

農村工学研究所技報

第215号

目次

開水路からパイプラインに移行する水路システムの放水路改修に関する水理機能診断 藤山 宗・樽屋啓之・中田 達	1
用排水路の維持管理における集落の労力負担能力の継続性評価 — 2010年世界農林業センサス農業集落カードの山形県のデータを用いた事例 — 鬼丸竜治	17
メタン発酵槽内に蓄積する物質の成分的特徴 中村真人・山岡賢・相原秀基・柚山義人・折立文子	31
排水管理時における用水制御施設の水理機能診断 藤山 宗・樽屋啓之・中田 達	39
数値標高モデルを用いた流出の場としての斜面の平均勾配計測方法の考察 堀川直紀・吉田武郎・工藤亮治・皆川裕樹・名和規夫	57
海岸保全施設の維持管理計画の改善のための課題 丹治 肇・桐 博英・中矢 哲郎・安瀬地一作	69
時間領域電磁探査法による大規模地すべり地比抵抗調査 中里裕臣・井上敬資・鈴木尚登・寺田剛	81
平成25年度豪雨による決壊ため池の氾濫解析検証 正田大輔・川本 治・鈴木尚登・吉迫 宏・井上敬資・小嶋 創	91
鉄筋コンクリート梁を模擬した縮小模型の曲げ挙動 渡嘉敷勝・浅野 勇・森 充広・西原正彦	103
バイオ炭混入による砂質土壌の物理性の変化 岩田幸良・宮本輝仁・亀山幸司	113
浮遊物質移動を組み込んだ分布型水循環モデルの構築 名和規夫・吉田武郎・堀川直紀・工藤亮治・皆川裕樹	123
人為的攪乱を受けない水田養魚における食物網と物質フロー 森 淳・森岡伸介・小出水規行・Bounsong Vongvichith・渡部恵司	131
地下水位の潮汐応答の分析による淡水レンズ帯水層の水理定数推定手法 白旗克志・石田聡・吉本周平・土原健雄	141
農地・農業用水等の地域資源保全のためのモバイル型地理情報システムの開発 重岡 徹・友松貴志・庄 直樹・山本徳司	155
21世紀初頭10年間の大規模地震における農業用大ダムの入力地震動 増川晋・黒田清一郎・林田洋一・田頭秀和	185
[技術資料] Web調査による主観的時間割引率の測定結果に関する技術資料 合崎英男	219

平成26年 3 月



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

農村工学研究所技報 第215号

所	長	小 泉	健
企 画 管 理 部	長	山 本	徳 司
審 議	役	倉 橋	一 博
技 術 移 転 セ ン タ ー	長	奥 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	毛 利	栄 征
水 利 工 学 研 究 領 域	長	中	達 雄
資 源 循 環 工 学 研 究 領 域	長	増 本	隆 夫
農 村 基 盤 研 究 領 域	長	石 田	憲 治

編 集 委 員 会

編 集 委 員 長	山 本	徳 司
委 員	友 正	達 美
〃	渡 嘉 敷	勝
〃	濱 田	康 治
〃	廣 瀬	裕 一
〃	坂 根	勇
事 務 局	児 玉	正 文

TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING

No. 215

KOIZUMI Takeshi	Director-General
YAMAMOTO Tokuji	Director, Department of Planning and General Administration
KURAHASHI Kazuhiro	General Administration Coordinator
OKUSHIMA Syuji	Director, Technology Transfer Center
KOBAYASHI Hiroyasu	Director, Agricultural Environment Engineering Research Division
MOHRI Yoshiyuki	Director, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division
NAKA Tatsuo	Director, Hydraulic Engineering Research Division
MASUMOTO Takao	Director, Renewable Resources Engineering Research Division
ISHIDA Kenji	Director, Rural Development and Planning Research Division

EDITORIAL BOARD

Chairman :	YAMAMOTO Tokuji
Members :	TOMOSHO Tatsumi
	TOKASHIKI Masaru
	HAMADA Koji
	HIROSE Yuichi
	SAKANE Isamu
Secretary	KODAMA Masafumi

開水路からパイプラインに移行する 水路システムの放水工改修に関する水理機能診断

藤山 宗* 樽屋啓之** 中田 達**

*株式会社三祐コンサルタンツ
**水理工学研究領域水路システム担当

キーワード：水路システム，機能診断，水理機能，開水路，パイプライン

I 緒言

我が国の農業水利施設の多くは、長期供用下におかれ更新の時期を迎えている。水利システムにおける構造に関する機能だけではなく、水理、水利用に関する機能も含めた総合的な機能診断の必要性に対応し、これまで数多くの研究成果が得られている。

中島 (2003) は、水利システムそのものの機能を明らかにする必要があると考え、用水路系を対象とし、構造、水理、水利用に関する機能毎の機能分析を行う上での着眼点および分析手法を提案している。また、これらの中島・中村 (2003) は、中島 (2003) の用水路系を対象とした研究成果をもとに、排水路系に拡張している。

中・樽屋 (2008) は、用水路系を対象とし、水理および水利用に関する機能と性能の基本的考え方を整理し、各性能に対してはその照査項目と照査指標を提案している。

樽屋・三春 (2009) は、用水路系を対象とし、水理および水利用に関する機能・性能に着目し、課題の抽出から対策の検討までが可能な水路カルテの作成事例を紹介している。また、三春ら (2009) は、水路カルテとともに、水利システム内の各施設要素を記号化し、その構造や機能、操作方法等を表現した水利機能図 (以降、「水

理機能平面図」と称する) の有効性も併せて整理している。

最近では、樽屋ら (2012) は、既往の研究成果を礎に、用水路系を対象とし、システムの点、線、面の診断の流れでの水理および水利用に関する診断手順の再整理を行うとともに、水路カルテをより視覚的に理解することが可能な水理機能診断カルテの作成事例を紹介している。しかし、樽屋ら (2012) は、調査・診断項目の過不足と現地適用性の検討を行うまでには至っておらず、今後の診断手順の普及を推進していく中で、課題が残されている。

以上のことから、本研究では、樽屋ら (2012) が提唱する水理および水利用に関する機能診断手順の現地適用を行うことを目的とし、開水路からパイプラインに移行する現地水路システムを対象とした水理機能診断を実施し、診断結果をもとに、対策案の提案を行った。

II 研究の方法

2.1 研究対象とする水路システム

Fig.1 は、研究対象とする水路システムの概要を示す。研究対象とする水路システムは、国営 A 用水農業水利事業により更新された、開水路からパイプラインに移行

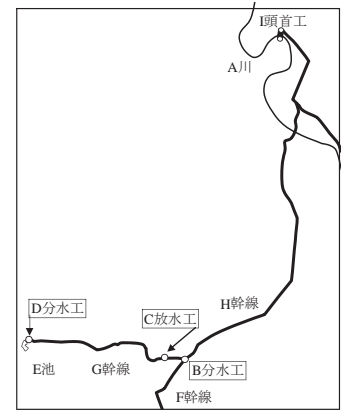
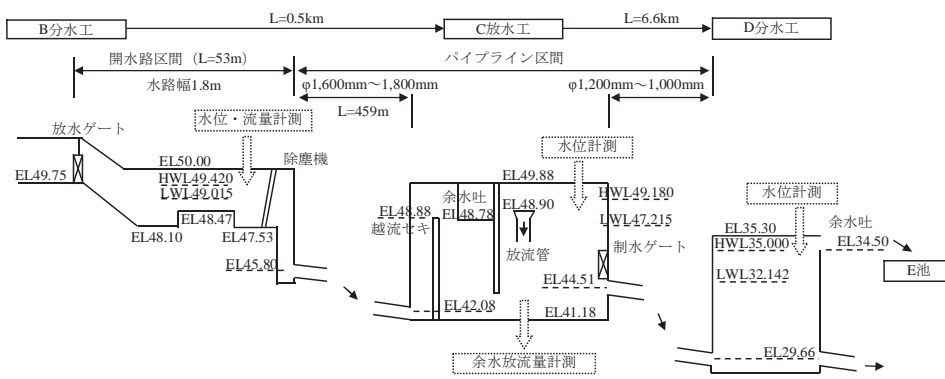


Fig.1 研究対象とする水路システムの概要
Outline of study site

する B 分水工～C 放水工～D 分水工 (総延長 L=7.1km) 区間とする。

2.2 研究の手順

まず、研究対象とする B 分水工～C 放水工～D 分水工における施設更新による水理機能の変遷を水理機能平面図に整理した (Fig.2)。次に、B 分水工、C 放水工および D 分水工の施設毎に、現地調査および聞き取りを実施し、水理上の問題点を踏まえ、これらの分水地点における水理機能診断カルテを作成した (以降、「点の診断」と称する)。次に、点の診断結果を踏まえ、B 分水工、C 放水工および D 分水工の施設間において、TM/TC データ (水位、流量) を用いた分析および診断を行った (以降、「線の診断」と称する)。最後に、点および線の診断結果に基づき、対策案の提案を行った。

2.3 調査、分析および診断の方法

2.3.1 施設更新による水理機能の変遷と各段階の問題点の整理

施設更新による水理機能の変遷の整理においては、工事図面および施設管理者等からの聞き取りに基づき、事業別に、水理機能平面図を作成した。なお、水理機能平面図における、対象施設の構造、機能および制御方式の記号化にあたっては、既往の研究成果 (農村工学研究所、2012) を参考にした。

2.3.2 点の診断

Table 1 は、施設毎の点の診断項目を示す。点の診断は、主に Table 1 に示す項目について、対象施設毎に、現地調査および施設管理者からの聞き取りを実施し、水理機能診断カルテを作成した。

本稿では、主に B 分水工における作成事例を紹介する。本分水工においては、非かんがい期、かんがい期の計 2 回の調査を実施した。非かんがい期 (平成 24 年 2 月下旬) においては、特に、目視および標尺を用いた手測りでの流況把握、施設管理者からの聞き取りによる日常のゲート操作方法 (制御方式) の把握を行った。また、かんがい期 (平成 24 年 7 月中旬) においては、Teledyne RD instruments 社製のドップラー式多層流向流速計 (ADCP) を用いた流量の把握を行った。なお、計 2 回の調査の時期は、それぞれ C 放水工改修前、改修後に当たる。

2.3.3 線の診断

線の診断においては、点の診断にて抽出した問題に対し、TM/TC データ (土地改良区管理) を用いて、対象施設間の水位、流量の関係を整理し、分析および診断を行った。なお、TM/TC データは、C 放水工改修前 (平成 23 年)、改修後 (平成 24 年) の内、降雨が無く、水位、流量の著しい変化が見られない期間を選定した (Table 2)。降雨の有無は、対象地区近隣観測所の雨量データ (国土交通省水文水質データベース) に基づき判断した。

Table 1 施設毎の点の診断項目
Function diagnosis indicators for every division work

診断項目	概要
(1) 施設状況	簡易的な外観目視による施設状況について整理する。
(2) 水位計形式および設置位置	対象施設の上下流における水位計の有無、形式とともに、設置位置について整理する。
(3) 余裕水深	主に対象施設上流における水位 (痕跡) について、余裕水深確保、溢水の有無について整理する。
(4) ゲート開度	調査時のゲート開度について整理する。
(5) 流況	対象施設上下流における流況 (水位痕跡) について整理する。
(6) 分水位の安定性	分水工における分水位を決定する構造 (セキ、オリフィス、複合型) および分水位の安定性について整理する。
(7) H-Q 曲線	H-Q (水位-流量) 曲線の作成が可能であるかどうかについて整理する。
(8) 制御方式	用水管理および排水管理における制御方式について整理する。
(9) 分水比 (量)	TM/TC データ、あるいは必要に応じて現地流量観測結果をもとに、分水比 (量) を整理する。

Table 2 対象とするデータの概要
Target data

使用するデータ	TM/TC データ (10 分間隔の計測)
対象とする期間	C 放水工改修前 (2011 年) 40 日分 C 放水工改修後 (2012 年) 79 日分
対象とするデータ項目 (Fig.1)	B 分水工下流 G 幹線 水位・流量 C 放水工 水位・余水放流量 D 分水工 水位

Ⅲ 調査結果

3.1 施設更新による水理機能の変遷と各段階の問題点の整理

Fig.2 は、水理機能の変遷を把握するための水理機能平面図を示す。Fig.2 は、施設更新による水理機能の変遷を (a) 事業①、(b) 事業②、(c) 事業③の流れで整理した。なお、本稿では、水位流量制御方式として、上流制御方式（上流からの水位、流量の情報に基づく制御方式）、下流制御方式（下流からの水位、流量の情報に基づく制御方式）という用語を用いるが、解釈は USBR (1991) に準じるものとする。

Fig.2 (a) より、国営 A 用水農業水利事業に着手した事業①では、F 幹線および G 幹線の 2 路線に分水する B 分水工が建設され、当時の G 幹線は開水路にて末端まで送水するシステムを有していた。

Fig.2 (b) より、事業②では、B 分水工下流の G 幹線のパイプライン化とともに、余水吐を有する分水スタンド (C 放水工、D 分水工) を設置し、D 分水工では調整池 (E 池) との接続が行われた。なお、事業②におけるパイプライン化の目的は、用水の安定供給と用水路の維持管理労力の軽減などである。

事業②完了後、運用開始したところ、事業①では確認されなかった B 分水工下流における G 幹線の水位・流量不安定、減勢不良および溢水の問題が生じた。それらの問題解決を図るため、水位流量制御を行うゲートの使用を上下流落差が大きな制水ゲート (B 分水工の中央) から、より上下流落差が小さい放水ゲート (同分水工の右岸) に変更したが、抜本的な問題解決には至らなかった。また、パイプライン化による充水維持の必要性より、余水吐 (C 放水工、D 分水工) からの常時越流が生じ、余水放流量が増加するといった問題も生じ、G 幹線の水位・流量不安定等の問題と併せた対策が必要となった。

Fig.2 (c) より、事業③では、事業②で生じた問題に対し、C 放水工にて、越流セキの設置および分水スタンドの容量拡大 (Fig.3) が実施された。越流セキの設置は、極力、越流セキの上流水位と下流水位の独立性を維持すること (完全ではないが、水位流量制御方式を上流制御方式に移行すること) による、同放水工上流の水位・流量の安定化を図るものである。また、分水スタンドの増設は、需要変動に対する調整容量を増強することによる、同放水工下流の水位・流量の安定化および同放流工における余水放流量の減少を図るものである。なお、本稿では、詳述しないが、事業②および事業③における C 放水工の設計思想は、ともに、同じ設計基準 (土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」平成 21 年 3 月) に準じている。

以上のように、施設更新による水理機能の変遷を事業①、事業②、事業③の流れで水理機能平面図に整理することにより、C 放水工改修後、G 幹線における水位・流量不安定等の問題が解決できていないことを把握した。

そこで、点および線の診断を行うにあたっては、C 放水工改修前後 (事業②、③) の流況変化に着目することとする。

3.2 点の診断

3.2.1 B 分水工

Fig.4 は、B 分水工における水理機能診断カルテ (非かんがい期) を示す。Fig.4 (1) より、非かんがい期にて現地水路における目視および施設管理者からの聞き取りにより、B 分水工下流の G 幹線における水位・流量不安定、減勢不良および溢水の問題が生じていることがわかった。また、それらの問題は、非かんがい期よりかんがい期の方が顕著に現れることを聞き取りより確認した。Fig.4 (2) より、日常のゲート操作方法等について施設管理者からの聞き取りを行い、用水管理と排水管理における水位流量制御方式は、両者ともに上流制御方式であることを確認した。また、B 分水工下流の水位は、度々、除塵機ゴミ詰まりにより上昇し、その水位が B 分水工上流側に影響を及ぼし、B 分水工下流の水位で流れが決まってしまうこと (水位流量制御方式が下流制御方式に移行すること) を確認した。

Fig.5 は、B 分水工における水理機能診断カルテ (かんがい期) を示す。Fig.5 (1) より、かんがい期にて B 分水工下流の G 幹線において、30 秒間程度で 12cm (平均値) の水位変動が生じている。また、Fig.5 (2) に示すように、ADCP を用いた流量観測を行い、B 分水工における分水比は概ね計画と一致していることを確認した。

3.2.2 C 放水工

Fig.6 は、C 放水工における水理機能診断カルテ (かんがい期) を示す。かんがい期にて、C 放水工の越流セキ上流における水位痕跡より、水位変動量 (3cm 程度) を確認し、比較的安定していることがわかった。また、放流管からの余水放流が生じている状況を確認した。なお、本来は、余水吐からの越流により余水放流する計画となっているが、維持管理上の問題から、余水吐は利用されていなかった。

3.2.3 D 分水工

D 分水工においては、かんがい期にて、余水吐からの越流により、E 池への余水放流が生じている状況であった。この余水放流は、シール高の確保とパイプライン化による充水維持の必要性より生じたものであり、年間通じて、余水放流を行っていることを、施設管理者からの聞き取りより確認した。

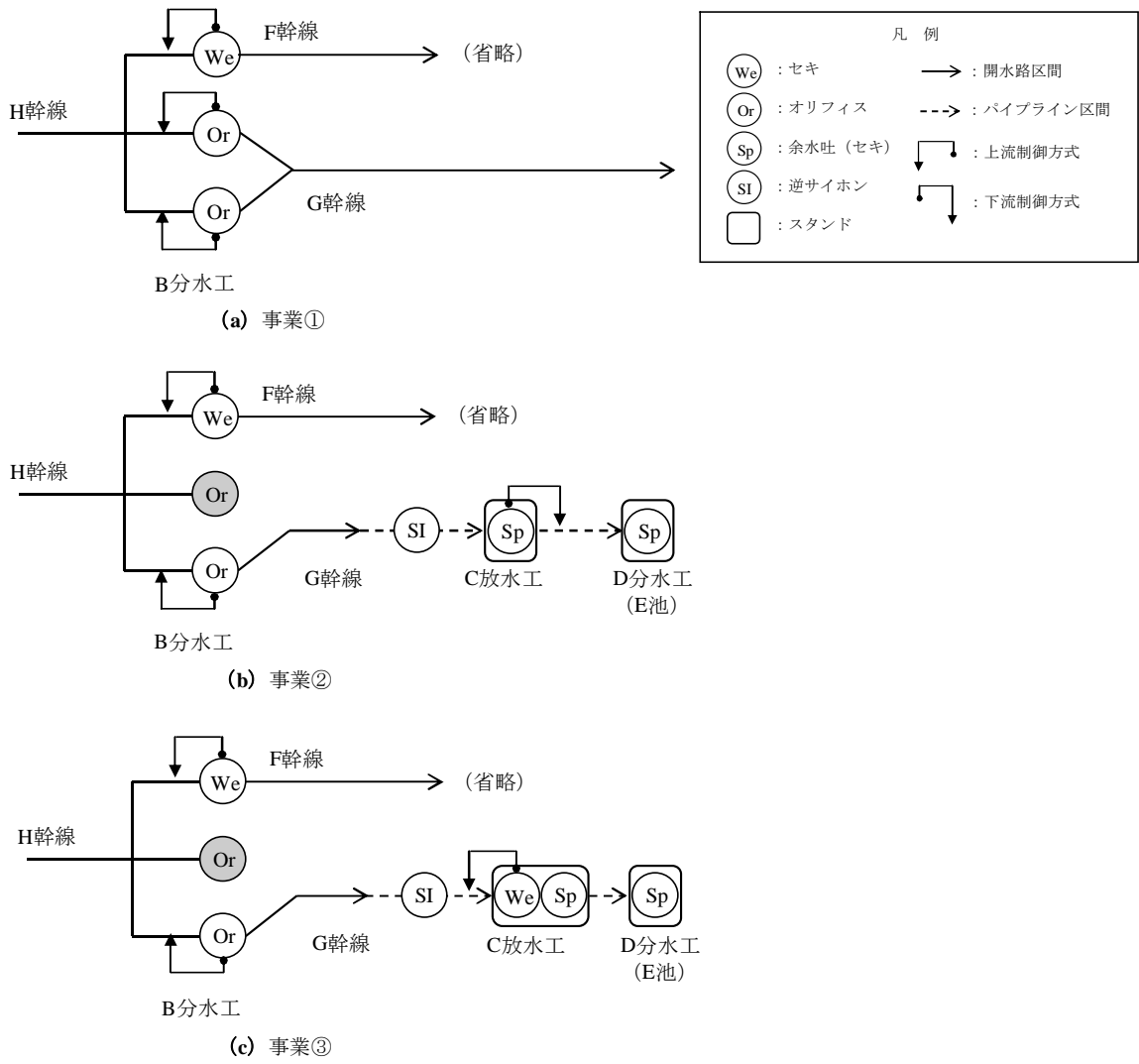


Fig.2 水理機能の変遷を把握するための水理機能平面図

(a) 事業①, (b) 事業②, (c) 事業③

Hydraulic function plan

(a) Enterprise ①, (b) Enterprise ②, (c) Enterprise ③

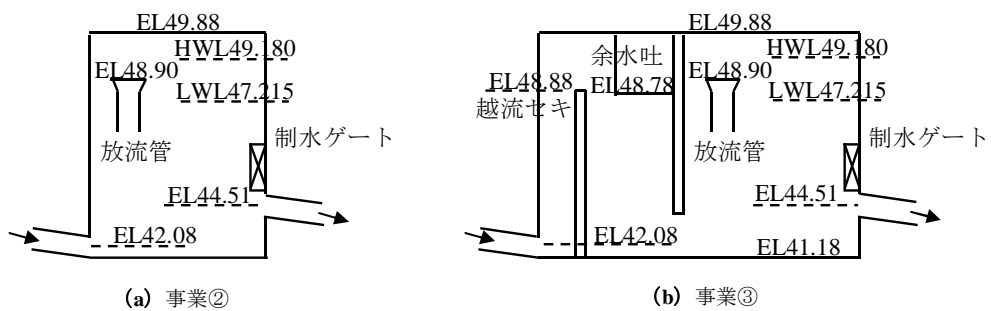


Fig.3 C放水工の構造

(a) 事業②, (b) 事業③

Structure of wasteway C

(a) Enterprise ②, (b) Enterprise ③


施設名称	B分水工（用水名：H幹線）	調査日	2011/10/21、2012/2/23（天候：晴れ）
		所在地	(位置図) 〇県〇市(マップコード 〇〇)
管理者	A土地改良区	施工年	—
ゲート形式	スライドゲート(ラック式)×3門	操作手順	中央制御室にて遠隔操作
分岐	2:(左岸)F幹線、(右岸)G幹線	分水比	6:4(左岸:右岸)
診断項目		調査・診断結果	
施設状況(主にゲートを対象)	外観目視より、扉体、開閉装置等の著しい劣化は見られない。		
水位計形式および設置位置	分水工上流：電波式水位計 分水工下流：(F幹線)電波式水位計、(G幹線)圧力式水位計		
ゲート上流側の余裕水深	30cm以上確保されており、調査時の水位(水位痕跡)については問題ない。		
ゲート開度	左岸→全開、右岸→(制水ゲート)全閉、(放水ゲート)開 ※開度未確認		
流況(水位痕跡を含む)	G幹線：運用当初は中央制水ゲートを使用していたが、下流水位の著しい波立ちが見られたことから、右岸放水ゲートの使用に切り替えて、波立ちが軽減された経緯あり。現在の水面変動量30cm～50cm程度。 F幹線：除塵機ゴミ詰まりにより、水位上昇するため、水路中壁に嵩上げしている。※G幹線についても同様。		
分水位の安定性	越流堰にて上流水位は安定する。ただし、左右岸ともに除塵機ゴミ詰まりにより、堰上げ背水(back water)が発生し、上流水位が不安定になるおそれあり。		
H-Q(水位-流量)性能曲線	ゲート上下流の水位は、上下流の水位流量制御施設の影響を受けていないものと思われるため、本分水工(実機)によるH-Q性能曲線の作成は可能である。		

Fig.4 (1) B分水工における水理機能診断カルテ（非かんがい期）

Diagnosis chart of hydraulic function in division work B (non-irrigation period)

