壌浸食に準えて整理されており(Evrard et al., 2015)、この問題でも水系における浮遊物質の把握が課題となる。

2.3 濁度観測とその測定原理

前述のように濁度計を用いたSSや土砂の観測は、その容易さから幅広く行われている。国内の河川では、濁度の自動監視観測所が2009年時点で127ヶ所設置されており、濁度モニタリングが実施されている。濁度計を用いた河川のSS流出量の推定等で問題となるのは、センサーを流水断面内のある場所に固定しなければならず、断面内の濃度分布に対応が難しく、ある程度の誤差を含むことである(長沢ら, 1986)。また、濁度計には粒径依存特性があることが知られており、粒径が大きくなるほど濁度計の出力は小さくなる(横山, 2002)。筑後川流域では、源流に近いほど同じSS濃度に対して濁度の応答が低い現象が観察されており、これは粒径の光学特性への影響(横山ら, 2008)と考えられている。

濁度の測定原理には様々な方法があり、それぞれに得失がある。濁度センサーに用いられる主な測定原理(平野, 2013)は、センサーと水との位置関係やセンサーの構造などから(1)透過光方式、(2)散乱光方式、(3)積分球方式、(4)レーザ方式などに分類される。透過光および散乱光方式は光源や受光部と接する窓の汚れや気泡の影響を受けるといった短所があるものの透過光方式では高濃度試料の測定が可能である。また、透過光散乱光方式では、窓の汚れや気泡の影響を受けるものの、試料色の影響が少なく極低濃度の測定が可能であるという特徴を持つ。散乱光方式の一つである表面散乱光方式は、受光窓が試料水に接触しないため、窓の汚れの影響が少ないという長所があり、比較的高濁度の水に用いられる。濁度計の精度維持管理上は、汚れの影響を減らすことが大きな課題である。河川や用排水路に設置する現地設置型の濁度センサーには、観測窓にワイパーを設け、汚れの影響の低減を図るものが多い。

このほか、湖沼や感潮河川を対象として超音波多層式流速計(ADCP)を用いた濁度の時空間分布の推定法(川西ら, 1998)など、間接的な濁度測定法も検討されている。

Ⅲ 水質水文遠隔監視システム

3.1 システム

近年、携帯通信やセンサー技術を含むICTの発展に伴って遠隔観測技術は大きく発展しており、比較的低

コストで遠隔監視システムの構築が可能である。本研究では、センサーによる遠隔監視と自動採水器の制御を可能とした水質水文遠隔監視システム（久保田ら，2015a）を用いた。

システム構成を Fig. 1 に示す。本システムは、携帯データ通信を用いて、ネットワークデータロガーを核として、8 chのアナログセンサー入力と1 chのパルス入力、印可電圧の制御、ならびに自動採水器の制御を可能とする遠隔監視システムである。アナログセンサー入力は、電圧0-5 Vの入力を基本として、変換器等を通じて電流入力や白金測温器など各種のセンサー入力に対応する。

本研究で使用した濁度センサーは、4～20 mA 電流出力であるが、変換器を通じて電圧に変換して接続される。パルス入力には、雨量計の他、水道メータなどの流量計を接続できる。また、バッテリーの電圧は、電圧を変換することで監視が可能である。

現地で取得されたデータは、基本的に10分毎に携帯通信を通じてデータサーバに蓄積され、利用者は、PCやスマートフォンからデータにアクセスができる。Fig. 2に、Webブラウザを用いてデータサーバにアクセスした際に表示されるPCの画面を示す。画面中央の表には、接続されたセンサーの種類と観測値が示されるとともに、警報メールや自動採水器を用いた条件採水のためのセンサーの閾値が示される。

画面左下の「ダウンロード」ボタンを押下すると、最長2ヶ月分のデータがCSV形式でダウンロードされる。

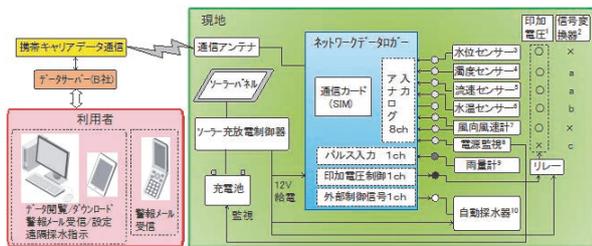


Fig. 1 水質水文遠隔監視システムの構成

Composition of Water Quality Remote Monitoring System (WQRMS)



Fig. 2 遠隔監視システムのPC画面
PC screen of WQRMS

また、画面右下の「接点出力手動ON」ボタンを押下すると、任意の時間で自動採水器による採水が可能である。

なお、Webブラウザからの閲覧では、閲覧時のデータの値表示に限られ、最近のデータのグラフ化などはできない。そこで、PCに専用ソフトウェアをインストールし、使用することで、観測値の推移をグラフで直感的に把握することが可能である (Fig. 3)。

Fig. 4にシステムの主要部の写真を示す。

3.2 システムの設置と活用の事例

Fig. 5に遠隔監視システムの農業用水路や用水の取水口への設置事例を示す。

Fig. 6に遠隔監視システムで取得されたデータの例を示す。これは、福島県相馬郡内のため池における観測データであり、2014年10月の台風19号通過前後のため池流出水の水位(青実線)と濁度(茶実線)、および遠隔操作により採取した水試料に含まれるCs-137の濃度(赤丸)を示している。従来、自動採水器による水試料の採取は、定時採水か、水位や雨量もしくは濁度センサー等の出力との連動により行っていたが、本システムを利用すると、任意のタイミングで採水器を作動させ、試料を

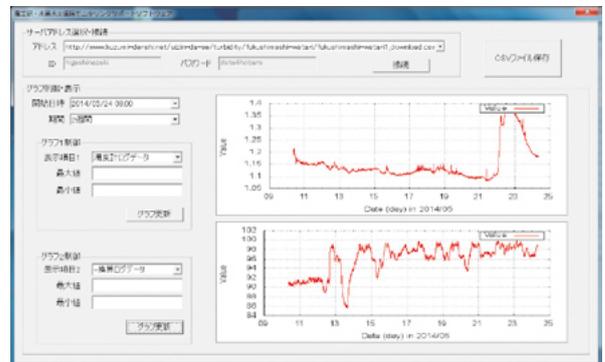


Fig. 3 グラフ化プログラムの画面 (PC)
Support software for monitoring and graphing

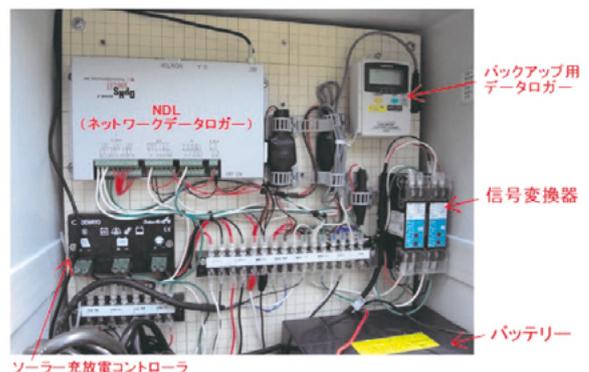


Fig. 4 遠隔監視システムの主要部
Internal photo of observation box of WQRMS

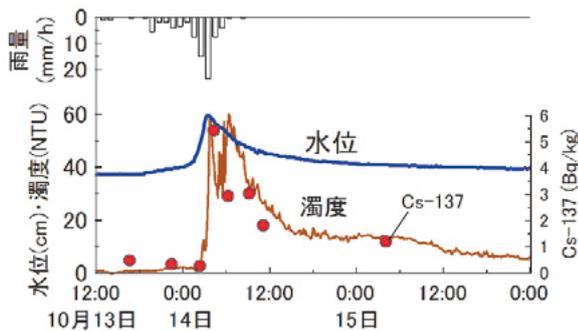


(a) 農業用水路



(b) 農業用水取水口

Fig. 5 遠隔監視システムの設置事例
Installation cases of WQRMS



(福島県飯館村ため池流出水, 2014年10月13日~15日)

Fig. 6 遠隔監視システムにより取得されたデータの例
An example of acquired data by WQRMS

採取することが可能である。また、環境水に含まれる比較的濃度の放射性Csの分析には、関連する水質分析を含めサンプルの量として3L程度を要するが、この場合、自動採水器(ISCO3700型)を用いると採水回数は最大で8回に限られることになる。定時採水やセンサーとの単純な連動では、採水回数が限定されている場合、

意図したサンプルの取得は困難であることが多い。加えて、本ため池は、立ち入り制限区域にあり、実際に現地で行う採水調査において時間的制約が厳しい中で、本例では、一降雨イベントに対応するため池流出水の濁度変動に追従し、水質試料をタイミングよく採取することに成功している。

3.3 システムのコスト

この遠隔監視システムに要するコストは、濁度観測のみの最小セットを考えると、濁度センサー(約25万円)を含めて合計51万円であった。これに使用する機能により、水温計で1万円、水位計で3~11万円、自動採水器で50万円程度の追加費用を要する。また、通信費とデータサーバ利用費で合わせて月額0.6万円程度がかかる。システムの設置や管理を外部に委託する場合、それらの費用も考慮する必要がある。

IV 研究方法

本研究では、はじめに、携帯型濁度計により得られた濁度とSSの関係を検討し、次に、遠隔または自記観測により得られた濁度とSSおよびT-P、放射性Csの関係について検討を行うとともに、遠隔または自記記録で濁度観測を実施する際に生じた問題点や課題等について検討を行った。

4.1 携帯型濁度計による濁度とSSの関係の検討

携帯型濁度計による濁度とSSの関係を、福島県内の河川1地点(阿武隈川水系広瀬川・大関, A地点)、幹線農業用水路2地点(阿武隈川水系の用水路における上流B地点および中流C地点)、支線用水路1地点(福島市内D地点, 小河川から引水)および、ため池流出水1地点(福島県相馬郡内ため池E地点(久保田ら, 2015b), 斜樋流出水)において行った(Table 1)。調査期間は、2013年4月より10月とし、採水は、地点A, B, Cでは、流心において表層よりバケツ採水を行い、地点D, Eでは流心で直接採水した。

濁度の現地測定には、携帯型濁度計(東亜DKK製TB-25A)を用いた。TB-25Aは、90度散乱光測定方式であり測定範囲は、0~800 NTU、分解能は1 NTUである。携帯型濁度計を用いた測定では、センサーを河川や用水路に浸けるのではなく、採水したバケツ内の試料水にセンサーを浸漬させて、十分攪拌を行いながら安定した濁度を記録した。ここで、基本的に濁度測定を行ったバケツ内の試料の一部をSS分析に供した。なお、前述のようにSSの分析には、孔径1 μ mの濾過材を用いることとなっているが、本研究では、孔径0.4 μ mのガラス繊維濾紙(アドバンテック東洋製GB140)を用いた。多数のサンプルで孔径の違いによる影響が小さいことを確認した上で、ここで得られた値をSS値として扱った。

Table 1 調査地点 Study site

地点	属性	調査期間	濁度・SSの現地観測		連続観測		備考
			採水位置／方法	観測回数	濁度	自動採水	
A	河川	2013/4～10	流心・表層／バケツ	72			伊達市梁川町大関
B	農業用水（幹線・上流）	2013/4～9	流心・表層／バケツ	15	○	○	阿武隈川水系農業用水
C	農業用水（幹線・中流）	2013/4～9	流心・表層／バケツ	12	○	○	阿武隈川水系農業用水
D	農業用水（末端・圃場）	2013/5～9	流心／バケツ	7			小河川を起源とする農業用水
E	ため池流出（斜樋）	2013/6～10	流心／バケツ	9	○	○	相馬郡飯館村長泥地区

* 連続観測の濁度の欄は、濁度センサーを用いた連続観測を行った地点（○印）を示し、自動採水の欄は自動採水を行った地点（○印）を示している。

4.2 遠隔／自記観測による濁度と水質項目の関係の検討

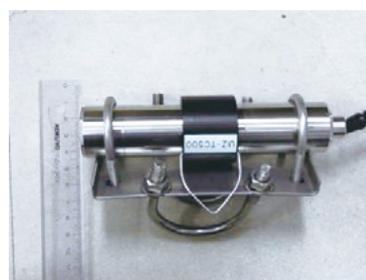
遠隔・自記観測装置により得られた濁度と水質項目の関係を検討した。調査箇所は、千葉県成田市内の印旛沼集水域内の円筒分土工（地点①）、および福島県相馬郡内のため池（久保田ら、2015b）の2本の流入溪流（地点②および地点③）である。このうち、地点①と③では、自動採水器を用いて、定時または、増水時の採水を行い、地点②では、遠隔採水を行った。また、定期的に人手による現地採水も実施した。

観測地点では濁度を10～20分毎に連続観測を行った。濁度の連続観測には、濁度センサー（ウイジン製 UIZ-TC）を用いた。この濁度センサーには、透過光方式の濁度センサー（Fig. 7）で観測前に光源・受光面窓の拭き取りを行うワイパーによる洗浄装置が付いている。本濁度センサーは、12Vの印可電圧を必要とし、測定範囲は事前に次の3つから選択する。3つの測定範囲は、0～100度、0～500度、0～3000度であり、各レンジにおいて4-20 mAの電流値を出力する。本研究で、この濁度センサーを選択した理由は、対象とする濁度のレンジが選択できるとともに、洗浄装置が付いていること、価格が安価であること、による。

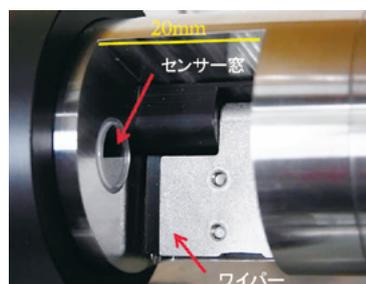
濁度の連続観測に合わせて自動採水器を設置し、定時採水や遠隔制御により採水を行い、持ち帰った試料のSS濃度およびT-P濃度の測定を行った。また、地点③の試料では、Cs-137の測定を行った。

水質分析では、SS濃度は前節と同様に行い、T-P濃度は、ペルオキシ二硫酸カリウムを用いたオートクレーブ分解後に、モリブデン青吸光光度法で定量した。また、放射性Csの分析では、ゲルマニウム半導体検出器を用いて、2Lまたは0.7Lマリネリ容器を用いてCs-134とCs-137の定量を行った。その際、検出限界は、試料水の濁りの状態から経験的に0.1～1 Bq/Lの範囲で設定した。結果と考察では、低濃度のため定量下限を下回ることがあるCs-134を除いたCs-137を検討対象とした。

遠隔／自記観測と自動採水器を用いた観測においては、4.1の試験とは異なり、濁度観測の対象水塊と採水され分析に供された水は一致しない。その要因は、セン



(a) 濁度センサーの外観と取付金具
Externals and installation fittings



(b) センサー部（拡大）

Fig. 7 透過光式濁度計
Transmitted type turbidity sensor

サー観測と採水のタイミングに最大5分程度の時間的なズレと、設置環境の制約から生じるセンサーと採水器の位置の空間的なズレである。このようなセンサー観測と採水の時間的・空間的なズレは、平時の小水路や溪流等においてはほとんど影響しない。しかし、増水時の河川や人為的なポンプ操作などの影響を受ける水域等では、センサー観測の対象水塊と採水された水の水質は、一部で大きく異なる可能性がある。そのため、得られたセンサー値と分析値のデータセットにおいて、その関係式から $\pm 2\sigma$ 以上外れるものについては外れ値として扱った。本研究では、数多くの観測値のセットを得て、関係式を求めることでズレによる影響は平均化され、その影響は

相対的に小さくなるものと考えた。

V 結果と考察

5.1 携帯型濁度計による濁度とSSの関係

携帯型濁度計による濁度とSSの関係を Fig. 8~9 に示す。それぞれ地点のデータ数は、Table 1 に示した観測回数と一致する。

A 地点では、平水時に加えていくつかの増水イベントに対応するデータが含まれているため、比較的広範囲の濁度とSSとの関係が得られた (Fig. 8)。回帰曲線は直線型 (原点通過) において十分に高い重相関係数が得られたものの、低濃度の範囲では、プロットが近似直線からやや外れているため、累乗型回帰曲線を別途算定したところ、低濃度での適合性に改善が見られた。なお、累乗型では、低濃度領域における適合性を高めるため、重み付き (1/Yi) 最小自乗法によりパラメータを求めた。

B から E の各地点においてもおおむね濁度とSSに比例関係が確認され、E 地点を除くと 0.9 程度以上の高い寄与率であった。得られた回帰曲線の傾きと寄与率はそれぞれ、B 地点で 1.52 と 0.87、C 地点で 1.94 と 0.94、D 地

点で 1.27 と 0.97、E 地点で 1.09 と 0.20 であった。

以上のように、福島県内の河川および農業用水路等の 5 地点における濁度とSSの関係を表す回帰曲線の傾きは、おおむね 1.1~1.9 程度の範囲であった。その中で濁度が数 10NTU 以下の低い濃度範囲しか得られていない C、D、E の 3 地点では、近似直線の傾きは 1.1~1.9 とややバラツキが大きかったが、100 NTU を超えるデータが得られた A および B 地点では、傾きは 1.5~1.6 である。これは、Fig. 8 で見たように回帰曲線が厳密にはやや下に凸の緩やかな累乗関数型を示すことが影響していると考えられる。このように考えると、C、D、E の 3 地点においても高濃度までデータが得られれば近似直線の傾きがより大きくなる可能性がある。

Fig. 9 にこれら 5 地点の濁度とSSの関係を 1 枚の図に重ねた。Fig. 9 からは、データが十分でない高濁度の領域を除き、少なくとも 40 NTU 程度までは、A 地点の累乗型回帰曲線 ($Y = 0.997X^{1.077}$) を用いて濁度からSS濃度を推定することができる。A 地点の 2 種類の回帰曲線に対する地点 B~E のデータの適合性をみるため、平均二乗誤差の平方根 (RMSE) を用いて評価した。RMSE は 0 に近いほど適合度がよいことを示しているが、A、B 地点は、両近似式で大差がなく、A 地点では、全データと濁度が低いものを比較すると、上でみたように濁度が低い領域では累乗型の適合がよかった。また、C~E 地点では、累乗型の方がやや優れていることがわかった。

これまで、河川水を対象とした濁度とSSの関係またはそれを利用して土砂流出量の推定等を行った研究事例は少ない。山口ら (2000) は、石狩川の 3 地点を対象として積分球式光電光度法による濁度計の観測値からSSに換算を行い流砂量の推定を行っている。この研究では濁度として 500~1000 度を超える観測値が得られており、そのときに得られた濁度とSSの比例定数は 1.19~1.74 であり、本研究で得られた値の範囲とほぼ一致する。また、横山ら (2008) は、筑後川流域の 17 地点において後方散乱光型濁度センサーによる濁度連続観測からSSの流出特性を推定した。その結果、濁度とSSの関係では、300~400 ppm 程度までの低濁度では、河川に

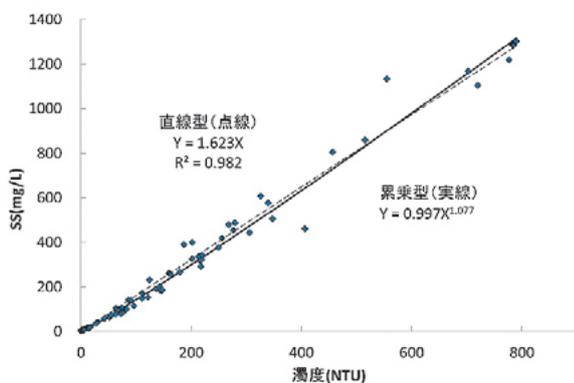


Fig. 8 携帯型濁度計による濁度とSSの関係 (A 地点)
Relation between turbidity with porTable meter and SS (site A)

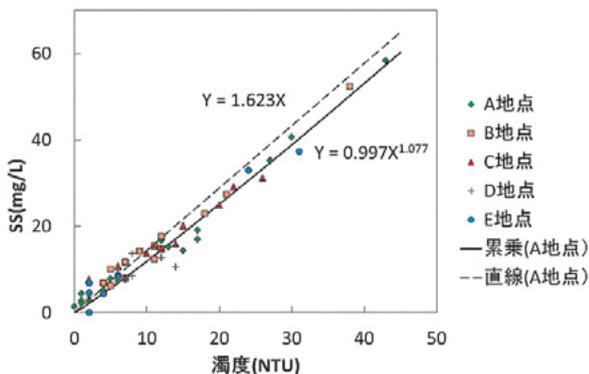


Fig. 9 濁度とSSの関係 (A~E 地点, 低濃度)
Relation between turbidity and SS (site A-E, low concentration)

Table 2 Fig. 9 の各地点および各近似式に対する RMSE
RMSE to the sites and each approximate expressions

地点	データ数	RMSE		備考
		直線式	累乗式	
A	72	47.8	47.7	全データ
A	43	23.1	14.3	濁度が 160NTU 以下のもの
B	15	25.3	24.7	
C	12	5.4	2.6	
D	7	5.8	2.7	
E	9	5.1	2.8	

よる違いは大きくないが、濁度が500 ppmを超えると違いは拡大し、流域特性により関係性がグループ分けできることを示した。ここでは、濁度とSSの関係は累乗関数で整理されている。本研究では、地点によって得られた濁度の範囲が異なるため現時点では十分な検討はできない。

5.2 遠隔/自記観測による濁度からのSS、T-P濃度の推定

遠隔/自記観測による濁度観測とSS、T-P濃度の関係を Fig. 10～Fig. 12 に示す。回帰曲線は直線型で示した。

濁度とSSの関係 (Fig. 10) は、地点①と地点②において、寄与率がそれぞれ、良好であった。決定係数と標準誤差は、地点①においてそれぞれ0.82と0.70、地点②において、それぞれ0.72と0.86であった。濁度値を用いたSSの推定は概ね妥当であると考えられた。

次に、SSとT-Pの関係を見ると、濁度とSSの関係ほど良好ではないが、決定係数は地点①で0.72、地点②で0.75と一定の関係が得られており、SSの値からT-P濃度の簡易推定が可能であると考えられる。

以上のように、2ヶ所の検討例を見てきたが、濁度センサー受光部への汚れの固着が問題にならないところで

あれば、濁度からSSの連続的な推定は容易であることがわかった。特に地点②では、濁度とSSの傾きが1.4と、5.1で検討を行ったものと同程度であり、濁度センサーの種類は異なるものの、この程度の傾きをもつ回帰直線でSSの簡易推定が可能である。さらに、濁度からSSの連続的な推定が可能な地点であれば、濁度センサーの出力から、T-P濃度の推定が可能ということになる。

ただし、これらの関係は、多分に経験的なものであり、SSまたは濁度からT-Pを推定するためには、本研究のようにそれぞれの測定地点において両者の関係を実測によって求める必要がある。また、都市排水などT-Pの人為的な排水が卓越する河川など、SSとT-Pの相関が低い場合などには適用は難しい可能性も考えられる。従って、この方法の適用性が高い水域は、T-Pについて人為の影響が小さい自然流域であることが推察される。