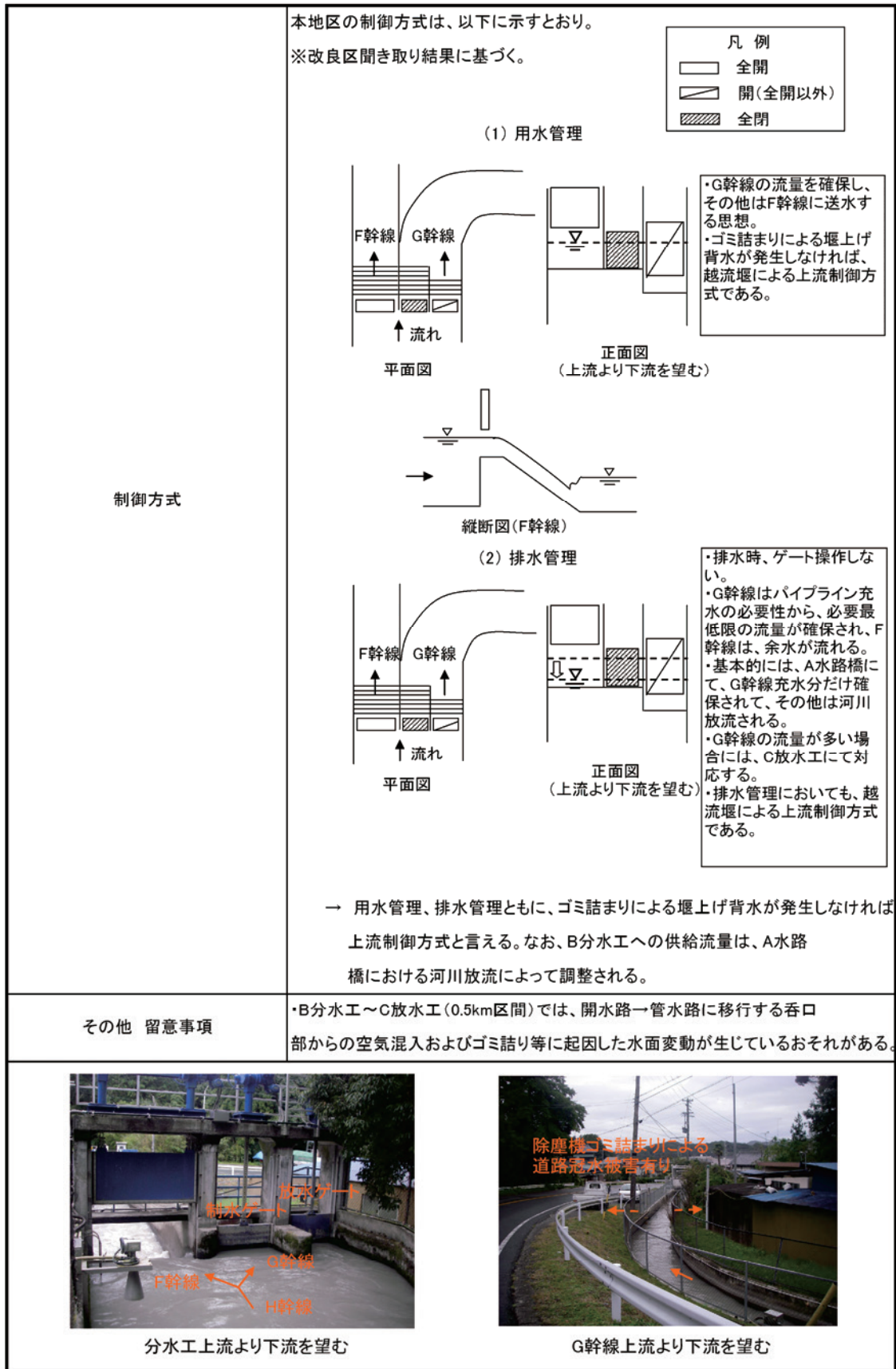


Fig.4 (2) B 分水工における水理機能診断カルテ (非かんがい期)
 Diagnosis chart of hydraulic function in division work B (non-irrigation period)


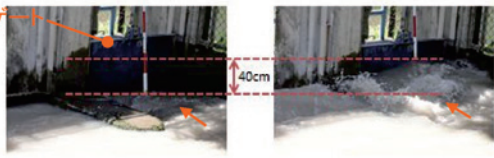
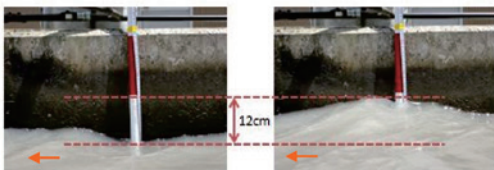
施設名称	B分水工（用水名：H幹線）	調査日	2012/7/18（天候：晴れ）
		所在地	(位置図)
			○県○市(マップコード ○○)
管理者	A土地改良区	施工年	昭和37年
ゲート形式	スライドゲート(ラック式)×3門	操作手順	中央制御室にて遠隔操作
分岐	2:(左岸)F幹線、(右岸)G幹線	分水比	6:4(左岸:右岸)
診断項目		調査・診断結果	
施設状況(主にゲートを対象)		外観目視より、扉体、開閉装置等の著しい劣化は見られない。	
水位計形式および設置位置		分水工上流：電波式水位計 分水工下流：(F幹線)電波式水位計、(G幹線)圧力式水位計	
ゲート上流側の余裕水深		30cm以上確保されており、調査時の水位(水位痕跡)については問題ない。	
ゲート開度		左岸→全開(1.5m)、右岸→(制水ゲート)全閉、(放水ゲート)0.4m	
流況(水位痕跡を含む)		<p>G幹線：2012/2/23改良区聞き取り結果と同様に、著しい波立ちが見られ、放水ゲート吐出し部で40cm程度の水面変動が観察された。分水後の水路における水面変動量は12cm程度であった。また、調査当日は、本分水工上流で、一部分水を停止していたため、制水ゲートを越流する状況を確認した。なお、B分水工下流の水面変動を抑制すること等を目的とし、C放水工の改修を実施していたが、問題解決には至っていない。(要検討事項)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>放水ゲート吐出し部における水面変動</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>G幹線における水面変動</p> </div> </div> <p>※写真中に記載の水面変動量は、30秒程度の平均値である。</p> <p>F幹線：G幹線のような波立ちは生じていない。また、水面位置は、中壁天端付近(時折越流する状況)にあることを確認した。</p>	
分水位の安定性		越流堰にて上流水位は安定していることを確認した。	
H-Q(水位-流量)性能曲線		ゲート上下流の水位は、上下流の水位流量制御施設の影響を受けていないものと思われるため、本分水工(実機)によるH-Q性能曲線の作成は可能である。	
制御方式		用水管理、排水管理ともに、ゴミ詰まりによる堰上げ背水が発生しなければ、上流制御方式と言える。(詳細は、水理機能診断_B分水工_2012/2/23参照)	

Fig.5 (1) B分水工における水理機能診断カルテ (かんがい期)
Diagnosis chart of hydraulic function in division work B (irrigation period)

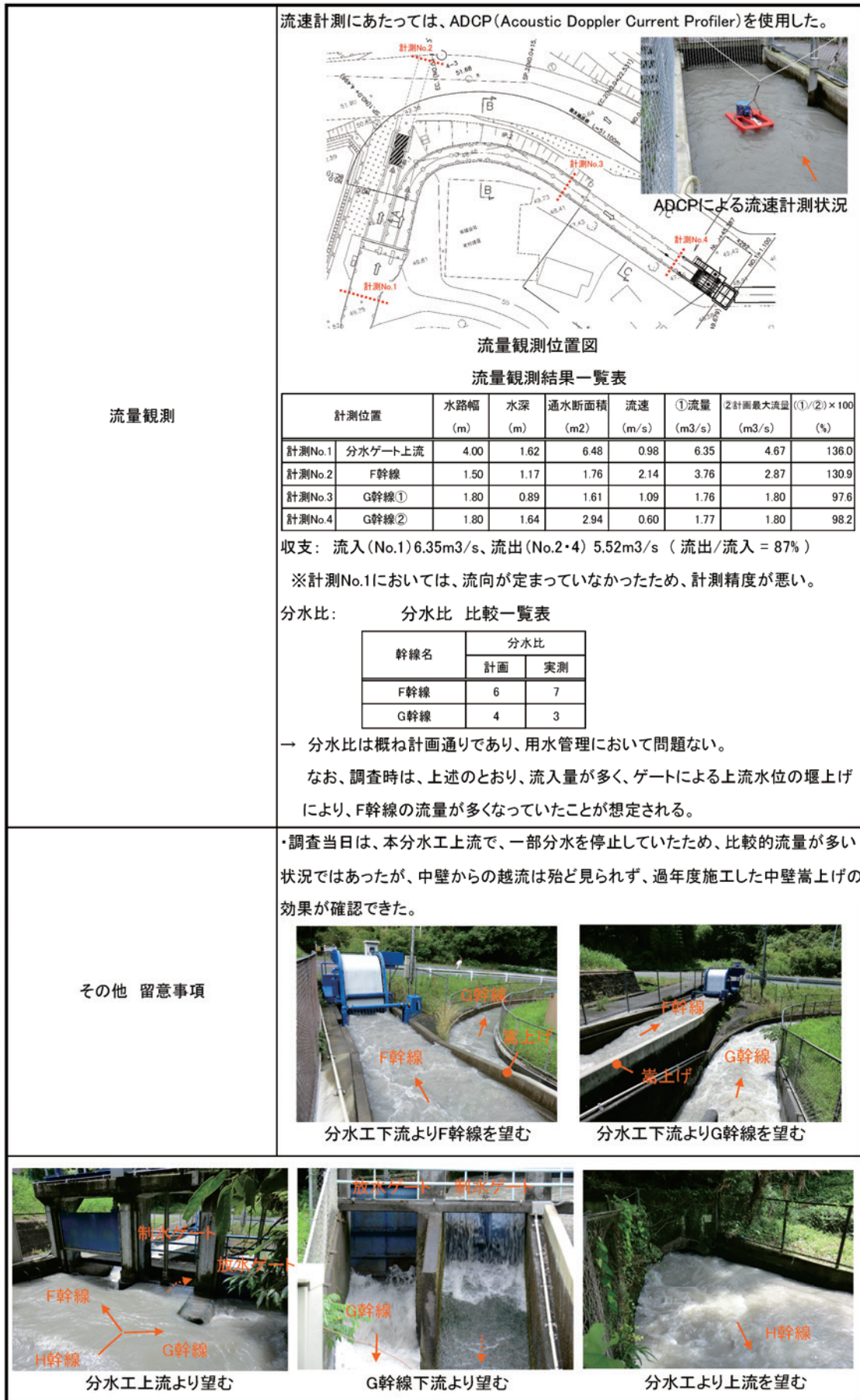


Fig. 5 (2) B 分水工における水理機能診断カルテ (かんがい期)

Diagnosis chart of hydraulic function in division work B (irrigation period)

施設名称	C放水工（用水名：G幹線）	調査日	2012/7/18（天候：晴れ）
	 <p>全景を望む</p>	所在地	（位置図） ○県○市（マップコード ○○）
管理者	A土地改良区	施工年	平成24年（増設）
ゲート形式	スライドゲート（ラック式）×2門	操作手順	中央制御室にて遠隔操作
分岐	2:（左岸）G幹線、（右岸）余水放流	分水比	—
診断項目		調査・診断結果	
施設状況（主にゲートを対象）		外観目視より、扉体、開閉装置等の著しい劣化は見られない。	
水位計形式および設置位置		圧力式水位計。	
ゲート上流側の余裕水深		—	
ゲート開度		未確認。	
流況（水位痕跡を含む）		<p>水位痕跡より判断し、越流堰上流（下流）の水面変動量は、3cm（15cm）程度である。本施設における水面変動を見る限り、越流セキ上流の水位は比較的安定しており、本施設上流に位置するB分水工における不安定な流況を説明できない。 （要検討事項 B分水工とC放水工の水位変動の相関について）</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>越流セキ上流の水面状況①</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>越流セキ上流の水面状況②</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>越流セキ下流の水面状況①</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>越流セキ下流の水面状況②</p> </div> </div>	
分水位の安定性		—	
H-Q（水位-流量）性能曲線		本施設における無効放流量および施設下流における分水量が安定している状況であれば、制水ゲート、緊急放流ゲートによるH-Q性能曲線の作成は可能である。	

Fig. 6 (1) C放水工における水理機能診断カルテ（かんがい期）
Diagnosis chart of hydraulic function in wasteway C（irrigation period）

<p>制御方式</p>	<p>・本施設は、越流セキによる上流水位の安定化および本施設上下流のエネルギーの縁切り、越流堰下流の水面積拡大による脈動現象の低減を期待し、改修(増設)を行った。以下に、改修前、改修後における制御方式について整理する。</p> <p>改修前の制御方式：放流管による放流であり、安定的な放流時においては、比較的上流制御方式に近い状況であるが、非放流時においては、下流制御方式であり、流入量に応じて制御方式が切り替わる状況にあった。</p> <p>改修後の制御方式：越流セキを境に、上流についてはセキによる上流制御方式、下流については構造上は余水吐による上流制御方式であるが、運用上はオリフィス(制水ゲート)による下流制御方式である。</p>  <p>改修(増設)前の施設状況</p> <p>改修イメージ図(水面は推定)</p> <p>・改修後、余水吐からの放流を行ったところ、風の影響を受け、自然な放流を行うことができなかった。現状は、余水吐からの放流は行わず、放流管(EL48.90m)からの放流により、水位制御を行っている。余水吐を塞いだことにより、管理水位は、余水吐の高さよりも高い位置(余水吐EL48.78m)となっている。越流堰の越流高は、EL48.88であり、流入量の変化に伴い、下流水位が上昇し、溺れることも想定される。</p>  <p>余水吐の状況</p>  <p>放流管からの放流状況</p>
<p>その他 留意事項</p>	<p>2012/2/13、本施設上流のG幹線パイプライン内の調査を実施した。サイホンからの呑口部の直下流天井において、空気塊?吹き上がり?のような周辺の壁面に見られない痕跡を確認した。</p>  <p>呑口トランジションを望む</p>  <p>サイホン末端を望む</p>
 <p>本施設上流のG幹線を望む</p>	 <p>施設状況①</p>  <p>施設状況②</p>

Fig. 6 (2) C放水工における水理機能診断カルテ (かんがい期)
 Diagnosis chart of hydraulic function in wasteway C (irrigation period)

IV 分析および診断結果

4.1 線の診断

4.1.1 B分水工下流におけるG幹線の水位変動量の変化

Fig.7 および Fig.8 は、B分水工下流におけるG幹線の流量と水位変動量の関係、およびG幹線の水位変動量とC放水工の水位の関係を示す。図中に示す流量および水位は1日における平均値、水位変動量は1日における最大値と最小値の差である。Fig.7 に示すように、G幹線流量が増加するにつれて、水位変動量が大きくなる。また、C放水工改修前後において、水位変動量の分布幅(0.04m程度)に変化はない。また、Fig.8 に示すように、G幹線流量の範囲(2.5m³/s未滿)が概ね同じ条件下において、C放水工改修後、C放水工水位が0.04m程度低下した。

以上の分析結果より、C放水工改修前後において、B分水工下流G幹線の水位変動量の分布幅(Fig.7)に変化が生じていないことから、越流セキの設置が、B分水工下流のG幹線における水位・流量不安定等の問題に対する抜本的な解決策となっていないものと考えられる。しかし、越流セキの設置を含めたC放水工の改修を行うことにより、同放水工越流セキ下流水位の低下が見られたことは、越流セキの上下流水位の独立性を維持することに繋がるため、水位流量制御方式が、従前の下流制御方式から、少なからず上流制御方式に移行しているものと推察される。なお、Fig.8 で見られた、C放水工における改修後の水位低下の要因については、後述する。

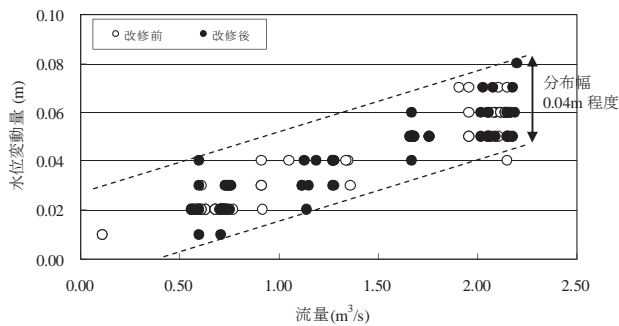


Fig.7 B分水工下流におけるG幹線の流量と水位変動量の関係

Relation between discharge and fluctuations of water level in division work B downstream

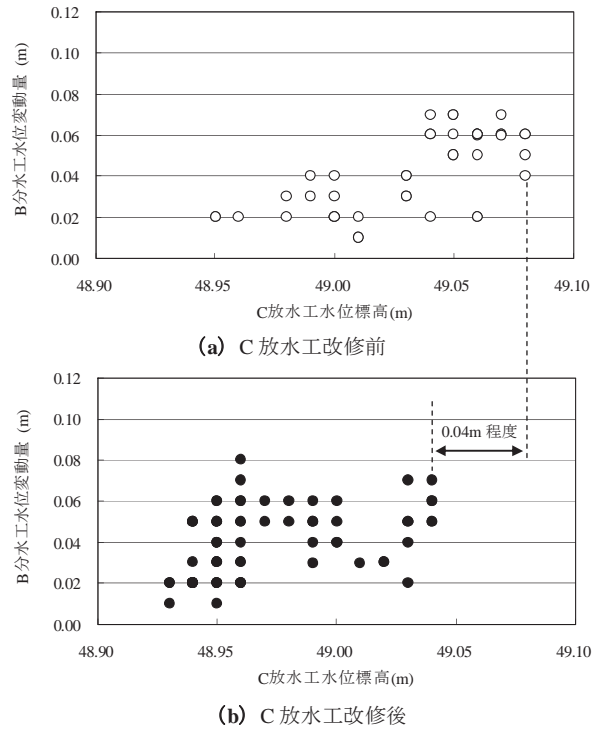


Fig.8 B分水工下流におけるG幹線の水位変動量とC放水工の水位の関係

(a) C放水工改修前, (b) C放水工改修後

Relation between fluctuations of water level in division work B downstream and wasteway C water level

(a) Before repair of wasteway C, (b) After repair of wasteway C

4.1.2 C放水工における余水放流量の変化

Fig.9 は、C放水工余水放流量とB分水工下流G幹線流量の関係を示す。図中に示すそれぞれの流量は、1日における平均値である。C放水工改修後、B分水工下流におけるG幹線流量に対して、余水放流量(0.15m³/s程度)が減少した。この現象は、Fig.8 で示した、C放水工の水位低下によるものと推察される。

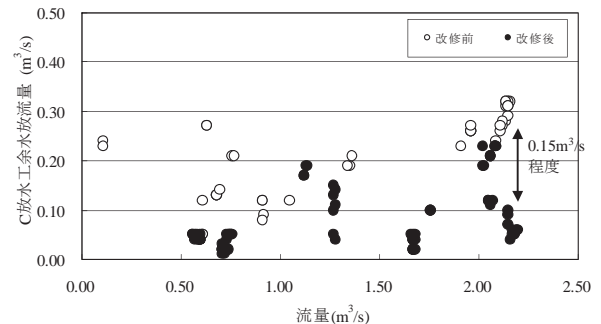


Fig.9 C放水工余水放流量とB分水工下流G幹線流量の関係

Relation between spillway discharge in wasteway C and canal G discharge in division work B downstream

4.1.3 B 分水工から D 分水工における水理特性の変化

Fig.10~**Fig.12** は、それぞれ B 分水工下流 G 幹線水位と C 放水工水位の関係、C 放水工水位と D 分水工水位の関係、B 分水工水位と D 分水工水位の関係を示す。図中に示すそれぞれの水位は、1 日における平均値である。

Fig.10 より、C 放水工改修後、C 放水工水位に対して、B 分水工下流 G 幹線水位が 0.2m 程度上昇した。この現象は、C 放水工における越流セキ設置による、上流水位の堰上げ効果によるものである。

Fig.11 より、C 放水工改修前後で、水位変化が見られなかった D 分水工水位に対して、C 放水工水位は低下している。この現象は、C 放水工における、越流セキの設置、分水スタンドの増設などによる損失水頭の増大によるもの、また、越流セキの完全越流時、越流セキで流量が規定され、セキ下流の水位低下に応じたセキ上流からの流量の増加が生じないことなどによるものと推察される。

Fig.12 より、D 分水工水位に対して、B 分水工下流 G 幹線の水位は上昇している。この現象は、**Fig.10** における考察と同じく、越流セキの設置によるものである。

以上のことから、C 放水工にて、越流セキの設置と分水スタンドの増設を含めた改修を行うことにより、B 分水工から D 分水工における水理特性が変化したものと推察される。なお、**Fig.11** の考察では、C 放水工における改修後の水位低下の要因を特定できておらず、継続して本診断結果を踏まえた分析を行う際は、越流セキ直上流水位の計測、C 放水工から D 分水工区間における分水量の計測などを行うことが必要となる。

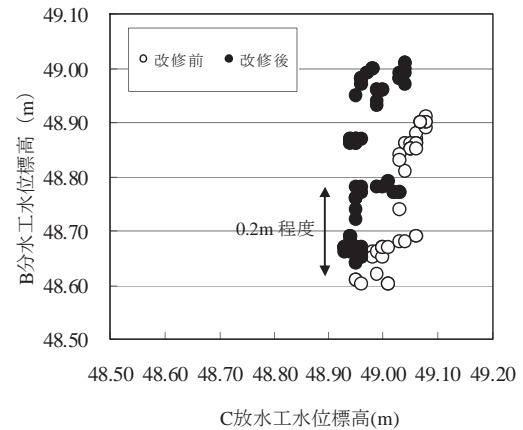


Fig.10 B 分水工下流 G 幹線水位と C 放水工水位の関係
Relation between canal G water level in division work B downstream and wasteway C water level

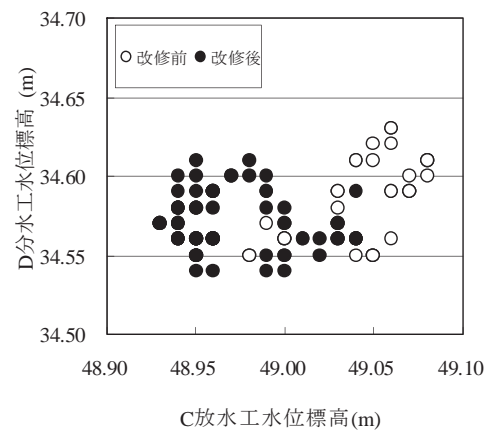


Fig.11 C 放水工水位と D 分水工水位の関係
Relation between wasteway C water level and division work D water level

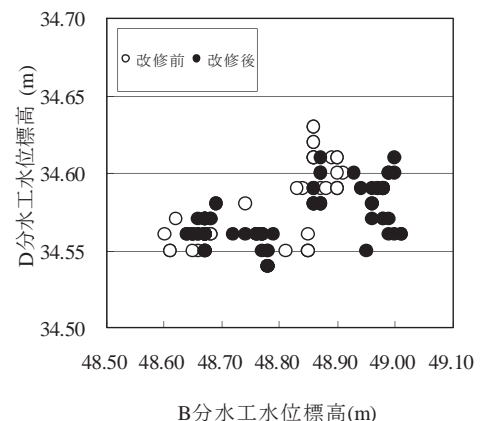


Fig.12 B 分水工水位と D 分水工水位の関係
Relation between division work B water level and division work D water level

4.1.4 C放木工における水位流量制御方式の変遷

上述の点および線の診断結果に示すように、C放木工改修後、B分木工からD分木工における水理特性の変化が生じたが、本来目的とした、B分木工下流のG幹線における水位・流量不安定等の問題解決には至っていない。次章において、B分木工下流のG幹線における水位・流量不安定等の問題に対する対策案について整理するが、ここで上述の点および線の診断結果を踏まえ、C放木工における水位流量制御方式の変遷を再整理した(Fig.13)。

(1) 事業②：C放木工の水位流量制御方式は、同放木工下流の需要変動に依存し、水位流量が変動することから、下流制御方式であった。

(2) 事業③ (計画時の想定)：C放木工における越流セ

キの設置により、極力、同放木工越流セキの上下流水位の独立性を維持し、同放木工の水位流量制御方式を、従前の下流制御方式から上流制御方式に変更することを想定した。

(3) 事業③ (現状)：越流セキ上下流における水位条件により、上流制御方式と下流制御方式が混在している可能性を有している。

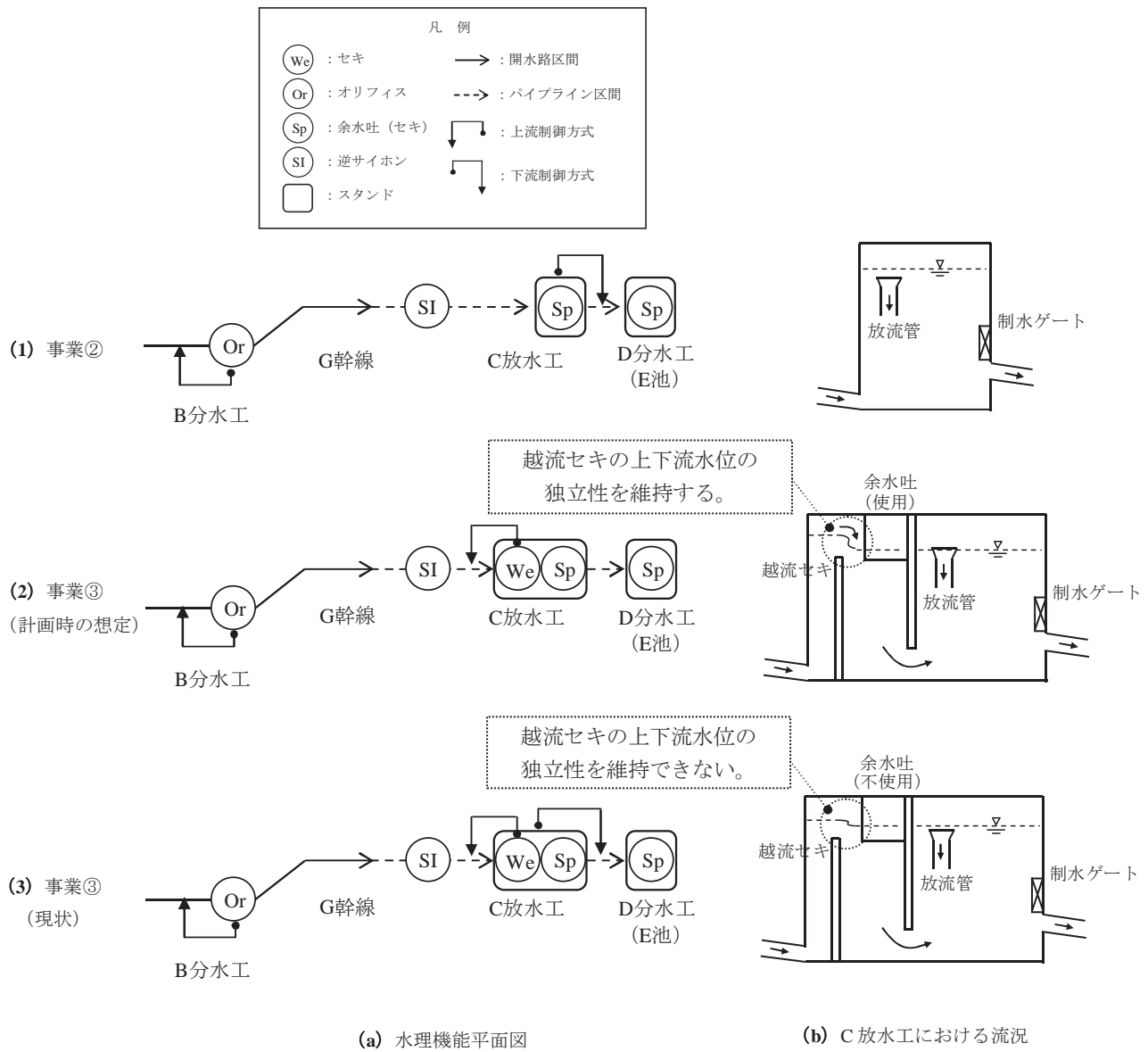


Fig.13 C放木工における水位流量制御方式の変遷

(a) 水理機能平面図 , (b) C放木工における流況

Changes of water level and discharge control methods in wasteway C

(a) Hydraulic function plan , (b) Flow behavior in wasteway C

4.2 B 分土工下流における G 幹線の水位・流量不安定等の問題に対する対策案の提案

上述の点および線の診断結果を踏まえ、G 幹線の水位・流量不安定等の問題に対する対策案を検討した (Fig.14)。

C 放土工における水位流量制御方式を完全な上流制御方式とすることを目的とした場合、①上流水位の対策、②下流水位の対策の 2 案が考えられ、複合的に対策を講じることが必要である。

また、両対策を講じる際には、以下の 3 点に留意する必要がある。①上流水位の対策は、B 分土工下流における G 幹線の溢水のリスクを高めることにも繋がるため、併せて開水路側壁の嵩上げおよび余水吐の設置が必要となる。②下流水位の対策は、C 放土工下流の水位 (圧力) 低下を引き起こす可能性があるため、C 放土工から D 分土工における水理、水利用についての検討が必要となる。最後に、①上流水位の対策、②下流水位の対策は、一見、個別に考えがちであるが、対策を講じることにより、最低範囲で、B 分土工～C 放土工～D 分土工の水路システムに影響を及ぼすため、水路システムとして捉え、十分な検討を行う必要がある。

	B分土工下流 G幹線	C放土工
①上流水位の対策	対策A：開水路底版コンクリート打設 対策B：開水路側壁の嵩上げ 対策C：開水路余水吐の設置	対策D：越流セキの嵩上げ
②下流水位の対策	—	対策E：飛散防止対策を講じた 上での余水吐の利用 対策F：余水放流管の放流量増大 対策G：余水放流調整バルブの設置

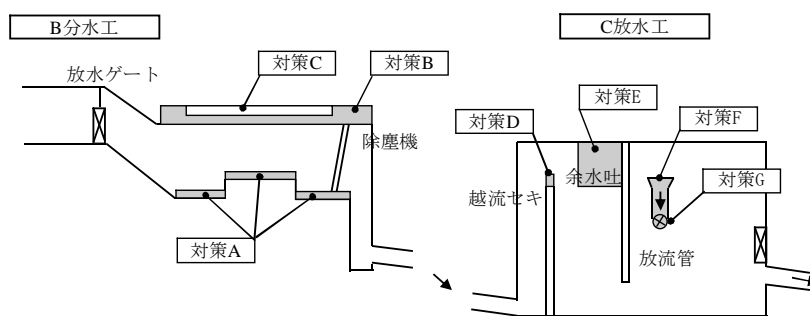


Fig.14 G 幹線の水位・流量不安定等の問題に対する対策案の概要
Countermeasures for hydraulic problems in canal G

V 結 言

本研究では、樽屋ら（2012）が提唱する水理および水利用に関する機能診断手順の現地適用を行うことを目的とし、開水路からパイプラインに移行する現地水路システム（G 幹線）を対象とした水理機能診断（点および線の診断）を実施し、以下のような所見が得られた。

- ① 施設更新による水理機能の変遷を水理機能平面図に整理することにより、点および線の診断を行うにあたっての着眼点を把握することができた。
- ② 点の診断においては、施設毎に、現地調査および施設管理者からの聞き取りに基づく水理機能診断を実施し、水位・流量変動等の問題について水理機能診断カルテに整理することにより、問題抽出を行うことができた。
- ③ 線の診断においては、点の診断結果を踏まえ、C 放水路改修前後における水理機能および水理特性の変化について TM/TC データを用いて整理することにより、C 放水路改修の効果について定量的に評価することができた。このことから、既往のモニタリングデータを活用することで、水理機能診断の一助となることがわかった。
- ④ ①～③の診断結果を踏まえ、事業③完了後の C 放水路が有している水理機能を明確にすることにより、B 分水路下流における G 幹線の水位・流量不安定等の問題に対する対策案の提案を行った。

今後も継続して、他地区にて、水理および水利用に関する機能診断手順の適用を試み、手法の汎用化を図る計画である。なお、現段階における、水理および水利用に関する機能診断手順の普及範囲は、検討内容から勘案すると、農業水利技術者（コンサルタント技術者等）に限

られ、土地改良区職員にも取り組めるようにしていくことが、今後の課題として残されている。

謝辞：本研究の実施にあたり、現地調査などにご協力を頂きました関係各位に対し、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 三春浩一・田中良和・向井章恵・樽屋啓之・中 達雄（2009）：用水路システムの水理および水利用に対する機能診断事例，農業農村工学会論文集，260，113-119
- 中 達雄・樽屋啓之（2008）：用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方，農業農村工学会論文集，256，9-16
- 中島賢二郎（2003）：用水路系の機能分析－水利システムの性能設計のために－，JIID 研究レポート，24，95-107
- 中島賢二郎・中村博樹（2003）：排水路系の機能分析－水利システムの性能設計のために－，JIID 研究レポート，24，109-114
- 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・東京大学大学院農学生命科学研究科・日本大学生物資源科学部（2012）：農業水利施設の機能保全のための研究成果の活用の手引き，農村工学研究所，104-105
- 樽屋啓之・藤山 宗・中田 達（2012）：分水施設機能診断のための基本的調査項目について，平成 24 年度農業農村工学会九州支部大会講演要旨集，94-95
- 樽屋啓之・三春浩一（2009）：用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント，水土の知，77（4），11-14
- USB（1991）：Canal Systems Automation Manual，1，9-11

Diagnosis of Hydraulic Function for Wasteway Renewal in the Canal System Shifting to Pipelines from Open Canals

FUJIYAMA So*, TARUYA Hiroyuki **and NAKADA Toru**

Sanyu Consultants Inc*

Hydraulic Engineering Division, Canal Systems**

Summary

In this study, for a local application of diagnosis procedure suggested by Taruya et al. for hydraulic and water serviceability functions, the diagnosis of hydraulic function for wasteway renewal in the canal system shifting to pipelines from open canals was performed, and obtained results are as follows. 1) The focus for diagnosing in point and line by arranging changes of hydraulic function in hydraulic plan could be grasped. 2) On the point diagnosis, the diagnosis chart based on results obtained by field survey and facility manager interview revealed hydraulic problems. 3) On the line diagnosis, TM/TC database was available for quantitative evaluation of wasteway C renewal. 4) Based on diagnosis results of hydraulic function for point and line, we could consider countermeasures for hydraulic problems.

Key words : canal system, diagnosis of functions, hydraulic function, open canal, pipeline

用排水路の維持管理における集落の労力負担能力の 継続性評価

— 2010年世界農林業センサス農業集落カードの山形県のデータを用いた事例 —

鬼丸竜治*

*農村基盤研究領域事業評価担当

キーワード：用排水路，維持管理，集落，労力負担能力，継続性評価，農業集落カード

I 緒言

これまで日本の農村では、集落にある水田用の用排水路（開水路）の維持管理は、集落が取り仕切り、集落の農家を動員して行われてきた（岡本，2003）。ところが近年、過疎化、高齢化、混住化等の進行に伴う集落機能の低下により、そのような維持管理の適切な実施が困難になってきた（農林水産省，2013a）。そこで、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」と呼ばれる新たな維持管理主体の設立促進を開始した。併せて、活動組織が行う維持管理等の共同活動に対して、財政的、技術的な支援を始め、現在も農地・水保全管理支払交付金（以下「保全対策」という。）として継続している（農林水産省，2013b）。

保全対策の公表されている最新の評価結果（農林水産省，2012a）によれば、保全対策による共同活動は、「用排水路等の機能維持に役立っている」と評価されている。一方、課題として、「農業者の高齢化や農村の混住化が今後さらに進行する中、地域共同による農業用水等の保全管理活動を継続すること」が示されている。ここで、以下本報では、保全対策で使われている用語「保全管理活動」を、後述する既往研究（例えば鬼丸・佐藤，2011）における用語と整合をとって「労力負担行動」と呼び、用排水路の維持管理に必要な労力を負担することの意味で用いる。なお、労力負担行動の具体例には、用排水路の草刈り、泥上げ等がある。

労力負担行動に関する既往研究を見ると、これまで複数の研究において、「労力負担行動に影響を与える諸要因の中から適切な要因を選択し、その要因に働きかけることによって、行動を継続・促進させる」という観点から、労力負担行動と影響要因との関係が分析されている。そのような既往研究のうち鬼丸・佐藤（2011）は、労力負担行動への影響要因として、労力負担意欲、労力負担能力、労力負担の振り分け方法、労力負担の履行方法の4つを示している。これらの要因のうち、労力負担意欲については、鬼丸（2012）が構造方程式モデリングを使って、意欲とそれに

影響を与える要因との関係を分析している。また、労力負担の振り分け方法に関しては合崎ら（2006）が、労力負担の履行方法に関しては山本・長澤（2010）が、それぞれ選択実験、コンジョイント分析によって、非農家住民の協力が得やすい作業計画を検討する具体的な方法を示している。

一方、労力負担能力については、それに着目して議論した既往研究は見られない。しかし、前述した保全対策における課題の解決を目指して、農家、非農家に労力負担を求める場合、負担意欲があり、負担の振り分け方法と履行方法が適切であっても、体力等の面で負担能力がなければ、彼らは労力を負担することはできない。したがって、労力負担能力について議論することは、労力負担行動への他の3つの影響要因と同様に、重要であると考えられる。

松下（2009）は、現状では活動組織の大半が集落単位で形成されており、集落単位の動きが共同活動の取り組み状況を知る1つの判断基準になると述べている。このことから、労力負担能力について議論する場合、能力について2つの捉え方ができると考える。1つは、参加者「個人」の労力負担能力であり、もう1つは、活動組織の設立基盤である、「集落」の労力負担能力である。

上記のうち「個人の労力負担能力」を、これまで維持管理の中心となってきた農家（岡本，2003）について見れば、農村の高齢化が進行している（農林水産省，2013a）ので、彼らの能力は加齢に伴う体力低下等によっていずれ低下するであろう。そのような場合でも、農家の能力が低下した分を非農家が補えば、もう1つの「集落の労力負担能力」は、維持管理に必要な水準を保つことができると考える。

このことから、まずは集落に着目し、集落の労力負担能力に応じて労力負担行動をするための支援策を検討・実施することは、保全対策における課題「地域共同による労力負担行動を継続すること」の解決に繋がるものと考えられる。

具体的には、集落として労力負担行動をしている集落を対象に、労力負担能力が継続する見込み（以下「継続性」という。）を評価し、継続性が相対的に低い集落を対象に、所要の支援策を検討・実施することが考えられる。このよ

うに対象集落を絞り込むことは、国家財政が厳しい中で効果的に施策を講ずる観点からも、妥当なものであると考える。

以上のことから、本報では、水田用の用排水路の維持管理における集落の労力負担能力の継続性について、その評価を事例集落のデータを用いて試みる。

なお、以下本報では労力負担能力という言葉、「維持管理に必要な労力を負担し得る力」の意味で用いる。したがってそれには、集落に住む、現在は労力を負担していない者の能力を含む。

Ⅱ 方法

労力負担能力は、上述した定義から明らかなように構成概念である。構成概念とは、本報で取り扱う能力のほか、学力、意欲のような、種々の現象や行動を説明するために仮定・導入される内的状態や心理過程のことである(横川, 1995)。構成概念は、それ自体を直接観測することはできない。そのため、直接観測することが可能な観測変数を通じて、間接的に測定することになる。その方法には、主に、構成概念が観測変数に影響を与えると考えられる場合に用いる因子分析と、観測変数が構成概念に影響を与えると考えられる場合に用いる主成分分析とがある(豊田, 1992)。

I編で述べたように、労力負担能力に着目して議論した既往研究は見られない。そこで本報では、はじめに既往研究で示された労力負担行動への影響要因の観測変数を整理し、それらのうち能力を介して行動に影響を与えると考えられるものを基に、労力負担能力の指標となる観測変数(以下「指標変数」という。)を検討することにした。その上で、上記の豊田(1992)に従って、指標変数のデータを主成分分析することにより、労力負担能力を測定することにした。

次に、I編で述べたとおり、本報では労力負担能力に応じて労力負担行動をするための支援策を検討することを上位目標としている。そこで、現時点のデータを用いて現在の労力負担能力を測定し、その結果を基に、現在の労力負担行動との関係に着目して労力負担能力を分析することにした。

そして、趨勢により予測した10年後のデータを用いて将来(10年後)の労力負担能力を測定し、それを現在の能力の分析結果と比較することによって、労力負担能力の継続性を評価することにした。

具体的な方法は、次のとおりである。

2.1 労力負担能力の指標変数の検討方法

2.1.1 労力負担行動への影響要因の観測変数

Table 1 は、集落の労力負担行動への影響要因について議論した入手可能な既往研究の中から、影響要因とその観測変数について記述した部分等を抽出・整理したものである。

既往研究では、集落の労力負担行動への影響要因として、Table 1 の影響要因欄に示した要因を挙げている。また、各影響要因の説明変数の候補として、説明変数欄に示した各変数を挙げている。そして、被説明変数欄に示した用排水路管理の実施有無等を被説明変数にして回帰分析を行い、○および△で示した、統計的に有意であった説明変数(候補)を、労力負担行動への影響要因の説明変数としている。ここで、説明変数欄に示した各変数は、回帰分析の立場から見れば説明変数と呼ばれ、観測可能か否かという立場から見れば観測変数と呼ばれるものであることから、以下本報ではそれらを観測変数と呼ぶことにする。

Table 1 の影響要因欄を見ると、同じ概念と考えられる影響要因が、例えば藤栄(2006)では集落内の異質性、藤栄(2007)では社会的異質性、藤栄(2008)では集落の社会的異質性と、異なる名称で表現されている場合がある。また、観測変数欄を見ると、同じ変数、例えば総戸数が、藤栄(2007)では集落規模、松下(2009)では集落属性と、異なる影響要因の観測変数として用いられている場合がある。

そこで本報では、既往研究における影響要因を同種の概念で分け、適当と考えられる名前を付けてTable 1の区分欄に示した。また、各影響要因の観測変数を、区分欄と対応させて観測変数欄に整理した。

2.1.2 労力負担能力の指標変数

豊田(1992)は、分析者が興味を持っている変数を規定する要因は数多く存在するから、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関して豊田(1998)は、モデル内の要因は、モデル構成者が現実の世界のどの側面から現象を理解したいかという動機によって選択されると述べている。

上記の考え方に基づいて、どの側面から労力負担能力を理解することが適当であるのか検討すると、橋詰(2004)は、日本の農業構造の変化を、量的な減少傾向から質的な衰退へと比重が移る新たな段階に突入したと表現している。また、島崎(2010)は、本報で用いたような社会調査の手法は、量的把握を目指す定量的手法と質的把握を目指す定性的手法に大別されると述べている。

このように、量・質2つの側面から物事を捉える方法は、「量より質」という言葉があることから分かるように、物事を理解する際に広く用いられ、多くの人に理解して貰いやすい方法であると考えられる。そこで本報でも、量・質2つの側面から労力負担能力を捉えることにした。

次に、2.1.1節で述べたとおり、Table 1の既往研究では、統計的に有意であった変数を観測変数としている。そのため、他の地区で観測変数を検討しようとする場合、既往研究において有意でなかった変数が、対象地区で有意な関係が見られなかっただけなのか、それともそもそも観測変数として不適切なのかが分からないので、どの変数を観測変数とするべきかの判断が難しい。そして、上記の豊田(1992)が述べていることから分かるように、一つの研究・論文で扱うことができる観測変数の数には、現実的な限界

Table 1 既往研究における影響要因とその観測変数等
Influencing factors, observable variables and so on in reference papers

区分	説明変数 (観測変数)	影響要因					
		既往研究	藤栄 (2006)	藤栄 (2007)	藤栄 (2008)	松下 (2008)	松下 (2009)
被説明変数		用排水路管理の 実施の有無 ^{注2)}	用排水路の 管理水準 ^{注3)}	用排水路の 管理形態 ^{注4)}	共同行動 水準 ^{注5)}	共同活動の 実施状況 ^{注6)}	
影響要因		集落内の異質性	兼業機会 集落内の土地利用	集落の規範の強さ その他の集落属性	集落規模 社会的異質性 集落属性	集落規模 集落の社会的異質性 集落属性 社会関係資本	地理条件 ソーシャル・キャピタル peer effect ^{注7)} 生産環境 集落属性 ソーシャル・キャピタル
集落の規模	総戸数			○	○	○	
	総戸数の二乗			○	○		
集落の生産環境	農家戸数					○	
	農家戸数増減率 (1990→2000年)					×	
	農家1戸当たり経営耕地面積					○	
	経営耕地率	○		×			
	経営耕地に占める田面積率	○			○		
	耕作放棄地率			○		○	
	集落の主な田の地形 (平坦地, 急傾斜地)					○	
集落の社会的異質性	土地利用多様性指標 ^{注8)}					○	
	林野率					○	
	非農家率	○	○		×	○	
	非農家率の二乗				○		
	自給農家率					○ ^{注9)}	
	兼業従事者率	○					
	兼業従事者率の二乗	○					
集落の属性	集落社会の分極化指数 ^{注10)}				×		
	集落社会の多様性指数 ^{注11)}				×		
	農業経営規模に関する分極化指数 ^{注12)}				○		
	農業経営規模に関する多様性指数 ^{注13)}			○	○		
	農家人口に占める65歳以上農家人口の割合				○	○ ^{注9)} × ^{注9)}	
	DID距離	×		△ ^{注14)}	○ ^{注15)}	○ ^{注16)} × ^{注17)}	
	農業地域類型		△ ^{注18)}	△ ^{注19)}	○ ^{注16)}	○ ^{注16)} △ ^{注20)}	
集落のその他属性	集落形態			△ ^{注21)}	○ ^{注22)}	○ ^{注16)}	
	地形			△ ^{注23)}			
	地域				○ ^{注24)}		
	集落の標高				○		
集落が属する旧市町村の共同活動の平均実施率					○		
集落の寄合回数			○	○	○	○ ^{注25)}	
ソーシャル・キャピタル	内部結束型ソーシャル・キャピタルの蓄積量 ^{注26)}					○	
	橋渡し型ソーシャル・キャピタルの蓄積量 ^{注27)}					○	
	内部結束型和橋渡し型の交差項 ^{注28)}					○	

注1) 上表中の記号 (○, △, ×) の意味は次のとおり。
○ : 少なくとも10%水準で有意差あり, △ : 説明変数の一部が少なくとも10%水準で有意差あり, × : 10%水準で有意差なし

注2) 用排水路管理を実施=1, 用排水路管理を非実施=0

注3) 用排水路管理を「全戸が出役して実施=3, 農家のみ出役して実施=2, 集落としては非実施=1, 非実施=0」

注4) 用排水路管理を「全戸が出役して実施=4, 農家のみ出役して実施=3, 雇用して実施=2, 集落としては非実施=1, 非実施=0」

注5) 2つの変数 (変数1: 農地・水・環境保全向上対策に「取り組んでいる=1, 取り組んでいない=0」。変数2: 農道, 用排水路, 生活関連施設それぞれについて「全戸出役=2, 農家のみ出役=1, 非実施=0」を平均して得られる値。データは, 滋賀県農政水産部農村振興課「H19世代をつなぐ農村まるごと向上対策の取り組み一覧表」を使用) を因子分析して得られる因子得点。松下 (2008) は構造方程式モデリングを用いて分析しているので, ここでは最上位の被説明変数を記載

注6) 集落が共同活動を実施=1, 集落が共同活動を未実施=-1。データは, 滋賀県農政水産部農村振興課「H19世代をつなぐ農村まるごと向上対策の取り組み一覧表」を使用

注7) ある主体の行動様式がその主体が属する参照グループの行動様式に影響をうける効果 (松下, 2008)