5.3 濁度観測によるCs-137の推定

濁度観測を用いて懸濁態を中心とする放射性Cs濃度の推定を行うことはこれまでいくつかの研究機関、大学等で試みられている (例えば、申ら (2015))。

地点③において濁度とSSおよびCs-137の関係を検討した結果を Fig. 13 に示す。

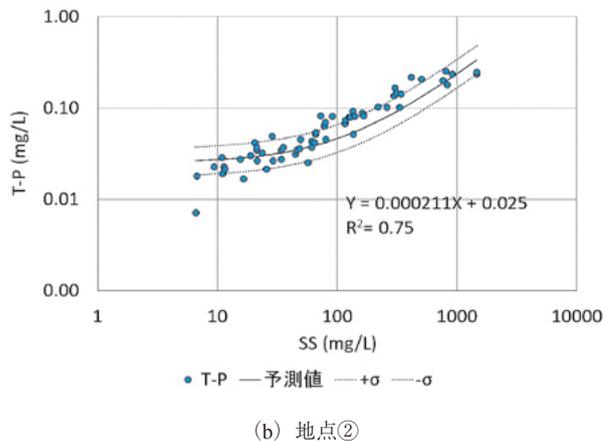
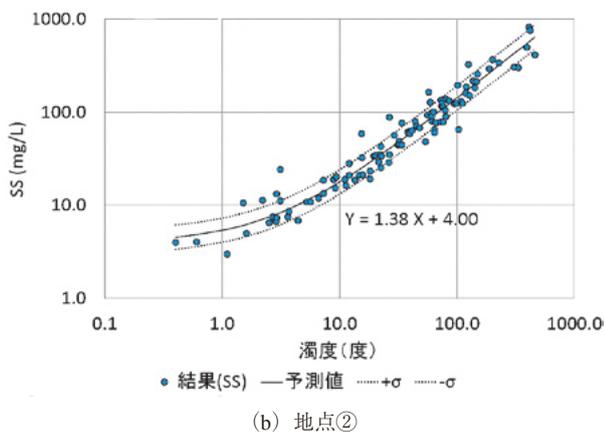
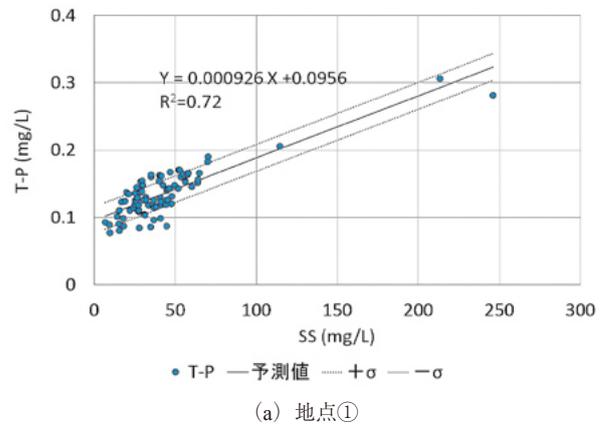
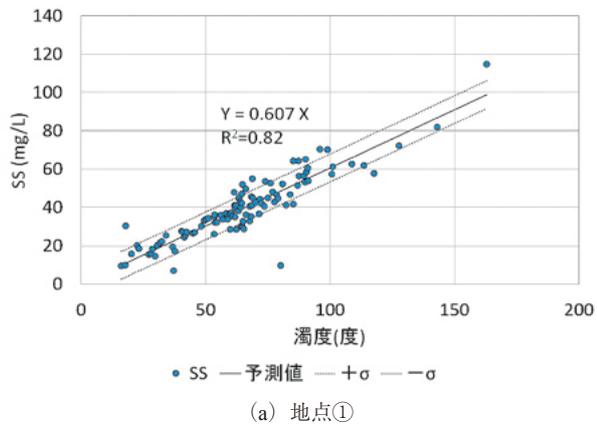


Fig. 10 濁度とSSの関係
Relationship between turbidity and SS

Fig. 11 SSとT-Pの関係
Relationship between SS and T-P

Fig. 13(a) は、Fig. 10(c) と同じ地点のものであるが、観測期間が一部異なるため、近似直線の傾きも多少異なっている。

濁度とCs-137濃度の関係は、T-Pの場合と同様にややバラツキは大きいものの直線関係で示される (Fig. 13(b))。このことは、濁度当たりのCs-137濃度、すなわち懸濁物質に含まれるCs-137濃度が、大まかに見ると、一定と仮定できることを示している。また、回帰曲線のy切片は、濁度0のときのCs-137濃度であり、それは、観測期間における平均の溶存態Cs-137濃度を示すことになる。

5.4 濁度センサーを用いた水質の遠隔監視上の問題

濁度センサーを用いた水質の遠隔監視上の問題点と課題をいくつか挙げる。

はじめに、携帯回線を用いた遠隔監視システムについて述べる。本システムでは、当然ながら携帯回線の通信状況の影響を受ける。電波条件がやや悪い箇所へ設置したケースでは、大雨時などに携帯通信に障害が発生し欠測が生じた。現行のシステムでは、システム本体にはデータ保存を行っていないため、通信障害によってデータサーバにデータが届かないと、復元不可能な欠測となる。

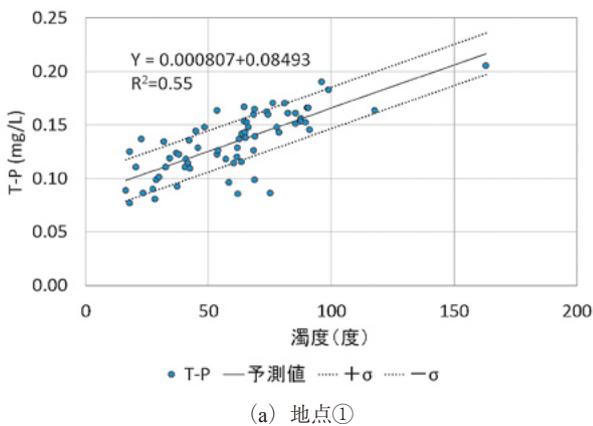
る。

今回使用している携帯通信で使用される周波数帯は、必ずしも電波の降雨減衰を受けやすいものではない。しかし、通信条件が良好でない場所に設置する場合、豪雨時の降雨減衰が影響する可能性がある。その場合、対策としては、データロガー内の不揮発性メモリ (メモリーカード等) にもデータを保持するなど、データの二重化を図る必要がある。また、これまで3年間の運用で直接の被害はなく、また、現状では対策を行っていないが、避雷対策も重要であろう。

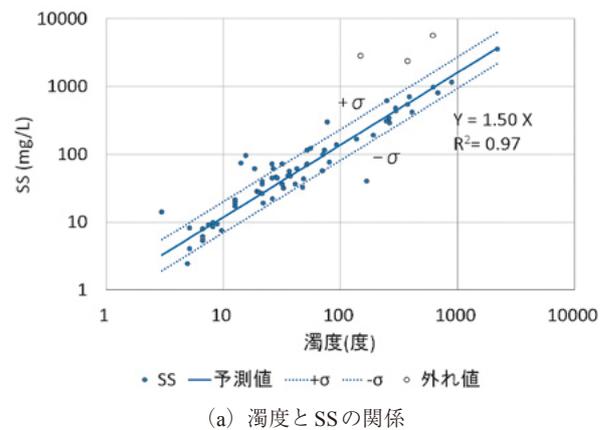
関連して、現在、無線機器を接続し、中継することで、電波が弱い、または届かない箇所での遠隔監視ができないか試行中である。さらに、この無線機器により1本の携帯回線で複数箇所のセンサーの監視や自動採水器の制御について試みを行っている。

また、遠隔監視システムでは、精密機器であるデータロガーや通信システムが、高低温や高湿度など過酷な気象条件下に晒されることから、機器の設置や維持管理において細心の配慮が必要である。具体的には、使用条件を超えた温度での運用や多湿による電子回路の腐食や短絡、部品劣化、昆虫・小動物などの影響排除である。

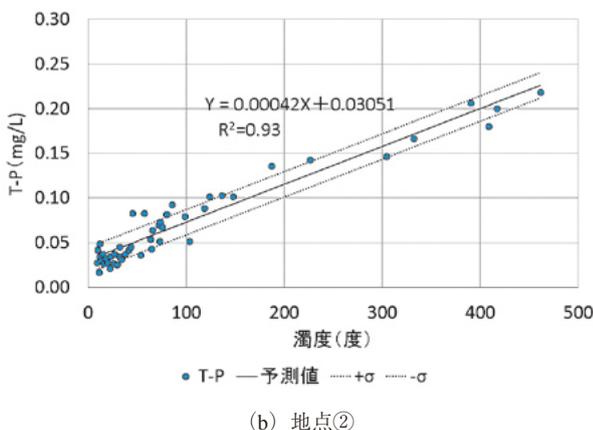
筆者らの例では、寒冷地に設置したシステムで、冬期



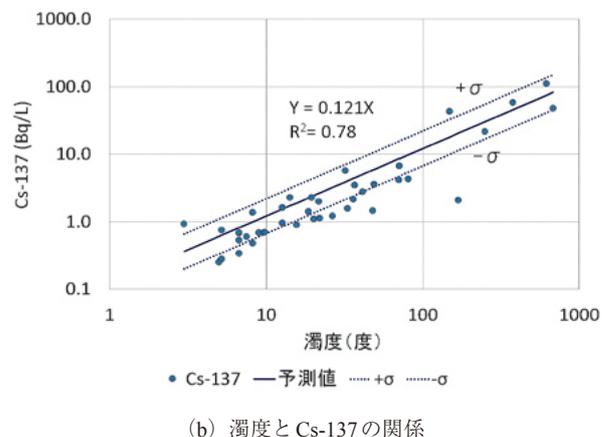
(a) 地点①



(a) 濁度とSSの関係



(b) 地点②



(b) 濁度とCs-137の関係

Fig. 12 濁度とT-Pの関係
Relationship between turbidity and T-P

Fig. 13 地点③における濁度とSS, Cs-137の関係
Relationship between turbidity and SS or Cs-137 at site 3

間にネットワークデータロガーの基盤にクモが入り込んで巣を作り、回路を短絡させる故障があった (Fig. 14)。このような機器は、野外での長期運用になることから、当然ながら防湿、対候、防塵性を含め耐久性のある構造とすることが欠かせない。

また、電源はソーラーパネルとバッテリーの組合せで長期観測への対応ができるようになってきているが、日照に制限がある場合への対策は課題である。

次に、濁度センサーの設置および維持管理上の問題について述べる。濁度センサーによる観測の問題は、主に、①設置場所と方法、②ゴミや堆積物による光路阻害、③受光部への物質の付着、に起因する。

濁度センサーの設置では、光路部を流水が通過するように固定することが基本であるが、そのような場所は一般にゴミ等が引っかかりやすい。また、特に低水時に水位が河床近くまで低下する場所では、流路の河床にセンサーを取り付ける必要があるが、その際、増水時には浮遊砂ではなく掃流砂を捉えてしまう可能性がある (Fig. 15)。このほか、センサーを河床近くに設置している場合では、出水時に堆砂に埋没してしまうケースがあった。

また、センサーは、濁質の堆積や滞留を避けるため、開孔率が低い保護管は使用すべきでなく、目の粗い頑丈な格子状の保護管を使うか、センサーを剥き出しに設置することが望ましい。

一方、センサーを剥き出しで設置すると流下物の接触により破損する危険性がある。比較的良好に管理された水路においても、一部でゴミや水草の引っかかりによる光路阻害によりスパイク状に発生する一時的な異常値もしくは長期間の欠測などが生じた。

また、ため池斜樋からの流出水の観測では、観測値のベースラインが上昇するという現象が見られた。本センサーは定期的なワイパーの動作により、通常の付着物や堆積物であれば影響を受けることは少ないが、透過窓表



観測箱に侵入したクモが基板上に巣をつくったため、回路がショートし、修理不能となったネットワークデータロガー

Fig. 14 電子機器のトラブルの事例

A trouble of network data logger by invasion of spiders

面への汚れの固着による影響は避けられない。このケースでは、堤体内で生じた湧水に含まれる鉄イオンが受光窓に鉄酸化物として沈着した影響と考えられた。

5.5 濁度計を用いた遠隔監視技術の活用と課題

濁度による遠隔監視の導入が容易になっていることは前述の通りである。従来、栄養塩の動態把握は、定期的な水質調査によるところが大きかったが、低平地の農地流域では、用排水機場の稼働や降雨時など自然流域と比べて非定常的な水の動きが多く、SSやT-Pなどの動態もより複雑で把握は困難であった。しかし、比較的低コストの濁度センサーで、SSに加えて栄養塩の把握も可能となれば、営農においても環境保全が求められ、閉鎖性水域の集水域などでは、さらなる負荷削減対策が求められる中で、本技術の活用による現況の把握や、水管理への活用が期待される。

2010年度に、千葉県印旛沼二期地区では全国初の水質保全型国営かんがい排水事業が着手された。この事業では従来施設の更新に併せて循環灌漑施設を整備し、農業用水の安定供給だけでなく、流域の水質保全にも寄与することを目的としている。

循環灌漑の強化では、従来、用水として利用していた印旛沼の水に加えて、地区内の農業排水が集まる低地排水路の水を積極的に再利用することで、印旛沼に流出する負荷の削減を目指している。窒素やリンなどの栄養塩の直接的なモニタリングはコストが嵩むが、ここで検討したように、濁度センサーを用いた簡易的な栄養塩推定法を用いれば比較的低コストで栄養塩の監視が可能となる。今後、実際に対象流域で適用可能か、検討を行う必要がある。

また、印旛沼流域では、現在のところ、揚水機場の水管理において、循環灌漑で使用する水は、低地排水路と印旛沼の水を混合して使用することを予定している。ここで、例えば、2つの水源の水量と水質をリアルタイムで遠隔監視を行い、循環灌漑施設において、両者の水位や水質に応じて、環境保全上有利となるよう取水水源の切り替えを行えば、負荷流出をより低減する水管理が実

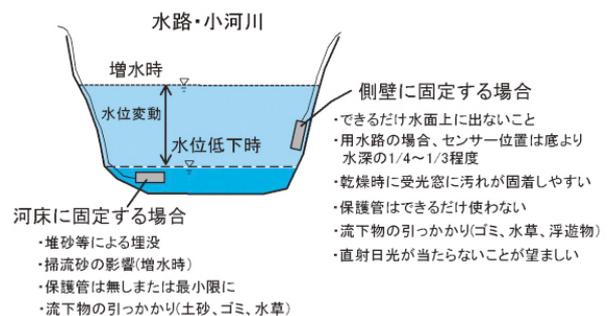


Fig. 15 濁度センサー設置時の考慮事項

Consideration matter for installation of turbidity sensor

現する可能性がある (Fig. 16)。そのためには、効果を定量的に評価するとともに、技術とコスト、耐久性などの観点から導入可能な遠隔監視、制御システムの開発が求められる。

今回使用した観測システムは、比較的低価格で導入可能であり、維持管理も容易であることから、研究の他、初期投資や維持管理の費用の確保が難しい中小規模の土地改良区等でも活用の可能性がある。

VI 結 言

本報では、農業水利施設等への導入を想定した小規模、低コストの水質遠隔監視システムを紹介するとともに、問題点についてまとめた。また、連続観測が容易な濁度センサーを用いた遠隔/自記観測により、連続観測がコスト的に難しい水質項目の簡易推定について検討を行った。概要を以下に示す。

- i) 濁度からSSの推定ができれば、簡易的にT-P濃度や放射性Cs濃度の推定が可能であることが確認された。
- ii) 濁度観測によってSS濃度が精度よく推定できることが確認された。SS濃度は、濁度を用いて近似直線で精度よく表すことができるが、累乗型の回帰曲線を適用すると、低濃度の領域の適合性が改善される。
- iii) 異なる水源をもつ5地点における河川水・農業用水に対して、濁度が40NTU程度までの比較的低濃度の濁水に含まれるSS濃度は、近似的に1本の累乗型回帰曲線 ($Y = 0.997X^{1.077}$) によって推定することが可能であった。
- iv) 低平地の水域などの一部の地点では、濁度センサーに固着する汚れの影響で、濁度センサーの長期設置によるSS濃度やT-P濃度の簡易推定は困難であった。

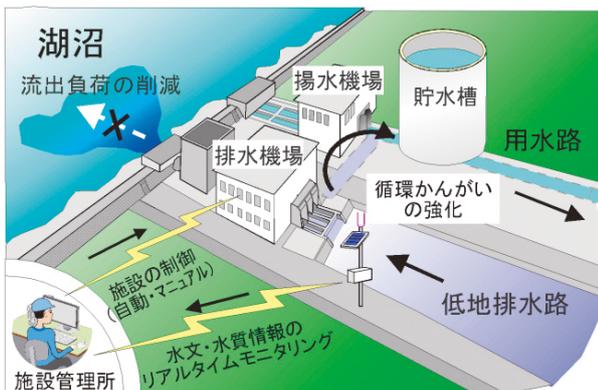


Fig. 16 循環灌漑地区における水質遠隔監視の活用
Use of WQRMS in cyclic irrigation management

謝辞：本研究の実施にあたっては、関東農政局印旛沼二期事業所、東北農政局、福島県、関係土地改良区等の協力を得た。また、本研究の一部は、SIP(水管理)および農水プロ「営農再開」の支援により実施した。記して謝意を表する。

参考文献

- Evrard O, Lacey JP, Lepage H, Onda Y, Cerdan O, Ayrault S (2015): Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A review, *J. of Environ Radioact*, **148**, 92-110
- 平野順子 (2013): 濁度計の測定方式と濁度標準液, *かんきょう* **112**, 8-19
- 池田英史 (2012): 森林流域からの土壌流出の実態・支配因子と予測モデル開発の現状と課題, *水文・水資源学会誌*, **25** (6), 396-409
- 川西澄, 山本洋久, 余越正一郎 (1998): 超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濁度, 粒径, フラックスの測定, *水工学論文集*, **42**, 559-564
- 久保田富次郎, 吉永育生, 原貴洋, 島武男, 高嶺典子, 生駒泰基 (2011): 国頭マージ地帯における新規作物導入による赤土流出低減と栄養塩の流出, *農業農村工学会大会講演要旨集*, 500-501
- 久保田富次郎, 田淵尚一, 濱田康治, 申文浩 (2015a): 遠隔監視による濁度・水文観測の課題と今後の活用, *農業農村工学会誌*, **83** (2), 97-100
- 久保田富次郎, 申文浩, 濱田康治, 人見忠良 (2015b): 阿武隈高原に立地するNため池における水中の放射性セシウムのモニタリング, *農村工学研究所技報*, **217**, 85-100
- 黒木幹男 (2006): 流域学事典—人間による川と大地の変貌, 新谷融, 黒木幹男編著, 北海道大学出版会, **102**
- 国土交通省 (2009): 河川水質試験法 (案), **58**
- 松尾宏, 熊谷博史, 楢崎幸範, 田中義人, 白川ゆかり (2008): 都市河川における亜鉛の流出特性とその存在形態, *福岡県保健環境研究所年報*, **35**, 98-101
- 長沢徹明, 片岡隆四, 梅田安治, 桜田純司 (1987): 濁度計による河川浮流土砂量の推定, *農業土木学会論文集*, **125**, 81-87
- 長沢徹明, 井上京, 横山慎司 (2000): 降雨時における浮流土砂流送挙動—農林地流域河川の浮流土砂流送に関する研究 (I)—, *農業土木学会論文集*, **208**, 1-6
- 中達雄, 穴瀬真, 鬼塚宏太郎, 島崎昌彦 (1992): 渦動排砂管を用いた造成地内の流出土砂制御工法の実用化, *農業土木学会論文集*, **161**, 91-97
- 中達雄, 島崎昌彦, 樽屋啓之 (2008): 畑地圃場から流出する微細土砂の制御工法, *農業農村工学会論文集*, **255**, 69-75
- 大澤和敏, 池田俊介, 久保田龍三郎, 赤松良久 (2008): 石垣島名蔵川流域における土砂輸送に関する長期観測およびWEPPの検証, *水工学論文集*, **52**, 577-582
- 申文浩, 久保田富次郎, 濱田康治, 人見忠良 (2015): 農業用

- 水の放射性Csのリアルタイム予測と水管理への展開，農業農村工学会誌，**83**(1)，35-38
- 塩野隆弘，奥島修二，高木東，福本昌人（2004）：黒ボク土畝立て圃場の土壤浸食に対するキャベツ栽培の影響，農業土木学会論文集，**230**，1-9
- Shiono T, Yamamoto N, Haraguchi N, Yoshinaga A (2007): Performance of grass strips for sediment control in Okinawa, *JARQ*, **41**(4), 291-297
- 末次忠司，日下部隆昭，坊野聡子（2005）：土砂管理施策のためのキーノート～土砂動態の時空間的不連続性を考慮した流域管理に向けて～，国土技術政策総合研究所資料，**231**，35-45
- 山口甲，三田村一弘，渡辺浩司（2000）：大河川における濁度観測値による土砂輸送量の計算，水工学論文集，**44**，401-406
- 山本博，遅澤省子，石原暁，花野義雄（1995）：四国の急傾斜畑地におけるマルチングの土壤侵食防止効果，土壤の物理性，**71**，41-46
- 山本浩一，二村貴幸，坂野章，日下部隆昭，末次忠司，横山勝英（2003）：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究，河川技術論文集，**9**，515-520
- 横山勝英（2008）：多点濁度観測による筑後川水系のSS流出・輸送特性に関する研究，水工学論文集，**52**，553-558
- 横山勝英（2002）：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，**698/II-58**，93-98

受理年月日：平成27年10月30日

Remote observation of turbidity and estimation of concentrations of suspended solids, total phosphorus and radioactive Cs in irrigation facilities

KUBOTA Tomijiro*, HAMADA Koji*, HITOMI Tadayoshi* and SHIN Moono**

*Department of Hydraulic Research Division

**Agricultural Radiation Research Center, Tohoku Agricultural Research Center, NARO

Abstract

With the development of the information and communications technology (ICT), remote observation and control of irrigation water is becoming easy and less costly with each year. However, more sophisticated technology would still be required for future irrigation management with environmental considerations such as conservation of water quality. In this study, a low-cost remote observation system for monitoring water quality was investigated and methods for estimating concentrations of suspended solids, total phosphorus, and radioactive cesium by the system using the output of turbidity sensors were evaluated. The proposed system could achieve remote water sampling at an arbitrary time through PCs or smartphones. This feature enables safe water sampling in restricted areas or during stormy weather. The overall features of the system are as follows: i) 8 analogue inputs for analogue sensors and 2 digital inputs for rainfall gauges; ii) remote water sampling at arbitrary times through PCs or smartphones; iii) utilization of mobile communication line; and iv) 10 min interval for default observation. Good correlations were found not only between turbidity and total suspended solids but also between turbidity and total phosphorus. The concentrations of total suspended solids and total phosphorus could be estimated from turbidity values using these relationships. Furthermore, the concentrations of radioactive Cs could also be estimated in a similar manner.