注8) 集落内の土地利用の多様性を, 田面積, 畑面積, 果樹園面積で区分した3つのグループの構成比率を用いて表す指標

注9) 松下 (2009) は, 生産環境の指標としたこれらの変数は「住民の異質性を表すという共通点をもつ」と述べている。

注10) 集落を構成する集団が二分しているかを, 5つの集団 (非農家, 自給的農家, 専業農家, 1種兼農家, 2種兼農家) の構成比率を用いて表す指数

注11) 集落が様々な集団から構成されているかを, 5つの集団 (非農家, 自給的農家, 専業農家, 1種兼農家, 2種兼農家) の構成比率を用いて表す指数

注12) 集落を構成する農家の経営規模が二分しているかを, 経営耕地面積で区分した7つのグループの構成比率を用いて表す指数

注13) 集落が様々な経営規模の農家から構成されているかを, 経営耕地面積で区分した7つのグループの構成比率を用いて表す指数

注14) 4区分 (30分以下, 30分~1時間以内, 1~1.5時間以内, 1.5時間以上) のうち1~1.5時間以内は有意差あり

(Table 1 続き)

Table 1 continued

- 注 15) 2 区分 (30 分以内, 1 時間以上) でいずれも有意差あり
 注 16) 3 変数 (変数 1: DID 距離が「30 分未満=2, 30~60 分=1, 60 分以上=0」。変数 2: 農業地域類型が「都市的地域=3, 平野地域=2, 中間地域=1, 山間地域=0」。変数 3: 集落形態が「密居=2, 集居=1, 散在・散居=0」の平均値である「立地を表す変数」に使用
 注 17) 2 区分 (30 分未満, 30 分以上)
 注 18) 4 区分 (都市的地域, 平地地域, 中間地域, 山間地域) のうち都市的地域と中間地域は有意差あり
 注 19) 4 区分 (都市的地域, 平地地域, 中間地域, 山間地域) のうち平地地域は有意差あり
 注 20) 3 区分 (都市的地域, 平野地域, 中間地域+山間地域) のうち都市的地域は有意差あり
 注 21) 4 区分 (散在, 散居, 集居, 密居) のうち集居は有意差あり
 注 22) 2 区分 (散在, 密居)
 注 23) 6 区分 (平野, 盆地, 高原, 裾野, 山間, 峡谷) のうち盆地は有意差あり
 注 24) 8 区分 (東北, 関東, 北陸, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州)
 注 25) 内部結束型ソーシャル・キャピタルの蓄積量を表す変数に使用
 注 26) 4 変数 (農道の管理形態, 用水路の管理形態, 生活関連施設の管理形態, 寄合回数) の第 1 主成分
 注 27) 5 変数 (農林漁業の体験交流, 産地直送交流, 農山漁村留学受け入れ, 伝統・工芸交流, 祭り・イベント交流) の第 1 主成分
 注 28) 内部結束型ソーシャル・キャピタルの蓄積量と橋渡し型ソーシャル・キャピタルの蓄積量の交差項

がある。

そこで本報では、Table 1 の整理結果を基に、次の 5 つの指標変数について、労力負担能力に影響を与えると考えられる理由を整理した上で、それらを使って集落の量的・質的な労力負担能力を測定することにした。

(1) 総戸数

I 編で述べたように、過疎化等の進行により維持管理が困難になってきたといわれている。ここで、維持管理への参加者は、耕作面積に関わらず家から 1 人が基本とされている (長濱, 2003) ので、上記のようにいわれていることは、集落の人口や戸数が減ったことにより、維持管理への参加者が減ってきたことを意味するといえる。

このことから、Table 1 の区分欄「集落の規模」の観測変数のうち「総戸数」は、集落の量的な労力負担能力の指標変数の 1 つになると考える。

なぜなら、総戸数が多いほど集落として行う維持管理への潜在的な参加者数は多くなるので、量的な面で集落として労力を負担し得る力を増やすと考えられるからである。

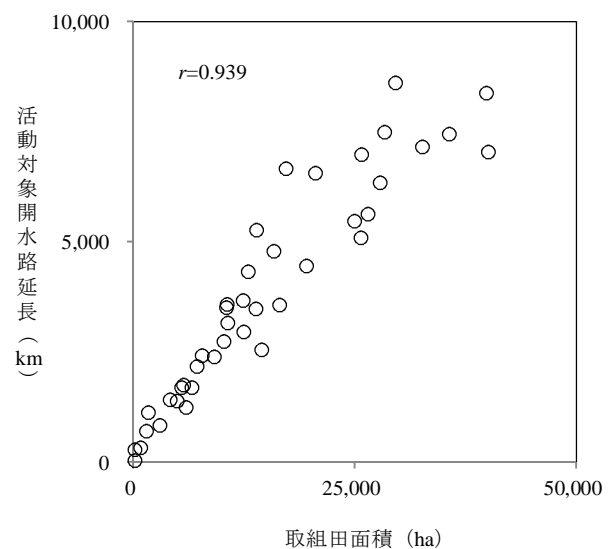
(2) 農家 1 戸当たり属地田面積

これまで維持管理は、集落の農家を動員して行われ (岡本, 2003), また上述したとおり、参加者は家から 1 人が基本とされている。そして、保全対策が行われている府県では、Fig.1 に示したとおり、田面積と開水路延長との間に強い正の相関関係 (相関係数 $r=0.939$) が見られる。ここで、Fig.1 の田面積は府県別の面積なので、これを属地田面積と見なすと、農家 1 戸当たり属地田面積は、これまで参加者 1 人が維持管理を担ってきた開水路延長の代替指標になると考える。

このことから、Table 1 の区分欄「集落の生産環境」の観測変数のうち「農家 1 戸当たり経営耕地面積」を基に検討すると、「農家 1 戸当たり属地田面積」は、集落の量的な労力負担能力の指標変数の 1 つになると考える。

なぜなら、農家 1 戸当たり属地田面積が大きいほど参加者 1 人が維持管理を担う開水路延長は長くなるので、量的な面で集落として労力を負担し得る力を減らすと考えられるからである。

なお、属地田面積を用いた理由は、集落ごとの開水路延



注) 上図は、農林水産省 (2012b) に基づき、外れ値である北海道、秋田・山形・新潟・兵庫県および共同活動支援の実績がない東京都を除いた、41 府県のデータを用いて作成した。

Fig.1 保全対策における府県別の取組田面積と活動対象開水路延長との関係 (2011 年度)

Relationship between the area of paddy fields with canal maintenance activities and the length of canals in each prefecture (2011 fiscal year)

長のデータが入手できなかったためである。また、上記の「経営耕地田面積」には、他の集落に通って耕作 (出作) している面積が含まれていることに留意が必要である。

(3) 農家率

I 編で述べたように、混住化等の進行により維持管理が困難になってきたといわれている。これは、集落の農家の割合が減ったことにより、維持管理への参加者が減ってきたことを意味するといえる。

このことから、Table 1 の区分欄「集落の社会的異質性」の観測変数のうち「非農家率」を基に検討すると、「総戸数に占める農家戸数の割合」(以下「農家率」という。)は、集落の質的な労力負担能力の指標変数の 1 つになると考える。

なぜなら、農家は非農家と比べると労力負担行動をす

ることによって得る便益は大きく、労力負担行動をするインセンティブは大きいといわれている（藤栄，2007）ので、総戸数等によって表される量的な労力負担能力が同じでも、農家率が高いほど労力負担行動をするインセンティブが大きい住民の割合が高くなり、質的な面で集落として労力を負担し得る力を増やすと考えられるからである。

(4) 農家の高齢化率

I編で述べたように、高齢化等の進行により維持管理が困難になってきたといわれている。高齢化とは、65歳以上の高齢者人口の割合が多いことである（青柳ら，2003）。したがって、上記のようにいわれていることは、集落の65歳以上人口の割合が増えたことにより、維持管理への参加者が減ってきたことを意味するといえる。

このことから、Table 1の区分欄「集落の社会的異質性」の観測変数のうち「農家人口に占める65歳以上農家人口の割合」（以下「農家の高齢化率」という。）は、集落の質的な労力負担能力の指標変数の1つになると考える。

なぜなら、高齢者は体力的な面で維持管理作業への参加が難しいことが多いといわれている（本田，2011）ので、量的な労力負担能力が同じでも、農家の高齢化率が高いほど労力負担行動をすることが難しい住民の割合が高くなり、質的な面で集落として労力を負担し得る力を減らすと考えられるからである。

(5) 寄合回数

Table 1の区分欄「集落のソーシャル・キャピタル」の観測変数のうち「寄合回数」は、集落の質的な労力負担能力の指標変数の1つになると考える。

なぜなら、寄合を行うことで集落構成員の結束は高まり、集落の共同行動は容易になるといわれている（藤栄，2008）ので、量的な労力負担能力が同じでも、寄合回数が多いほど共同行動の1つである維持管理への住民の参加は容易になり、質的な面で集落の労力を負担し得る力を増やすと考えられるからである。

2.2 労力負担能力の測定方法

2.2.1 指標変数のデータを主成分分析する方法

本報では、2.1.2節で示した5つの指標変数のうち、量的な労力負担能力の指標変数である総戸数および農家1戸当たり属地田面積のデータを主成分分析し、得られた第1主成分得点を、労力負担能力を測定するための新たな指標「量的な労力負担能力」の値とした。

同様に、質的な能力の指標変数である農家率、農家の高齢化率、寄合回数のデータを主成分分析し、得られた第1主成分得点を、労力負担能力を測定するための新たな指標「質的な労力負担能力」の値とした。

2.2.2 使用するデータ

本報では集落の労力負担能力を扱うので、測定に使用するデータは、集落単位のデータである2010年世界農林業センサス農業集落カード（以下「2010年農業集落カード」という。）のデータとした。

2010年農業集落カードは、最新の世界農林業センサスで

ある2010年世界農林業センサスを実施した農林水産省大臣官房統計部から、一般財団法人農林統計協会がデータの提供を受けて、編集・頒布している。農林統計協会（2012）によれば、同カードは、2010年世界農林業センサスの農山村地域調査と農林業経営体調査の調査結果および過年次の農業集落カードデータを、農村の地域社会における最小の単位である農業集落単位の整理統合したものである。そして、全国の約11万集落のデータが、2012年11月から一般に頒布されている。

同カードを使うと、2.2.3節で述べる事例集落のみならず、全国の集落について、新たに調査することなくデータを利用することができるメリットがある。

2010年農業集落カードでは、質的な労力負担能力の指標変数「農家の高齢化率（農家人口に占める65歳以上農家人口の割合）」の算出に必要な「農家人口」が、総農家ではなく販売農家を対象に示されている。このため、本報では、上記の指標変数の代替指標変数として「販売農家人口に占める65歳以上販売農家人口の割合」を用いることとし、以下これを「農家の高齢化率」と呼ぶ。また、このことと整合をとるため、質的な能力の指標変数「農家率（総戸数に占める農家戸数の割合）」についても、代替指標変数として、「総戸数に占める販売農家戸数の割合」を用いることとし、以下これを「農家率」と呼ぶ。なお、総農家は、販売農家と自給的農家に区分されている（農林水産省，2010a）。

2010年農業集落カードでは、指標変数「農家1戸当たり属地田面積」の算出に必要な「属地田面積」として、「農業集落の精通者の知見に基づき、農業集落の範囲内にある耕地を聞き取った面積」（農林統計協会，2012）が示されている。しかし、同カードにおける1集落当たりの総農家数は、数戸から数百戸まで大きな幅があるので、属地田面積の聞き取り精度にも大きな幅があると考えた。そこで本報では、上記の属地田面積のデータに代えて、食料・農業・農村白書（農林水産省，2012c）において日本の耕地面積の出典とされている、農林水産省の「耕地及び作付面積統計」（農林水産省，2011a）のデータを用いることにした。

具体的には、「耕地及び作付面積統計」では市町村単位のデータが示されているので、各集落が属する市町村の「耕地及び作付面積統計の田耕地面積」に、各集落の「2010年農業集落カードの経営耕地田面積（販売農家）」と、各集落が属する市町村の「2010年世界農林業センサスの経営耕地田面積（販売農家）」（農林水産省，2012d）との比率を掛けて、各集落の属地田面積とした。

上記において総農家ではなく販売農家のデータを用いた理由は、市町村の「2010年世界農林業センサスの経営耕地田面積（総農家）」が公表されていないためである。

2.2.3 事例集落

本報では事例集落として、①山形県内にある集落、であって、2010年農業集落カードのデータが、②水田あり・用排水路あり・畑地集落以外、③非公表データなし、④外れ値なし、という条件を満たす842集落を選定した。

①の条件を設けた理由は、山形県は、保全対策の取組面積が全府県で1位、取組田面積が2位、対象開水路延長が4位である(農林水産省, 2012b)ことから、本報で事例とする水田用の用排水路のある集落が、多数存在すると考えたからである。

②の条件を設けた理由は、本報では水田用の用排水路を扱うためである。

③の条件を設けた理由について、2010年農業集落カードでは、項目によって秘匿処置を行っている(農林統計協会, 2012)。そこで、労力負担能力の測定に必要なすべてのデータを揃えるため、指標変数の計算に必要なデータが非公表等になっている集落は、対象外とした。

④の条件を設けた理由について、本報で用いた主成分分析は、変数の相関関係の情報を手がかりにして変数を合成する方法である(三輪, 2007)。また、相関係数は外れ値に大きく影響される(小塩, 2007)。したがって、外れ値があると適切な主成分分析が妨げられる。そこで、指標変数に外れ値のある集落は、対象外とした。

外れ値の定義について、本報で用いた統計解析ソフトウェア(IBM SPSS Statistics 20)では、第1四分位点よりも四分位範囲(第1四分位点と第3四分位点の間)の1.5倍以上小さな値のデータ、および第3四分位点よりも四分位範囲の1.5倍以上大きな値のデータを、それぞれ外れ値としている(内田, 2007)。本報ではこれに従った。

2.3 労力負担能力の継続性の評価方法

2.3.1 現在の労力負担能力の測定・分析

はじめに、2010年農業集落カードのデータを用いて、2.2.1節で示した方法により、事例とした842集落の2010年現在の量的・質的な労力負担能力を測定した。

測定した労力負担能力は、2.2.1節で述べたとおり主成分得点なので、量的データである。量的2次元データの分析において、通常最初に行われるのは散布図の作成であるといわれている(中井・松原, 1991)。そこで本報でも、最初に量的な労力負担能力と質的な能力の関係を、散布図を用いて分析した。その際、労力負担行動との関係に着目して分析するため、労力負担行動をしている集落、していない集落に分けて分析した。

次に、上記の分析結果を基に、測定した量的・質的な労力負担能力の平均値を基準にして、事例集落を4つのカテゴリーに分けた。カテゴリーに分けたデータのような、質的データの関係を見るには、クロス表が用いられる。クロス表は、本報のような、社会調査の結果分析ではきわめてよく用いられる方法である、といわれている(中井・松原, 1991)。そこで本報でも、クロス表を用いて、量的・質的な労力負担能力と労力負担行動との関係を分析した。

その上で、労力負担能力がどのような状態の時に、「労力負担行動をしていない集落」が多いのかを、調整済み標準化残差を用いて分析した。調整済み標準化残差は、クロス表のどのセルに特徴があるのかを確認する方法である(田窪, 2009)。また、「労力負担行動をしていない集落」

に着目した理由は、労力負担能力がどのような状態の時に労力負担行動をしていない集落が多いのかが分かれば、そのような集落を対象に、能力に応じて労力負担行動をするための支援策を検討することができると思ったからである。

2.3.2 将来の労力負担能力の測定および継続性の評価

趨勢により予測した10年後(2020年)のデータを用いて、2.2.1節で示した方法により、事例とした842集落の将来(2020年時点)の量的・質的な労力負担能力を測定した。

10年後のデータは、橋詰(2004)が趨勢による農業集落数をマルコフモデルを使って予測した方法に準拠し、2010年農業集落カードに掲載されている2010年と2000年のデータを用いて、2010年の値に増減率(2010年の値/2000年の値)を掛ける方法で算出した。その際、例えば、算出した農家数が総戸数を超えないようにする等、各算出値が非現実的な値とならないように補正した。また、指標変数のうち「寄合回数」については、2000年のデータが2010年農業集落カードに掲載されていないため、2000年世界農業センサス農業集落カードのデータを用いた。

そして、将来の量的・質的な労力負担能力の平均値を基準にして、事例集落のうち現在は労力負担行動をしている集落を、2.3.1節と同様にカテゴリーに分けた。

その上で、各集落が現在の労力負担能力で含まれるカテゴリーと、将来の能力で含まれるカテゴリーとを、現在の能力の分析結果に基づいて比較・分析することによって、労力負担能力の継続性を評価した。

III 結果と考察

3.1 現在の労力負担能力の測定結果

Table 2に、現在(2010年)の労力負担能力の測定結果を示す。

Table 2の区分欄のうち主成分負荷量は、元となった変数と主成分との関係の強さを表し、絶対値が0.3ないし0.4以上あれば、当該主成分に対して貢献していると見てよいだろうとされている(三輪, 2007)。Table 2の主成分負荷量の値を見ると、絶対値が最小の指標変数は農家率(0.466)である。その値は0.4以上あるので、元となった5つの変数は、いずれも量的・質的な労力負担能力の測定に貢献していると判断することができる。

次に、主成分負荷量の符号を見ると、総戸数が正(0.745)、

Table 2 現在(2010年)の労力負担能力の測定結果
Results of measuring the ability to maintain in 2010

	区分	指標変数		値
量的な 労力負担能力	主成分	総戸数		0.745
	負荷量	農家1戸当たり属地田面積		-0.745
	寄与率			55.4%
質的な 労力負担能力	主成分	農家率		0.466
	負荷量	農家の高齢化率		-0.730
	寄与率	寄合回数		0.641
	寄与率			38.7%

農家 1 戸当たり属地田面積が負 (-0.745)，農家率が正 (0.466)，農家の高齢化率が負 (-0.730)，寄合回数が正 (0.641) であった。このことは、2.1.2 節で述べた「総戸数が多いほど、量的な労力負担能力を増やす」、「農家 1 戸当たり属地田面積が大きいほど、量的な労力負担能力を減らす」、「農家率が高いほど、質的な労力負担能力を増やす」、「農家の高齢化率が高いほど、質的な労力負担能力を減らす」、「寄合回数が多くほど、質的な労力負担能力を増やす」という因果関係と、それぞれ整合している。

Table 2 の区分欄のうち寄与率は、元となった変数を持つ全体の情報のうち、当該主成分によって何割が説明されることになるかを意味する値である。また、基準を 60% や 70% 程度としておけば十分実用に供する一方で、社会的なデータのような相関が低くなりがちなデータでは基準を低めにと、データの特性に合わせて調整するのがよいだろう、とされている (三輪, 2007)。このことから、本報で扱うデータは社会的なデータなので、上記の基準よりも低めに見ると、量的な労力負担能力の寄与率 (55.4%) は実用に供するレベルであり、質的な労力負担能力の寄与率 (38.7%) はやや低い、と判断することができる。

3.2 現在の労力負担能力の分析結果

3.2.1 現在の労力負担能力と労力負担行動との関係

Fig.2 は、事例とした 842 集落のうち労力負担行動をしている 802 集落について、縦軸に質的な労力負担能力、横軸に量的な労力負担能力をとった散布図に、3.1 章の測定結果を表示したものである。同様に Fig.3 は、労力負担行動をしていない 40 集落について、測定結果を表示したものである。

ここで、上記の「労力負担行動をしている集落、していない集落」の区分には、2010 年農業集落カードの調査項目「農業用排水路を保全している、していない」を用いた。上記項目の調査に用いられた 2010 年世界農林業センサス農山村地域調査票 (農業集落用) (農林水産省, 2010b) では、農業用排水路は「集落のは場周辺にある農業用の用水路と排水路」と説明されている。また、保全は「農業集落の共有資源として、その保全、維持、向上を図るため、地域住民が主体となって取り組む行為」であって、「自己の農林業生産活動のために、維持管理のみを行っている場合は除く」と説明されている。なお、2010 年世界農林業センサス農山村地域調査の対象となった全国 139,176 集落の中で、「農業用排水路のある農業集落」は 126,132 集落であって、そのうち「保全している集落」は 73.1% に相当する 92,162 集落とされている (農林水産省, 2011b)。

Fig.2 を見ると、各点は右下がりの幅広い楕円状に分布し、量的な労力負担能力が増えると質的な能力が減る傾向、すなわち負の関係があることが見て取れる。この傾向は、Fig.3 において一層顕著に見て取れる。

このように、量的な労力負担能力の「高低」と質的な能力の「高低」との間に負の関係が見られ、また、その関係の強さには、労力負担行動を「している集落、していない

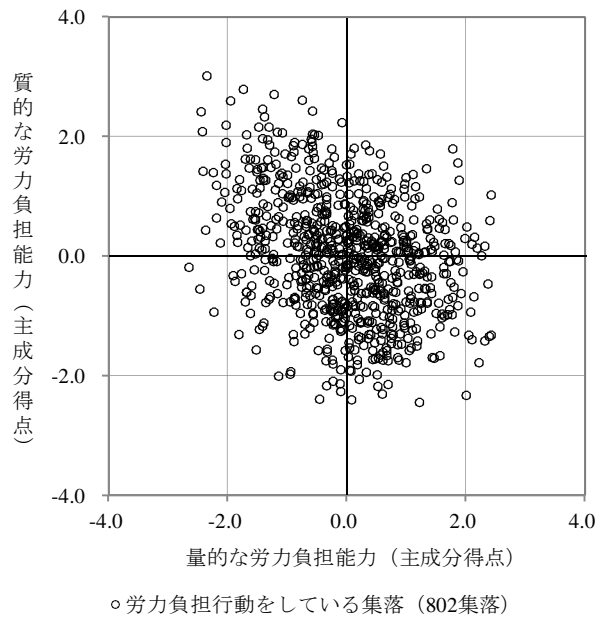


Fig.2 量的・質的な労力負担能力の散布図 (労力負担行動をしている 802 集落。2010 年)
Scatter diagram of the quantitative/qualitative ability to maintain (802 rural communities with maintenance activity, 2010)

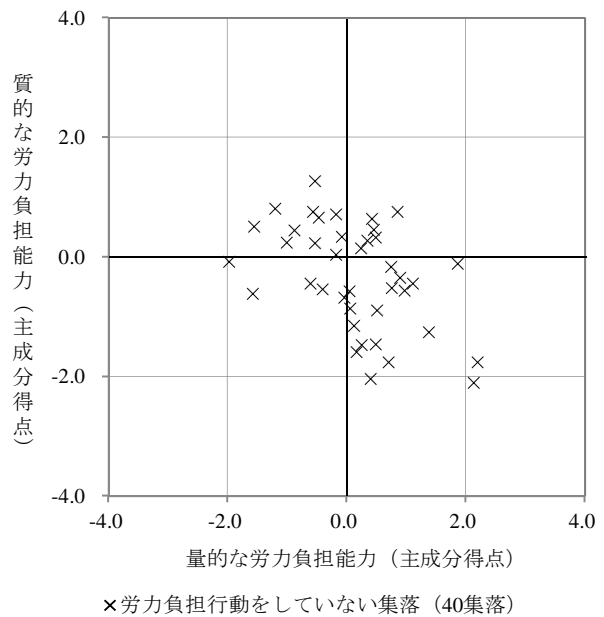


Fig.3 量的・質的な労力負担能力の散布図 (労力負担行動をしていない 40 集落。2010 年)
Scatter diagram of the quantitative/qualitative ability to maintain (40 rural communities without maintenance activity, 2010)

集落」による違いがあるように見られた。

そこで次に、事例集落を、量的な労力負担能力の値が平均値よりも高いか低いかわ、質的な能力の値が平均値よりも高いか低いかわによって、それぞれ量的な能力が「高い、低い」、質的な能力が「高い、低い」というカテゴリーに分けた。ここで、量的・質的な能力の値は主成分得点であって、本報では標準化したデータを用いて算出しているの、その平均値は 0 である。また、量的・質的な能力の値

が平均値と等しい集落は、「高い」カテゴリーに含めた。

そして、説明を容易にするため、以下本報では、量的・質的な労力負担能力のカテゴリーがともに「高い」に含まれる集落のグループを「第 I グループ」、量的な能力が「低い」かつ質的な能力が「高い」に含まれる集落のグループを「第 II グループ」、量的・質的な能力がともに「低い」に含まれる集落のグループを「第 III グループ」、量的な能力が「高い」かつ質的な能力が「低い」に含まれる集落のグループを「第 IV グループ」と呼ぶことにする。なお、数学的に表現すれば、第 I グループとは Fig.2, Fig.3 の第 I 象限に含まれる集落を意味し、他のグループも同様である。