Key words: total phosphorus, radioactive cesium, turbidity, suspended solids, remote monitoring system

〔農工研技報 218〕
〔89 ~ 97, 2016〕

模擬帯水層内に淡水レンズを再現する室内実験

石田 聡* 有田智也** 曹 英傑*** 唐 常源** 白旗克志*
土原健雄* 吉本周平*

*資源循環工学研究領域水資源工学担当

**千葉大学園芸学部

***中山大学

要 旨

淡水レンズの発生を室内で再現する実験装置を構築するため、幅2.2 m、奥行き0.8 m、高さ1.05 mの模擬帯水層を大型実験水槽内に設け、豊浦砂を充填した。同時に実験装置内の360箇所にて電気抵抗を測定するセンサーを配置し、一定時間間隔で抵抗値を自動で測定するシステムを作成した。作成した模擬帯水層を、両側の塩水貯留槽から供給される塩水で満たした後、塩水貯留槽の水位を一定に保ちながら、上部から降雨発生装置によって淡水（模擬降水）を供給した。実験中の模擬帯水層内の電気抵抗を測定した結果、模擬帯水層内の淡水域は、中心部が縁辺部に比べて厚い、下に凸のレンズ状を保ちつつ、下方に向かって徐々に拡大した。このことから本装置により淡水レンズの形成が可能であると見込まれた。測定システムで取得した模擬帯水層内の抵抗値分布は、採水によるEC測定結果と整合的であったが、データ取得率は73%と想定より低く、測定条件の見直しが必要とされた。

キーワード：淡水レンズ，実験，地下水，帯水層

I 緒 言

降水によって地表から涵養された淡水と、海から侵入する塩水の密度差と圧力バランスによって、淡水レンズと呼ばれる地下水が分布している島嶼域においては、淡水地下水を利用するため、帯水層上部の淡水域にストレーナを設けた井戸が設置されることが多い。しかしこの井戸からの過大な揚水によって井戸周辺の圧力が低下し、塩淡境界が上昇するアップコーニングと呼ばれる現象が発生し、井戸周辺の地下水が徐々に塩水化する。揚水を停止し、降水によって淡水が涵養されればアップコーニングは徐々に回復するが、揚水量が過大であった場合にはその後の降水によっても回復しないことが経験的に知られている。しかし揚水量とアップコーニングの規模の関係や、揚水停止後の降水による回復過程は明らかにされておらず、現場では井戸内の塩分濃度を定期的に測定し、一定濃度を超えたら揚水を停止し、塩分濃度が下がるのを待って再度揚水を開始するという対症療法的な管理手法が採られているのが現状である。

淡水レンズの塩水化を対象とした研究は、マーシャル諸島共和国ローラ島 (Presley, 2005, 石田ら, 2010 など)、トンガ王国リフカ島 (太平洋諸国共同体 (SPC), 2013) などで揚水による井戸等の塩水化が報告されているが、現地試験によって揚水時や揚水停止後のアップコーニングの形状変化や回復過程、回復可能な揚水量を

明らかにした研究は見られない。その理由は、アップコーニングを発生させる揚水試験はその後の地下水利用に支障を来すおそれがあるので現地で行うことが難しいことである。しかし、このような試験によるリスクは、室内実験によって回避できると考えられる。

淡水レンズを再現した実験研究例については、井内ら (2000) が幅0.9 m、高さ0.5 m、奥行き0.04 mの模擬帯水層を実験水槽内に設け、水槽上部から降水装置によって一定量の淡水を供給し、模擬帯水層の左右から過マンガン酸カリウムで着色した塩水を供給することで、淡水レンズを再現するとともに、その形状を目視により観察し、塩淡境界形状が下に凸のレンズ状となることを示した。中園ら (2008) は半径0.7 m、高さ0.8 m、中心角60°の扇形柱体の模擬帯水層を実験水槽内に設け、水槽上部から降水装置によって一定量の淡水を供給し、円周部から食用色素で着色した塩水を供給することで、淡水レンズを再現した。また、模擬帯水層の淡水域および塩水域に水平パイプを設置し、淡水域および塩水域から同時に揚水を行った場合と、淡水域のみから揚水を行なった場合について塩淡境界の変化を比較し、両者の淡塩境界面の変化は目視ではあまり違いはみられなかったが、揚水した水の電気伝導度 (EC) の経時変化より、淡水域のみから揚水した場合の方が、淡水域のECの上昇が早いことを示している。

しかしこれら既往の研究ではいずれも実験装置の規

模が小さく、帯水層内の水の塩分濃度分布を測定して、アップコーニングの発生や回復の状況を把握することは困難であった。またこのような実験研究例が少ない理由は、淡水レンズの再現には降雨発生装置や塩水供給装置などが必要となり、実験装置の作成が煩雑であること等のためと考えられる。このような背景のもと、本研究では大型水槽を使用した淡水レンズ室内実験装置を構築するとともに、装置を用いた淡水浸透実験を行い、その結果について考察した。

II 実験装置

本実験装置は、淡水レンズを形成するための模擬帯水層、模擬帯水層の側方から塩水を供給する塩水貯留槽、塩水貯留槽の水位を周期的に変化させる潮汐発生装置、模擬帯水層の上方から淡水を供給する降雨発生装置、模擬帯水層内の塩分濃度を分布的に測定する測定装置等より成る。これらは全て空調が効いた室内にある。Fig. 1に装置の概念図を、Fig. 2に装置の配管系統図を示す。

2.1 模擬帯水層

模擬帯水層、塩水貯留槽は、大型実験水槽に設置されている。大型実験水槽は幅3.2 m、高さ1.2 m、奥行き0.8 mであり、その中央部に幅2.2 m、高さ1.05 m、奥行き0.8 mの模擬帯水層を設け、その両側に幅0.5 m、高さ1.2 m、奥行き0.8 mの塩水貯留槽を設けた。模擬帯水層と塩水貯留槽とは、模擬帯水層内の砂の流出を防ぎつつ水を通過させるため、SUS金網#200（目開0.074 mm）にSUS金網#8（目開2.375 mm）を重ねた透水板で仕切った。塩水貯留槽内には定められた高さに越流アクリルパイプが設置され、この高さを越えた水はパイプ内に流入し、パイプに接続されたホースによって塩水貯留槽外に排出されることで、水位が一定に保たれる。また、模擬帯水層に砂を詰める際に水槽が膨らまないように四面を鉄枠で挟み込んで固定した。

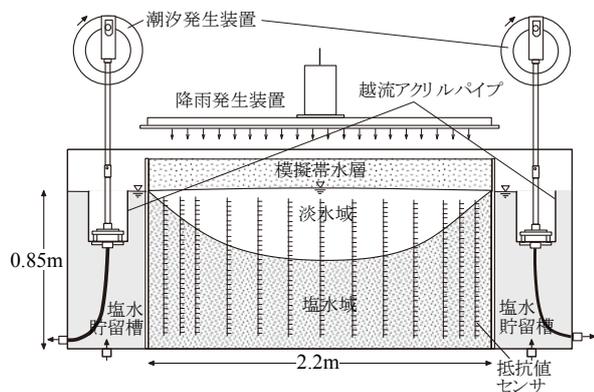


Fig. 1 実験装置概念図

Conceptual diagram of experimental device

実験中は降雨発生装置から供給される淡水が継続的に塩水貯留槽に流入してくるので、塩水の濃度低下を防止する必要がある。このため、塩水貯留槽の底部にバルブを設け、このバルブと塩水供給タンクを接続し、実験中はこのバルブから常に塩水を供給する構造とした。塩水供給タンクは容量1 m³のタンクを2個準備し、塩水供給ポンプ（三相電機製マグネットポンプPMD2573B2FおよびPMD581B2E）によって給水した。

2.2 降雨発生装置

降雨発生装置は模擬帯水層上部に、偏り無く一定量の淡水を供給するものである（Fig. 2右側）。

ここでは模擬帯水層の上面から高さ0.5 mの位置に、長さ0.9 mの降水パイプ（硬質塩ビ管VP13A、内径13 mm）を模擬帯水層中心線から左右に5本ずつ計10本平行に固定したものを2セット（降雨パイプ小、降雨パイプ大）用意し、それぞれの降水パイプ下方に孔パイプ小はφ0.5 mm、降雨パイプ大はφ1.6 mmの穴を等間隔に10箇所開け、パイプに導水した淡水をこの穴から下方に落下させる構造とした。なお、Fig. 2では降雨パイプ小は左側、降雨パイプ大は右側に記してあるが、実際には降雨パイプ小、降雨パイプ大とも、模擬帯水層上部の両側に配されている。また、以下に記す実験は降雨パイプ小のみを用いている。

降雨発生装置への給水は、容量1,000 Lの淡水供給タンクから、降雨送水ポンプ（岩谷電機製ステンレスカスケードポンプ20CJT0401）によって行い、給水量を把握するため流量計（アズワン流量計AI-0354-040およびAI-0354-020）を接続した。降水量の調整は、降雨送水ポンプから降雨パイプに至る配管途中に分岐を設け、淡水の一部を淡水供給タンクに戻すバルブを操作することによって行った。実験に先立って、流量計に表示される流量と、模擬帯水層に供給される降水量との関係は予め測定したところ、本装置で供給可能な降水量は20～170 mm/hであった。

2.3 潮汐発生装置

今回の試験では使用していないが、作成した装置には潮汐発生装置も含まれているので概要を記す。

潮汐の発生装置は、駆動モーター（住友重機製CNHM02-5087-AV-51）および減速ギアにより機械的に円盤を回転させ、円盤に接続させた越流アクリルパイプを上下させることにより、水位を周期的に変化させる構造とした（Fig. 2）。

振幅の調整幅は0～0.3 m、回転数の調整幅は1～12時間/回転とした。

2.4 測定

2.4.1 抵抗値計測システム

実験中の淡水レンズの形状やアップコーニングの状態

を把握するためには、模擬帯水層内の水の塩分濃度分布を測定する必要がある。緒言で述べたように、既往の研究では塩水を着色し目視によって塩淡水境界位置を把握していたが、塩水と淡水が混合した汽水域が形成される場合、この方法では正確な塩分濃度分布の把握は難しい。井内ら（2000）は目視による確認の補足として、模擬帯水層内に多数の細孔を空けた直径3 mmのパイプを一定間隔で鉛直に立て込み、針の長い注射器でパイプ内の水を一定深度毎に採取し、ECを測定した。このパイプは模擬帯水層内のオールストレーナ井戸とみなすことができる。この方法は採水の手間は掛かるが、模擬帯水層内の塩淡水境界が動かない定常状態であれば有効な方法であると考えられる。しかし模擬帯水層内での揚水や、潮汐を模した塩水水位の変動などがある場合は、パイプが模擬帯水層内の水みちとなり、パイプ内の濃度分布は模擬帯水層内の濃度分布と異なってしまうので、模擬帯水層内の塩分濃度分布把握手法としては不適となる。このような現象は実際に淡水レンズが分布している島嶼においても確認されている（石田ら、2013）。

そこで本研究では電気抵抗を測定するセンサーを模擬帯水層内に埋め込み、一定時間間隔で自動測定を行うシステムを作成した。Fig. 3に抵抗値測定センサーの構造を示す。

1組の抵抗値センサーは長さ0.22 mのアクリル棒に等間隔にステンレス製のピンを0.03 m間隔で7本挿し、それぞれのピンにリード線が接続される構造となっている。アクリル棒とピンは接着剤で固定されている。リード線はピン毎に色分けされ、ピン毎に番号（チャンネル

ル）が割り振られ、7芯ケーブルにてリレーボックスに接続される。7芯ケーブルによってピン周辺の地下水流が乱されないように、両者の距離を約0.3 m取った。抵抗値測定センサーは4組を1列とし、Fig. 1に示すように各列鉛直に13列模擬帯水層内に埋め込んだ。各列の埋め込み位置は、模擬帯水層と塩水貯留槽の境界板を起点とし、両側の3列を0.1 m間隔、残り7列を0.2 m間隔と

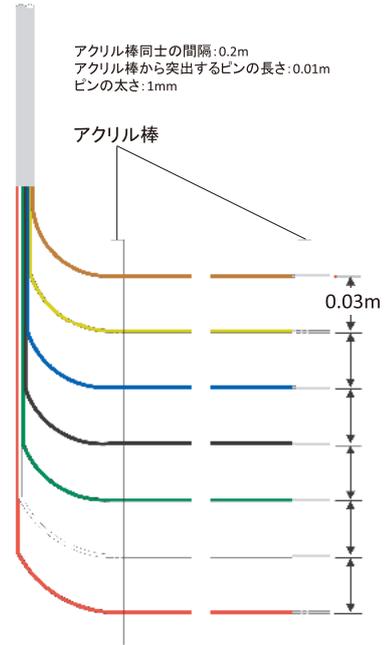


Fig. 3 抵抗値測定センサーの構造
Resistance sensors

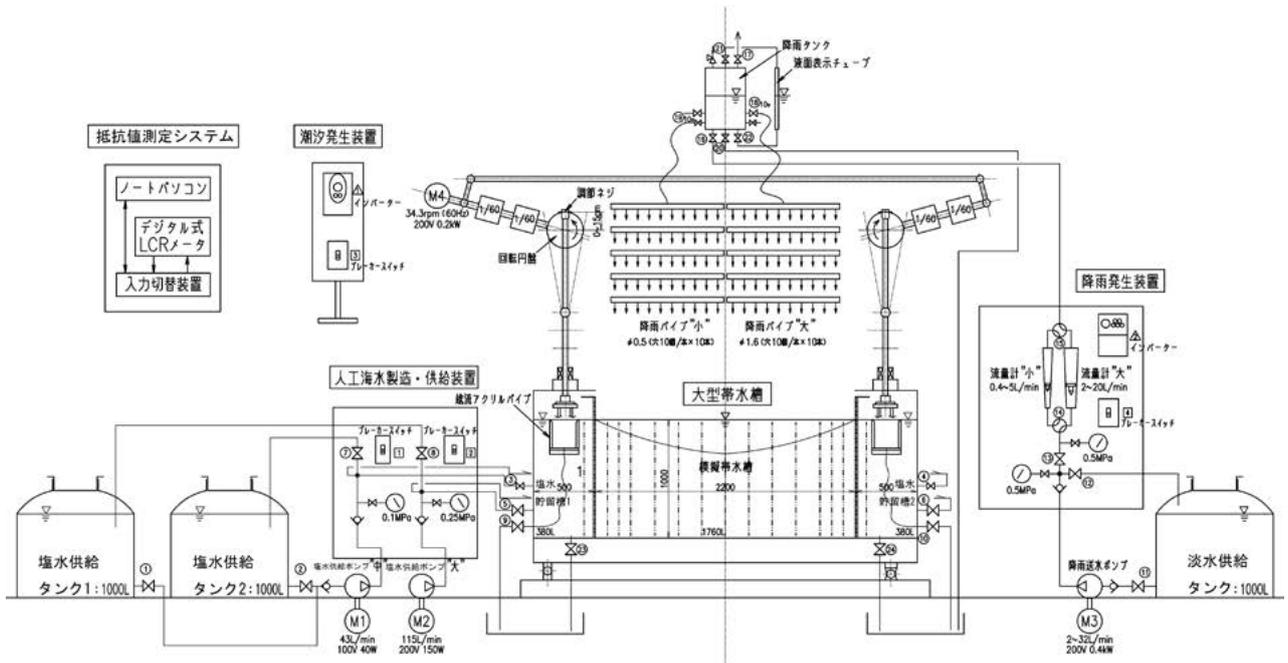


Fig. 2 実験装置配管系統図
Piping system of experimental device

した。センサーのピンの先端は支柱を塩水貯留槽に面していない側の壁から 25 cm 離れた距離に 1 列に並べセンサーの測定部が中央を向くようにした。また左右の塩水貯留槽内にもそれぞれ 1 列の抵抗値測定センサーを配した。抵抗値測定センサーの総数は 60 組で、測定箇所数は 360 点である。

模擬帯水層内の抵抗値は、抵抗値測定センサーの隣り合ったピン間の抵抗値を LCR メータ (日置電機製 3511-50, 測定周波数 1 kHz) で測定することとし、測定対象とする抵抗値測定センサーのピンを切り替えるためのリレーボックスを設け、測定対象とするチャンネル、チャンネル間のウェイトタイム、測定時間間隔等を指定してリレーボックスの動作を制御し、測定結果をパーソナルコンピュータに収録するソフトウェアを作成した。

2.4.2 EC 測定のための採水孔

抵抗値計測システムによって計測される抵抗値が、実際の模擬帯水層内の水の塩分濃度と整合的かどうかを確認するため、実験水槽の側壁 (模擬帯水層の長辺) に小孔を設け、先端にガーゼを巻いた径約 2 mm の採水チューブを水平に挿入し、実験時に模擬帯水層内から直接採水して当該地点の EC を測定できる構造とした。実験水槽の側壁から採水チューブ先端までの距離は 0.34 m である。なお、一部ではチューブによらない採水も行った (後述)。

III 測定試験

作成した測定装置の動作を確認するため、模擬帯水層を作成して淡水浸透実験を行った。

3.1 模擬帯水層

模擬帯水層の材料には粒度が揃い不純物が少ないことから実験で誤差を生じにくい標準的な砂として豊浦砂を使用した。模擬帯水層の容量は 1.848 m³ である。水槽内に豊浦砂を充填する方法は、均一かつ自然の堆積状態に近い形で充填するため、所定の高さまで水を注いだ後、砂を少しずつ加える水中落下法を用いた。また砂の高さが採水チューブ設置高付近に到達したら、順次採水チューブを挿入し、充填を進めた。実験に先立って行ったアクリルカラムを用いた定水位透水試験では、今回用いた豊浦砂の透水係数は 1.7×10^{-4} m/s であった。この値は水中落下法で供試体を作成した他の研究、(例えば山口ら (2008) による 2.26×10^{-4} m/s) と同程度のオーダーであった。

抵抗値測定センサー各列の最上部のピンの位置は底面から 0.96 m の高さ (模擬帯水層表面から 0.09 m の深さ)、最下部のピンは底面から 0.06 m の高さ (模擬帯水層表面から 0.99 m の深さ) とした。

Fig. 4 に抵抗値測定箇所および採水チューブ設置断面図を示す。採水地点のうち G-1 ~ G-4 については採水チューブを設置していない。Fig. 4 に示す抵抗値測定箇所は、抵抗値測定センサーのピンとピンの中点である。また、実験装置の構造より、模擬帯水層内の塩分濃度分布は中心線 (Fig. 4 の G 列) に対して左右対称になると考えられるので、採水チューブは中心線に対して片側のみに配した。

Table 1 に採水チューブ設置箇所の位置情報を示す。

模擬帯水層の表面には、降雨発生装置からの雨垂れで帯水層の上に窪みができるのを防ぐために、綿を敷き詰めた。

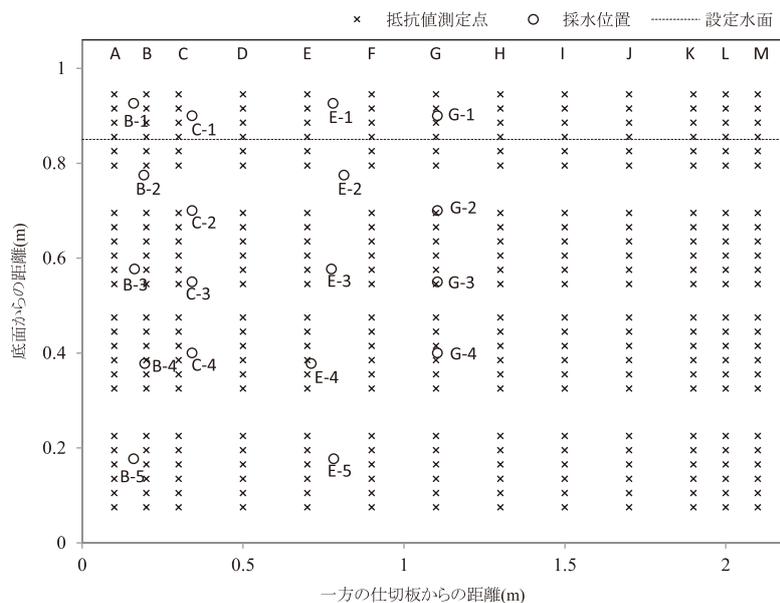


Fig. 4 抵抗値測定および採水箇所
Measurements and sampling points for resistance

Table 1 採水チューブ設置位置一覧
Locations of sampling points

	X	Y		X	Y
B-1	0.160	0.926	E-1	0.780	0.926
B-2	0.192	0.775	E-2	0.814	0.775
B-3	0.163	0.577	E-3	0.775	0.577
B-4	0.195	0.378	E-4	0.712	0.378
B-5	0.160	0.177	E-5	0.782	0.177
C-1	0.342	0.900	G-1	1.104	0.900
C-2	0.342	0.700	G-2	1.104	0.700
C-3	0.342	0.550	G-3	1.104	0.550
C-4	0.342	0.400	G-4	1.104	0.400

X：仕切板からの距離(m)，Y：底面からの高さ(m)

G-1～G-4は採水チューブなし（壁面の穴のみ）

3.2 実験条件

本研究では実験用水として、淡水には脱気水、塩水には濃度が3%となるように、精製塩を水道水に溶かしたものを使用した。塩水供給タンクに所定の水と精製塩を投入し、塩水供給ポンプにより塩水供給タンク底部の水を揚水し、揚水した水を塩水供給タンク上部に戻し循環させるという手順で攪拌を行い塩水を作成した。

本試験では、まず塩水貯留槽に塩水を導水し、水位を底面から0.85 m（以下水位0.85 mと記す）に保持した。模擬帯水層の初期状態は、このようにして塩水を十分に浸透させた状態であった。

その後降雨発生装置によって模擬帯水層上部から淡水を供給するとともに、抵抗値測定センサーによる模擬帯水層内の抵抗値測定と、採水チューブからの採水およびEC測定を一定時間間隔毎に実施した。採水地点は直前までの測定結果から塩淡水境界付近と推定される箇所とし、チューブに接続したポンプにより減圧しながら、途中に取り付けられた三方コックを開閉して行なった。

またG-1～G-4については模擬帯水層側面から直接シリンジで採水を行った。

Fig. 5に実験中の装置の状況を、**Fig. 6**に降雨発生装置による淡水の供給状況を示す。

実験諸元をまとめると以下の通りである。

塩水貯留槽水位：0.85 m

降水強度：68 mm/h

降水発生時間：4.5 h

採水時間間隔：30 min

抵抗値測定センサーデータ取得時間間隔：10 min

IV 結果

4.1 採水による模擬帯水層内のEC測定結果

Table 2に採水によって得られた模擬帯水層内の水のEC測定結果を示す。

全体的に模擬帯水層内のECが低い領域は、時間の経



Fig. 5 実験装置

Photograph of experimental device



Fig. 6 降水発生状況

Photograph of rain generator

過とともに徐々に浅層から深層に拡大している。このことは降雨発生装置によって供給された淡水が、模擬帯水層内に浸透していることを示している。模擬帯水層中央部に位置するG-1～G-4のECの変化を見ると、実験開始1.5時間後に塩水貯留槽水位より0.15 m低い位置にあるG-2のECが直前に比べて急激に低下した。このような急激なECの低下は、当該測定地点がそれまで塩水域だったが、時間の経過とともに淡水域となったことを示していると考えられる。同様に塩水槽水位より0.30 m, 0.45 m低い位置にあるG-3およびG-4では、それぞれ実験開始2.0時間後から2.5時間後、3.0時間後から3.5時間後に、ECが急激に低下した。ここでは仮に塩水と淡水の境界を両者の中間のECである2,000 mS/mと置くと、初めて淡水域に入った時間はG-2, G-3, G-4でそれぞれ実験開始から1.5時間後、2.5時間後、3.5時間後である。

これに対してG-1～G-4より0.3～0.4 mほど塩水貯留槽に近いE-1～E-5の中で、塩水貯留槽水位よりそれぞれ0.075 m, 0.273 m低い位置にあるE-2, E-3では、初めて淡水域に入った時間はそれぞれ実験開始から2.0時間後、4.0時間後と、G-2, G-3に比べて遅かった。また塩

水貯留槽水位より0.473 m低い位置にあるE-4には、実験期間中ECは低下しなかった。

G-1～G-4より0.76 m塩水貯留槽に近いC-1～C-4の傾向もE-1～E-5と同様であったが、ECが変化している時間帯においてC-2とE-2、C-3とE-3のECを比較すると、いずれも塩水貯留槽に近いC-2、C-3のECがより高い傾向にあった。

今回の採水箇所でも最も塩水貯留槽に近いB-1～B-5の中で、塩水貯留槽水位よりそれぞれ0.075 m、0.273 m低い位置にあるB-2、B-3では、初めて淡水域に入った時間はそれぞれ実験開始から2.0時間後、4.5時間後であり、後者はC-3、E-3に比べて遅く、前者は同じ時間（2.0時間後）におけるECがC-2、E-2より高かった。

4.2 模擬帯水層内の抵抗変化

抵抗値測定センサーによる測定では、総測定数4,536回のうちデータが得られたのは3,326回であり、データ取得率は73%であった。

電気抵抗は概ね $1 \times 10^3 \Omega \sim 1 \times 10^5 \Omega$ のオーダーの範囲内であった。全箇所での平均値は実験開始時に $8.8 \times 10^2 \Omega$ であったものが、実験終了時には $2.3 \times 10^6 \Omega$ となった。比較的浅い位置の測定箇所では、実験中にそれまで $1 \times 10^3 \Omega$ のオーダーであった抵抗値が、10分後の測定では $1 \times 10^5 \Omega$ のオーダーに増加する現象が見られ、これが塩水域から淡水域への移行を捉えていると考えられ

Table 2 EC測定結果
Results of EC measurements

時間	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30
B-1	4410	136	38.9	33.4	33.2	-	-	-	-
B-2	-	4560	4500	1590	78	52.2	41	43.4	33.8
B-3	-	-	-	-	-	-	4560	4150	289
B-4	-	-	-	4420	4420	4460	4480	4470	×
B-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-1	4440	181	60.4	43.6	36	31.9	-	-	-
C-2	4460	4460	4460	816	54.9	38.5	36.5	-	-
C-3	-	-	-	4420	4550	4500	4490	1402	117.6
C-4	-	-	-	-	-	-	-	4480	4460
E-1	4510	40.7	31.8	29.6	-	-	-	-	-
E-2	-	4480	3730	58.9	42.4	37.8	41.7	34	31.5
E-3	-	-	4510	4470	4490	4480	3740	112.4	56.4
E-4	-	-	-	-	-	-	4540	4480	4530
E-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G-1	4300	175.4	31.3	27.7	26.8	-	-	-	-
G-2	4270	4300	239	37.8	29.1	28.9	-	-	-
G-3	-	-	4380	4390	1043	77.5	43.8	40.6	37.3
G-4	-	-	-	-	4540	4020	469	59.8	42.6

単位 (mS/m, 25℃換算), 時間: 実験開始からの経過時間
 - : 測定せず (他のデータより類推可能), × : 測定ミス
 着色 : 2,000mS/m未満

る。

Table 3に取得したデータのうち、測定箇所が塩水域から淡水域に移行するときの測定値の変化の例を示す。

抵抗値測定センサーで得られるデータは10分毎の360点の抵抗値であり、膨大な生データを掲載することは誌面の都合上難しい。ここでは模擬帯水層の中心線から、採水によってECを測定した側のそれぞれの測定箇所において、実験開始から抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えるまでの経過時間をTable 4に示す。

塩水貯留槽の水位より下方のセンサーにおける実験

Table 3 抵抗値の変化例
Example of change in resistance

時間	3:10	3:20	3:30	3:40	3:50	4:00
A(69.5)	4.23E+05	3.83E+05	3.60E+05	3.49E+05	3.49E+05	3.46E+05
A(66.5)	5.55E+04	8.87E+04	1.55E+05	2.21E+05	2.31E+05	2.24E+05
A(63.5)	4.50E+03	9.00E+03	2.87E+04	9.09E+04	1.96E+05	1.84E+05
A(60.5)	2.83E+03	1.95E+03	4.16E+03	1.70E+04	6.07E+04	9.66E+04
A(57.5)	3.77E+03	1.99E+03	1.94E+03	2.82E+03	1.03E+04	5.14E+04

単位: Ω , 着色: $1.0 \times 10^5 \Omega$ を超える測定値, () はセンサー高さ(cm)

Table 4 抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えるまでの経過時間
Times when resistance conspicuously increased

センサ高(m)	A列	B列	C列	D列	E列	F列	G列
0.945	1:00	1:00	0:40	1:30	0:50		
0.915	1:10	1:10	0:50	1:30	1:00	1:00	0:50
0.885	1:20	1:10	1:20	1:30	1:20	1:10	1:00
0.855	1:20	1:40	1:20	1:40	1:30		1:10
0.825	1:20	1:40	1:40	1:50	1:50	1:30	1:10
0.795	2:00	1:50	2:00	2:00	2:00	1:40	1:40
0.695	3:00	3:10	2:30	2:20	3:00	2:40	2:10
0.665	3:30	3:10	2:40	2:40	3:10	3:00	2:20
0.635	3:50	3:30	2:50	2:50	3:30	3:10	
0.605	4:10	3:40	3:20	3:30	3:40	3:40	
0.575	-	3:50	3:50	4:00	3:50	3:50	3:30
0.545	-	-	4:10	4:20	4:10	4:10	3:40
0.475	-	-	-	-	-	-	-
0.445	-	-	-	-	-	-	-
0.415	-	-	-	-	-	-	-
0.385	-	-	-	-	-	-	-
0.355	-	-	-	-	-	-	-
0.325	-	-	-	-	-	-	-
0.225	-	-	-	-	-	-	-
0.195	-	-	-	-	-	-	-
0.165	-	-	-	-	-	-	-
0.135	-	-	-	-	-	-	-
0.105	-	-	-	-	-	-	-
0.075	-	-	-	-	-	-	-

実験開始からの経過時間, センサ高は模擬帯水層底面が起点
 - : 顕著な増加なし, 空欄: 欠測により判別不能

開始から抵抗値が顕著に増加する時間は、全体的にはセンサーの位置が高いほど、またセンサーの位置が模擬帯水層の中心に近いほど短くなる傾向にあったが、B列の0.795 mセンサー、C・D列の0.795～0.635 mセンサーなど、この傾向に従わない箇所も見られた。

実験終了までに抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えたセンサーの下限高さは、C～G列が0.545 mであったのに対し、B列が0.575 m、A列が0.605 mと、塩水貯留槽に近づくほど高かった。

V 考 察

5.1 模擬帯水層内の塩分濃度分布測定手法について

実験終了時のEC低下域および抵抗値増加域について、Table 2とTable 4を比較すると、B列では下限がそれぞれB-3（高さ0.577 m）とセンサー高0.575 m、C列ではC-3（高さ0.55 m）とセンサー高0.545 m、E列ではE-3（高さ0.577 m）とセンサー高0.545 mとほぼ一致しており、塩水域と淡水域の識別はどちらの手法でも可能であると考えられる。しかしG列ではG-4（高さ0.4 m）とセンサー高0.545 mがそれぞれの下限となっており、0.145 mの差が見られる。この原因として、G-1～G-4には採水チューブを設置しなかったことが考えられる。採水チューブを用いた場合、採水地点は壁面から0.34 m離れた地点となるが、G-1～G-4は壁面に近い箇所からの採水となり、模擬帯水層の中心部とは塩分濃度の分布が若干異なっていた可能性がある。これらの結果より、採水によるEC測定では採水箇所を模擬帯水層の壁面から離す必要がある。

一方、抵抗値測定センサーによる測定は、大量のデータを自動取得することができるため、模擬帯水層内の抵抗値分布を子細に把握することが可能であることが示された。しかし同時に、欠測が多いという問題点も明らかになった。欠測時の動作を確認すると、リレーが切り替わりLCRメータが測定を開始したときに、LCRメータの測定レンジの切り替えが上手くいかないことが多く、特に直前の測定点から抵抗値が大きく変わる点を測定した場合この傾向が顕著であった。この現象は、1地点あたりの測定時間（ウェイトタイム）を長く取ればある程度回避できるが、そうすると1回の測定点数を少なくするか、測定間隔を長く取る必要がある。今回の実験でも、センサーの高さが0.4 m以下の領域は常に塩水であったことから、実験結果を予測して測定するセンサーを選別し、欠測を少なくすることも検討する必要があると考えられる。

5.2 淡水レンズの再現性について

Table 4より、実験中の淡水域を $1 \times 10^5 \Omega$ 以上の部分と定義すると、模擬帯水層中心部が縁辺部（塩水貯留槽付近）に比べて厚い形状を保ちつつ、下方に向かって

徐々に拡大したと言える。このことから、本実験装置による模擬帯水層内での淡水レンズを再現することは可能であると考えられる。今回の実験では、模擬帯水層内の抵抗値やECが時々刻々変化する様子をセンサーや採水による測定で捉える事が可能かどうかを判断するため、降水量を大きめに設定したので定常状態には達しなかった。しかし降水量をより小さく設定すれば、塩淡境界の変動がなくなり、淡水域はレンズ状を保ち続けると予想される。

ここでは井内ら（2000）を参考に、模擬帯水層内に淡水レンズを定常状態で発生させるために必要な降水量を明らかにするため、淡水と塩水の混合がないと仮定し、地下水の圧力を静水圧近似するDupuit近似を用いて、降水量と塩淡境界深度との関係を求める。解析領域はFig. 7に示す均質・等方媒体の不圧帯水層である。

左右の海面高をH、塩淡境界面高を ζ 、地下水位を η 、帯水層の透水係数をK、単位面積当たりの降水量をNとすると、Dupuit近似における定常状態の基礎方程式は次式のとおりである。

$$K(\partial^2 \eta^* / \partial x^2) = -N^* \quad (1)$$

ここで、

$$\eta^* = (\eta - H)^2 / 2(\gamma H)^2 \quad (2)$$

$$N^* = (\rho_f / \rho_s)(N / \gamma H^2) \quad (3)$$

となる。 ρ_f 、 ρ_s はそれぞれ淡水、塩水の密度、 $\gamma = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ である。

両海側端においてはともに $\eta = H$ なので、 $x = 0$ 、 $x = L$ でともに、

$$\eta^* = 0 \quad (4)$$

が成立する。式(1)は η^* について厳密解が得られ、

$$\eta^* = -(N^* / 2K)(x^2 - Lx) \quad (5)$$

となる。式(2)より帯水層底面から地下水面までの高さ

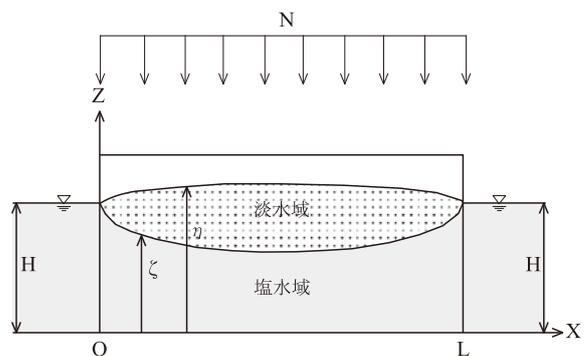


Fig. 7 淡水レンズ解析領域（井内ら（2000）に加筆）
Schematic of freshwater lens (retouched with Inouchi et al. (2000))

η は、

$$\eta = \gamma H(2\eta^*)^{1/2} + H \quad (6)$$

と求められる。地下水流に関して Dupuit 近似を用いると、淡水の圧力 $P_f = \rho_f g(\eta - z)$ と塩水の圧力 $P_s = \rho_s g(\eta - z)$ は塩淡水境界面 $z = \zeta$ において $P_f = P_s$ となるから塩水層の厚さ ζ は、

$$\zeta = \eta - \rho_s \rho_f (\eta - H) / \gamma \quad (7)$$

と求められる。

ここで(5), (6), (7) 式に今回の実験条件, $H = 0.85$ m, $L = 2.2$ m, $\rho_f = 1.00$ g/cm³, $\rho_s = 1.03$ g/cm³, $N = 1.89 \times 10^{-2}$ mm/s, $K = 1.7 \times 10^{-4}$ m/s を与え、模擬帯水層中央部 $x = 1.1$ m における ζ を求めると負の値となる。これは降水強度が大きいため、定常状態では実験水槽内の中央部は淡水で満たされることを意味している。

一方、降水強度を今回の実験の 1/10 まで減じると、 $x = 1.1$ m における ζ が正の値 (0.15 m) となるので、定常状態で淡水域をレンズ状に保つためには降水強度を今回の実験より 1 オーダー小さくできる降雨発生装置が必要である。

今回の実験の結果を受け、降雨発生装置による降水強度をより小さく設定することを試みたが、降雨発生装置に供給する水量を絞ると、降水パイプ内が満流ではなくなり、パイプの位置によって降水量にむらが出てしまうため、実現できなかった。このため、パイプに空ける穴をより小さくするか、パイプの径を小さくする等の改良が必要である。

VI 結 言

本研究では、大型水槽内の模擬帯水層を中心とした淡水レンズ再現装置、および模擬帯水層内の抵抗値分布を自動で測定するシステムを構築し、装置の動作状況を確認するため、淡水浸透実験を行った。

実験の結果、抵抗値測定システムによって測定した模擬帯水層内の抵抗値分布は、採水チューブを用いて測定した模擬帯水層内の EC 分布と整合的であった。一方で抵抗値のデータ取得率は 73% に留まり、その向上のためには現状の測定点数 360 点を減少させるか、実験では 10 分に設定した測定時間間隔をより長く取る必要があ

ることが明らかになった。

実験中の測定より、模擬帯水層内の淡水域は、中心部が縁辺部に比べて厚い、下に凸のレンズ状を保ちつつ、下方に向かって徐々に拡大する様子を把握することができ、本実験装置によって模擬帯水層内の塩分濃度分布を把握できることが明らかになった。

また、Dupuit 近似を用いた計算より、今回の実験条件より降水強度を 1/10 程度小さく設定できれば、定常状態の淡水レンズを維持することが可能であると見込まれるとともに、本実験装置により揚水によるアップコーニングの発生と回復過程を明らかにするためには、降雨発生装置の改良が必要であることが示唆された。

謝辞: 本研究の一部は科研費 (15K07659) および農林水産省委託プロジェクト研究「極端現象の増加に係る農業水資源、土地資源及び森林の脆弱性の影響評価」の支援を受けて実施した。

引用文献

- 井内国光, 坂本光, 柿沼忠男 (2000): 砂モデル実験による海岸及び島しょ地下水の定常挙動, 陸水学雑誌, **61**, 1-10
- 石田 聡, 吉本周平, 小林 勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造 (2010): マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤工学会誌, **58**(5), 1-4
- 石田 聡, 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 今泉眞之 (2013): 深度別電気伝導度連続測定による淡水レンズ動態把握手法, 農工研技報, **214**, 163-173
- 中園知伸, 神野健二, 百田博宣 (2008): 室内実験による淡水レンズ取水工法に関する基礎的研究, 日本地下水学会講演会講演要旨, **2008**, 254-257
- Presley K. T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5098, 1-40
- Secretariat of the Pacific Community (SPC) (2013): Assessing Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise Lifuka Island, Ha'apai, Tonga, Rising Oceans, Changing Lives Final Report, 21-22
- 山口 晶, 吉田 望, 飛田善雄 (2008): 再液化化メカニズムに関する実験的研究, 日本地盤工学会論文集, **8**(3), 46-62

Laboratory Experiment for Reproducing Freshwater Lens in Artificial Aquifers

ISHIDA Satoshi*, ARITA Tomoya**, CAO Yingjie***, TANG Changyuan**,
SHIRAHATA Katsushi*, TSUCHIHARA Takeo* and YOSHIMOTO Shuhei*

*Renewable Resources Engineering Division, Water Resources Engineering

**Chiba University

***Sun Yat-sen University

Abstract

An artificial aquifer of 2.2 m width, 0.8 m depth and 1.05 m height filled with Toyoura sand was installed in a large-scale experiment aquarium to build an experimental device that reproduces freshwater lens in the laboratory. A sensor that measured electrical resistance at 360 points in the experimental device was attached, and a system to measure resistance automatically at predetermined time intervals was concurrently constructed. The artificial aquifer was filled with saltwater supplied by tanks of saltwater on both sides. Afterwards, freshwater (simulated rainfall) was added from the upper part while keeping the water level of the saltwater tank constant. Measured electrical resistance of the artificial aquifer indicated that the freshwater area in the central part was thicker than the one at the edge and that it formed a convex lens boundary below it. The size of the freshwater area expanded during the experiment. This result shows that freshwater lens can be reproduced with this device. The resistance distribution in the artificial aquifer acquired in the system corresponded to EC measurements of the water. The rate of data acquisition for the system was 73%. This rate is lower than expected, so the measurement conditions must be modified.

Key words: *Freshwater lens, Experiment, Groundwater, Aquifer*

堰下流河床低下時の護床工法の比較実験

—マット工法の効果—

常住直人* 高木強治* 島崎昌彦* 吉永育生**

* 水利工学研究領域基幹施設水理担当

** 農林水産省農林水産技術会議事務局研究統括官室

要 旨

堰下流の河床低下が上流の堰側に及び護床を破壊する等、堰本体に被害をもたらすことがある。これを抑制すべく対策工法を考案し移動床水理模型実験により比較検討を行った。検討した工法は、護床ブロックの追加、底板敷設、ブロック連結、大型ブロック化、吸い出し防止マット敷設等の組み合わせである。本研究から、ブロックの連結や大型化のみでは堰被害を防ぎ難いこと、連結護床ブロックと吸い出し防止マットによる工法がエプロン直下の洗掘抑制に長期間有効なことが分かった。また、実験結果よりマット工法の設計・施工についての提案を行った。

キーワード：取水堰、護床工、河床低下、局所洗掘、移動床水理模型実験

I 緒 言

農業取水堰の多くは、圃場への送水の便から河川中上流域に設置される（常住・高木，2010）。一方、堰下流の河川中下流域では、骨材採取や治水のため、河床浚渫が成されることが多い。このため、その上流側の堰の直下でも漸次、河床が低下していき、実際、多数の堰で築造当初フラットだった護床の傾斜化や、エプロン直下での段差発生が見られる（常住ら，2009）。これらの傾斜や段差が、下流河床の低下に起因するのは、魚道下流口の水位低下を伴うことから分かる（篠邊，1989；常住ら，2009）。なぜなら、堰直下付近の局所洗掘によって生じた傾斜や段差では、魚道下流口の水位低下は起きないからである（常住・高木，2010）。

河床低下に伴い傾斜や段差が生じている場合、堰上下流の水位差が大きくなるので、パイピングや堰直下の洗掘（根入れ露出など）など構造上の問題が起きやすい。また、河床低下が経済活動や治水など、人為的要因に起因しているのであれば、その変化は比較的大きく、かつ現状で止まるとは限らない。したがって、今後も進行しうる河床低下に対応できるように、かつ近年の財政状況も鑑み極力低コストで堰の長期供用を図れるように堰の保全工法を体系化していく必要がある。

河床低下の問題については、従前、蛇行水路等での移動床実験により階段式、斜路式、1段式などの復旧工法の洗掘軽減効果を調べた研究がある（三輪・高井，2011）。この研究は、堰被災後の各復旧工法の洗掘軽減

効果や砂礫堆の進行に伴う洗掘深さの変動について、有用な情報を与えている。

一方、下流河床低下が堰直下に及ぶ際の被災メカニズムは、護床ブロックも再現した直線水路の移動床模型実験で調べられている（常住ら，2014）。この研究では、被災は護床直下の洗掘、護床の傾斜化に始まり、エプロン直下の洗掘域拡大へと進行していくことが分かっている。また、護床ブロックの流出有無により、被災の進行速度やパイピング、根入れ露出など被災規模が異なることも分かっている。したがって、護床直下の洗掘や護床の傾斜化など、初期の護床被害時の改修において、エプロン直下の洗掘を抑える工法とすれば、事後、堰本体が被災するまでの期間を延ばせ、被災規模を軽減でき、復旧コストを抑制出来ると考えられる。これは堰の長期供用化や、長期供用時のライフサイクルコスト低減に資する。

そこで、本報文では、その端緒として、護床ブロックも再現した移動床模型実験を行い、各種護床工法によるエプロン直下の洗掘抑制効果、根入れ保護効果を比較検討した。以下、本報文では、各工法の現地での効果を分かりやすくするため、特に断らない限り現地換算での表記とする。

II 実験方法

2.1 相似則と模型および実験諸元

河川中上流域の河床変動は、掃流砂が主体であり、重

力が卓越する現象なので、流れをフルード相似、砂・ブロックをシールズ相似とした縮尺1/50の移動床模型で実験を行った。このため、模型には天然珪砂を用い、模型ブロックの比重は実物と同程度に調整し、水温は15～25度に設定した。実際、実験中にリップルの発生は見られず、粘性の影響は無視出来るものであった。

実験は給砂無しとし直線矩形水路 (Fig. 1) で行った。この水路の模型寸法は既報文 (常住ら, 2014) と同様で、内幅0.23 m, アンダーフロー流入ゲートまでの上流端整流区間長が0.38 m, エプロン区間長が0.2 m, その下流の移動床区間長が4.65 mという構成であり、移動床区間では、堰の土砂吐側 (ミオ側) の護床から護床工下流の低下河床までを再現した。

実験模型および実験諸元は、農業取水堰の標準的諸元から設定し、標準的諸元は国土交通省河川局 (2009), 山本 (1988), 農業土木学会 (1990), 川合 (1975), 常住ら (2014) を参考に次の値とした - 河床勾配1/450, 河床の60%粒径4.3 cm, 90%粒径10 cm (粒径は河床勾配より設定), 河道支配流量～計画高水流量 (単位幅当たり) 6.0～18.3 m³/s/m, 堰高3 m, 下流河床落差5 m。

以上より河道支配流量～計画高水流量での流入フルード数は3.9～2.7, 下流水深は2.20～5.98 m (模型4.4～12.0 cm) となる。また、模型砂の50%粒径は0.83 mm (60%粒径0.87 mm) とした。なお、模型砂の粒度は、0.25 mm未満が1%, 0.25～0.425 mmが5%, 0.425～0.850 mmが51%, 0.85～1.180 mmが43%で、(84%粒径) / (16%粒径) は1.72で概ね均等である。

実験の初期砂面形は、護床区間を含むエプロン下流端から下流113.4 m地点まではエプロンと同一標高とし、そこから攪乱時水中安息角31.5度 (河村, 1982) で下流河床落差にすり付く形状とした。

なお、本実験はフルード模型のため、パイピングなど粘性の影響が無視しえない事象では現地との差異が大きくなりうる。このため、現地では今回の実験結果よりもパイピングは激しくなると考えられる。

2.2 洪水波形

堰側の河床低下は、小流量時には護床下流端からの護



Fig. 1 実験装置全景

Photograph of the experimental apparatus

床の傾斜化が緩慢に上流に及ぶことで進み (「傾斜進行型」), 一方、大流量時には (護床直下水位の低下に伴い) 護床直下に局所洗掘域が発達し、その洗掘域に護床ブロックが転倒、流出して護床が破壊されつつ、洗掘域が急速に上流に進行して進むことが分かっている (「局所洗掘進行型」) (常住ら, 2014)。いずれも、傾斜や洗掘がエプロン直下に達したところで、エプロン直下洗掘域が発達し、根入れ露出など堰構造の不安定化を来すが、低頻度な大洪水ほどそれが急激かつ大規模に進む。そこで今回の実験では、局所洗掘進行型となる低頻度の大洪水波形で各工法の効果を比較することとし、自然の洪水波形を外挿すべく、計画高水流量2日通水 (以下, 「ピーク時」), 河道支配流量2時間通水 (以下, 「減水時」), 停水 (以下, 「停水時」) とした (以下, 「代表波形」)。

2.3 検討した護床工法

今回検討した主要な護床工法は次の6種である。

- 護床追加：計画高水流量を設計流量とした設計基準 (農業土木学会, 1982) に即した標準的な護床工 (護床区間長56.7 m, 計画高水時の粗度係数0.037, ブロック配置は千鳥) の下流端に、護床ブロックを追加投入したものである。護床ブロックは質量3.1 t, 密度2400 kg/m³のイボ粗度型 (幅0.9×長1.8×厚0.75 mの直方体中央に幅0.5×長0.75×高さ0.3 mのイボを付けた形状) である。ブロック追加は概ね現場準拠で護床下流端から護床延長の17.5%区間に設計ブロックを二層化することで行った。
- 底板&護床 (Fig. 2)：大洪水時の急激な河床低下でのパイピング被害と根入れ露出被害を防ぐべく、護床工の上流部底面に遮水底板 (長さ25 m) と遮水根入れを設けたものである。また、当初の減勢機能を維持すべく、護床上流部 (護床のうち、堰放流の減勢により跳水に至る部分) のブロック流出を抑止する隔壁を底板下流端に設けている。
- 底板&連結護床：「底板&護床」とほぼ同様だが、護床下流部 (護床のうち、跳水に対し砂面を保護する部分) のブロック流出も抑止すべく、護床下流部のブロック同士と隔壁・ブロック間を連結したものであ