本節では 3 つの変数 (量的な労力負担能力, 質的な能力, 労力負担行動) を取り扱うので, 分析に用いるクロス表は 3 重クロス表とした。3 重クロス表は, 統制変数のカテゴリーごとに, 通常 2 変数からなるクロス表を分割したものである。また, 統制変数は, 変数間の関係の詳細な分析をするために導入する変数であり (水原, 2007), ここでは 3 つの変数のうちいずれか 1 つが統制変数になる。

I 編で述べたように, 労力負担能力は労力負担行動に影響を与えると考えられる要因なので, 本節では, 量的な能力, 質的な能力をそれぞれ統制変数にした場合について分析した。

Table 3 量的な労力負担能力を統制した場合の, 質的な労力負担能力と労力負担行動との関係 (2010 年)

Relationship between the qualitative ability to maintain and the maintenance activities under the controlled quantitative ability to maintain (2010)

		労力負担行動		計
		している集落	していない集落	
量的な 労力 負担 能力	高い	高い	6	181
		(96.7%)	(3.3%)	(100.0%)
		[42.9%]	[25.0%]	[41.9%]
	低い	低い	18	251
		(92.8%)	(7.2%)	(100.0%)
		[57.1%]	[75.0%]	[58.1%]
	計	計	408	432
		(94.4%)	(5.6%)	(100.0%)
		[100.0%]	[100.0%]	[100.0%]
	高い	高い	11	247
(95.5%)		(4.5%)	(100.0%)	
	[59.9%]	[68.8%]	[60.2%]	
低い	低い	5	163	
	(96.9%)	(3.1%)	(100.0%)	
	[40.1%]	[31.2%]	[39.8%]	
計	計	394	410	
	(96.1%)	(3.9%)	(100.0%)	
	[100.0%]	[100.0%]	[100.0%]	
計	計	802	842	
	(95.2%)	(4.8%)	(100.0%)	

注 1) 上表の独立性の検定にかかる検定統計量は次のとおり。
 量的な労力負担能力が高い場合：
 χ^2 値 (自由度 1) =2.981, p 値=0.084 (< 0.10)
 Fisher の直接確率検定の p 値 (両側) =0.092 (< 0.10)
 量的な労力負担能力が低い場合：
 χ^2 値 (自由度 1) =0.503, p 値=0.478
 Fisher の直接確率検定の p 値 (両側) =0.606
 注 2) 上表において, () 内の数字は行パーセントを, [] 内の数字は列パーセントを, それぞれ表す。

分析の結果, Table 3 に示した, 量的な労力負担能力を統制変数にした 3 重クロス表において, 量的な能力が「高い」場合に, 質的な能力と労力負担行動との間に 10% 有意の関係 (χ^2 検定の p 値=0.084) が見られた。

同様に, Table 4 に示した, 質的な労力負担能力を統制変数にした 3 重クロス表において, 質的な能力が「低い」場合に, 量的な能力と労力負担行動との間に 10% 有意の関係 (χ^2 検定の p 値=0.075) が見られた。

なお, 上記のように, 3 つの変数のうち 1 つを統制変数にした場合に, 残り 2 つの変数の関係の仕方が統制変数のカテゴリーによって異なることは, 「交互作用」という用語で知られている (大竹, 2010)。また, 本報のデータは, 悉皆調査に基づくデータであって, いわゆるサンプリングデータではないが, 誤差を考慮して分析するためには統計的検定の手続きが必要になるといわれている (野呂, 2007) ので, 上記の検定を行ったものである。

クロス表による分析の結果, 変数間に有意な関係があると判定されたことから, 次に, 調整済み標準化残差を用いた分析を行った。

調整済み標準化残差は, 平均 0, 標準偏差 1 の正規分布に近似的に従うことが知られている。この性質から, 集落の労力負担行動について議論した既往研究 (例えば藤栄, 2008 ; 松下, 2009) と同じく有意水準を 10% にした場合,

Table 4 質的な労力負担能力を統制した場合の, 量的な労力負担能力と労力負担行動との関係 (2010 年)

Relationship between the quantitative ability to maintain and the maintenance activities under the controlled qualitative ability to maintain (2010)

		労力負担行動		計
		している集落	していない集落	
質的な 労力 負担 能力	高い	高い	6	181
		(96.7%)	(3.3%)	(100.0%)
		[42.6%]	[35.3%]	[42.3%]
	低い	低い	11	247
		(95.5%)	(4.5%)	(100.0%)
		[57.4%]	[64.7%]	[57.7%]
	計	計	411	428
		(96.0%)	(4.0%)	(100.0%)
		[100.0%]	[100.0%]	[100.0%]
	高い	高い	18	251
(92.8%)		(7.2%)	(100.0%)	
	[59.6%]	[78.3%]	[60.6%]	
低い	低い	5	163	
	(96.9%)	(3.1%)	(100.0%)	
	[40.4%]	[21.7%]	[39.4%]	
計	計	391	414	
	(94.4%)	(5.6%)	(100.0%)	
	[100.0%]	[100.0%]	[100.0%]	
計	計	802	842	
	(95.2%)	(4.8%)	(100.0%)	

注 1) 上表の独立性の検定にかかる検定統計量は次のとおり。
 質的な労力負担能力が高い場合：
 χ^2 値 (自由度 1) =0.355, p 値=0.551
 Fisher の直接確率検定の p 値 (両側) =0.624
 質的な労力負担能力が低い場合：
 χ^2 値 (自由度 1) =3.172, p 値=0.075 (< 0.10)
 Fisher の直接確率検定の p 値 (両側) =0.082 (< 0.10)
 注 2) 上表において, () 内の数字は行パーセントを, [] 内の数字は列パーセントを, それぞれ表す。

調整済み標準化残差の絶対値が 1.65 以上のセルは、特徴的な箇所であるとみなしてよく、その値が正のところは他に比べて度数が多いことを示すといわれている（内田，2007）。ここで、上記の 1.65 は、正規分布表より導かれる、10%有意な時の確率変数の値（z 値）である。

Table 5 に、量的な労力負担能力を統制変数にした場合の、質的な能力と労力負担行動との調整済み標準化残差を示した。また、Table 6 に、質的な労力負担能力を統制変数にした場合の、量的な能力と労力負担行動との調整済み標準化残差を示した。

Table 5 を、労力負担行動を「していない集落」に着目して見ると、絶対値が 1.65 以上かつ値が正であるセルは、第IVグループと交差するセル (1.73) であることが分かる。同様に Table 6 を、労力負担行動を「していない集落」に着目して見ると、絶対値が 1.65 以上かつ値が正であるセルは、第IVグループと交差するセル (1.78) であることが分かる。

このことから、第IVグループには、労力負担行動をしていない集落が他のグループに比べて多い、という特徴があるといえる。

3.2.2 労力負担行動をすることができなくなる労力負担能力の限界値

Table 5 質的な労力負担能力と労力負担行動との調整済み標準化残差 (2010年)
Adjusted standardized residual between the qualitative ability to maintain and the maintenance activities (2010)

量的な 労力 負担能力	質的な 労力 負担能力	グループ名	労力負担行動	
			している 集落	していない 集落
			高い	高い
	低い	第IVグループ	-1.73	1.73
低い	高い	第 II グループ	-0.71	0.71
	低い	第 III グループ	0.71	-0.71

Table 6 量的な労力負担能力と労力負担行動との調整済み標準化残差 (2010年)
Adjusted standardized residual between the quantitative ability to maintain and the maintenance activities (2010)

質的な 労力 負担能力	量的な 労力 負担能力	グループ名	労力負担行動	
			している 集落	していない 集落
			高い	高い
	低い	第 II グループ	-0.60	0.60
低い	高い	第IVグループ	-1.78	1.78
	低い	第 III グループ	1.78	-1.78

担能力の限界値

前出の Fig.2, Fig.3 を見ると、量的な労力負担能力の最低値は、労力負担行動をしている集落 (Fig.2) が-2.7 程度、していない集落 (Fig.3) が-2.0 程度である。同様に、質的な能力の最低値は、Fig.2 が-2.4 程度、Fig.3 が-2.1 程度である。このように、労力負担行動をしている集落の方に、量的・質的な労力負担能力ともに、より低い集落のあることが分かる。

このことから、ここまで事例としてきた 842 集落についていえば、値の低いことが主な原因となって労力負担行動をすることができなくなる、労力負担能力の「限界値」は見られない。その原因の 1 つとして考えられることは、事例集落には、外れ値のある集落が含まれていないことである。

そこで本節では、外れ値のある集落も含めて労力負担能力の指標変数を分析し、集落として労力負担行動をすることができなくなる限界値を確認する。

具体的には、はじめに分析対象集落として、2010 年農業集落カードの山形県の全 2,406 集落の中から、2.2.3 節で述べた事例集落の選定条件のうち「外れ値なし」を除く 3 つの条件に合致する、2,108 集落を選定した。その上で、対象集落のうち労力負担行動をしている集落、していない集落それぞれについて、労力負担能力の 5 つの指標変数の最小値・最大値を整理した (Table 7)。なお、上記の 2,108 集落には、これまで事例としてきた 842 集落がすべて含まれる。

Table 7 の指標変数欄のうち「総戸数」を見ると、その最小値は、労力負担行動をしている 2,003 集落、していない 105 集落ともに、5 戸であった。過疎化の進行により維持管理が困難になってきたといわれている（農林水産省，2013a）が、上記のとおり本報では、労力負担行動をしている集落と、していない集落とで、総戸数の最小値は変わらず、労力負担行動をすることができなくなる総戸数の限界値（最小値）を確認することはできなかった。

このことについて、2010 年農業集落カードでは、2.2.3 節で述べたように、一部の集落のデータは公表されていない。そのため、総戸数が 5 戸未満の集落において、限界値が見られるのかもしれない。

Table 7 の「農家 1 戸当たり属地田面積」の最大値を見ると、労力負担行動をしていない集落 (17.5ha) よりも、当該面積が大きい (34.3ha) 集落において労力負担行動をしていることが分かる。本報では、農家 1 戸当たり属地田

Table 7 指標変数の最小値・最大値 (2010年)
Minimum/Maximum value of the indicating variables (2010)

指標変数	最小値		最大値	
	労力負担行動を している 2,003 集落	労力負担行動を していない 105 集落	労力負担行動を している 2,003 集落	労力負担行動を していない 105 集落
	総戸数	5 戸	5 戸	7,233 戸
農家 1 戸当たり属地田面積	0.016ha	0.044ha	34.3ha	17.5ha
農家率	0.3%	0.1%	100%	90.0%
農家の高齢化率	0.0%	0.0%	100%	57.1%
寄合回数	0 回	0 回	99 回	99 回

面積が大きいほど、参加者 1 人が維持管理を担う水路延長は長くなり、労力負担行動をすることが困難になると予測したが、この指標変数についても、労力負担行動をすることができなくなる限界値（最大値）を確認することはできなかった。

このことについて、本報では労力負担行動の区分に、2010 年農業集落カードの調査項目「農業用排水路を保全している、していない」を用いた。この項目の調査に用いられた調査票（農林水産省、2010b）では、保全の内容については触れられていない。そのため、労力負担行動をしている集落のうち、参加者 1 人が維持管理を担う水路延長が相対的に長い集落では、維持管理の内容が簡略化されているのかもしれない。

Table 7 の「農家率」の最小値を見ると、労力負担行動をしている集落が 0.3%、していない集落が 0.1%であり、農家率が 0.3%を下回ると集落として労力負担行動をしなくなる、と解釈することができる。このことは、混住化の進行により維持管理が困難になってきたといわれている（農林水産省、2013a）ことと整合している。しかし、差は 0.2 ポイントにすぎないので、上記の結果をもって、限界値（最小値）を確認することできたとするのは、不適切であろう。

Table 7 の「農家の高齢化率」の最大値を見ると、労力負担行動をしている集落が 100%、していない集落が 57.1%であり、高齢化率がより高い集落でも労力負担行動をしていた。

このことについて、現在わが国には 75 歳以上を対象にした医療保険制度がある（厚生労働省、2012）ことから考えると、健康状態や体力等の面で労力負担行動に支障が出る高齢者とは、75 歳よりも高齢な人達なのかもしれない。

Table 7 の「寄合回数」の最小値を見ると、労力負担行動をしている集落、していない集落とも同じ 0 回であり、労力負担行動をすることができなくなる限界値（最小値）を確認することはできなかった。

このことについて、本報では、寄合を行うことで集落構成員の結束が高まり、これを繰り返すことで集落内の「規範」を形成し、集落の共同行動は容易になると述べた藤栄（2008）に従い、**Table 1** でソーシャル・キャピタルの観測変数とされた寄合回数を用いた。一方、上述した「規範」は、ソーシャル・キャピタルの特徴の一つ（Putnam, 1993）なので、対象集落ではそれ以外の影響が大きかったのかもしれない。

ここで、上記の結果を別の側面から捉えると、対象集落に限って言えば、労力負担能力の指標変数には限界値はないので、能力の低いことが主な原因となって労力負担行動をすることができない集落は存在しない、ということが出来る。すなわち、実際に労力負担行動をしているか否かは別として、本節で分析対象とした 2,108 集落は、集落として労力負担行動をするために必要な労力負担能力を有している、ということができる。

3.2.3 第IVグループには労力負担行動をしていない集

落が他のグループに比べて多い理由

3.2.1 節で述べたとおり、平均値よりも量的な能力が高く質的な能力が低い集落のグループ（第IVグループ）には、労力負担行動をしていない集落が他のグループに比べて多い、という特徴があった。

I 編で述べたように、労力負担能力は労力負担行動に影響を与える要因の 1 つである。そのため第IVグループでは、質的な能力の低いことが、労力負担行動をしていない集落が多いことの理由であるのかもしれない。しかし、同じように質的な能力の低い第IIIグループでは、量的な能力も低い点が第IVグループとは異なるものの、前出の **Table 5** に示したとおり、量的な能力を統制した場合に、質的な能力と労力負担行動との間に有意な関係は見られなかった。したがって、質的な能力が低いことだけでは、労力負担行動をしていない集落が多いことの理由にはならない。

そこで本節では、第IVグループには労力負担行動をしていない集落が他のグループに比べて多い理由を考察する。

鬼丸（2012）は、労力負担行動への影響要因のうち、労力負担能力と労力負担意欲には共通の要因が影響を与えると考えられる、と述べている。

このことから、本報で取り扱った労力負担能力の指標変数の中には、労力負担意欲にも影響を与える要因があって、それが意欲を通じて労力負担行動に影響を与えた結果、労力負担行動をしていない集落が増えたのかもしれない。ここで、本節では特に断らない限り、労力負担意欲という言葉を用いて、鬼丸・佐藤（2011）に準拠して、集落の全住民の労力負担意欲の平均という意味で使う。

労力負担意欲に影響を与える要因に関して、鬼丸（2012）は、意欲には他者に対する信頼感が大きな影響を与えると述べている。また、その理由を、山岸（1990）の考えに基づいて、「他者に対する信頼感が持てる状況では、他者も自分と同様に労力負担行動をとってくれるであろうと考えるので、労力を負担しようと思う気持ち（意欲）は高いが、他者に対する信頼感が持てない状況では、自分だけが労力負担行動をとっても馬鹿を見るのではないかと考えてしまうので意欲は低い」と述べている。

上記の「他者に対する信頼感が持てない状況」に関して、藤栄（2007）は、非農家は農家と比べると労力負担行動をするインセンティブは小さいと述べている。また、藤栄（2008）は、寄合を行うことで集落構成員の結束は高まり、集落の共同活動が容易になると述べている。

このことから、「非農家数が多く、寄合回数が少ない」集落では、労力負担行動をするインセンティブの小さな住民が多く、住民の結束も低いと考えられるので、自分だけが労力負担行動をとっても馬鹿を見るのではないかと考えてしまう住民が多いだろう。住民の多くがそのように考えてしまうので、当該集落では労力負担意欲は低くなると考える。

上記のように考えると、**2.1.2** 節で述べた 5 つの指標変数のうち総戸数が多く、農家率が低く、寄合回数が少ない集落は、上述した「非農家数が多く、寄合回数が少ない」

Table 8 各グループにおける「非農家数が多く、寄合回数が少ない」集落数
Number of rural communities “with more non-farm households and fewer frequency of meetings” in each group

グループ名	集落数	非農家数		寄合回数		非農家数が最多値以上の集落数	寄合回数が最少値以下の集落数
		中央値	左欄のうち最多値	中央値	左欄のうち最少値		
第Iグループ	181集落	21戸		15戸		90集落	9集落
第IIグループ	247集落	9戸		12戸		34集落	41集落
第IIIグループ	163集落	11戸	22戸	7戸	7戸	22集落	89集落
第IVグループ	251集落	22戸		8戸		132集落	124集落

集落なので、労力負担意欲の低い住民が多い集落、すなわち労力負担意欲の低い集落である考える。

3.2.1節で述べた4つのグループにおける「非農家数が多く、寄合回数が少ない」集落数について分析するため、指標変数の中央値等をTable 8に整理した。Table 8の「非農家数が最多値以上の集落数」、「寄合回数が最少値以下の集落数」欄を見ると、第IVグループは132集落、124集落であり、いずれも最多である。

このように、第IVグループには「非農家数が多く、寄合回数が少ない」集落が他のグループに比べて多数含まれている。それらの集落は、上述した「労力負担意欲の低い集落」なので、第IVグループには、意欲の低い集落が他のグループに比べて多数含まれていると考えることができる。

上記の結果から、労力負担行動をすることができなくなる労力負担意欲の限界値は不明であるものの、第IVグループには意欲の低いことが原因となって労力負担行動をしていない集落が少なくとも他のグループよりは多い、といえよう。

I編で述べたとおり、本報では、集落の労力負担能力に応じた支援策を検討することを上位目標としている。上記の結果から考えると、第IVグループの集落への支援策を検討する際には、労力負担意欲を向上させるために働きかける要因の選択方法を示した鬼丸(2012)に基づいて、意欲を向上させる支援策から検討を始めると効果的であろう。

3.3 将来の労力負担能力の測定結果

Table 9に、将来(2020年)の労力負担能力の測定結果を示す。

Table 9の区分欄のうち主成分負荷量を見ると、絶対値が最も小さい指標変数は寄合回数(0.479)である。その値は0.4以上あるので、3.1章で述べた現在の労力負担能力の測定結果と同様、元となった5つの変数は、いずれも量的・質的な能力の測定に貢献していると判断することができる。

また、主成分負荷量の符号も、現在の労力負担能力の測定結果と同様、2.1.2節で述べた因果関係と整合している。

Table 9の区分欄のうち寄与率を見ると、3.1章で述べた現在の労力負担能力の測定結果と同様に、量的な労力負担能力の寄与率(54.1%)は実用に供するレベルであり、質的な労力負担能力の寄与率(35.5%)はやや低い、と判断することができる。

3.4 労力負担能力の継続性の評価結果

Table 9 将来(2020年)の労力負担能力の測定結果
Results of measuring the ability to maintain in 2020

	区分	指標変数		値
		主成分	負荷量	
量的な 労力負担能力	主成分	総戸数		0.735
	負荷量	農家1戸当たり属地面積		-0.735
	寄与率			54.1%
質的な 労力負担能力	主成分	農家率		0.608
	負荷量	農家の高齢化率		-0.682
		寄合回数		0.479
	寄与率			35.5%

3.4.1 労力負担能力の継続性が低い集落

3.2章で述べたとおり、平均値よりも量的な労力負担能力が高く質的な能力が低い集落のグループ(第IVグループ)には、労力負担行動をしていない集落が他のグループに比べて多い、という特徴があった。また、そのような特徴が見られる理由の1つは、第IVグループには、労力負担意欲の低い住民の多い集落が他のグループに比べて多数含まれていると考えられることであった。

今、事例集落のうち現在は労力負担行動をしている集落を、3.3章で測定した「将来の」量的・質的な労力負担能力の平均値を基準にして、3.2.1節と同様に4つのグループに分けたとする。その場合、現在は第I~IIIグループに含まれ、将来は第IVグループに含まれる集落の中には、将来は労力負担行動をしなくなる集落が多いと考える。

なぜなら、上述したように第IVグループには、少なくとも第I~IIIグループよりは、意欲の低いことが原因となって労力負担行動をしなくなる集落が多いといえるので、含まれるグループが第I~IIIグループから第IVグループに変わった集落には、意欲の低いことが原因となって労力負担行動をしなくなる集落が多いと考えられるからである。

このように、現在は第I~IIIグループに含まれ、将来は第IVグループに含まれる集落は、労力負担能力が継続しない(現在と将来とで含まれるグループが変わる)ことと、労力負担行動をしなくなることとが関係していると考えられる集落である。そこで本報では、それらの集落を、労力負担能力の継続性が低い集落であると判定することにする。

Table 10は、上記の考え方に基づいて、現在は集落として労力負担行動をしている802集落を対象に、現在(2010年)の労力負担能力で含まれるグループと、将来(2020年)の能力で含まれるグループとの関係をクロス表に整理したものである。

Table 10に基づいて労力負担能力の継続性を評価すると、継続性が低いと判定されるのは、第Iグループから第

Table 10 現在の労力負担能力と将来 (2020 年) の労力負担能力との関係 (集落として労力負担行動をしている 802 集落)

Relationship between the present ability to maintain and the predicted ability in 2020 (802 rural communities with maintenance activity)

		将来 (2020 年) の労力負担能力				計
		第 I グループ	第 II グループ	第 III グループ	第 IV グループ	
現在 (2010 年) の 労力負 担能力	第 I グループ	117	13	2	43	175
	第 II グループ	10	199	25	2	236
	第 III グループ	2	25	115	16	158
	第 IV グループ	24	3	27	179	233
計		153	240	169	240	802

IVグループに変わる 43 集落, 第IIグループから第IVグループに変わる 2 集落, 第IIIグループから第IVグループに変わる 16 集落の, 計 61 集落である。

3.4.2 本報で示した方法の利点

本報では労力負担能力の継続性を評価するために,

2.1.2 節で示した 5 つの指標変数を用いた。

一般に, 5 つの変数の関係を知るためには, 10 通りの組み合わせ (${}_5C_2$) を調べなければならない。また, 本報で用いた指標変数は, その単位が戸や ha 等異なることから, 単純には比較することができない組み合わせも存在する。

これに対して本報で示した方法は, 5 つの指標変数を集約した 2 つの変数 (量的な労力負担能力, 質的な労力負担能力) の関係を調べるだけなので, 5 つの変数を扱う場合と比べて, 情報の読み取りが容易である。また, 2 つの変数のデータは標準化されているので, 元の変数の単位に関わらず比較することができる。さらに, 変数が 2 つなので, 1 枚の散布図を使って変数間の関係を視覚的に把握することができる。そして, 最終的に継続性の評価に用いたクロス表は, 見やすい, 説得力が高いといった特徴があるといわれており (大竹, 2010), 基礎的な数学の知識があれば表を読み取って継続性の有無を判断することができる。

これらは, 本報で示した方法の利点であるといえよう。

IV 結 言

本報では, 水田用の用排水路の維持管理における集落の労力負担能力の継続性について, その評価を 2010 年農業集落カードの山形県のデータを多変量解析することにより試みた。

具体的には, はじめに現在の量的な労力負担能力を, 総戸数, 農家 1 戸当たり属地田面積の 2010 年現在のデータを主成分分析することによって, また現在の質的な労力負担能力を, 農家率, 農家の高齢化率, 寄合回数の 2010 年現在のデータを主成分分析することによって, それぞれ測定した。次に, 現在の労力負担能力の測定結果を基に, 現在の労力負担行動との関係に着目して労力負担能力を分析した。そして, 指標変数の将来のデータ (趨勢に基づ

く 2020 年算出値) を主成分分析することによって, 将来の量的・質的な労力負担能力の値を測定し, それを現在の能力の分析結果と比較することによって, 労力負担能力の継続性を評価した。