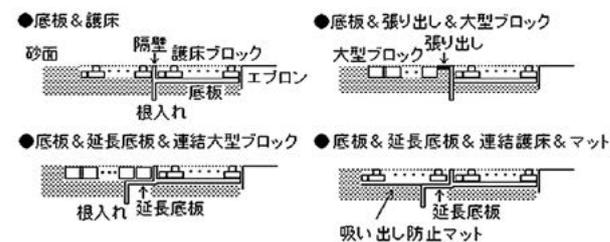


Fig. 2 検討した護床工法

Figures of tested riprap types

る。連結長さ（連結ブロックの屈撓性確保のための余裕長さ）は0.5 mである。実験ではテグスをブロック天端中央に接着して、上下流方向・左右方向の隣接ブロックと連結した。

- 底板&張り出し&大型ブロック (Fig. 2)：「底板&護床」と類似だが、護床下流部のブロック流出を抑止するため、この部分のブロックを大規模化・重量化したものである。また、底板直下の洗掘を抑えるべく、ブロックの面積、厚さを増し、砂面被覆率（単位面積当たりのブロック被覆面積の%）を高めた。この大型ブロック（幅2.15×長4.8×厚1.5 m、イボ無し、29.4t、1900 kg/m³）は、杵工に現場砂礫を詰めてフタをする簡易・低廉な構造を想定している。さらに、本工法では、減水時のナップ垂れに対し、底板直下の根入れを保護すべく、底板下流端の隔壁天端に張り出し（長さ1.5m）を設けた。
- 底板&延長底板&連結大型ブロック (Fig. 2)：「底板&張り出し&大型ブロック」と類似だが、大型ブロック同士を連結してある。この場合の連結長さは、厚手の大型ブロックの屈撓性が不足しない程度で、かつブロック隙間が極力広がらないように1.15 mに抑えた。また、本工法では、張り出しを設けず、代わりに底板を護床下流部側に10 mだけ延長した。これは、延長底板上のブロックを底板直下の洗掘域にずり落ちさせることで、直下洗掘域発達時も底板直下の砂面や根入れの被覆保護を図るものである。なお、護床下流部はこの底板延長分だけ延伸してある。
- 底板&延長底板&連結護床&マット (Fig. 2)：「底板&延長底板&連結大型ブロック」と類似だが、大型ブロックを護床ブロックに変え、その護床区間の底面に護岸などに用いられている吸い出し防止マットを敷いたものである。マットにはポシブルAK65N（旭化成ジオテック社製、ポリエステルSB長繊維不織布、厚さ3 cm、透水係数0.71 cm/s）を用いた。

2.4 計測方法

流量計測は直角三角堰、水位・砂面計測はポイントゲージと側面からのビデオ画像解析により行った。水路横断方向の砂面標高には大きな差異が無く、固定した偏りも無く、とりわけ洗掘域では差異が無かったので、砂面計測は概ねビデオ画像解析に依った。

Ⅲ 実験結果と考察

ここでは洗掘抑制効果をエプロン、底板、延長底板などの根入れ直下の洗掘容積の増大速度により、また、根入れ保護効果を根入れ直下の段差の小ささにより代表させる。直下洗掘容積は、直下洗掘域のうち、洗掘域下流端の鞍部（凸部）標高以下の部分の容積であり、鞍部が消失した後は、洗掘域直下の低下河床標高以下の部分の

容積とした。また、直下段差、洗掘深はエプロン面標高を基準とした。各護床工法の実験結果は次のようになった。

3.1 護床追加

「護床追加」でも護床直下洗掘域へのブロックのずり落ち、流出と護床の破壊は防げず、洗掘域は護床を破壊しつつ急速に上流に進行した。下流に堆積する流出ブロックがブロック追加で高密度になる分、それによるセキ上げと相まって土砂流出が抑止されるが、標準的な護床よりも直下洗掘の発達が若干遅くなった程度で抑制効果はあまり見られなかった (Fig. 3)。

3.2 底板&護床

底板下流端に隔壁を設けたため、護床上流部のブロック（底板上）は流出しなかった。これにより当初設計の減勢が維持され若干洗掘が抑制された (Fig. 3)。しかし、護床下流部のブロック流出や護床の破壊は防げず、「護床追加」の場合と大差がなかった。

3.3 底板&連結護床

護床ブロックの流出や護床の破壊は連結護床化で抑えられ、護床直下洗掘域は上流に進行しないが、護床下流端から護床の傾斜化が生じ、それが底板直下に達するとナップの落下地点を中心に底板直下にも洗掘域が発達した。急激な護床の破壊は起きないので、前形式までと比べ直下洗掘域の発達はかなり抑えられた (Fig. 4)。しかし、ナップが垂れる減水時には直下段差が増大し、根入れが大きく露出して、根入れ保護効果は十分でなかった (Fig. 5, Fig. 6)。これは、i) 底板直下の洗掘域が広がるにつれ、護床ブロック間の隙間が広がり砂面被覆率が下がること、ii) 減水時にはナップが垂れつつ下流水位も低下するので、衝突水脈の鉛直方向流速での吸い出し洗掘を抑止し難くなること、に依ると考えられる。

直下段差は最終的に直下洗掘の最大深さ程度（エプロン標高から当初設定した下流の低下河床標高までの落差

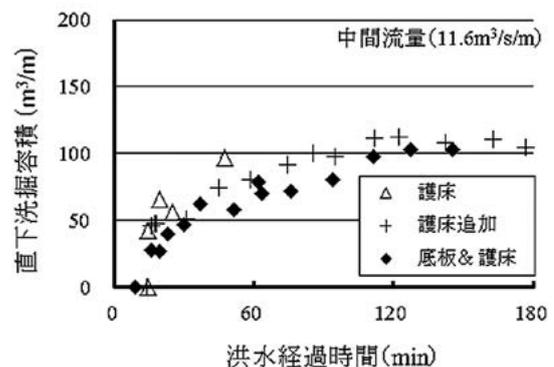


Fig. 3 各工法での直下洗掘の発達状況（その1）
Differences of scouring volumes in time series by riprap types (1)

(下流河床落差)の約2倍)に増大した。また、直下段差拡大に伴う流下土砂は連結護床下流部の上に堆積するため、根入れ直下の護床はその上下流端が拘束されて吊り橋化しつつ、その底面が空洞化していった (Fig. 6)。

なお、隔壁と連結護床を連結しない場合は、吊り橋化、空洞化は起きないものの、底板直下洗掘の発達に伴い連結護床・隔壁間に隙間が生じ、減水時に連結護床の上流部が捲れ上がって、やはり同程度の根入れ露出が生

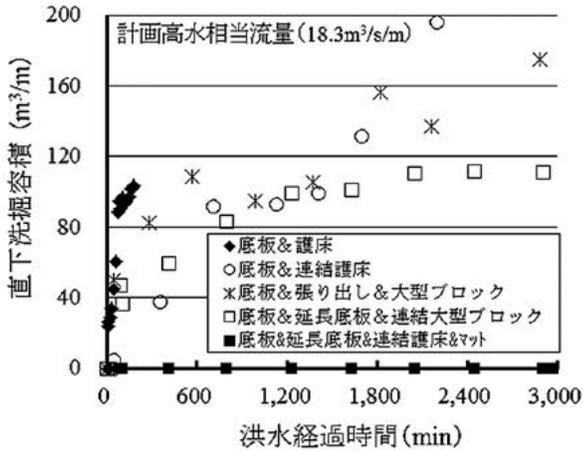


Fig. 4 各工法での直下洗掘の発達状況 (その2)

Differences of scouring volumes in time series by riprap types (2)

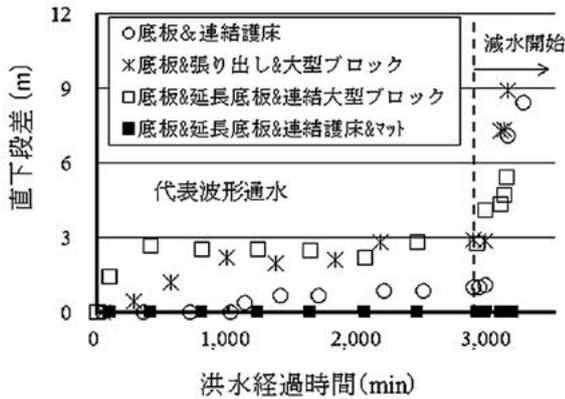


Fig. 5 各工法での直下段差の発達状況

Differences of scouring drop in time series by riprap types

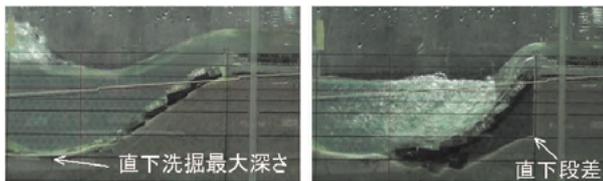


Fig. 6 減水による連結護床の吊り橋化 (左: 減水前, 右: 減水後2時間。「底板&連結護床」)

Suspended chained riprap by scouring while discharge decreasing

じた。

3.4 底板&張り出し&大型ブロック

大型ブロック護床でも護床直下洗掘域の上流移動は防げなかった。この場合は、ブロックが大型なのでブロックの流出、散逸はほとんどなく、護床直下の洗掘域への下流端ブロックのずり落ち、その上流側のブロック隙間の増大、隙間での縦渦洗掘発達、縦渦洗掘域への上流側ブロックのずり落ち、ブロック間隙間の増大、という順序で洗掘域が漸次、上流に移動した (Fig. 7)。その間、縦渦洗掘等によりブロック上流面の露出が大きくなったブロックは、上流面が流れに押され、幾つかが下流に流された (Fig. 7)。

この場合も洗掘域が底板直下に達すると、そこでの落下流により洗掘域が拡大していくが、流下ブロックが遠方に散逸しないため、それが洗掘域直下で副ダムの作用するようになると、洗掘域での跳水が比較的安定した。そうなるまでは未連結のブロックで不安定なため、洗掘抑制効果も不安定で、平均的には「底板&連結護床」とあまり変わらない抑制効果であった (Fig. 4)。

抑制効果が改善しないのは、洗掘域へのブロックのずり落ち、流出はブロックの大型化、重量化でも防げないためであり、そうなるのは、洗掘域とその直上流の水位差によって、砂面被覆率が高い大型ブロックでも、ブロック底面にパイピング的な吸い出し洗掘が起きるためである (Fig. 7)。なお、エプロンと接合していない底板でも、水位低下時には、大型ブロック同様のずり落ちが起きた。

底板直下の洗掘域が拡大すると、ブロックと張り出し間に隙間を生じるようになり、張り出し下面で縦渦洗掘が発生して、根入れが露出した。本型式は、張り出しがあり大型ブロックの砂面被覆率も高いものの、ブロック間や張り出し・ブロック上流端間の隙間発生により、減水時の根入れ露出は、「底板&連結護床」の型式と同程

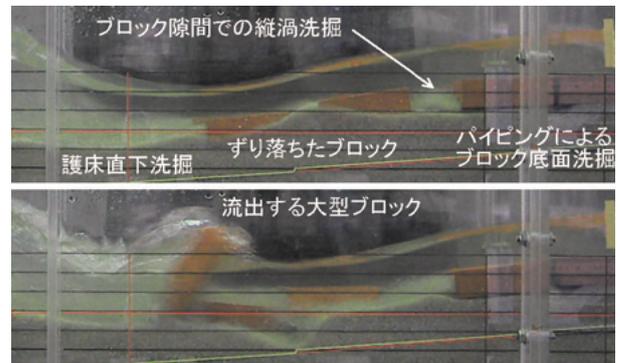


Fig. 7 護床直下洗掘と護床破壊 (計画高水通水後30分。「底板&張り出し&大型ブロック」)

Riprap destruction by its downstream scouring

度生じた (Fig. 5)。

3.5 底板 & 延長底板 & 連結大型ブロック

「底板 & 張り出し & 大型ブロック」と同様のメカニズムで洗掘域が上流に移動するが、連結によりブロック隙間の増大やブロック流出が抑えられるため、洗掘抑制効果はより高く、かつ洗掘容積も安定した (Fig. 4)。

一方、根入れ保護効果については、延長底板上のブロック下面で縦渦が起き、当初から「底板 & 張り出し & 大型ブロック」と同程度の根入れ露出が生じた (Fig. 5)。これは延長底板上のブロックが、根入れ直下の洗掘域拡大に伴い洗掘域側に引っ張られ、延長底板下流端からはみ出すためである。

減水時には、ブロック隙間は連結無しの場合よりも開かないものの、ナップ垂れと下流水位低下により隙間から吸い出し洗掘が進み、直下段差が増大し、延長底板上のブロックがずり落ちていき、最後は上流端ブロックが浮き上がって、底板直下に全て崩落した (Fig. 8)。崩落したブロックが抑えとなり、根入れ露出の増大はある程度抑制されたものの (Fig. 5)、安定して根入れが保護される状態ではなかった。

3.6 底板 & 延長底板 & 連結護床 & マット

マットにより護床底面からの土砂吸い出しは見られなかった。ブロック底面でのパイピングが起きないので、護床直下の洗掘域が深くなるにつれ、マット底面の土砂が洗掘域に漸次ずり落ち、護床が下流端から緩慢に傾斜化していった。護床直下の洗掘深増大につれ、マット底面土砂のずり落ちが増え、護床傾斜の下流端付近が急勾配化するが、更に洗掘深が深くなると、その急勾配部のマット底面の土砂もずり落ち、護床傾斜は全体的にある程度緩勾配になって、これを繰り返して傾斜面が上流に伸びていった (Fig. 9)。

このような洗掘域の拡大、洗掘深の増大、護床下流端からの傾斜化は、護床直下の跳水が波状跳水、潜り噴流と交互に変化していきつつ進行していった (Fig. 10)。

3.6.1 ピーク時の流況

波状跳水時は、洗掘域のナップ落下地点から下流側では底面土砂が下流に移動し、上流側ではナップ下側の縦



Fig. 8 延長底板上ブロックの浮き上がり (減水後34分) と崩落 (「底板 & 延長底板 & 連結大型ブロック」)

Destruction of riprap with large blocks on an extended apron

渦によって底面土砂が上流に移動する。洗掘最深点は洗掘域中央付近になる。上流に移動する底面土砂が洗掘域上流側の傾斜面にある程度堆積するとナップ下側の縦渦は縮小し、ナップはナップ上側の縦渦に押されて下方に垂れ、波状跳水は潜り噴流へと変化する。

潜り噴流時には、波状跳水時に傾斜面に堆積した土砂が下方に垂れたナップによって下流に押し戻される。マット直下が掘れ、洗掘最深点は上流側に移動する。しかし、傾斜面の堆積土砂が流出するにつれ、ナップ下側の縦渦は再び拡大し、ナップは上下に揺らぐようになり、ついには波状跳水に戻る。

波状跳水に戻ると、潜り噴流時に洗掘域中央に押し出された堆積土砂の山は削れて上下流に分かれ、再び洗掘域上流側では上流向きの底面土砂移動が復活する。これによりマット直下の洗掘は埋め戻され、洗掘最深点は再度、洗掘域中央付近に戻る。

以上の過程で、マット下流端付近の傾斜面は、潜り噴流時にやや急勾配化するものの潜り噴流時の露出、波状跳水時の埋め戻しを繰り返す。潜り噴流は洗掘深増大につれ生じにくくなり、潜り噴流時のマット直下洗掘も小さくなり、マット下流端付近の傾斜面形状は概ね安定していく。

3.6.2 減水時の流況

減水時にはナップの垂れと下流水位低下により、潜り噴流時と類似の流況になる (Fig. 10)。マット下流端直下が深く洗掘され、それに伴いマット底面の土砂がずり落ち、マット下流端付近から急勾配になっていく (Fig. 9)。しかし、洗掘された土砂は直下に堆積し、洗掘深の増大は止まり、護床傾斜面の形状は安定していく。傾斜面は急勾配化するが傾斜上流端の位置は変わらず (Fig. 9)、最後まで底板直下には洗掘も段差も生じなかった (Fig. 4, Fig. 5)。

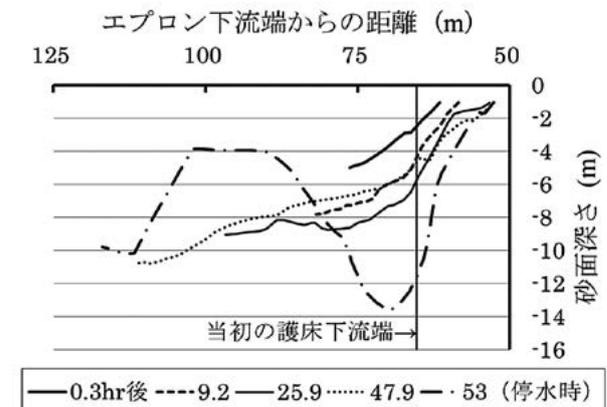


Fig. 9 代表波形通水での護床直下洗掘上流斜面の変化 (「底板 & 延長底板 & 連結護床 & マット」)

Upstream slope profiles of scour in the downstream of riprap on geotextile layer in a representative flood

事後は、護床傾斜面の下流端付近の急勾配部が埋め戻し（洪水ピーク時）、露出（減水時）を繰り返すだけで、河道支配流量に応じた傾斜面形状を中心に安定すると思われる。また、給砂有りで砂堆が発達する条件下では、砂堆の谷通過時には本実験のように護床直下が掘れるものの、それ以外では砂堆の山通過による埋め戻しがあり（三輪・高井, 2011）、減水時に砂堆の谷が通過する状況でなければ今回の実験ほどには掘れないと考えられる。このような傾斜面の安定が崩れ、傾斜面が上流に伸びていくには、マットの破損・亀裂での土砂吸い出し、もしくは計画高水を超えるような異常洪水での護床直下洗掘深の更なる増大が必要だろう。

IV 下流河床低下時の護床工法に関する考察

今回の検討で、護床ブロックの追加やブロックの大型化・重量化・大面積化では、護床直下洗掘域へのブロック流出や護床破壊は防ぎ難いことが分かった。ブロックの流出を防ぎ、洗掘抑制効果を高めるには、ブロックを連結するほうが有効であった。連結していなければ、ブロックの大型化で砂面被覆率を高めても、ブロック間の縦渦洗掘によるブロックの散乱は防げず、ブロック下部の土砂吸い出しはさほど抑止されなかった。

一方、減水時（下流水位低下かつナップ垂れ時）の根

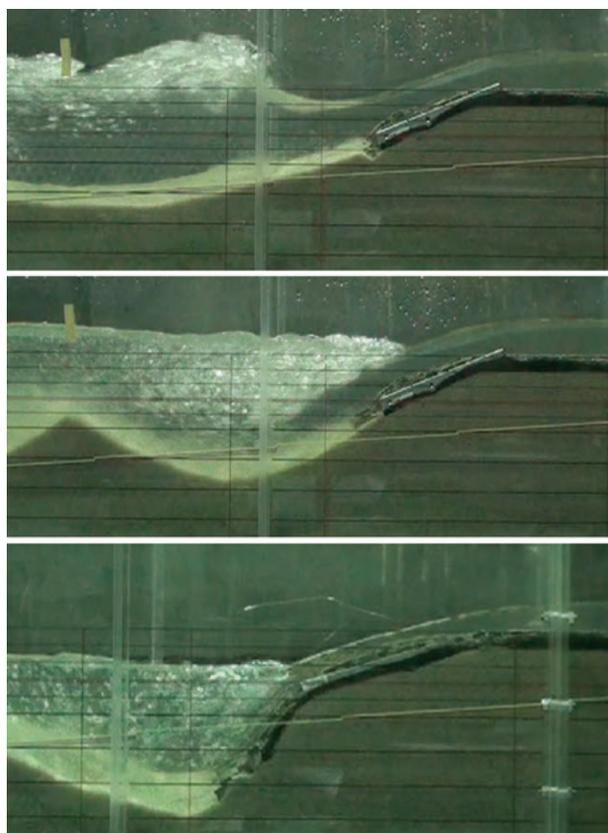


Fig. 10 マット直下の洗掘状況(上: 波状跳水時, 中: 潜り噴流時, 下: 減水時, 「底板&延長底板&連結護床&マット」)
Patterns of scour in the downstream of riprap on geotextile layer

入れ露出は、ブロックの連結、ブロックの大型化（砂面被覆率増大）、張り出し構造の付設のいずれでも防ぎ難く、根入れ露出の防止には吸い出し防止マットの敷設が効果的だった。吸い出し防止マットでは洗掘抑制効果も大幅に改善した。

しかし、マットでは砂礫による摩耗・亀裂がありうるので、マットの保護と押さえのためにブロック被覆等と組み合わせる必要がある。この場合、ブロック被覆を安定化させるためには、ブロック流失を防ぐブロックの連結化が必要であり、かつマットの摩耗を極力抑えるべく、ブロック・マット間、ブロック間の隙間を低減する必要がある。ブロック・マット間の隙間低減のためには連結ブロックの屈撓性向上が求められ、ブロック隙間低減のためにはブロック間隔（連結長さ）の縮小が求められるので、両者を考慮すればブロックの面積・厚さは過度には出来ず、隙間増大につながるブロックの過剰な大型化はむしろ逆効果になる。

以上よりマットと過度に大型でない連結護床ブロックの組み合わせが洗掘抑制効果、根入れ保護効果の向上に有効と考えられる。この型式ではマットを厚く、連結材径を太くすればその分、長期供用化につながる。しかし、マット亀裂による吸い出し洗掘を見逃し、マット補修等が適宜行われなければ長期的にはエプロン直下で洗掘発達となる可能性は皆無でない。したがって、長期的に考えれば、遮水底板や遮水根入れで堰本体を保護するとともに、それらにより下流河床低下分の追加浸透路長を予め確保するのが望ましい。この際、根入れ深さを下流の低下河床高より深く出来れば、将来的に底板直下の洗掘が発達した際の堰改修（段状改修等）も容易になる。遮水底板や遮水根入れを設けない場合は、計画高水での洗掘形状に対し、マット被覆により浸透路長を確保すべく十分なマット長さが必要になる。

以上からエプロン直下河床の低下速度の緩慢化、根入れ保護、長期経過時や想定外洪水時の安全性、次期改修の容易さを考慮すると Fig. 11 のような形式が有効と考えられる。

この型式でのマット長さは、マット傾斜の角度が（マット被覆により）攪乱時水中安息角よりも急勾配になることから Fig. 11 中の式のように代表波形減水前の最大洗掘深と攪乱時水中安息角で決まる傾斜長以上とす

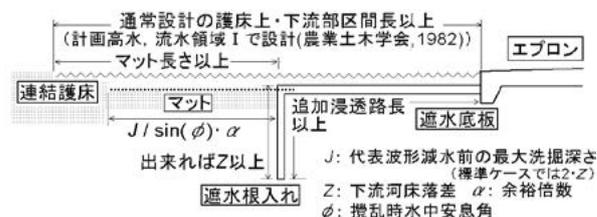


Fig. 11 下流河床低下時に有効な護床工法
Proposed riprap type on condition its downstream riverbed drops

る。そのようにすれば、護床の傾斜はエプロンもしくは底板に達せず、下流河床低下に伴うこれら直下での洗掘や段差を回避出来る。

V 結 言

今回の実験結果から、「底板&連結護床&マット」の工法が下流河床低下時の洗掘抑制効果、根入れ保護効果とも優れていることが分かった。これに対し、護床ブロックの追加、護床ブロックの大型化やブロックの連結化では、エプロン直下の洗掘を抑えられず、根入れも保護出来ず、堰への被害を防ぎ難いことが分かった。今後はマット長さの設計の基になる洗掘最大深についてデータを蓄積し設計図表等を策定していきたい。

謝辞：本論文の実験模型製作には農村工学研究所農村技術支援チーム諸氏にご尽力いただいた。記して深甚なる謝意を表す。

引用文献

川合亨（1975）：河川の流砂機構に関する考察，農業土木試験場技報B水理，**35**，1-14。
河村三郎（1982）：土砂水理学，森北出版，10-11。

国土交通省河川局（2009）：河川整備基本方針，http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html（閲覧日：2010年4月5日）。
三輪式・高井和彦（2011）：堰下流護床工による河床洗掘軽減効果に関する実験的研究，農業農村工学会論文集，**271**，17-23。
農業土木学会（1982）：頭首工の設計，（社）農業土木学会，81-86。
農業土木学会（1990）：農業土木工事図譜 第4集 頭首工編，（社）農業土木学会，13-138。
篠造三郎（1989）：頭首工の魚道 上巻，笹軽印刷，24-25。
常住直人・後藤真宏・浪平篤（2009）：大都市圏の農業取水堰周辺における河床変動とその影響に関する一考察，応用生態工学，**12**(2)，131-140。
常住直人・高木強治（2010）：取水堰下流の河床低下対策に関する一考察，平成22年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨集，10-13。
常住直人・高木強治・島崎昌彦・吉永育生（2014）：農業取水堰下流の河床変動状況と洪水時護床変形に関する実験的検討，河川技術論文集，**20**，301-306。
山本晃一（1988）：河道特性論，土木研究所資料，**2662**，20-49。

受理年月日：平成27年11月4日

Restraint Effects for Scouring in Downstream Riverbed Drop by Riprap Types

— Effects of Geotextile Layer and Connected Riprap —

TSUNESUMI Naoto*, TAKAKI Kyouji*, SHIMAZAKI Masahiko* and YOSHINAGA Ikuo**

*Hydraulic Structures Design and Management, Hydraulic Engineering Research Division

**Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Secretariat of Agriculture, Forestry and Fisheries
Research Council, Office of Director, Research and Development

Abstract

Many diversion weirs have risks of piping, structural unstableness by their downstream scouring from downstream riverbed drop. The drop occurs by downstream excavations to protect downstream city areas from large floods. Management actions are required to extend the life-span of diversion weirs for the downstream condition. Therefore, we examined restraint effects for scouring by downstream riprap types through hydraulic model experiments with movable bed in a representative condition of diversion weirs.