その結果, 次のことが明らかになった。

- ①現在の量的・質的な労力負担能力の平均値を基準にして事例集落を 4 つのグループに分けると, 平均値よりも量的な能力が高く質的な能力が低いグループ (第IVグループ) には, 労力負担行動をしていない集落が他のグループに比べて多いという特徴がある。
- ②①の特徴が見られる理由の 1 つは, 当該グループには, 労力負担意欲の低い集落が多数含まれていると考えられることである。
- ③事例集落では, 労力負担行動をすることができなくなる労力負担能力の限界値は見られない。
- ④現在は第 I ~ III グループに含まれ, 将来は第IVグループに含まれる集落は, 労力負担能力が継続しない (現在と将来とで含まれるグループが変わる) ことと, 労力負担行動をしなくなることとが関係していると考えられる集落なので, 労力負担能力の継続性が低い集落であると判定することができる。
- ⑤現在は労力負担行動をしている 802 集落のうち, 労力負担能力の継続性が低いと判定されるのは, 61 集落である。

本報は, 農村工学研究所技報として, 中間的な研究成果で速報的な内容を取りまとめたものである。グループ分けの基準は平均値でよいのか等, 今後検討すべき課題は複数あるが, 労力負担能力の継続性を評価する試みとして, 本報の内容を報告したい。

参考文献

- 合崎英男・土屋慶年・近藤 巧・長南史男 (2006) : 非農家世帯員の協力による農業用水路の維持管理の条件—宮城県亘理町を事例として—, 農業経営研究, 44(2), 1-11
- 青柳みどり・有田博之・石田憲治・國光洋二・小泉 健・友正達美・吉村亜希子 (2003) : 経済・社会・一般, “農業土木学会編, 改訂五版農業土木標準用語事典”, 農業土木学会, p.1
- 藤栄 剛 (2006) : 農村共有資源の管理メカニズム—農業集落による農業用排水路管理を一例として—, 農業経営研究, 44(1), 158-163
- (2007) : 農村共有資源管理のための共同行動: 滋賀県の農業集落を対象として, 滋賀大学環境総合研究センター研究年報, 4(1), 73-82
- (2008) : 農村共有資源管理のための共同行動—農業集落の規模と社会的異質性に着目して—, 日本農業経済学会論文集, 2008, 77-84
- 橋詰 登 (2004) : 中山間地域における農業集落の存続要件に関する分析, 農林水産政策研究, 7(2004), 1-24
- 本田恭子 (2011) : 農業用排水路の維持管理に対する非農家の参加条件—農業用水および用排水路の管理形態に着目して—, 農村計画学会誌, 30(1), 74-82

- 厚生労働省 (2012) (参照 2013.6.3) : 平成 24 年版厚生労働白書 — 社会保障を考える —, (オンライン), 入手先<<http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/12/dl/1-03.pdf>>
- 松下京平 (2008) : ソーシャル・キャピタルが環境ガバナンスに及ぼす影響およびその醸成メカニズム—構造方程式モデリングによる分析, 環境情報科学論文集, 22, 321-326
- (2009) : 農地・水・環境保全向上対策とソーシャル・キャピタル, 農業経済研究, 80(4), 185-196
- 三輪 哲 (2007) : 変数の合成と主成分分析, “村瀬洋一・高田 洋・廣瀬毅士編, SPSS による多変量解析”, オーム社, 223-248.
- 水原俊博 (2007) : クロス集計, 独立性の検定, “村瀬洋一・高田 洋・廣瀬毅士編, SPSS による多変量解析”, オーム社, 71-94.
- 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
- 中井検裕・松原 望 (1991) : 2 次元のデータ, “東京大学教養学部統計学教室編, 統計学入門”, 東京大学出版会, p.43, 45, 46
- 農林水産省 (2010a) (参照 2013.6.3) : 2010 年世界農林業センサス用語の解説, (オンライン), 入手先<<http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/yougo.html>>
- (2010b) : 2010 年世界農林業センサス農山村地域調査票 (農業集落用), 農林水産省, p.4
- (2011a) (参照 2013.6.3) : 農林水産関係市町村別統計平成 22 年 耕地面積 山形県, (オンライン), 入手先<<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001070130>>
- (2011b) (参照 2013.11.29) : 2010 年世界農林業センサス結果の概要 (確定値) 統計表 7 地域資源の保全 (5) 農業用排水路, (オンライン), 入手先<<http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/gaiyou.html>>
- (2012a) : 農地・水保全管理支払交付金 平成 19~23 年度の実績と効果, 農林水産省, 1-13
- (2012b) : 平成 23 年度 農地・水保全管理支払交付金の取組状況, 農林水産省, 9-10
- (2012c) (参照 2013.6.3) : 平成 23 年度食料・農業・農村白書, (オンライン), 入手先<http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h23/pdf/z_1_3_5.pdf>
- (2012d) (参照 2013.6.3) : 2010 年世界農林業センサス第 1 巻都道府県別統計書 06 山形県 V 販売農家 14 土地 (1) 経営耕地の状況, (オンライン), 入手先<<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001036094&cycocode=0>>
- (2013a) : 農地・水保全管理支払交付金実施要綱, 農林水産省, 1-25
- (2013b) : 農地・水保全管理支払交付金交付要綱, 農林水産省, 1-6
- 農林統計協会 (2012) : 2010 年世界農林業センサス農業集落カード利用ガイド, 農林統計協会, p.1, 26
- 野呂芳明 (2007) : データ分析の基礎知識, “森岡清志編著, ガイドブック社会調査 第 2 版”, 日本評論社, p.217.
- 岡本雅美 (2003) : 現代日本の農業水利組織と地域住民, 農村計画学会誌, 22(3), 183-187
- 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
- ・佐藤政良 (2011) : 参加型水管理における農民の維持管理労力負担意欲への影響要因の分析—タイ国ココティアム維持管理事業支線用水路 18R 地区を事例として—, 農業農村工学会論文集, 275, 1-11
- 小塩真司 (2007) : 実践形式で学ぶ SPSS と Amos による心理・調査データ解析, 東京図書, p.8
- 大竹延幸 (2010) : 単純集計とクロス集計, “島崎哲彦編著, 第八版 社会調査の実際—統計調査の方法とデータの分析—”, 学文社, 212-213
- Putnam, R.D. (1993) : *Making Democracy Work: Civic Traditions in Modern Italy*, Princeton University Press (河田潤一訳 (2001) : 哲学する民主主義—伝統と改革の市民的構造, NTT 出版, 206-207) .
- 島崎哲彦 (2010) : 第八版 社会調査の実際—統計調査の方法とデータの分析—, 学文社, p.9
- 田窪正則 (2009) : SPSS で学ぶ調査系データ解析, 東京図書, p.61.
- 豊田秀樹 (1992) : SAS による共分散構造分析, 東京大学出版会, 1-2, p.119, 153-156
- (1998) : 共分散構造分析 (入門編) —構造方程式モデリング—, 朝倉書店, p.150
- 内田 治 (2007) : すぐわかる SPSS によるアンケートの調査・集計・解析 [第 3 版], 東京図書, 140-142, p.159
- 山岸俊男 (1990) : 社会的ジレンマのしくみ—「自分 1 人ぐらいの心理」の招くもの—, サイエンス社, 176-177
- 山本忠男・長澤徹明 (2010) : 農業水利施設の維持管理作業における住民参加の可能性—コンジョイント分析による作業プランの検討—, 農村計画学会誌論文特集号, 29, 275-280
- 横川和章 (1995) : 構成概念, “小川一夫監修, 改訂新版 社会心理学用語辞典”, 北大路書房, p.86

Evaluation of the Continuity of Residents' Ability to Maintain Irrigation/Drainage Canals in Rural Communities

— Evaluation with data from Yamagata Prefecture on rural community cards based on the 2010 World Census of Agriculture and Forestry —

ONIMARU Tatsuji*

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

Summary

This study evaluated whether a rural community can continue to maintain irrigation/drainage canals for paddy fields with data from 842 rural communities in Yamagata Prefecture. Results showed: (1) “quantitative ability to maintain” can be measured with data from the total households and area of paddy fields per farm household, and “qualitative ability to maintain” can be measured with data from the farm household rate, elderly farmers’ rate and frequency of meetings; (2) when the above 842 rural communities are divided into 4 groups, group IV, which consists of rural communities with above average quantitative ability and below average qualitative ability to maintain, shows a rate of rural communities without maintenance activities larger than other groups; and (3) whether a rural community, expected to move from other groups to group IV in the future, can be evaluated as a rural community with low continuity of resident’s ability to maintain irrigation/drainage canals.

Key words: Irrigation/Drainage canal, Maintenance, Rural community, Ability to maintain, Evaluation of continuity, Rural community card

メタン発酵槽内に蓄積する物質の成分的特徴

中村真人* 山岡賢* 相原秀基** 柚山義人* 折立文子*

*資源循環工学研究領域資源循環システム担当

**株式会社 和郷

キーワード：メタン発酵，堆積物，MAP，硫黄，乳牛ふん尿，維持管理，砂

I 緒言

メタン発酵とは、嫌気条件下においてメタン発酵微生物の代謝作用により、家畜排せつ物や食品廃棄物等の有機物から再生可能エネルギーであるメタン (CH_4) を回収する技術である (李, 2005)。このメタン発酵技術は、家畜排せつ物や食品廃棄物などのように、燃焼によるエネルギー回収が困難な、水分の多いバイオマスも原料として利用できるなど、適用範囲が広い。また、肥料成分を多く含むメタン発酵消化液 (メタンを取り出した後の液体) を液肥として利用することにより、肥料資源の有効利用および資源循環等を通じ地域資源の有効活用を実現できる。このように、メタン発酵には様々な利点があるため、メタン発酵は農林水産省がとりまとめたバイオマス事業化戦略 (農林水産省, 2012) では、重点的に活用する実用化技術の一つとして位置づけられている。

メタン発酵の利点をより活かすためには、施設を長期間安定的に運転し、維持管理に要するコストを低減することが重要である。メタン発酵プラントの維持管理につ

いては、中川 (2007)、独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005)、中村ら (2010) の報告がある。運転管理技術を向上させるためには、さらに運転データの事例を積み上げることが望ましい。

メタン発酵プラントを長期的に運転した時、発酵槽に原料由来の無機物を主成分とする堆積物が蓄積する場合がある (中村・中山, 2007; 石田, 2009)。また、メタン発酵プラントと類似の施設である、家畜排せつ物の汚水処理施設や下水処理施設では、リン酸マグネシウムアンモニウム (以下、「MAP」, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) やヒドロキシアパタイト (以下、「HAP」, $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$) などの析出が報告されている (鈴木, 2010)。

本報告では、運転開始後7年6ヶ月が経過した、メタン発酵プラントの発酵槽内に蓄積する成分の分布とその成分を調査し、得られた結果をもとに、メタン発酵プラントの設計や維持管理に関する留意点をとりまとめた。

II 調査対象のメタン発酵プラント

対象としたメタン発酵プラントは、約7年半継続的に

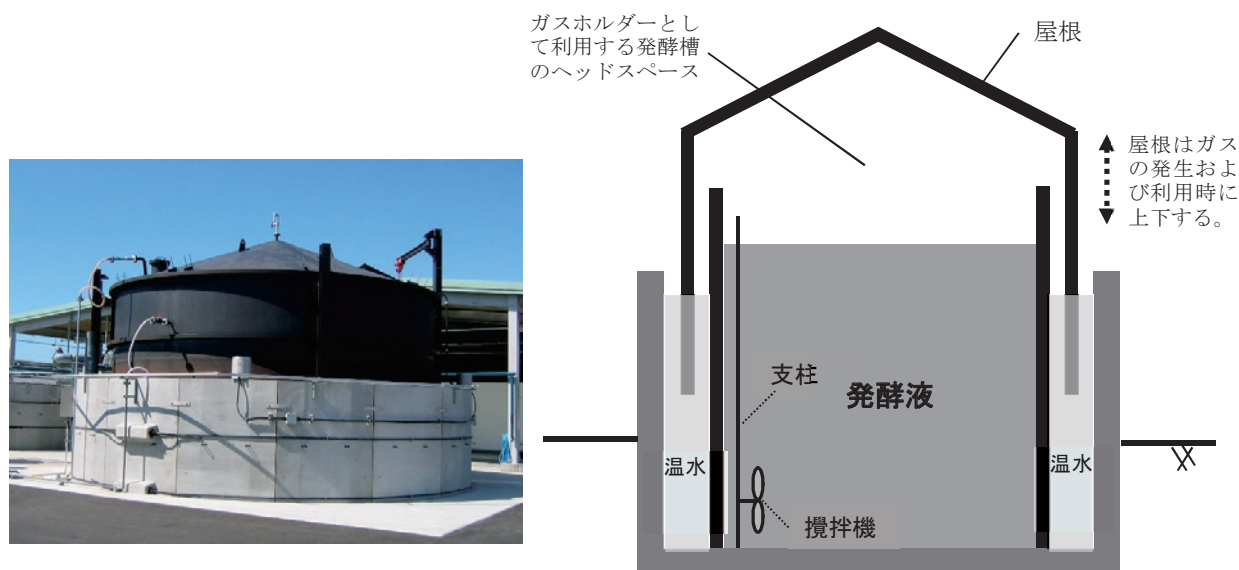


Fig. 1 メタン発酵槽の写真と断面図

Photos and cross-sectional diagram of a digester tank

運転している山田バイオマスプラント (中村ら, 2010) である。発酵槽の写真および断面図を Fig. 1 に示す。発酵槽は円筒形で、その容積は 135m^3 である。発酵槽でバイオガスが発生すると、発酵槽の屋根がせり上がり、ヘッドスペースにガスが貯留できる構造となっている。また、発酵槽内には、槽内の液を均一に混合するための攪拌機 (攪拌羽根がついており、水平方向に水流を起こす) が底面に設置されている (Fig. 1)。

原料は一旦、受入ピットに一時的に貯蔵された後、固液分離 (篩のサイズは 3mm) されて、液分だけが発酵槽に投入される設計である。

山田バイオマスプラントの原料は、乳牛ふん尿、牛ふん脱離液 (乳牛ふん尿を畜産農家で固液分離した液分)、野菜残渣 (野菜の加工工場等から排出される加工くずおよび規格外品をしぼった液) の 3 種類で、投入量は約 5t / 日である。運転開始から 4 年程度は主に乳牛ふん尿および牛ふん脱離液を原料としていたが、徐々に野菜残渣の割合が高まり、2012 年 3 月以降は野菜残渣のみを原料としている。運転開始から本調査時 (2013 年 1 月) までの累積の原料投入量は、乳牛ふん尿、牛ふん脱離液および野菜残渣で、それぞれ、 5700t 、 2800t 、 4500t であった。

III 調査方法

3.1 作業手順

発酵槽内の蓄積物の調査の準備として、まず、発酵槽の屋根をクレーンで吊り上げて取り外し、発酵槽内の液の排出を行った。発酵槽の液を空にした状況で、発酵槽内の蓄積物の分布状況の把握や蓄積物のサンプリングを行った。そして、蓄積物のうち、発酵槽底部に堆積していたものをバキューム車で吸引することにより除去し、攪拌機の交換を行った。最後に、再び屋根をクレーンで元に戻し、一連の作業が終了した。一連の作業手順を Fig. 2 の写真に示す。

本報では詳細を述べないが、屋根の取り外し前にヘッドスペースガスを窒素ガスで置換する、発酵槽内での作業では酸素マスクを着用するなど、安全性を確保しながら作業を行った。

3.2 蓄積物の成分分析方法

採取した蓄積物について、含水率、リン (P)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg) については肥料分析法 (農林水産省農業環境技術研究所, 1992)、炭素 (C)、窒素 (N) については土壤環境分析法 (土壤環境分析法編集委員会, 1997)、強熱減量、硫黄 (S) については下水試験方法 (社団法人日本下水道協会, 1997) に準じて測定した。ケイ素 (Si) については、肥料分析法 (塩酸で抽出し定量) で分析を行ったところ、不溶性成分が残った。そのため、ケイ素全量を定量する方法として、マイクロウェーブで全分解し、ICP 発光分光法で

定量する方法でも分析した。また、各蓄積物中の硫酸イオン (SO_4^{2-}) 含有量は、各蓄積物 5g を 50mL のイオン交換水で抽出し、上澄み液をイオンクロマトグラフで分析し、定量した。

IV 結果および考察

4.1 蓄積物の種類

発酵槽内で確認された蓄積物として、主に、発酵槽の底部に堆積したもの (以下、「底部堆積物」)、発酵槽の液面上部の壁面に付着したもの (以下、「壁面付着物」)、攪拌機およびその支柱等に付着した白色の結晶物 (以下、「白色結晶」) の 3 種類が確認された。蓄積物の堆積状況とその拡大写真を Fig. 3 に、成分分析結果を Table 1 に示す。

4.2 発酵槽内の蓄積物の成分とその特徴

4.2.1 底部堆積物

底部堆積物は発酵槽に均一に堆積せず、攪拌機が設置されている側に薄く、他方が厚く堆積していた。攪拌機が引き起こす水流により吹き溜まったためであると考えられる。

底部堆積物には、畜舎の敷料として利用されているおがくずと思われる木片等が少量含まれていた。しかし、強熱減量は 20% 程度であり、有機物の含有量は少なく、大部分は無機物であった。また、底部堆積物に多くのケイ素が含有し、そのうち、塩酸可溶性成分の割合が低かったことから、底部堆積物に含まれるケイ素の大部分は一次鉱物由来のケイ素 (砂、土壌など) であることが示唆された。山田バイオマスプラントの原料のうち、食品加工残渣には砂がほとんど含まれていない。そのため、乳牛ふん尿に含まれる砂が蓄積したものと考えられる。また、リン、マグネシウム、カルシウム、窒素などが含まれていることから、MAP や HAP も一定の割合で含まれることが示唆された。

底部堆積物の量は約 20m^3 (約 27t) であり、原料 1t あたりの堆積量は 2.1kg であった。原料 (主に乳牛ふん尿) の日投入量が 36.5t (独立行政法人北海道開発土木研究所, 2005 の 18 ページから推定) のメタン発酵プラントにおいて、運転開始 8 年経過後の堆積量が 120m^3 (堆積物の容積重が山田バイオマスプラントの堆積物と同じであると仮定すると、原料 1t あたりの堆積量 1.5kg) であったと報告している石田 (2009) の報告よりもやや多かった。この 2 つの事例から、原料のうち、発酵槽の底部に堆積する割合は、0.1 から 0.2% 程度であると試算された。

山田バイオマスプラントでは、7 年半の間に堆積物量の発酵槽容積の $1/7$ に達していた。発酵槽の有効容積を確保するためには、堆積物の定期的な除去が必要である。また、底部堆積物は、石田 (2009) の報告と同様に固結



発酵槽の屋根の取り外し作業（左：クレーンによる吊り上げ，右：取り外し後の発酵槽）



発酵槽内の液の排出による水位の変動の様子（左および中：作業途中の発酵槽の様子，右：排出終了後の様子）



発酵槽の底部堆積物を吸引し、除去している様子（左：吸引車，中：堆積物の吸引作業，右：作業後の様子）



攪拌機の取り外し作業（左：攪拌機の設置位置，中：攪拌機の取り外し作業，右：取り外した攪拌機）

Fig. 2 堆積物調査のための一連の作業

Takes for the investigation of materials accumulated in a digester tank

していなかったため、バキューム車による吸引で除去することが可能であった。仮に発酵槽の底部に堆積物を引き抜くための排出口を設置しておけば、今回の調査のよ

うな発酵槽の開放を行うことなく、堆積物の除去が可能であることが示唆された。ただし、発酵槽への砂の混入は完全には避けられないため、攪拌機により吹き寄せら

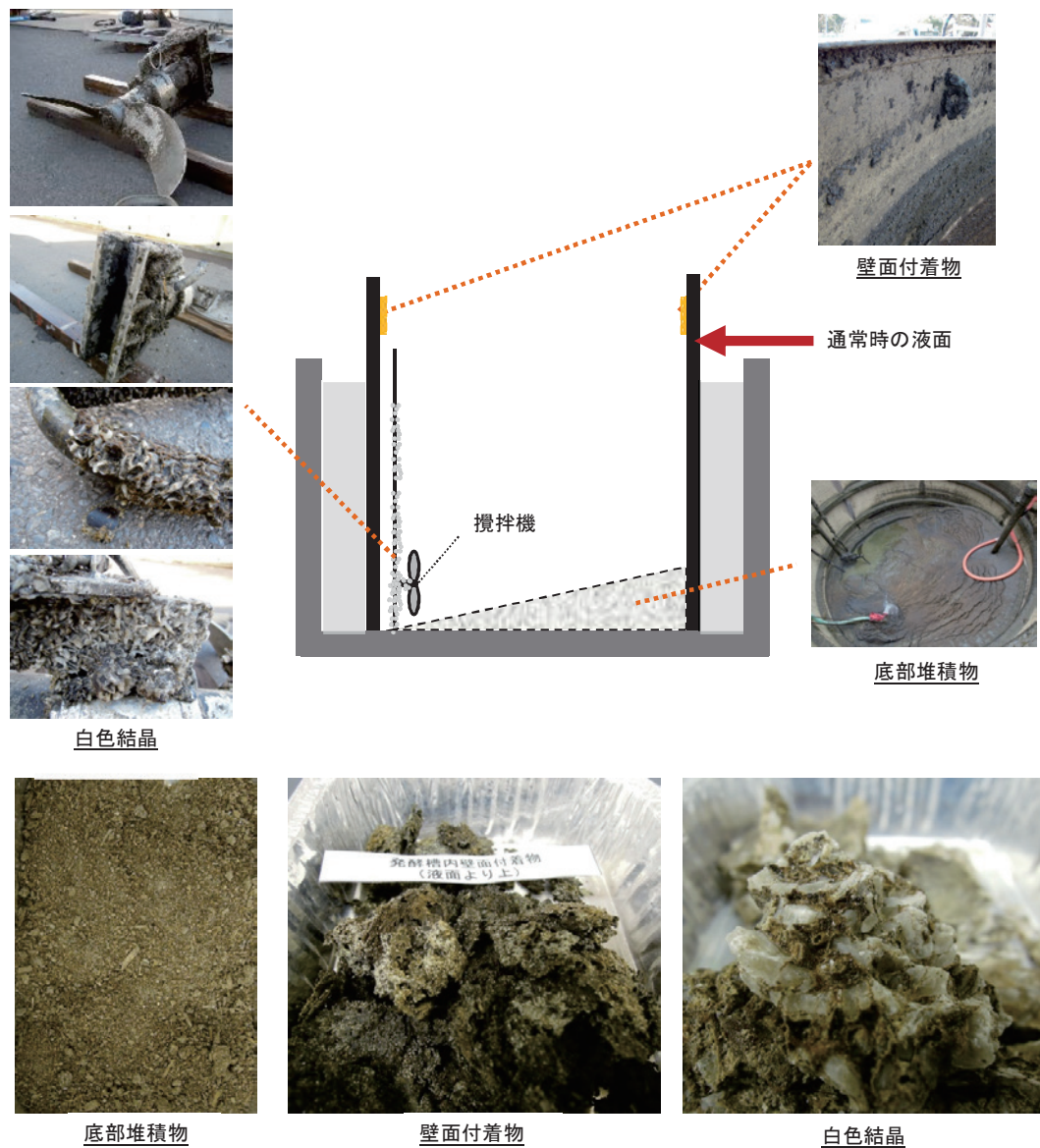


Fig. 3 発酵槽内の蓄積物の分布とその拡大写真

Photos and distribution of accumulated materials in a digester tank

れる部分への機器の設置は避けるとともに、堆積物を排出できる設計とすることが望ましい。

4.2.2 壁面附着物

壁面附着物は、発酵槽の通常運転時の液面より上の壁面（液面から 0cm～約 50cm の間）に膜状（厚さ 2～3mm）に蓄積していた。色はこげ茶色で、主に発酵液の飛沫が乾燥したものと考えられ、その量は少なかった。また、壁面附着物には微小な黄色の結晶が見られた。壁面附着物の硫黄の含有率が高かったことから、黄色の結晶は硫黄を主成分とする化合物であることが示唆された。

小林ら（2009）は、生物脱硫（発酵槽のヘッドスペースに微量の空気を吹き込むことにより硫黄酸化細菌の働きを利用してバイオガス中の硫化水素を除去する方法）を行っているメタン発酵槽のヘッドスペースにおいて、フィラメント状の硫黄が S^0 として多量に蓄積すること

を報告している。一方、バイオガス中には、もともと 1～2%程度の微量の酸素が存在する（小林ら、2009）ため、積極的に生物脱硫を行っていない山田バイオマスプラントのようなメタン発酵プラントでも硫黄酸化細菌による少量の硫黄の蓄積が生じたと考えても矛盾がない。ただし、山田バイオマスプラントでの析出量は少量であるので、バイオガスの脱硫効果としては無視できるほど小さいと考えられる。

また、硫黄の酸化がさらに進み、腐食性の硫酸が生成することは運転管理の観点から望ましくないが、小林ら（2009）の報告と同様に、壁面附着物の硫酸イオン含有量は極めて少なかった。

以上より、壁面附着物は量も少なく、問題のある成分も確認できなかったため、壁面附着物に対応するための特別な維持管理作業は必要ないと考えられる。

Table 1 発酵槽蓄積物の量と成分
Amounts and compositions of materials accumulated in a digester tank

	単位	底部堆積物	壁面付着物	白色結晶
量	m ³	約 20	少量	少量
含水率	%	54.9	36.7	39.2
強熱減量	%	22.5	73.5	17.3
N	dry-%	1.83	2.5	4.13
C	dry-%	9.6	41.6	1.5
P	dry-%	4.84	1.26	16.2
K	dry-%	0.383	0.02	0.277
Ca	dry-%	5.66	5.97	10.5
Mg	dry-%	3.26	0.76	10.3
S	dry-%	0.38	7.58	0.12
塩酸可溶性 Si ^{**}	dry-%	0.659	0.256	0.008
全 Si ^{**}	dry-%	14.9	2.20	1.94
SO ₄ ²⁻	dry-%	0.04	0.01	0.003

※肥料成分法で分析した、塩酸に可溶性 Si の含有量。砂に含まれる Si などは含まない。
 ※※含まれるすべての形態の Si の含有量。

Table 2 発酵槽内の液の成分
Composition of the liquid in a digester tank

	単位	乳牛ふん尿 が主原料の 時期の成分	野菜残渣が主 原料である時 期の成分
pH		7.7	7.5
EC	S/m	2.0	1.4
T-N	mg/L	3400	1800
NH ₄ -N	mg/L	1800	800
T-P	mg/L	530	400
T-K	mg/L	3200	2600
T-Ca	mg/L	1600	-
T-Mg	mg/L	660	-

4.2.3 白色結晶

白色結晶は固い結晶で、攪拌機および攪拌機を固定するための支柱などに3~8mm程度の厚みで付着していた(Fig. 3の写真)。羽根などの可動部への析出量は比較的少なく、攪拌機の可動部以外部位への付着が多い傾向があった。また、白色結晶が分布していたのは攪拌機周辺のみで発酵槽の壁面への付着は確認できなかったため、量としては少量であった。白色結晶は固結しており、発酵槽内に設置していた攪拌機等の装置の取り外し作業は、結晶を削りとりなければ実施できない状態であった。

ふん尿処理施設において、結晶化する成分としては、MAPやHAPなどがある。化学式から得られるP:Mgの重量比は、MAPの場合で1:0.78、HAPの場合でP:Caの割合は1:2.2である。白色結晶に含まれるMgとCaの全量がMAPまたはHAPであったと仮定すると、マグネシウムとカルシウムの含有量と分子構成比から、MAP態リンの含有率は13.1%、HAP態リンの含有率は4.9%となる。これらを合計したPの含有率は18.0%となる。この値は白色結晶のPの含有率16.2%と同程度であった。また、風乾した白色結晶を105℃に加熱した場合に減量

したことから、白色結晶は水和物であることが示唆された。一方、MAPやHAPの生成は弱アルカリ領域(7.5超)で起こりやすい(鈴木, 2010)。Table 2に時期別の発酵槽内の液の成分を示す。発酵槽内の液のpHは、両時期とも7.5以上であり、MAPやHAPが生成する条件を満たしていた。

以上のことから、白色結晶はMAPとHAPを主成分とすることが推察された。特に、白色結晶は水和物を含んでいることから、MAPの割合が高いことが強く示唆された。また、乳牛ふん尿を主原料とする時期の方が野菜残渣を主原料とする時期に比べてpHがやや高く、アンモニア態窒素やECの値も高かったことから、MAP等は主に乳牛ふん尿が主原料の時期に生成されたと推察された。

Parsons and Doyle (2004)は脱炭酸が起こりやすい箇所、局所的にpHが上昇し、MAPが生じやすいと報告している。吉田ら(2012)は、下水汚泥の送泥ネットワークの攪拌機を含む脱炭酸が生じる箇所、pH上昇によるMAPが生成していたと報告している。また、材質の違いがMAP付着性に与える影響を調査し、ステンレスの面の方が、エポキシ樹脂で塗装された面に比べてMAPが生成しやすいことを指摘している。白色結晶がMAPであると仮定すると、攪拌機周辺のみで析出し、発酵槽の壁面には析出されなかった原因は、攪拌機の周辺で脱炭酸により局所的にpHが上昇した可能性、ステンレス製の攪拌機の方が塗装されている発酵槽の壁面よりも析出されやすかった可能性が考えられた。

このように、メタン発酵槽内ではMAP等が結晶化するおそれがあり、多量の結晶の付着は、攪拌機等の発酵槽内に設置した機器の機能低下や機器同士または機器と発酵槽の底面・壁面との固着などが起こる懸念がある。結晶の析出を制御することは難しいため、発酵槽の設計に際しては、発酵槽内に白色結晶のようなものが析出し、

発酵槽内の機器が周囲と固着することにより生じる問題（発酵槽内の機器の交換作業等に支障が出るなど）について考慮する必要がある。

V 結 言

本報告では、運転開始から7年半経過したメタン発酵プラントについて、発酵槽内の調査を行い、発酵槽内に蓄積する堆積物や結晶物について、それらの量、分布および成分を把握した。発酵槽の底部には、攪拌機により吹き寄せられる部分を中心に砂を主成分とする 20m³ にのぼる多量の堆積物が見られた。発酵槽への砂の混入は完全には避けられないため、攪拌機により吹き寄せられる部分への機器の設置は避けるとともに、堆積物を排出できる設計とすることが望ましい。また、発酵槽内に設置された攪拌機の周辺には、MAP 等の結晶が確認された。多量の結晶の付着は、攪拌機等の発酵槽内に設置した機器の機能低下や機器同士または機器と発酵槽の底面・壁面との固着などが起こる懸念がある。結晶の析出を制御することは難しいため、発酵槽の設計に際しては、結晶により発酵槽内の機器が周囲と固着することにより生じる問題（発酵槽内の機器の交換作業等に支障が出るなど）について考慮する必要がある。

本報告で得られた知見をメタン発酵槽の設計に活かすことにより、メタン発酵プラントの安定的な運転につながり、結果として維持管理コストの低減が可能となる。

謝辞：株式会社和郷の故阿部邦夫氏には、本調査に対して全面的な協力を賜った。また、寒地土木研究所の大深正徳氏には、メタン発酵プラントにおける蓄積物に関する情報提供をいただいた。土木研究所の日高平氏には、MAP の生成に関して情報提供をいただくとともに、とりまとめるにあたりご意見をいただいた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

土壤環境分析法編集委員会 (1997) : 土壤環境分析法

- 独立行政法人北海道開発土木研究所 (2005) : 積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書, 334-475
- 石田哲也 (2009) : 別海バイオガスプラントでの発酵槽を開放したの堆砂除去と点検, 日本畜産環境学会会誌, 8(1), 22
- 小林拓朗・李玉友・久保田健吾・原田秀樹・前田武己・河合和保・吉田尊彦 (2009) : 硫酸酸化細菌を利用したメタン発酵槽の微好気環境下におけるバイオガス脱硫, 土木学会論文集 (G), 65(2), 104-113
- 李玉友 (2005) : バイオマス利活用 (その3) -メタン発酵技術一, 農業土木学会誌, 73(8), 77-82
- 中川悦光 (2007) : 南丹市八木バイオエコロジーセンターの資源循環 -メタン施設が8年を経過したことに伴う2005年度設備改修を顧みて-, 共同利用型バイオガスプラントの課題と展望に関するシンポジウム資料, 独立行政法人土木研究所, 1-13
- 中村和正・中山博敬 (2007) : バイオガスシステム内部における砂の堆積, 寒地土木研究所月報, 649
- 中村真人・柚山義人・山岡賢・折立文子・清水夏樹・阿部邦夫・相原秀基・藤川智紀 (2010) : メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析—山田バイオマスプラントを事例として—, 農工研技報, 210, 11-36
- 農林水産省 (2012) : バイオマス事業化戦略
<http://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/bioi/120906.html> (2013年10月22日確認)
- 農林水産省農業環境技術研究所 (1992) : 肥料成分法 (1992年版)
- Parsons, S.A. and Doyle, J.D. (2004) : Struvite scale formation and control, *Water Science and Technology*, 49(2), 177-182
- 鈴木一好 (2010) : 家畜ふん尿の新処理・利用技術と課題 : 4. 豚舎汚水中リンの MAP 結晶化法による除去回収および利用技術, 日本土壤肥科学雑誌, 81(6), 609-613
- 社団法人日本下水道協会 (1997) : 下水試験方法上巻-1997版-
 吉田彩子・伊賀益司・鶴田航子 (2012) : 送泥ネットワーク中の MAP スケールに関する調査, 第49回下水道研究発表会講演集材質による違い, 1009-1011

受理年月日 平成 25 年 11 月 1 日

Characteristics of Materials Accumulated in a Digester Tank for Methane Fermentation

NAKAMURA Masato*, YAMAOKA Masaru*, AIHARA Hideki **,
YUYAMA Yoshito*, and ORITATE Fumiko*

Renewable Resources Engineering Research Division, Biomass Recycling System *
Wago Corporation **

Summary

This study examined compositions and amounts of materials accumulated in a digester tank for methane fermentation after 7.5 years of operation. Approximately 20 m³ of sediments including large amounts of inorganic materials such as sand were found at the bottom of the digester tank. The accumulation of sand is unavoidable because feedstock materials such as dairy manure contain sand. Therefore, a digester tank should be designed considering the possibility of deposition of sand. Installation of drains to discharge accumulated sand is desirable. Crystals of magnesium ammonium phosphate (MAP) are observed around the liquid mixer of the tank. These crystals may cause breakdown of equipment in the tank. Crystals also cause problems in equipment replacement because parts of equipment in the tank become firmly adhered to each other by the crystals.

These findings can contribute to stable operation of methane fermentation plants and reductions in maintenance costs.

Key words : Methane fermentation, Sediment, MAP, Sulfur, Cattle manure, Maintenance of facility, Sand

排水管理時における用水制御施設の水力機能診断

藤山 宗* 樽屋啓之** 中田 達**

*株式会社三祐コンサルタンツ

**水理工学研究領域水路システム担当

キーワード：水路システム，分土工，機能診断，水力機能，流量係数

I 緒言

受益者へ農業用水を送水するための用水路（開水路）は、近年、周辺農地の宅地化に伴い、多量の雨水表面排水の流入を受け、溢水とともに周辺農地、宅地などへの冠水の事例が全国各地で確認されている（たとえば、安田，2011）。昨今、気候変動などの影響を受け、予測が困難な、積乱雲の発生による突発的で局所的な豪雨（いわゆるゲリラ豪雨）が頻発し、用水路の溢水リスクが増大している状況にある。台風のように、比較的、大雨が発生する地点とその量が想定できるような場合、施設管理者（土地改良区など）は、予め、頭首工からの用水路への送水を停止するとともに、用水路における主要な分土工にてゲート操作を行うことにより、用水路の溢水リスクを低減させることが可能である。しかし、ゲリラ豪雨のように、大雨が発生する地点とその量が予測できない場合、頭首工からの用水路への送水停止や分土工におけるゲート操作が遅れ、用水路への多量の雨水排水の流入に伴い、用水路の溢水リスクが増大する。このように、従来、施設管理者は、おもに農業用水を受益者へ送水する管理（用水管理）を行ってきたが、最近では、周辺農地とともに宅地などの冠水を防止する管理（排水管理）が、従来より増して、施設管理者に求められており、用水路の管理が複雑化している状況にある。

用水路の溢水リスクの低減を図る対策としては、ソフト面では排水管理マニュアルの作成、ハード面では用水路の通水能力の向上、排水バイパスの追加などが挙げられる（たとえば、大谷，2013；翠川ら，2005）。しかし、上述のような対策を検討するにあたって、現況における分土工の分水性能、用水路の通水性能とともに、排水管理時における施設管理者の操作等に関して、水力および水利用の観点で機能診断を行い、その結果を対策検討に反映するまでを検討した事例は少ない。そのため、用水管理時はもとより排水管理時においても、水力および水利用に関して機能診断を行うことが求められている（たとえば、樽屋・三春，2009；中・樽屋，2008）。

最近では、樽屋ら（2012）は、用水路系を対象とし、システムの点、線、面の診断の流れでの水力および水利用に関する機能診断手順の整理を行っている。また、藤

山ら（2014）は、樽屋ら（2012）が提唱する水力および水利用に関する機能診断手順の現地適用を行っている。

以上のことから、本研究では、樽屋ら（2012）が提唱する水力および水利用に関する機能診断手順を用いて、現地水路システムにおける用水制御施設（分土工、放水工）を対象とした排水管理時の水力機能診断を実施した。なお、本稿は、藤山ら（2014）の研究成果を発展させ、排水管理に重点を置いた取り組みとして位置づけられる。

II 研究の方法

2.1 研究対象とする水路システムおよび分土工

Fig.1 は、研究対象とする水路システムの概要を示す。研究対象とする水路システムは、国営 A 用水農業水利事業により更新された、開水路からパイプラインに連結する B 分土工～C 放水工（総延長 L=0.5km）区間である。また、本区間は河川取水口から路線延長 6.2km 下流に位置し、その間、複数箇所の河川放流施設を有する。

Fig.2 は、B 分土工の構造概要を示す。B 分土工は、スライドゲート 3 門（F 幹線 1 門，G 幹線 2 門）を有しており、本分土工より、H 幹線から F 幹線，G 幹線の 2 路線へ分岐する。F 幹線については、基本的に、全開でのゲート管理が行われており、越流セキの形式で分水する。G 幹線については、通常、制水ゲートの利用はなく、放水ゲートが用いられており、オリフィスの形式で分水する。つまり、本分土工は、セキ形式 1 門とオリフィス形式 2 門が複合した分水機構を有している。なお、C 放水工の構造については、Fig.4 にて後述する。

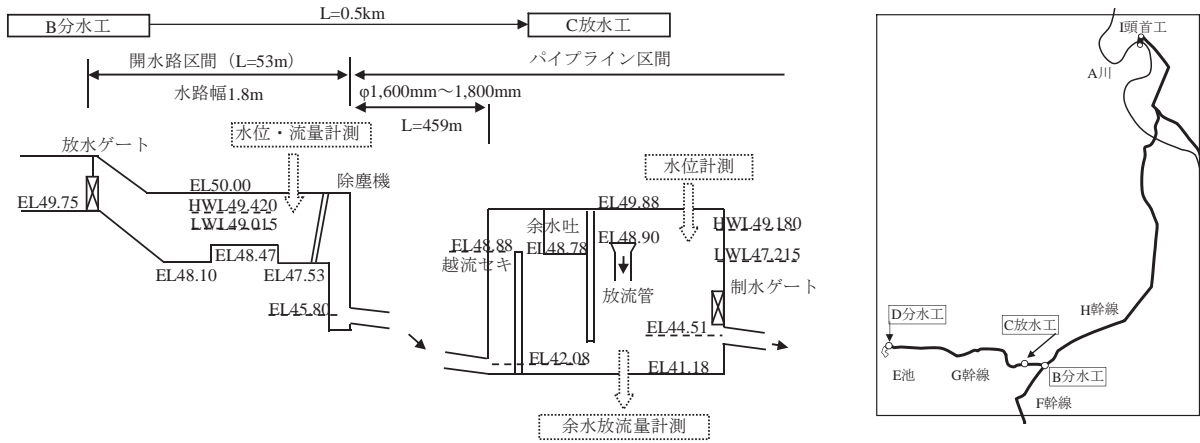


Fig.1 研究対象とする水路システムの概要
Outline of study site

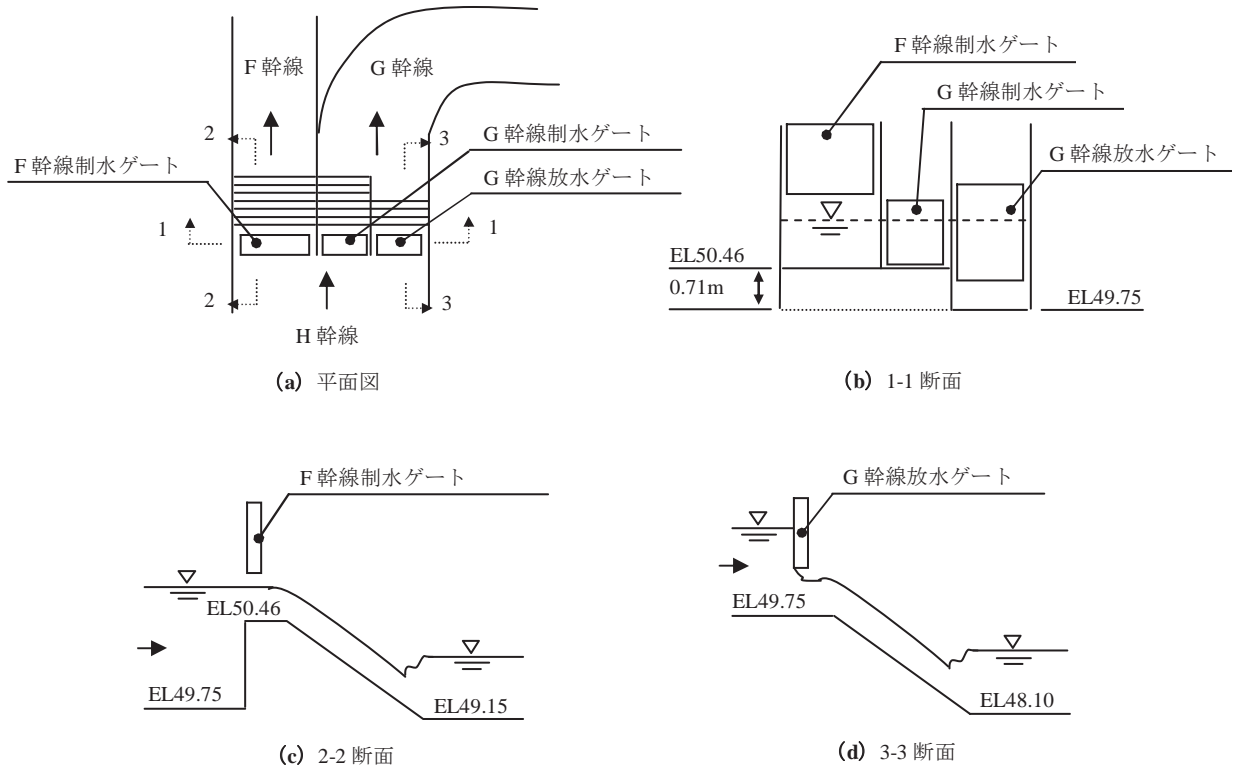


Fig.2 B分土工の構造概要
(a) 平面図, (b) 1-1断面, (c) 2-2断面, (d) 3-3断面
Structure of division work B
(a) Plan, (b) Section 1-1, (c) Section 2-2, (d) Section 3-3

2.2 研究手順および調査方法

2.2.1 研究手順

まず、研究対象とする B 分木工～C 放水工区間において、施設更新による水利機能の変遷を水利機能平面図（三春ら、2009）にて整理するとともに、溢水実績の情報整理を行った。次に、TM/TC データを用いた、B 分木工地点における排水管理の履歴と分水機構の整理を行った（以降、「点の診断」と称する）。最後に、点の診断結果を踏まえ、溢水状況の確認を行うとともに、B 分木工と C 放水工の 2 地点間における排水管理時の問題点の抽出を行い、対策案の提案を行った（以降、「線の診断」と称する）。

2.2.2 調査方法

2.2.2.1 施設更新による水利機能の変遷の情報整理

施設更新による水利機能の変遷の情報整理は、工事図面および施設管理者等からの聞き取りに基づき、事業による施工年次別に、水利機能平面図を作成した。なお、水利機能平面図における、対象施設の構造、機能および水位・流量制御方式の記号化にあたっては、既往の研究成果（農村工学研究所、2012）を参考にした。

2.2.2.2 溢水実績の情報整理

溢水実績の情報整理は、施設管理者からの聞き取りに基づき行った。

2.3 分析および診断の方法

2.3.1 点の診断

2.3.1.1 排水管理の履歴の整理

a 検討に用いる降雨データと施設管理データ

降雨データは、対象地区近傍観測所の観測データ（国土交通省水文水質データベース）を用い、対象とする降雨は、2011 年：4 ケース、2012 年：2 ケースの計 6 ケースとした（Table 1）。また、施設管理データは、土地改良区所有の TM/TC データ（10 分間隔）を用いた（Table 2）。

b 整理方法

Table 1 に示す降雨データに対応する施設管理データ（Table 2）を抽出し、それぞれ雨量と流量（F 幹線、G 幹線）の関係とともに、ゲート開度を経時的に整理した。また、それらの整理結果をもとに、降雨パターン（台風、通常降雨、ゲリラ豪雨）を基本とし、排水管理パターンを区分する。

2.3.1.2 分水機構の整理

a 検討に用いる施設管理データ

分水機構の整理を行うにあたっては、土地改良区所有の施設管理データ（2012/1/1～12/31）（Table 3）を用いた。

b 整理方法

(1) G 幹線放水ゲートの流量係数の推定

G 幹線放水ゲートの設定開度（全 15 ケース）毎に、B 分木工（H 幹線）の水深と G 幹線の流量との関係を整理した。次に、スルースゲートからの自由流出の関係式（1）（椿東一郎、1977）に基づき、G 幹線放水ゲートの

開度毎に、流量係数 C を推定する。最後に、G 幹線放水ゲート開度 d と流量係数 C の関係式を推定する。

$$Q = C \times b \times d \times \sqrt{2gh_0} \tag{1}$$

ここで、Q：G 幹線流量（m³/s）

C：流量係数

b：ゲート幅（m）

d：ゲート開度（m）

h₀：ゲート上流水深（m）

(2) B 分木工水深と流量比の関係の整理

比較的データ数が多い、G 幹線放水ゲート開度 d=0.16m、0.41m の 2 ケースについて、B 分木工水深と流量比（G 幹線流量/F 幹線流量）の関係を整理する。

Table 1 排水管理時の履歴の整理にて対象とする降雨データ Rainfall data for arrangement of histories of drainage management

年	月日	最大時間雨量 (mm)	降雨パターンによる区分
2011	7/26～28	41	ゲリラ豪雨
	8/21～23	51	通常降雨
	9/3～5 (台風12号)	48	通常降雨
2012	9/20～22 (台風15号)	30	台風
	6/18～20 (台風4号)	35	台風
	8/13～15	34	通常降雨

Table 2 排水管理履歴の整理に用いる施設管理データ Facility management data for arrangement of histories of drainage management

データ期間	2011/1/1～2012/12/31 (2ヶ年)
データ項目	F幹線 流量
	G幹線 流量
	F幹線 制水ゲート開度
	G幹線 放水ゲート開度

Table 3 分水機構の整理に用いる施設管理データ Facility management data for arrangement of the division mechanism

データ期間	2012/1/1～12/31 (1ヶ年)
データ項目	B分木工 (H幹線) 水位
	F幹線 流量
	G幹線 流量
	G幹線 放水ゲート開度

2.3.2 線の診断

B 分木工下流の F 幹線および G 幹線にて、溢水が生じた 2012/8/14 降雨時の TM/TC データを用いて、B 分木工および C 放水工における水位・流量の変化を整理し、溢水状況を確認した。また、水利機能平面図を用いて、B 分木工から C 放水工の 2 地点間における排水管理時の問題点の抽出を行い、対策案の提案を行う。