In these experiments, we examined with extra riprap blocks, extended apron and impervious sheet piles, connected riprap blocks, large riprap blocks, geotextile layer and these combinations. Results show that connected riprap blocks on geotextile layer have the best restraint effect for its downstream scouring and perfectly prevent exposure of sheet piles in the condition of the supposed worst hydrograph. And extended apron and impervious sheet piles for enough creep length is also required for future improvement of a weir.

Key words: Diversion weir, Riprap, Riverbed drop, Scouring, Hydraulic model experiment with movable bed

〔農工研技報 218〕
〔107 ~ 113, 2016〕

コンクリート水路の摩耗状態の変化を考慮した 粗度係数評価手法

中矢哲郎* 渡嘉敷勝** 森 充広***

* 水利工学研究領域 沿岸域水理担当

** 企画管理部 業務推進室

*** 施設工学研究領域 施設機能担当

要 旨

農業用コンクリート水路を対象に、補修した平滑な状態、粗骨材が露出する状態まで摩耗が進行した場合の粗度係数の変化を水理模型実験により明らかにした。摩耗した水理的に粗面の水路から、摩耗が進行し粗骨材が露出している水路の粗度の範囲において、表面粗さ測定から算定される算術平均粗さ R_a 、又は最大高さ R_z を用いることでマンシングの粗度係数を推定できることを示した。さらに、同手法を水理的に滑面又は遷移領域にある補修材料に拡張するための実験式を提案した。

キーワード：摩耗，コンクリート水路，マンシング式，粗度係数，相当粗度，水理模型実験

I. 緒 言

農業用水路における劣化、損傷などの材質の状態や、土砂の堆積などの水路の管理状態が通水性能に及ぼす影響を把握する上で、マンシングの平均流速公式中の粗度係数 n は通水性の指標として一般的に用いられる重要な値である。しかし、現状では粗度係数の増加が水路表層の摩耗、損傷による凹凸などの材質の状態によるものなのか、土砂の堆積、雑草の繁茂、藻類の付着など管理状態によるものなのかを分離して評価することが困難である。こうした評価が可能になれば、通水性能の低下が土砂の堆積や雑草の繁茂など維持管理に起因する場合は、清掃や草刈りのみで機能を回復することが可能になり、表面被覆工事等のおおがかりな改修作業を回避し、限りある予算を有効に利用することが可能となる。

現場の粗度係数と材質の表面状態を結びつける試みは数多くなされている。例えば、加藤ら(2007)や、織間・中島(2004)は現場粗度係数を基に相当粗度 k_s に算術平均粗さを用いることを提案している。しかし粗度係数と表層状態を関係付ける時に、現場においては砂礫の散乱や藻類や雑草の繁茂が少なからずあり、それら管理上の不確定要素の影響をなくすことは困難である。よって、水路の摩耗が粗度係数に及ぼす影響を調べたいときに摩耗以外の不確定要素の影響(例えば雑草や水路の凹凸など)を排除できる室内実験での評価が大前提になる。摩耗したコンクリート水路躯体の凹凸の形状から粗度係数を推定する手法は、中矢ら(2008)により水理模型実験を基に提案されているが、新設の平滑な状態から

摩耗し、更に粗骨材が露出するという材質の状態の変化が相対的にどの程度粗度係数に影響を及ぼすのかはほとんど検証されていない。

以上の背景のもと、本研究では、摩耗が進行し粗骨材が露出した状況を模擬した状態、改修直後の平滑な状態の2種類の水路を製作し、粗度係数 n を水理模型実験から求め、粗度係数に及ぼす表面状態の影響を明らかにする。そして、表層の凹凸形状を測定し、中矢ら(2008)により提案されている摩耗したコンクリート水路の凹凸形状から粗度係数 n を推定できる式が、粗骨材が露出した状況まで適用できるかを検証する。

II. 水理模型実験からの粗度係数の算定

2.1 通水面の状態の設定

摩耗したコンクリート水路を対象に、中矢ら(2008)により提案された表層形状から粗度係数を算定する式の適用範囲を検討するため、摩耗が進行し粗骨材が完全に露出した水路底状態を模擬するために、実際のコンクリート粗骨材に近い最大粒径3 cmの玉石を摩耗コンクリート水路の底面部に敷並べた摩耗板を作成した。設置密度は水路底面に均等に 1 m^2 あたり300 gに調整した。並べる時に玉石表面及び、模擬摩耗板表面にエポキシ樹脂を塗布し、流れにより移動しないように完全に固定させた。

礫を設置した水路の状態をFig. 1に示す。礫は底面のみ設置しているため、礫面の粗度係数を算定するためには、合成粗度係数から礫面を分離して算定する必要がある。

ある。合成粗度係数 N の算定には、各部位毎の粗度係数 n_i とその潤辺 S_i を用いた次式を用いた。

$$N = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (n_i^{3/2} \cdot S_i)}{S} \right\}^{2/3} \quad (1)$$

$$S = S_1 + S_2 \cdots S_n$$

よって、礫水路の底面のみの粗度係数を算定するには、まず水理模型実験より合成粗度係数 N を算定し、式 (1) より底面の粗度係数を逆算する。ここで、側面の摩擦板の粗度係数は中矢ら (2008) により予め算定されている 0.013 を用いる。

また、補修直後の状態を想定して、繊維補強セメントにより平滑に仕上げた水路を作成した。繊維補強セメントは通常のコモルタルに用いる材料のほか、ビニロンやポリエチレンの非常に細かくて強い化学繊維を使用しているため従来のセメント材料より高い引張及び曲げ変形能力を有している。現地では材料吹きつけ後にコテ仕上げで平滑性をもたせる。今回の実験においても現地の状況を想定しコテにより表面を平滑に仕上げた。

2.2 水理模型実験の方法

水理模型実験に用いた水路の概要、及び記号の定義を Fig. 2 に記す。実験には農村工学研究所頭首工第一実験

棟内の長さ 50 m、幅 60 cm の直線水路を用いた。摩擦板を設置した水路断面を Fig. 3 に示す。水深、標高、流速の計測は Fig. 2 に示すように上流、中央、下流の各計測点において行った。流入流量は水路最上流部の四角堰の越流水深をマンメータにより測定し、JIS 規格の板谷・手島の式を使用し算定した。人為的誤差の影響排除を目的として、水深計測に際してはサーボ式波高計により 100 Hz で 9,000 データの水面変動値を平均して算定した。平均流速は流量データと水深データから算定した。

粗度係数は、Fig. 2 に示す水路の上流-中央間、中央-下流間のエネルギー勾配を求め、上流側及び下流側の 2 つの粗度係数を算定し平均した値を用いた。エネルギー勾配は Fig. 4 に示すように、計測した水深、水路標高値、流速値から上流-中央間、中央-下流間の値を求める。礫水路において水深を計測する際は玉石凹凸部の最上部を水深の最深部とした。マンニングの平均流速公式は次のとおりである。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I_e^{1/2}$$

$$I_e = I - \left\{ \alpha \frac{Q^2}{2g} \frac{1}{L} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 U : 流速 ($m \cdot s^{-1}$)、 R : 径深 (m)、 I_e : エネ



Fig. 1 模擬摩擦水路への礫設置状況
Installation of gravel to experimental channel

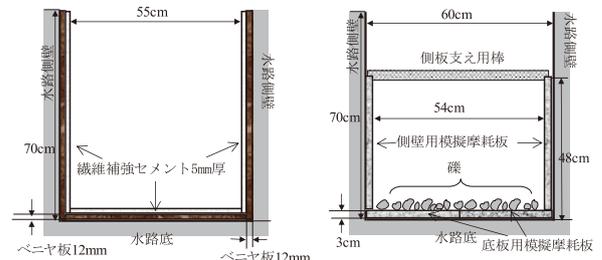


Fig. 3 実験水路の断面
Schematic cross-sectional view of experimental channel

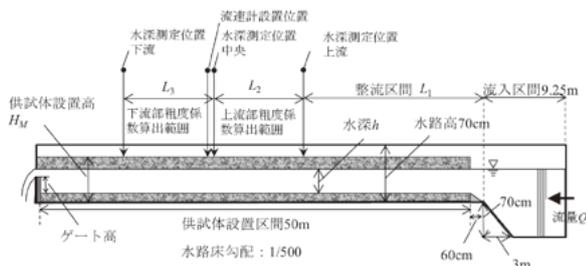


Fig. 2 実験水路の概要
Schematic plan view of experimental channel

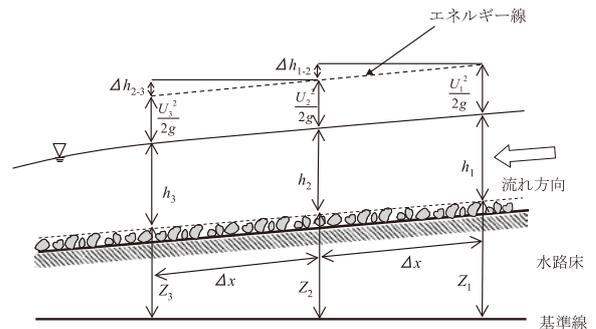


Fig. 4 凹凸面を考慮したエネルギー勾配の算定法
Method for calculation of energy gradient that considers corrugated surface

ルギー勾配, g : 重力加速度 ($m \cdot s^{-2}$), n : マニングの粗度係数, I : 水面勾配, Q : 流量 ($m^3 \cdot s^{-1}$), A_1 : 上流側流積 (m^2), A_2 : 下流側流積 (m^2), L : A_1, A_2 間の距離 (m), α : 流速分布補正值 (開水路では1.0~1.1を使用), である。水路床勾配を I_b とおくと, 等流条件の場合は $I_e = I = I_b$ となる。

相当粗度 k_s (m) と Manning の粗度係数は次式で表せる。

$$n = 0.042k_s^{1/6} \quad (3)$$

よって相当粗度 k_s を通水表面の状態から算定できれば, 通水することなしに, 粗度係数を算定することが可能となる。

2.3 表面粗さの測定

水路の表面粗さの測定はレーザー変位計により, Fig. 2 の水深測定位置3カ所において, 各2測線選定し, 0.01 mm 精度で1 mm 間隔で評価長さ30 cm の計測を行い傾斜補正を行ったデータを採用した。評価長さは, 過去の調査事例では15 cm 程度の型どりゲージで測定しているが, 正確な評価のために30 cm とした。加藤ら (2007) による摩耗したコンクリート水路の凹凸測定結果では, 縦, 横方向数十点ではほぼ同じ傾向を示す。よって水路側壁および水路底に水路長全体にわたり設置した模擬摩耗板ユニット一枚につき1測線で全体を概ね代表できるとした。ここで, 水路底用模擬摩耗板ユニットの幅×長さ×厚さは, 29.5 cm × 60 cm × 3 cm (約12 kg) であり, 側壁用模擬摩耗板ユニットは45 cm × 60 cm × 3 cm (約18 kg) である。

2.4 実験条件

Table 1, 2 に, 実験条件を示す。表中の横断線は流速を一定にし, 水深を変化させることを意味する。水路床勾配は1/500 とし, 流速一定条件下で水深 (径深) を変化させる条件, 水深一定条件下で流速を変化させる条件を設定することで, 礫水路におけるフルード数を, 0.1 ~ 0.6 に含まれる22ケースの条件を設定した。繊維補強セメント水路の実験条件は, 0.1 ~ 0.8 に含まれる31ケースの条件を設定した。フルード数は, 実際の常流水路の流れの範囲を含めるように設定した。

III. 検討結果

3.1 粗度係数の特徴

Fig. 5 にフルード数と粗度係数の関係を示す。比較のために中矢ら (2008) の摩耗板の粗度係数も併記した。(3)式を用いて粗度係数を相当粗度のみから表すためには, n が流れの状態によって変化せず一定値を示すことが必要である。粗度係数は, 開水路の流れの状態を表す代表的な数値であるフルード数の変化にかかわらず一定

値を示している。また, レイノルズ数の変化に対しても粗度係数は一定値を示す傾向にあった。よって, 相当粗度のみから n を算出する(3)式を使用することは妥当といえる。

繊維補強セメントの粗度係数の測定値は0.0103であった。設計基準値のもととなったChow (1962) のデータの, コンクリート (暗渠, 直線) で0.010~0.013, セメント (モルタル) で0.011~0.015, の値の最小値が繊維補強セメントの値に一致している。模擬摩耗板の粗度係

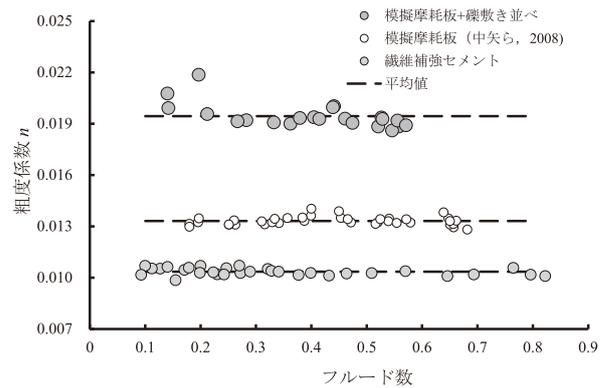


Fig. 5 フルード数と粗度係数の関係

Relationship between Froude number and the coefficient of roughness

Table 1 設定した実験条件 (礫水路)

Experimental conditions (Gravel canal)

$L_1 = 20$ m, $L_2 = 10.8$ m, $L_3 = 10.8$ m, $H_M = 0.48$ m

Run	流量 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	平均水深 (m)	平均流速 ($m \cdot s^{-1}$)	径深 (m)	レイノルズ数	フルード数
01	0.119	0.299	0.755	0.140	225997	0.441
02	0.149	0.349	0.811	0.150	282679	0.439
03	0.034	0.281	0.232	0.136	65259	0.140
04	0.048	0.350	0.262	0.150	91699	0.142
05	0.050	0.289	0.331	0.138	95666	0.196
06	0.070	0.342	0.388	0.149	132877	0.212
07	0.069	0.282	0.469	0.136	132105	0.282
08	0.093	0.356	0.498	0.151	177316	0.266
09	0.090	0.283	0.603	0.136	170534	0.362
10	0.117	0.358	0.622	0.152	222553	0.332
11	0.105	0.291	0.683	0.138	198974	0.404
12	0.141	0.371	0.722	0.154	267828	0.379
13	0.123	0.297	0.786	0.140	233847	0.460
14	0.162	0.383	0.803	0.156	307964	0.414
15	0.141	0.299	0.892	0.140	266840	0.521
16	0.184	0.382	0.917	0.156	349924	0.474
17	0.047	0.144	0.625	0.093	90006	0.527
18	0.103	0.232	0.842	0.123	195456	0.558
19	0.156	0.311	0.953	0.143	296492	0.546
20	0.057	0.163	0.668	0.101	108776	0.529
21	0.118	0.254	0.878	0.129	223175	0.556
22	0.174	0.324	1.018	0.145	330030	0.572

数は0.013であり、摩耗を模擬していながらも計画設計基準水路工（農林水産省農村振興局，2001）で示されるコンクリートの粗度係数0.012～0.016（現場打ちフルーム，暗渠等）の範囲内にある。礫水路では0.019となり，コンクリート水路の範囲を超えている。

このように水路の表面状態の違いにより粗度係数が異なることが明確に示された。

3.2 各材料の表面粗さと予測式の適用範囲

礫水路，摩耗板，繊維補強セメントの各表面粗さパラメータの算定結果をTable 3に示す。中矢ら（2008）は水理模型実験より得られた模擬摩耗板の n と，模擬摩耗板表面の各種表面粗さパラメータの実測値から，(3)式中の k_s と表面粗さパラメータとの関係を表す実験式を以下のとおり示した。

$$k_s = 2 \times R_a \tag{4}$$

$$k_s = 0.26 \times R_z \tag{5}$$

ここで，最大山高さ Z_p は粗さ曲線の平均線から最も高い山頂，最大谷深さ Z_v は最も深い谷，最大高さ R_z は Z_p と Z_v の合計である。算術平均粗さ R_a は，粗さ曲線の平均線からの高さの絶対値の平均を表したものである。具体的には粗さ曲線における基準長さ l の，1 mm 間隔の測定位置における，平均線から粗さ曲線までの偏差の絶対値を合計し平均して算出する。今回は基準長さとして評価長さを同じ設定にした。また(3)式の適用範囲は粗面乱流であるため（中矢ら，2008），表面粗さをを用いて粗面滑面の判定を行った。礫水路は粗面乱流であり，繊維補強セメントは滑面から粗滑遷移領域に分類された。よって繊維補強セメント水路は式(3)の適用範囲外となる。

礫水路の表面状態を，Fig. 6に示す。礫による突起部分が明瞭に表れている。この凹凸形状は目視でも判読可能である。中矢ら（2008）によると，高さ方向の凹凸の偏りを表すパラメータであるスキューネス R_{sk} により摩耗形状を特徴付けられ，式(4)，(5)の適用条件の一つとしている。ここで $R_{sk} > 0$ は，表面の凸部分が大きく尖り，山頂部から深い位置に高さ分布が偏っており， $R_{sk} = 0$ は，凹凸の高さ分布は平均線を挟んでほぼ対称となる。 $R_{sk} < 0$ は，山頂部付近から高い密度を示し，凹凸の高さ分布は山頂部付近に偏っている。模擬摩耗板は，凹凸の全体の形状を概ね形づくるのは $R_{sk} < 0$ の山に相当する形状であり，粗骨材周辺の窪みに相当するのは $R_{sk} = 0$ 型であり，全体としてはこの二つの形状が合成された形状であることが示されている。この条件を礫水路にあてはめると， $R_{sk} = -0.3$ で，式(4)，(5)の適用範囲内となる。なお， R_{sk} の具体的な閾値については，更なる実験ケースの追加による検証が必要である。

これらの検討より今回の礫水路の条件は，粗面乱流

で，0に近い負の R_{sk} 値であり，式(3)，(4)，(5)による粗度係数の算定の適用が可能であることを示している。

3.3 表層形状特性からの粗度係数の評価

式(4)，(5)から k_s を求め n を推定した結果をFig. 7に示す。三角点で表示している記号は，粗度係数の実測値

Table 2 設定した実験条件（セメント水路）

Experimental conditions (Cement canal)
 $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 10 \text{ m}$, $L_3 = 10 \text{ m}$, $H_M = 0.7 \text{ m}$

Run	流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水深 (m)	平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	径深 (m)	レイノルズ数	フルード数
01	0.036	0.303	0.218	0.144	66006	0.127
02	0.049	0.401	0.222	0.164	89091	0.112
03	0.062	0.506	0.222	0.179	112227	0.100
04	0.074	0.595	0.224	0.189	133414	0.093
05	0.056	0.297	0.341	0.143	101240	0.200
06	0.076	0.406	0.341	0.164	138245	0.171
07	0.096	0.504	0.344	0.178	173136	0.155
08	0.113	0.602	0.340	0.189	204748	0.140
09	0.077	0.299	0.465	0.143	138837	0.272
10	0.102	0.403	0.457	0.164	184110	0.230
11	0.122	0.501	0.441	0.178	220736	0.199
12	0.144	0.601	0.434	0.189	260714	0.179
13	0.093	0.304	0.554	0.145	168191	0.321
14	0.122	0.409	0.541	0.165	220780	0.270
15	0.152	0.502	0.547	0.178	274522	0.247
16	0.180	0.601	0.541	0.189	325226	0.223
17	0.112	0.298	0.681	0.143	202286	0.399
18	0.145	0.403	0.652	0.164	262271	0.328
19	0.178	0.501	0.642	0.178	321727	0.290
20	0.198	0.607	0.591	0.190	358522	0.242
21	0.129	0.296	0.789	0.143	232980	0.464
22	0.165	0.401	0.747	0.164	299467	0.377
23	0.208	0.499	0.754	0.178	376316	0.341
24	0.145	0.301	0.875	0.144	263486	0.509
25	0.192	0.404	0.860	0.164	347098	0.432
26	0.061	0.123	0.903	0.085	111112	0.822
27	0.113	0.207	0.987	0.118	203950	0.694
28	0.162	0.301	0.978	0.144	293937	0.570
29	0.063	0.131	0.866	0.089	113243	0.765
30	0.124	0.201	1.117	0.116	224191	0.796
31	0.182	0.298	1.104	0.143	329200	0.646

Table 3 粗さパラメータの算定結果

Calculation result of rough parameter roughness

	最大高さ R_z (mm)	最大山 高さ Z_p (mm)	最大谷 深さ Z_v (mm)	算術平均 粗さ R_a (mm)	スキュー ネス R_{sk}
礫	27.5	12.7	14.8	5.7	-0.3
摩耗板	4.0	1.4	2.7	0.5	-0.9
セメント	0.162	0.082	0.08	0.033	-

に対し、式(4)、(5)により R_a 、 R_z の実測値から k_s を逆算した値を表示している。丸（灰色）で表示している記号は、式(3)を用いて算定した設定した k_s 毎の粗度係数の計算値である。Table 4 に式(4)、(5)により算定した粗度係数の一覧を示す。

礫水路での n の実測値は 0.0194 で、式(3)から k_s を逆算すると 9.7 mm となった。算術平均粗さを用いる式(4)で k_s を求めると 11.4 mm で、最大高さを用いる式(5)で k_s を求めると、7.15 mm であった。これらの k_s を用いて式(3)から粗度係数を換算すると、 $k_s = 11.4$ mm のとき $n = 0.0199$ で $n = 0.0005$ の誤差、 $k_s = 7.15$ mm のとき $n = 0.0184$ で $n = 0.0010$ の誤差であった。これらの誤差から判断すると、摩耗板から礫水路に相当する表面粗さまでは、式(4)の方が適合性は良い。しかし現地で算術平均粗さを測定する場合は、レーザー変位計などを用いなければならず測定準備や分析等に労力を要する。一方、最大高さの場合は型どりゲージなどで最大山高さと最大谷深さをその場で測定するだけで粗度係数が求められることができるため、大きなえぐれをさげ、かつ式(5)から算定する n 値と実測値との誤差の 0.001 程度を許容できれば現地での適用性は高いという利点がある。

Fig. 8 に現地の水路への適合状況を示す。供用年数 30 年以上の開水路で、目視ではかなり摩耗が進行している状況であり、今回の実験における礫水路と模擬摩耗板との中間に相当する。レーザー変位計を用いて、摩耗水路

の表面形状を測定し、基準長 30 cm に対する R_a 、 R_z 、 R_{sk} を求めたところ、それぞれ $R_a = 1.5$ mm、 $R_z = 11.1$ mm、 $R_{sk} = -0.3$ であった。この結果から、式(4)、(5)から k_s を求め式(3)に代入して n を求めたところ粗度係数は 0.016 となり、模擬摩耗板と礫水路の中間程度という今回の実験結果とも整合する結果がえられた。

以上は摩耗したコンクリート水路や砂礫が堆積している場合の粗面乱流に適用した場合であるが、機能診断を行う上では、表面被覆材などにより補修を行った後の、粗度係数の経年変化を測定したい場合が多い。この場合は補修直後の水路は滑面状態になるため、式(3)の粗面乱流状態の適用範囲外となる。よって、粗面乱流から滑面又は、遷移領域まで、式(3)を補間する式を検討する。Fig. 7 のように、式(3)を単純に拡張すれば繊維補強セメントの粗度係数の推定値は 0.008 となり、実際の測定値を過小評価することになる。この傾向は滑面になるほど顕著になる。よって、繊維補強セメントの 0.010 付近から、摩耗板付近を補間する以下の実験式を作成した。

$$n = 0.033k_s^{1/6} + 0.0034 \quad (6)$$

この式を遷移領域から粗面領域までの補間に用いるこ

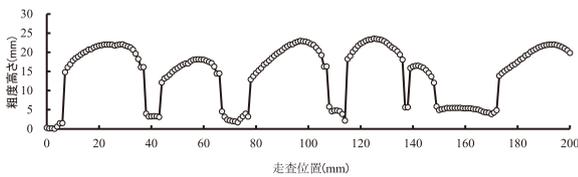


Fig. 6 礫水路の凹凸の例

Example of the surface profile of an experimental gravel canal

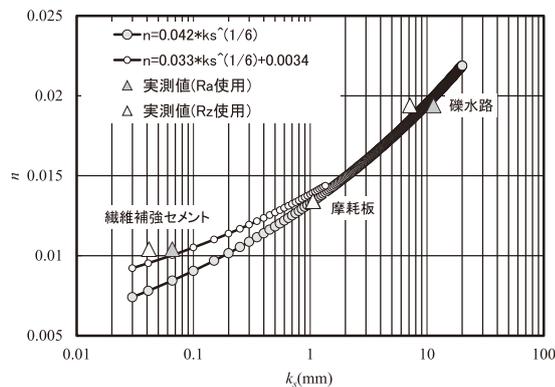


Fig. 7 粗度係数と k_s の関係

Relationship between coefficient of roughness and k_s

Table 4 粗さパラメータと粗度係数
Surface roughness parameters and coefficient of roughness

	算定式	k_s (mm)	換算粗度係数
礫	$0.26 \times R_z$	7.15	0.0184
	$2 \times R_a$	11.40	0.0199
	測定値	9.71	0.0194
摩耗板	$0.26 \times R_z$	1.06	0.0134
	$2 \times R_a$	1.07	0.0134
	測定値	1.05	0.0134
セメント	$0.26 \times R_z$	-	-
	$2 \times R_a$	-	-
	測定値	0.23	0.0104

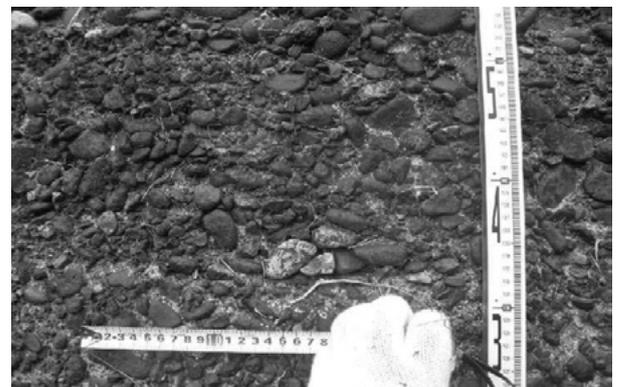


Fig. 8 粗骨材が露出したコンクリート水路

($n = 0.016$, $R_a = 1.5$ mm, $R_z = 11.1$ mm, $R_{sk} = -0.3$)

Concrete canal wall which coarse aggregate exposed

とで、 $k_s = 1 \text{ mm}$ 以下の補修材料の初期の状態の粗度係数を推定することが可能となる。適合状況を Fig. 7の白小丸で示す。しかし上式は、実験から算定した実験式であるため、理論的な検討や実際の適合性は追加試験により実証する必要がある。

IV. 結 言

水理模型実験により摩耗したコンクリート水路を補修した平滑な状態、粗骨材が露出する状態まで摩耗が進行した場合の粗度係数の変化を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 礫水路、繊維補強セメント水路の粗度係数はそれぞれ、0.019及び0.01となり、表面状態の粗さが粗度係数に影響を与えることを確認した。
2. 粗骨材の露出を想定した水路であっても粗面乱流でありスキューネスによる表面形状の条件を満たせば、摩耗したコンクリート水路の表面粗さから粗度係数を算定する式を適用できることを示した。
3. 補修材料のような平滑な面においても表面粗さから

粗度係数を算定する実験式を作成した。

今後は、雑草の繁茂や砂礫の堆積などの水路の管理状態の影響評価手法について、現地の粗度係数測定等から検討する必要がある。

引用文献

- 加藤 敬, 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之 (2007): コンクリート水路壁面経年劣化と水理機能変化, 平成19年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 310-311.
- 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」 基準書 技術書, 154-158.
- 織間宏明, 中島賢二郎 (2004): 開水路における粗度係数の考え方, JIID研究レポート, No.25, 131-157.
- VEN TE CHOW 著, 石原藤次郎訳 (1962): 開水路の水理学 I, 丸善, 92-191.
- 中矢哲郎・渡嘉敷勝・森充広・森丈久 (2008): 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業土木学会論文集, 第258号, 76, 3 23-28.

受理年月日: 平成27年11月4日

Evaluation Technique of the Coefficient of Roughness in Consideration of the Change Situation of the Surface Abrasion of Concrete Channel

NAKAYA Tetsuo*, TOKASHIKI Masaru**, MORI Mitsuhiro***

*Coastal Hydraulics Engineering, Hydraulic Engineering Research Division

**Planning and Promotion Section, Department of Planning and General Administration

***Facilities Engineering, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division

Abstract

We clarified the change situation of the coefficient of roughness in consideration of the characteristics of abrasive surface of concrete channel such as repair smooth and bare coarse aggregate, by hydraulic model experiment. It was shown that Manning's rough coefficient can be presumed by using arithmetic average coarseness R_a or the maximum height R_z , calculated from surface coarseness measurement in the range of hydraulic rough channel like the abraded concrete channel or the channel on which gravel was scattered. Furthermore, in the formula, the empirical formula which can treat the area from a smooth surface side to a roughened surface was proposed.

Key words: *Abrasion, Concrete channel, Manning equation, Coefficient of roughness, Equivalent roughness, Hydraulic model experiment*

〔農工研技報 218〕
〔115 ~ 123, 2016〕

地下水位制御システムの機能発揮状況からみた導入条件

若杉晃介* 原口暢朗* 瑞慶村知佳*

*農地基盤工学研究領域水田高度利用担当

要 旨

地下水位制御システムFOEASは水田の高度利用を実現する新技術として、全国的に普及している。そこで、地下水位制御システムFOEASが導入された全国13地区を対象に、ほ場の土壌タイプ、地下水位、用排水量、作物収量などを測定し、これらの指標が本工法の有する地下水位制御や地下かんがい機能に及ぼす影響を評価し、導入条件を検討した。その結果、土地改良事業計画設計基準 計画「暗きょ排水」の中で規定されている土壌調査（土壌タイプの特定）に加え、現地の地下水位条件を踏まえた暗渠埋設土層の透水性調査が不可欠であることを示し、その閾値は 1×10^{-5} cm/s オーダー程度であることを明らかにした。

キーワード：地下水位制御，地下かんがい，FOEAS，透水係数，インタークレート

I 緒 言

1.1 背景と目的

近年開発された地下水位制御システムFOEAS（以下、FOEAS）は、暗渠排水機能と地下かんがい機能を併せ持ち、湿害と干ばつ害を回避するとともに、転作作物に最適な地下水位を維持でき、高品位安定多収を可能とする技術である（若杉ら，2009）。現在（平成26年12月）、全国194地区、9,767 haに普及しており、食料・農業・農村基本計画（農林水産省，2015）においても力強い農業を支える農業生産基盤整備技術として位置づけられており、今後もさらなる普及が見込まれている。

FOEASはほ場整備事業などの公共事業で導入されることが多く、その工種は暗渠排水として施工される。土地改良事業計画設計基準 計画「暗きょ排水」（農林水産省，2000）では、暗渠排水の施工にあたり地形、土壌、地下水位、気象などに関する項目について事前調査することが要件とされており、特に土壌断面調査と耕盤下（地下30 cm程度）の透水係数を計測することが重要とされている。一方で、FOEASでは地下かんがい時に暗渠から上方に向かって用水が供給されるため、通常の暗渠排水とは異なる施工基準が求められている。そこで、本研究ではFOEASが施工された複数の地区において、現地の土壌タイプや水利慣行を踏まえ、用排水量や作物収量などの調査結果からFOEASを導入する際に考慮すべき適用条件の整理を目的とする。

1.2 既往の研究

地下水位制御システムを導入する条件は一般的な暗渠

排水の施工条件に加えて、地下からのかんがいによる地下水位制御が可能となることが重要である。土地改良事業計画設計基準 計画「ほ場整備（水田）」（農林水産省，2013）では、地下かんがいにおいては暗渠管から上方の作土層に水を供給するため、管より下方の土層は上方の土層に比べて透水係数が小さくなくてはならないとしている。また、藤森・小野寺（2012）によると、地下かんがいを可能とする条件として、水田の下層土が砂や礫などの透水性土壌で降下浸透が大きい水田では地下水位制御が困難であるとしている。これらの既往成果では下層土の透水性についての注意を促すのみで具体的な数値については記述されていない。一方、土地改良事業計画設計基準 計画「暗きょ排水」（農林水産省，2000）では、暗渠管の下層土壌の透水係数は 1×10^{-6} cm/s以下が望ましいと記載されているがその根拠は示されていない。

II 調査方法

導入条件を検討するため、様々な立地条件や土壌タイプ、及び栽培状況下における全国13のFOEAS導入地区を対象に調査を行った。調査項目は地形・土壌調査、透水試験、地下水位や用排水量、収量調査である。

2.1 地形・土壌調査・地区内地下水位

各地区の地形は国土調査による地形分類図（1/200,000）（国土交通省HP）、土壌タイプは土壌図（1/200,000）と現地での土壌断面調査により調べた。また、地区の地下水位は調査ほ場周辺の排水路の深さ及び非かんがい期の土壌断面調査時に測定した地下水位を記

録した。

2.2 透水試験

透水試験は室内透水試験と現場透水試験（インテークレート試験）を行った。作土の現場透水係数は営農作業による間隙や亀裂によって、室内透水試験による透水係数よりも大きな値になる傾向にあるため、補正係数を求める必要がある（荻野ら, 1991）。しかし、本研究では暗渠排水施工の調査項目である下層土層（心土）の透水係数を調べるのが重要であり、心土は作土と異なり営農作業の影響がほとんどないことから補正係数は用いずに試験を行った。また、現場透水係数は室内透水試験よりも広い範囲の透水性が観測できるため、よりバラツキが小さくなることから現場透水試験が可能な場合は優先的に行った。なお、調査は暗渠管が埋設されていない地点において、作物が作付けされていない非かんがい期に実施した。

(1) 現場透水試験

地下水位が暗渠深よりも下位で比較的安定しているほ場では現場透水試験を行った。試験は調査ほ場の表土及び暗渠管が埋設される地下60 cmの層において、シリンダーインテークレート試験（土壤環境分析法編集委員会編, 1997）を行い、ベーシックインテークレートの値から透水係数を算出した（Fig. 1）。なお、シリンダーは内径158 mm（SCB社製, SIS-A）を用い、各層において150 mm打ち込んで調査を行った。

(2) 室内透水試験

降雨後などにおいて地下水位が短時間で表層部付近まで上昇し、土壤の飽和状態が比較的長く続くようなほ場では、現場透水試験が困難なため、土壤タイプを特定するため土壌断面調査を行うとともに、表土層と心土層からサンプリングを行い、室内飽和試験を行った。サンプリングは100 ccの円筒コアサンプラーを用いて、作土や心土、及び暗渠管を埋設した各層において5個のサンプリングを行った。試験は室内飽和透水試験（土壤環境分析法編集委員会編, 1997）による変水位法を用いて飽和透水係数を算出した。

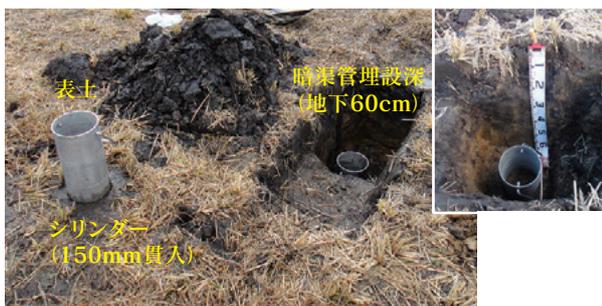


Fig.1 インテークレート試験状況

An intake rate experiment for determining soil hydraulic conductivity at depth around 60 cm

2.3 ほ場内地下水位及び用水量、収量調査

FOEASの地下かんがい機能が十分発揮されたか否かを判定するため、地下水位、用排水量、作物収量を調査した。

(1) ほ場内地下水位

ほ場内に地下水位計（株）ウイジン社製, UIZ-100W）を設置して地下かんがい時や降雨時の水位変動を測定し、FOEASによって設定した地下水位の保持状態や排水後の設定水位への回復状況を測定した。

(2) 用水量

FOEASにおいて、地下かんがい時の用水量を把握するため、電磁流量計（愛知時計電気（株）社製, SA50）を調査ほ場の給水口に設置して用水量を調べた。なお、水稻作時において、若杉ら（2009）は給排水時にFOEASの水位管理者と水位制御器を適切に用いることで節水機能があるとしており、同地区で同じ栽培体系の対照ほ場が確保できた場合はFOEASほ場と同様に調査した。

(3) 収量調査

FOEASによる地下かんがい及び暗渠排水機能は転作作物栽培時の増収効果に貢献する報告が多くされていることから、坪刈調査により作物収量を調べた（例えば、島田ら, 2011）。なお、水稻作時は収量に与える影響が小さいことから対照ほ場に比べて同等の以上の収量が得られているか調べた。

2.4 ヒアリング調査及び文献調査

現地調査による実測ができない場合、調査ほ場を耕作する農家へのヒアリング及び文献調査によって上記の調査項目を調べた。

Ⅲ 調査地の概要と調査内容

FOEASを導入した研究所内の試験ほ場や現地実証ほ場など13地区を調査地とした。各調査地区の概要と調査内容は下記のとおりである（Table 1）。

① K県K地区(1) 及び② K県K地区(2)

K県K地区(1)は河岸段丘に位置し、土壤は灰色台地土で栽培作物は代かき移植栽培による水稻と転作大豆を作付けした。なお、K地区は1 ha程度の団地単位で希望者のみにFOEASを施工しており、団地間の距離が1.5 kmある2団地（K地区(1)とK地区(2)）で調査を行った。地下水位は河川付近のほ場では高いが、調査を行ったほ場では1 m以下と低い。

③ I県T地区

I県T地区は台地に位置する研究所内のほ場で、栽培作物は転作大豆である。土壤は火山性土で、一部客土を行っているため地下水位は低い。そのため、畦畔直下に幅90 cmの畦シート（ポリ塩化ビニル製）を田面より+20 cm～地下-70 cmの位置に埋設して漏水対策を

行った（藤森ら，2008）。また，本調査ほ場では，同じ土壌条件下において，水利条件（地下水位の状況）が変わった場合の影響をみるため，降雨後（総雨量257 mm，平成27年9月6～10日）の地下水位が上昇した際に，実験的に地下かんがいを実施した。

④ I 県 T K 地区

I 県 T K 地区は台地に位置する試験場内のほ場で，火山性土地帯において水稻を栽培するため，他の水田土壌を客土した経緯がある。そのため，地下水位は1 m以下と低いが，灰色低地土のほ場である。なお，調査ほ場では水稻の乾田直播栽培を行った。

⑤ I 県 T F 地区

I 県 T F 地区は低平地に位置しており，FOEASの実証試験圃として約1 ha程度整備された地区である。土壌は多湿黒ボク土で，水稻の乾田直播栽培と転作大豆栽培

を行った。

⑥ I 県 T Y 地区

I 県 T Y 地区は低平地に位置する試験場内のほ場で，灰色低地土のほ場である。なお，調査ほ場では水稻の移植栽培と転作大豆栽培を行った。

⑦ T 県 U 地区

T 県 U 地区は台地に位置するT県の試験場内のほ場である。土壌は多湿黒ボク土で，代かきと無代かきによる水稻移植栽培及び転作ビール麦を栽培した。

⑧ T 県 O 地区

T 県 O 地区は低平地水田地帯に位置し，FOEASの実証試験ほ場として約50 a程度整備された地区である。地下水位は-60 cm程度と比較的高く土壌は灰色低地土で，転作田においてビール麦栽培を実施した。

⑨ C 県 Y 地区

Table 1 調査地区の概要と調査内容
Outline of experimental sites, survey and measurements

番号	地区	地区内 地下水位※	土 壌	栽培作物	調査内容
①	K 県 K 地区 (1)	-1 m 以下	灰色台地土	移植水稻 転作大豆	土壌調査 用水量調査 収量調査
②	K 県 K 地区 (2)	-1 m 以下	灰色台地土	移植水稻	土壌調査 用水量調査
③	I 県 T 地区	-1 m 以下	火山性土	転作大豆	土壌調査 用水量調査
④	I 県 T K 地区	-1 m 以下	灰色低地土	乾田直播水稻	土壌調査 用水量調査 収量調査
⑤	I 県 T F 地区	-60 cm	多湿黒ボク土	乾田直播水稻 転作大豆	土壌調査 用水量調査 収量調査
⑥	I 県 T Y 地区	-60 cm	灰色低地土	移植水稻 転作大豆	土壌調査 用水量調査 収量調査
⑦	T 県 U 地区	-1 m 以下	多湿黒ボク土	移植水稻（代掻きあり・無代掻き） 転作麦	土壌調査 収量調査
⑧	T 県 O 地区	-60 cm	灰色低地土	転作麦	土壌調査 収量調査
⑨	C 県 Y 地区	-80 cm	灰色低地土	転作大豆	土壌調査 収量調査
⑩	A 県 D 地区	-1 m 以下	灰色低地土	移植水稻 乾田直播水稻	土壌調査 収量調査
⑪	F 県 F 地区	-60 cm	灰色低地土	転作大豆	土壌調査 収量調査
⑫	M 県 W 地区	-60 cm	灰色低地土	転作大豆	土壌調査 収量調査
⑬	M 県 S 地区	-60 cm	灰色低地土	移植水稻	土壌調査 ヒアリング調査

※非灌漑期における地区の地下水位

C 県 Y 地区は低地に位置し、地区全域に渡って FOEAS を整備している。地下水位は -80 cm 程度と比較的に高く、土壌は強グライの灰色低地土である。FOEAS 導入前は排水不良により水稲単作地帯であったが、導入後は大豆や麦、ネギなどを栽培しており、調査は大豆栽培をしているほ場で実施した。

⑩ A 県 D 地区

A 県 D 地区は低平地水田地帯に位置する研究所内のほ場で、土壌は灰色低地土で、乾田直播による水稲栽培を実施した。

⑪ F 県 F 地区

F 県 F 地区は低平地水田地帯に位置し、FOEAS の実証試験ほ場として約 50 a 程度整備された地区である。土壌は灰色低地土で、転作田において大豆栽培を実施した。

⑫ M 県 W 地区

M 県 W 地区は低平地水田地帯に位置し、FOEAS の実証試験圃として約 50 a 程度整備された地区である。土壌は灰色低地土で転作田において大豆栽培を実施した。

⑬ M 県 S 地区

M 県 S 地区は低平地水田地帯に位置し、FOEAS の実証試験圃として約 50 a 程度整備された地区である。土壌は灰色低地土である。なお、本地区では土壌調査とヒアリング調査を行った。

IV 現地調査結果

① K 県 K 地区 (1)

土壌調査による室内飽和透水係数 (以下、 K_s) は表土では $4.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、地下 60 cm の心土では $1.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ であった。また、FOEAS を導入したほ場と未施工の対照ほ場において、水稲作時の用水量調査と収量調査を行った。FOEAS ほ場では中干し後の再かんがいに 35 mm/d 程度の用水を使用した。その他の時期は水位管理者を用いた水管理が行われ、5 mm/d 以下の用水量であった (Fig. 2)。また、FOEAS ほ場の総用水量

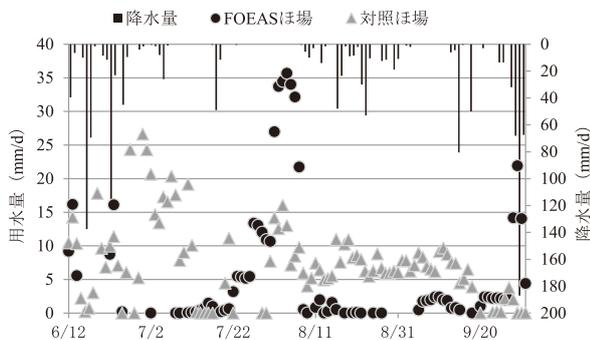


Fig.2 K 県 K 地区 (1) の FOEAS 及び対照ほ場の用水量
Water requirement for rice measured in the plot equipped with FOEAS system and in the reference plot in the site No.1

は 460 mm (うち地下かんがい量 418 mm) で、対照ほ場の総用水量は 766 mm であり、約 40% (306 mm) の節水となった。水稲の収量は FOEAS ほ場で 581 kg/10 a、対照ほ場で 546 kg/10 a となり、統計的な有意差はなかったがやや収量が増加した。なお、別の調査年において、FOEAS による地下水位制御を行って転作大豆を栽培したところ、収量は 320 kg/10 a となり、対照ほ場の 185 kg/10 a に比べて大幅な増収を確認している (若杉ら, 2013)。

② K 県 K 地区 (2)

K 県 K 地区 (1) の近隣にある K 地区 (2) のほ場において、代かき時に 100 mm/d 程度の地下かんがいを実施したが、地下水位の上昇は確認できなかったため、かんがい期に土壌調査を行った (Fig. 3)。表土 (地表 ~ -15 cm) の K_s は $2.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ で、K 地区 (1) と同等であった。また心土 (-15 ~ -32 cm) の K_s は $1.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ で K 地区 (1) と同一であったが、河川により近い場所に位置するほ場のため、心土の -32 cm 以下から礫質土が存在しており、 K_s は $6.9 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ と高い値であった。

③ I 県 T 地区

大豆栽培時に地下かんがいを数回実施したが、総用水量は約 1,000 mm であった。さらに、暗渠管から距離別に 3 地点で地下水位を測定したが、ほ場内において地下水位のバラツキも確認された。なお、調査ほ場の心土の K_s は $3.5 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ であった。また、降雨後の 9 月 10 日 22 時から地下水位が高い状態から約 70 mm/d の地下かんがいを実施して地下水位の変化を調べた (Fig. 4)。地下かんがいの実施により水口側の地下水位は -20 cm 程度まで上昇したが、用水の供給が漏水に間に合わないため徐々に低下し、-38 cm 程度まで低下し、さらに用水の供給を止めると水口側で -70 cm、水尻側で -90 cm 程度まで低下した。ほ場全体に用水を行き渡らせるには弾

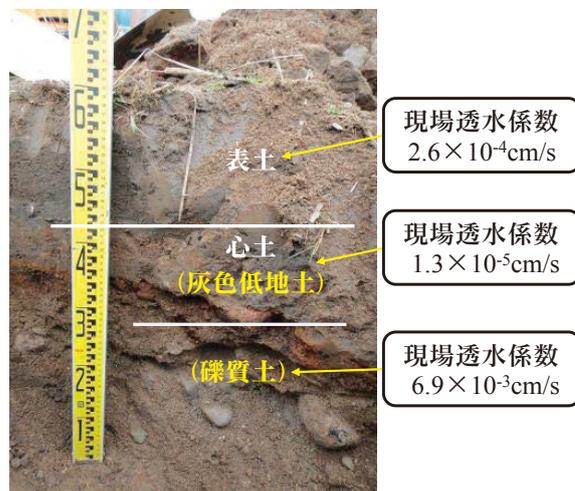


Fig.3 K 県 K 地区 (2) の土壌断面
Soil profile in the site No.2

丸暗渠層（-40cm）の地下水位を維持する必要があるが、横浸透の漏水対策を施し、地下水位が高い状態からかんがいしても用水供給を止めると地下水位が急落しており、調査ほ場の土壌の透水性及び一筆ほ場のみの対策ではFOEASの機能を発揮することは困難であった。

④ I 県 T K 地区

FOEASほ場の表土の現場透水係数（以下、Ib）は $3.8 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ で、地下 60 cm の心土の Ib は $1.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ であった。また、水稻作時の FOEASほ場の総用水量は 627 mm（うち地下かんがい用水量 302 mm）であった（Fig. 5）。一方、FOEAS未整備の対照ほ場の総用水量は 860 mm であり、FOEASに備わる器機による水管理を行うことで約 30%（233 mm）の節水となった。なお、収量は FOEASほ場で 465 kg/10 a、対照ほ場で 500 kg/10 a となり、FOEASほ場でやや減収となったが、統計的な有意差はなかった。

⑤ I 県 T F 地区

FOEASほ場の表土の Ks は $7.2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ で、地下 60 cm の心土の Ks は $3.6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ であった。水稻の収

量は FOEASほ場で 416 kg/10 a、対照ほ場で 405 kg/10 a であった。また、大豆の収量は FOEASほ場で 343 kg/10 a、対照ほ場で 105 kg/10 a となった。当地区は非常に排水が不良のため、主に FOEASの排水効果による増収が顕著であったが、8月の干ばつ時期では地下かんがいにによって設定した -35 cm 程度の地下水位を維持していた（Fig. 6）。

⑥ I 県 T Y 地区

FOEASほ場の表土の Ks は $1.8 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ で、地下 60 cm の心土の Ks は $6.4 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ であった。FOEASほ場において転作大豆を栽培したところ、夏場と開花期に地下かんがいを約 100 mm 行い、収量は 361 kg/10 a であった。一方、隣接する対照ほ場は 312 kg/10 a であり、FOEASによる増収効果が確認された。

⑦ T 県 U 地区

FOEASほ場において、代かきと無代かきによる水稻栽培を行った。両ほ場とも減水深が 100 mm/d 以上あり、湛水状態を維持するのが難しかった。代かきを行っても減水深が減らなかった原因としては、FOEASの施工によって耕盤層を破壊してしまったためと考えられる。水稻収量は代かき水田で 479 kg/10 a、無代かき水田で 454 kg/10 a、対照ほ場で 527 kg/10 a であったが各ほ場の統計的な有意差はみられなかった。なお、無代かき水田の表土の Ks は $4.3 \times 10^{-3} \text{m/s}$ で、地下 60 cm の心土の Ks は $1.1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ であった。また、FOEASほ場においてビール麦を栽培したところ、地下水位を -30 cm 以下に設定したほ場は 268 kg/10 a と対照ほ場の 177 kg/10 a に比べて大幅に増収した。FOEASほ場においては地下かんがいを行っていないことから、主に排水による増収効果であると考えられる。

⑧ T 県 O 地区

FOEASほ場の表土の Ib は $4.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ で、地下 60 cm の心土では $5.8 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ であった。なお、収量調査を行った T 県農業試験場へのヒアリングの結果、

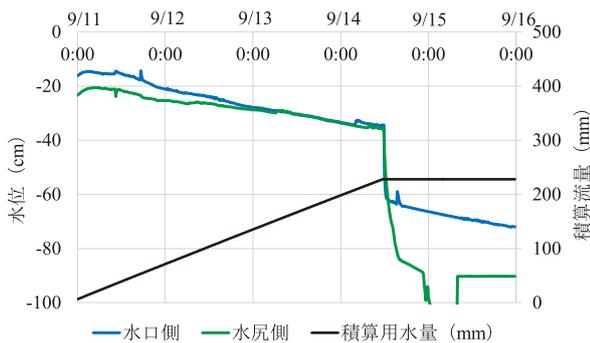


Fig.4 I 県 T 地区の地下かんがいと水位の状況 (高地下水位時)

Cumulative amount of water applied by subsurface irrigation, depth of groundwater table upstream and downstream vs time in a plot in the site No.3

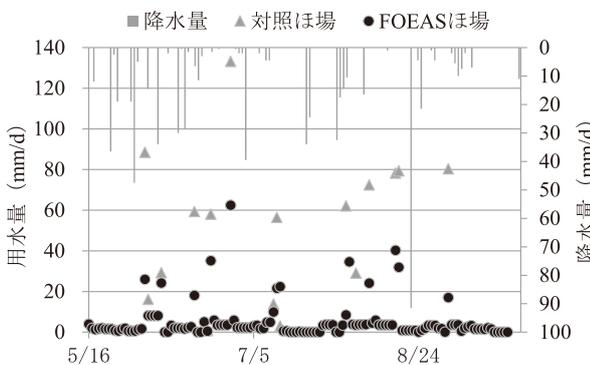


Fig.5 I 県 T K 地区の FOEAS 及び対照ほ場の用水量

Water requirement for rice measured in the plot quipped with FOEAS system and in the reference plot in the site No.4

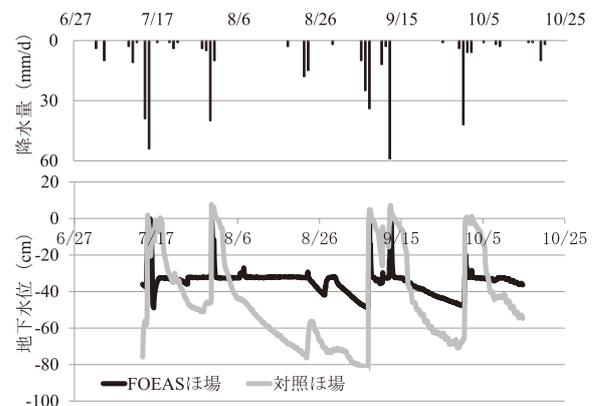


Fig.6 I 県 T F 地区の FOEAS 及び対照ほ場の地下水位

Depth of groundwater table in the plot quipped with FOEAS system and in the reference plot in the site No.5

ビール麦の収量は湿害回避と穂ばらみ期の地下かんがいにより、無対策のほ場に比べて57%の増収が確認された。

⑨C県Y地区

FOEASほ場の表土のKsは 5.9×10^{-8} cm/sで、地下60 cmの心土のKsは 4.2×10^{-7} cm/sであった。H地区は地区全体にFOEASを整備しているため、調査はFOEASほ場のみであるが、転作大豆栽培時に153 mmの地下かんがいをを行い、収量は226 kg/10 aと県内平均収量153 kg/10 aよりも増収していた。

⑩A県D地区

地表かんがいをを行ったほ場では問題なく水管理できたが、水稻の乾田直播栽培において地下かんがいによる水位制御を行ったほ場では200~300 mm/d程度の多量の用水を用いても、一定の水位管理が困難となり、雑草が増加し、水稻収量が11%減収となった。FOEASほ場の表土は灰色低地土でIbは 3.0×10^{-5} cm/sとなり、比較的到低透水性であったが、地下40 cmの土層から細粒黄色土に代わり、地下60 cmのIbは $5.0 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ cm/sであった。

⑪F県F地区

FOEASほ場の表土のKsは 7.8×10^{-3} cm/sで、地下60 cmの心土のKsは 3.3×10^{-7} cm/sであった。FOEASほ場において転作大豆を栽培したところ、収量は280 kg/10 aとなり、県内の平均収量である169 kg/10 aよ

りも大幅に増収していた。また、耕作した農家へのヒアリング調査においても、地下かんがいや暗渠排水は機能していた。

⑫M県W地区

FOEASほ場の地下60 cmの心土のIbは 1.2×10^{-5} cm/sであった。FOEASほ場において転作大豆を栽培したところ、収量は248 kg/10 aとなり、近接する対照ほ場の184 kg/10 aに比べて大幅に増収した。また、FOEASほ場では現地において地下かんがいを実施し、地下水位の上昇を確認した。

⑬M県S地区

FOEASほ場の地下60 cmの心土のIbは 3.7×10^{-5} cm/sであった。なお、本調査地はその後の現地調査が出来なかったが、耕作した農家へのヒアリング調査の結果、水稻栽培時による地下かんがいを実施し、問題なく地下水位が上昇した。

V 考察

5.1 土壌条件

各調査地区の暗渠管理設深(地下60 cm)における土壌の透水係数(KsまたはIb)と地下水位制御システム機能発揮状況の判断材料となる地下水位制御や地下かんがい、作物増収の有無及びその判断指標をまとめた(Table 2)。なお、地下水位制御は水稻作時の地下かん

Table 2 調査地区の透水係数と地下水位制御システムの機能発揮状況

Saturated soil hydraulic conductivities at depth around 60cm measured in the experimental sites and the performance evaluation for subsurface irrigation by FOEAS system

番号	地区	地区内 地下水位	現場透水係数 (Ib) (cm/s)	室内透水係数 (Ks) (cm/s)	地下水位制御システム機能発揮状況				評価指標
					地下水位 制御	地下 かんがい	作物 増収	可否	
①	K県K地区(1)	-1 m以下	-	1.3×10^{-5}	○	○	○	○	地下灌漑による用水削減、 転作時の大豆増収
②	K県K地区(2)	-1 m以下	-	6.9×10^{-3}	×	×	-	×	地下灌漑時に水位上昇が 見られない
③	I県T地区	-1 m以下	-	3.5×10^{-4}	×	×	-	×	大豆栽培時用水量 1,000 mm
④	I県TK地区	-1 m以下	1.5×10^{-6}	-	○	○	○	○	地下灌漑による用水削減
⑤	I県TF地区	-60 cm	-	3.6×10^{-8}	○	○	○	○	転作時の増収排水促進
⑥	I県TY地区	-60 cm	-	6.4×10^{-8}	-	○	○	○	転作時の増収
⑦	T県U地区 (無代掻き圃場)	-1 m以下	-	1.1×10^{-3}	×	×	○	×	地下かんがい時に水位上 昇が見られない
⑧	T県O地区	-60 cm	5.8×10^{-7}	-	-	○	○	○	転作時の増収排水促進
⑨	C県Y地区	-80 cm	-	4.2×10^{-7}	-	○	○	○	転作時の増収
⑩	A県D地区	-1 m以下	$5 \times 10^{-4} \sim$ 1.5×10^{-3}	-	×	×	×	×	用水量の増大
⑪	F県F地区	-60 cm	-	3.3×10^{-7}	-	○	○	○	転作時の増収
⑫	M県W地区	-60 cm	1.2×10^{-5}	-	-	○	○	○	転作時の増収
⑬	M県S地区	-60 cm	3.7×10^{-5}	-	-	○	○	○	地下灌漑による水位制御 が可能

※「-」は未調査

がいによる節水効果の有無や転作時の地下水位状況から判断した。地下かんがいは現地調査による地下水位の上昇の有無や農家からのヒアリングによって判断した。作物増収は現地調査の坪刈調査から判断し、水稻は対照ほ場と同等以上を増収とみなした。次に、これらから判断された地下水制御システム導入可否と土壤の透水係数をまとめた (Fig. 7)。その結果、透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ よりも高い地区では地下かんがい機能が発揮されず、 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ オーダーよりも低い地区では、地下かんがいによる効果が確認された。

土壤タイプでは灰色低地土の場合、A県D地区を除き透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ 程度あり、転作時の増収効果などが確認された。本来、灰色低地土は排水不良になることが多いため、FOEASの排水機能による増収の側面もあるが、I県TY地区、T県O地区、C県Y地区では必要時に応じて地下かんがいを実施していた。また、T県U地区のような粘土含有量が少ない黒ボク土は、FOEAS施工による耕盤層の破壊によって代かきを行っても減水深が大幅に増加してしまう懸念がある。

5.2 水利条件

FOEASを整備すると排水路は暗渠埋設深 -60cm よりも深くなるため、排水路底は必然的に田面下 $-80 \sim 100 \text{cm}$ 以下となる。そのため、地区の地下水位もそれに伴って整備前よりも下がるため、地区内の地下水位が -1m 以上または -1m 以下で水利条件を区分した (Fig. 7)。地下水位が低い場合は、透水係数が $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ では地下かんがいによる地下水位維持には多くの用水量が必要となり、システムの効果も発揮しにくいことが分かった。またI県T地区では、実験的に地下かんがいをを行うための漏水対策を行っても、地下水位を維持するのに多量の用水を要していた。そのため、降雨後の短期間に地下水位が比較的に高い状態にあっても、地下水位が低い場合と同様に透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上ではFOEASの機能を発揮することが困難であると思われる。なお、地区全体にFOEASが整備された場合は、農区ごとにブロックローテーションを行い、排水路の堰上げによって地下水位を上昇させる対策も考えられ

るが、湿害のリスクも向上することから、運用には注意が必要である。なお、FOEASを施工しても地下水位が -60cm よりも高い位置にある地区は、データ不足のため対象外とした。

5.3 導入判断の調査要件

暗渠排水を施工する際の調査項目として、土壤調査や地下水位調査、地表残留水調査、地耐力調査などが挙げられており、中でも土壤調査における透水試験は下層土 (耕盤下 30cm 程度) の透水係数を測定することとしている。K県K地区 (2) やA県D地区のように、心土の下層から異なる土壤が存在する場合もあるため、FOEAS導入の際は、一般的な暗渠排水整備の調査項目に加え、暗渠管理設層 (地下 60cm) において、現場透水試験 (シリンダー法) または室内透水試験 (変水位法) による透水性を測定することが不可欠である。

VI まとめ

全国13地区の現地ほ場を用いて、FOEASの機能発揮状況を調べたところ、地下水位の高低に関わらず、土壤の透水係数が $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ オーダーよりも低いことがFOEASの機能を発揮する上で重要なことを明らかにした。また、FOEASの導入の際は暗渠管理設層の透水性調査が不可欠であることを提示した。

なお、透水係数は数地点の調査結果からほ場を代表する値を導くことは困難であり、今回提示した閾値は一つの目安である。また、十分な用水量が確保できる地区では、導入条件の閾値が変わる可能性がある。そのため、今後もさらなる知見の集積を図り、FOEASの導入条件について精査していく必要がある。

謝辞：本研究は農林水産省農村振興局水資源課による「平成20年度農業用水再編対策推進調査委託事業」、及び「平成21年度地下かんがい用水技術検討委託事業」、並びに農林水産省農村振興局農村環境課による「計画基礎諸元調査 (平成22～26年)」、農林水産省農林水産技術会議事務局による受託研究「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 (平成

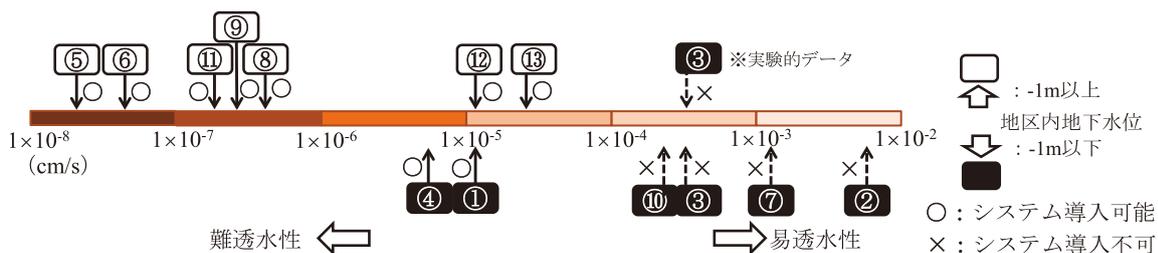


Fig. 7 土壤条件と水利条件による地下水制御システムの導入可否
Adoption and rejection for FOEAS system in view of the soil and groundwater condition

22～25年)」の研究成果の一部をまとめたものである。記して謝意を表す。

引用文献

土壤環境分析法編集委員会編 (1997)：土壤環境分析法，博友社，66-69，76-79
藤森新作，小野寺恒雄 (2012)：地下水位制御システムFOEAS導入と活用のポイント，農文協，45-50
藤森新作ら (2008)：地下水位調節システムと畦畔漏水防止対策による転作作物の安定栽培，平成19年度農村工学研究所研究成果情報，13-14
農林水産省 (2015)：食料・農業・農村基本計画，44
農林水産省 (2000)：土地改良事業計画設計基準 計画「暗きよ排水」，8-21，126-129
農林水産省 (2013)：土地改良事業計画設計基準 計画「ほ場整備 (水田)」，270-279
農林水産省農村環境課：計画基礎諸元調査報告書 (平成22～26年)

国土交通省国土政策局国土情報課：<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/20-1/08.html>

荻野芳彦，村島和男 (1991)：汎用化水田の暗渠排水の計画と設計，農業土木学会誌，59(9)，37-42
大山 亮，家中亮子，出口美里 (2013)：ビール麦および水稲の水田輪作体系におけるFOEAS施工効果，栃木県農業試験場研究成果集，32号，31-32
島田信二ら (2011)：異なる土壤種類における地下水位制御が根粒着生・非着生ダイズの葉色と子実重に及ぼす影響，日本作物學會紀事，80，68-69
若杉晃介，藤森新作 (2009)：水田の高度利用を可能とする地下水位制御システムFOEAS，水土の知77(9)，7-10
若杉晃介ら (2013)：食料自給率向上に資する地下水位制御システムおよびGPSレベラーの普及，農業農村工学会誌，81(10)，13-16
(独) 農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター (2014)：水田輪作における地下水位制御システム活用マニュアル

受理年月日：平成27年11月16日

Quantifying Subsoil Hydraulic Conductivity for Stable Subsurface Irrigation in FOEAS System

WAKASUGI Kousuke*, HARAGUCHI Noburo* and ZUKEMURA Chika*

*Advanced Paddy Field Management, Agricultural Environment Engineering Research Division

Abstract

FOEAS system has functions of subsurface irrigation and subsurface drainage through underdrains set at a depth of 60 cm. It has many advantages of advanced use of paddy fields such as direct seeding of rice, cultivation of soy bean, thus, it spreads in paddies in Japan. Seepage below the underdrains depending on subsoil condition is critical for subsurface irrigation. Thus, the purpose of this study is to evaluate subsoil condition for stable subsurface irrigation in the system. In 13 paddy plots equipped with the system, soil type, subsoil hydraulic conductivity, underground water level, were surveyed to evaluate subsoil conditions. Crop production and water consumption for subsurface irrigation were also surveyed to evaluate whether subsurface irrigation was stable or unstable. The results were comprehensively evaluated and summarized as follows. (i) Saturated soil hydraulic conductivity at depth around 60 cm should be less than an order of 10^{-5} cm/s for stable subsurface irrigation. (ii) Measurement of hydraulic conductivity of subsoil around underdrains is important to judge whether subsurface irrigation is stable or unstable.

Key words: *Controlling the subsurface water level, Subsurface irrigation, FOEAS, Soil hydraulic conductivity, Intake rate*

本技報から転載・複製する場合は、農村工学研究所の許可を得てください。

農村工学研究所技報 第218号

平成28年3月30日 印刷
平成28年3月30日 発行

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究所

〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目1番6号
電話029(838)8169(情報広報課)
<http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/>

印刷：筑波印刷情報サービスセンター協同組合

TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
No. 218
March 2016

CONTENTS

ONIMARU Tatsuji Simplified Calculation Techniques as an Indicator to Evaluate the Sustainability of Non-farmer Participation in Activities for Maintaining Irrigation/Drainage Canals	1
FUKUMOTO Masato, SHINDO Soji Method to Check Mistakes and Omissions of Survey Data for Locations of Abandoned Farmlands Utilizing Google Earth	19
Yoji KUNIMITSU A research note about analysing the economic influence of East Japan big earthquake disaster — Application of Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) Model —	29
OKUSHIMA Limi, ISHII Masahisa, MORIYAMA Hideki, IWATA Yukuyoshi, GOTO Masahiro, SASE Sadanori, TATENO Masayuki, TAKASUGI Shinji Greenhouse Heating and Cooling Tests with the Geothermal Heat Pump Systems using the Shallow Surface Waters and the Shallow Underground	39
MORI Mitsuhiro, ASANO Isamu, KAWAKAMI Akihiko and KAWABE Shohei Evaluation of Applicability of the Continuous Scanning System for Irrigation Tunnel Lining	51
SHODA Daisuke, YOSHISAKO Hiroshi, KONNO Michiaki, INOUE Keisuke and SUZUKI Hisato Survey of Small Earthfill DAM Damaged by Debris flow due to Concentrated Heavy Rain in August 2014	65
KUBOTA Tomijiro, Hamada Koji, HITOMI Tadayoshi and SHIN Moono Remote Observation of Turbidity and Estimation of Concentrations of Suspended Solids, Total Phosphorus and Radioactive Cs in Irrigation Facilities	77
ISHIDA Satoshi, ARITA Tomoya, CAO Yingjie, TANG Changyuan, SHIRAHATA Katsushi, TSUCHIHARA Takeo and YOSHIMOTO Shuhei Laboratory Experiment for Reproducing Freshwater Lens in Artificial Aquifers	89
TSUNESUMI Naoto, TAKAKI Kyouji, SHIMAZAKI Masahiko and YOSHINAGA Ikuo Restraint Effects for Scouring in Downstream Riverbed Drop by Riprap Types — Effects of Geotextile Layer and Connected Riprap —	99
NAKAYA Tetsuo, TOKASHIKI Masaru, MORI Mitsuhiro Evaluation Technique of the Coefficient of Roughness in Consideration of the Change Situation of the Surface Abrasion of Concrete Channel	107
WAKASUGI Kousuke, HARAGUCHI Noburo and ZUKEMURA Chika Quantifying Subsoil Hydraulic Conductivity for Stable Subsurface Irrigation in FOEAS System	115