Ⅲ 調査結果

3.1 施設更新による水理機能の変遷の情報整理

施設更新による水理機能の変遷を把握するため、水理機能平面図を用いて、(a) 事業②時点、(b) 事業③時点の流れで整理した (Fig.3)。なお、本稿では、水位・流量制御方式として、上流制御方式 (上流からの水位、流量の情報に基づく制御方式)、下流制御方式 (下流からの水位、流量の情報に基づく制御方式) という用語を用いるが、解釈は USBR (1991) に準じるものとする。

Fig.3 (a) は、事業②時点において、B 分水工下流の G 幹線がパイプライン化されるとともに、余水吐を有する分水スタンド (C 放水工) が設置された時点の水理機能平面図である。なお、事業②時点におけるパイプライン化の目的は、用水の安定供給と用水路の維持管理労力の軽減等である。

Fig.3 (b) は、事業③時点において、C 放水工にて、越流セキの設置と分水スタンドの容量拡大 (Fig.4) が行われた時点の水理機能平面図である。越流セキの設置は、極力、越流セキの上流水位と下流水位の独立性を維持すること (完全ではないが、水位・流量制御方式を上流制御方式に移行すること) による、同放水工上流の水位・流量の安定化を図るものである。また、分水スタンドの増設は、需要変動に対する調整容量を増強することによる、同放水工下流の水位・流量の安定化および同放水工における余水放流量の減少を図るものである。なお、本稿では、詳述しないが、事業②時点および事業③時点における C 放水工の設計思想は、ともに、同じ設計基準 (土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」平成 21 年 3 月) に準じている。

以上のように、事業②時点、事業③時点において、C 放水工における各種の水理機能の変更 (下流制御方式から上流制御方式への変更など) が行われているが、詳細については、藤山ら (2014) を参照されたい。

3.2 溢水実績の情報整理

Fig.5 は、B 分水工下流の現場における溢水状況の写

真 (2012/8/14 9:00 時点) である。2012 年 8 月 14 日 9 時頃、最大時間雨量 34mm を記録し、B 分水工下流の F 幹線および G 幹線の開水路区間にて、溢水が生じ、周辺道路、宅地への冠水被害が生じていたこと、また、同様な被害が、最近年、複数回生じていることを、施設管

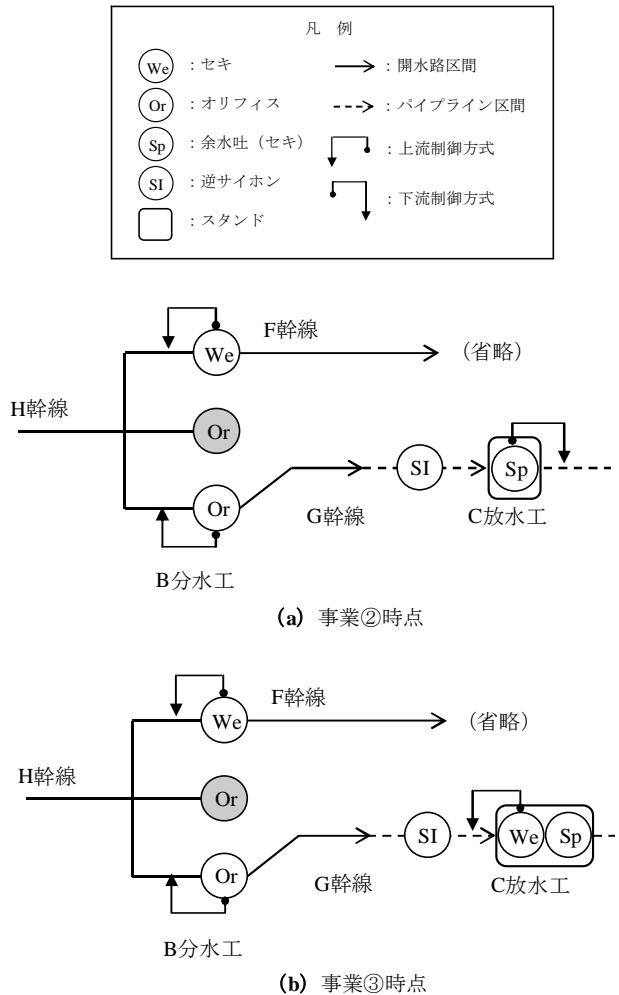


Fig.3 水理機能の変遷を把握するための水理機能平面図

(a) 事業②時点, (b) 事業③時点
Hydraulic function plan
(a) Enterprise ②, (b) Enterprise ③

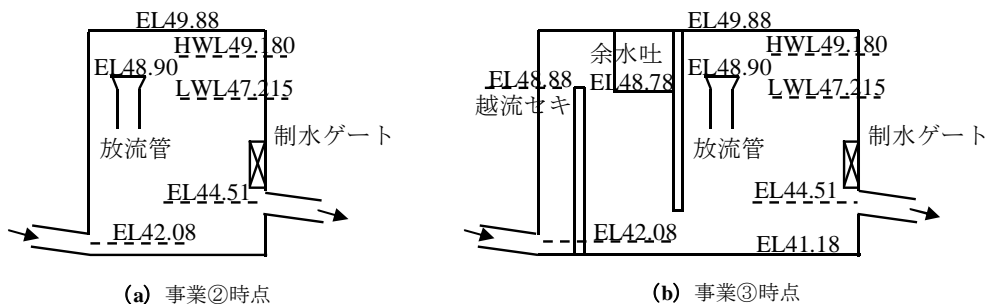


Fig.4 C 放水工の構造

(a) 事業②時点, (b) 事業③時点

Structure of wasteway C

(a) Enterprise ②, (b) Enterprise ③

理者からの聞き取りにより明らかとなった。なお、Fig.5 に示す写真は、施設管理者により撮影されたものである。

IV 分析および診断結果

4.1 点の診断

4.1.1 排水管理の履歴

Fig.6~Fig.11 は、Table 1 に示す降雨イベント毎の幹線流量とゲート開度の時間変化を示す。なお、それぞれの図中には、施設管理者の排水管理に伴う、F 幹線および G 幹線の流量変化点を破線丸囲みにて示す。

Fig.6 および Fig.7 は、それぞれ 2011/9/20~22 (台風 15 号)、2012/6/18~20 (台風 4 号) における降雨時の幹線流量とゲート開度の時間変化を示す。台風 15 号 (2011/9/20~22) および台風 4 号 (2012/6/18~20) は、両者ともに、当初より、対象地区を直撃することが予想されていた。そのため、雨の降りはじめの段階で、H 幹線への送水量を減少させたため、Fig.6 および Fig.7 から読み取れるように、F 幹線および G 幹線における流量増加を抑制することができている。また、両者の降雨時の B 分土工におけるゲート操作は、G 幹線 (放水ゲート) のみで行われており、このゲート操作は、B 分土工下流の G 幹線開水路区間における溢水リスクの低減を目的としたものであることを、施設管理者からの聞き取りにより確認した。

Fig.8~Fig.10 は、それぞれ 2011/8/21~23、2011/9/3~5 (台風 12 号)、2012/8/13~15 における降雨時の幹線流量とゲート開度の時間変化を示す。台風 12 号 (2011/9/3~5) は、発生当初、対象地区を直撃することも予想されたが、同期間において対象地区を直撃しなかったことから、台風の降雨イベントとしては取り扱わなかった。

Fig.8~Fig.10 より、すべての降雨時において、最大時間雨量に達する過程で、F 幹線 (および G 幹線) における

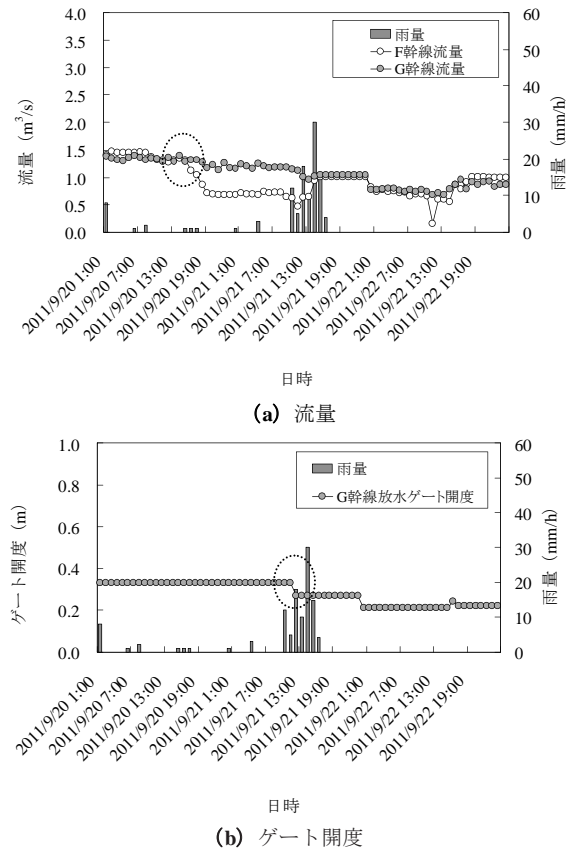


Fig.6 2011/9/20~22 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度
Discharge and gate opening at the time of the rain of 2011/9/20-22
(a) Discharge, (b) Gate opening



Fig.5 B 分土工下流の現場における溢水状況の写真 (2012/8/14 9:00)
(a) B 分土工の流況, (b) F 幹線の溢水状況, (c) G 幹線の溢水状況

Overflow behavior in division work B downstream
(a) Flow behavior in division work B, (b) Overflow behavior in canal F, (c) Overflow behavior in canal G

流量増加が見られること、また、その間、B 分土工におけるゲート操作は行われていないことが読み取れる。

施設管理者からの聞き取りでは、台風時には、雨の降り始めの段階で、H 幹線への送水量を減少させるが、その他の降雨時には、H 幹線への送水量の減少は、雨の降り方を見ながら経験的に判断することを基本方針としていることを確認した。また、H 幹線への送水量の減少が遅れる、あるいは、遅らせる理由についても、施設管理者に確認したところ、G 幹線のパイプライン化により、維持管理上、極力パイプラインの充水状態を確保することが求められ、できるだけ、H 幹線への送水量の減少を遅らせることを念頭に置いているとのことであった。

以上の点を踏まえると、施設管理労力の軽減等を目的とし、G 幹線をパイプライン化したことが、降雨時、施設管理者による H 幹線への送水量の低減の判断（用水管理から排水管理に切り換える判断）を難しくしていることが推察される。

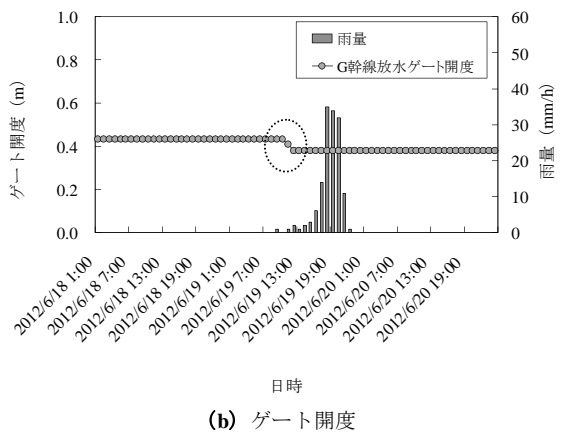
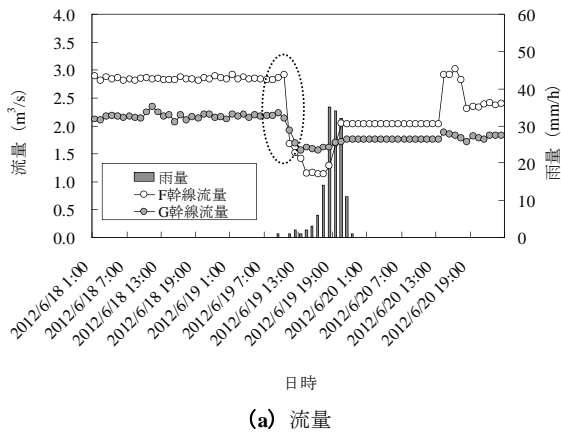


Fig.7 2012/6/18~20 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度

Discharge and gate opening at the time of the rain of 2012/6/18-20
(a) Discharge, (b) Gate opening

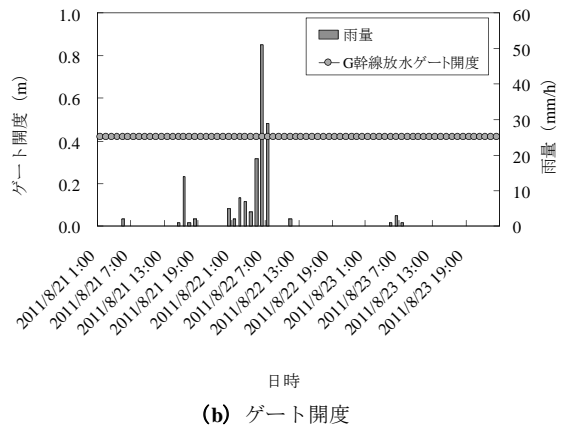
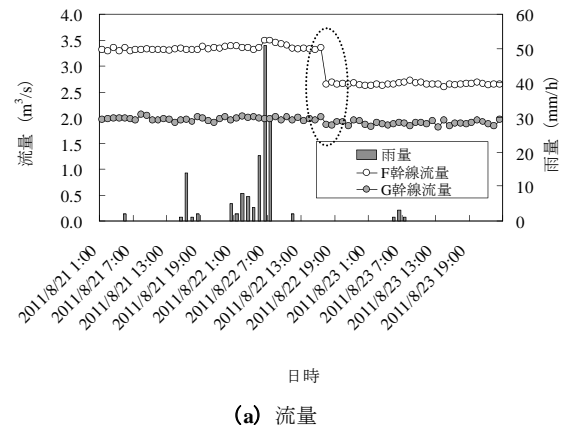
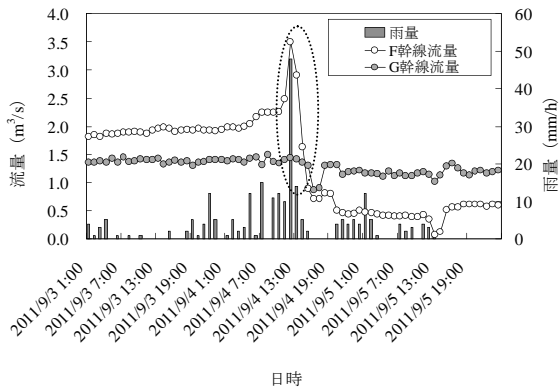
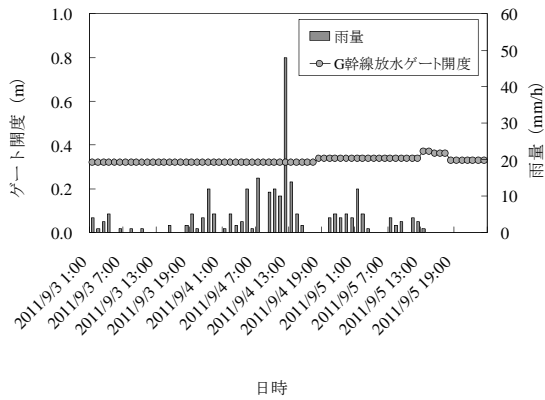


Fig.8 2011/8/21~23 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度

Discharge and gate opening at the time of the rain of 2011/8/21-23
(a) Discharge, (b) Gate opening

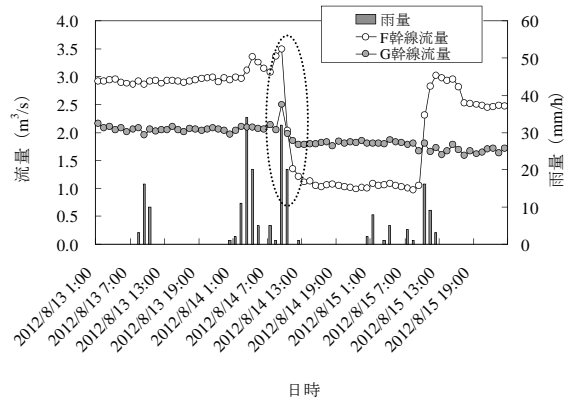


(a) 流量

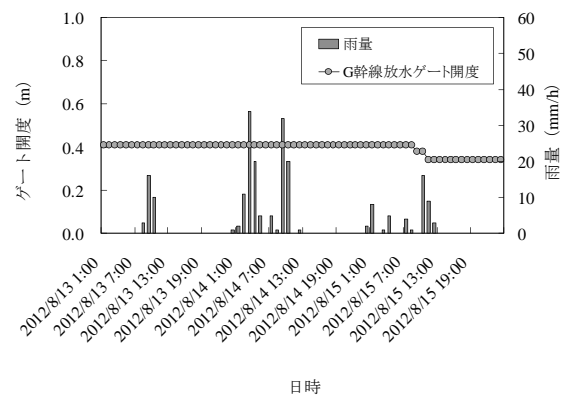


(b) ゲート開度

Fig. 9 2011/9/3～5 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度
Discharge and gate opening at the time of the rain of 2011/9/3-5
(a) Discharge, (b) Gate opening



(a) 流量



(b) ゲート開度

Fig. 10 2012/8/13～15 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度
Discharge and gate opening at the time of the rain of 2012/8/13-15
(a) Discharge, (b) Gate opening

Fig.11 は、2011/7/26～28 における降雨時の幹線流量とゲート開度の時間変化を示す。本降雨データは、上述の降雨データ（5 ケース）と異なり、連続して降り続く降雨ではなく、突発的な降雨であったことから、ゲリラ豪雨として取り扱うものとした。本降雨時には、突発的な降雨に伴い、F 幹線の流量増加が見られた。施設管理者からの聞き取りによると、本降雨は、予測できないものであったため、H 幹線への送水量の減少および B 分水工におけるゲート操作に遅れが生じたとのことであった。

以上のように、Table 1 に示す降雨イベントにおける幹線流量とゲート開度の時間変化を、台風 (Fig.6, Fig.7)、通常降雨 (Fig.8～Fig.10)、ゲリラ豪雨 (Fig.11) に区分し説明し、それぞれの区分における排水管理に相違が見られることが明らかとなった。そこで、それぞれの区分における排水管理パターンを再整理した (Table 4)。

パターン 1：2011/9/20～22 (台風 15 号)、2012/6/18～20 (台風 4 号) (Fig.6, Fig.7) のように、事前の気象情報により雨量の増加が想定される台風の場合には、雨の降り始めの段階で、H 幹線への送水量の減少を行うとともに、B 分水工におけるゲート操作を行い、G 幹線の溢水リスクを減少する。

パターン 2：2011/8/21～23、2011/9/3～5 (台風 12 号)、2012/8/13～15 (Fig.8～Fig.10) のように、通常降雨の場合には、最大時間雨量に達する過程で、H 幹線への送水量の減少および B 分水工におけるゲート操作の判断を経験的に行っており、場合によっては、判断が遅れ、G 幹線の溢水リスクが高まるおそれがある。

パターン 3：2011/7/26～28 のように、ゲリラ豪雨の場合には、予測できない突発的な降雨であるため、H 幹線への送水量の低減および B 分水工におけるゲート操作が遅れ、G 幹線の溢水リスクが高まる。

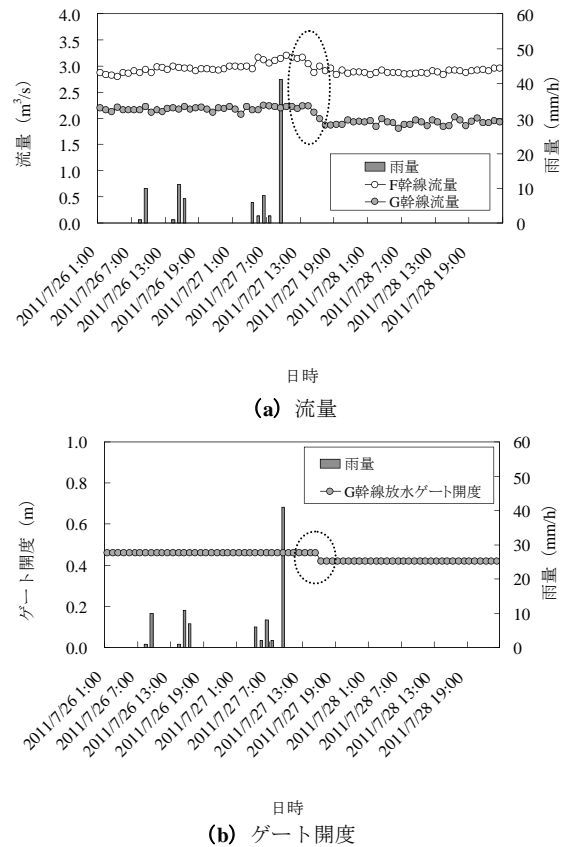


Fig. 11 2011/7/26～28 降雨時の幹線流量とゲート開度の変化
(a) 流量, (b) ゲート開度
Discharge and gate opening at the time of the rain of 2011/7/26-28
(a) Discharge, (b) Gate opening

Table 4 排水管理パターンの区分
Classification of drainage management patterns

排水管理 パターン	年	月日	H幹線への送水量の低減 の有無 ^{※1}	B分水工におけるゲート操作の有無		備考
				F幹線	G幹線	
パターン1	2011	9/20～22	◎	×	○	台風15号
	2012	6/18～20				台風4号
パターン2	2011	8/21～23	○	×	×	—
		9/3～5				台風12号
パターン3	2012	8/13～15	○	×	○	—
		7/26～28				—

※1_表中の◎, ○は、以下のことを意味する。

- ◎：最大時間雨量に達する前に、H幹線への送水量の低減を行った。
- ：最大時間雨量に達したのち、H幹線への送水量の低減を行った。

4.1.2 分水機構

4.1.2.1 G 幹線放水ゲートの流量係数

Fig.12 は、G 幹線放水ゲート開度と流量係数の関係を示す。G 幹線放水ゲート開度 d と流量係数 C の関係は、一次近似式 ($C=0.23d+0.69$) にて表すことができる。なお、本検討を行う上での参考資料として、各ゲート開度 d における流量係数 C の算出結果を付録に示す。

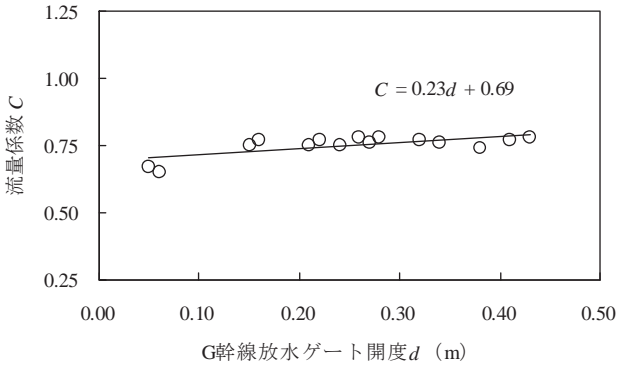


Fig.12 G 幹線放水ゲート開度と流量係数の関係
Relationship between gate opening of canal G and coefficient of discharge

4.1.2.2 B 分土工水深と流量比の関係

G 幹線放水ゲート開度 2 ケース ($d=0.16m, 0.41m$) について、Fig.12 に示した流量係数 C に基づき、B 分土工水深と流量比 (G 幹線流量/F 幹線流量) の関係を整理した (Fig.13)。Fig.13 より、B 分土工水深が大きくなるにつれて、G 幹線および F 幹線の流量は増加すること、また、その流量の変化勾配は、F 幹線の方が大きいことがわかった。また、B 分土工における流量比 (G 幹線流量/F 幹線流量) は、B 分土工水深が大きくなるにつれて、小さくなる。

以上のことから、G 幹線が有するオリフィスの形式よりも、F 幹線が有する越流セキの形式による分水機構の方が、B 分土工水深に対する流量の変化勾配が大きいこと、つまりは、B 分土工の分水機構は、越流セキの形式とオリフィスの形式を用いた分水機構の複合系であることを確認した。なお、オリフィスと越流セキの流量の関係は、スルースゲートからの自由流出の関係式 (1) と完全越流セキの流量の関係式 (2) (樁東一郎, 1977) より、水位に対して、それぞれ $1/2$ 乗、 $3/2$ 乗に比例して流量増加することからも説明できる。

$$Q = C \times B \times \sqrt{2gE^3} \quad (2)$$

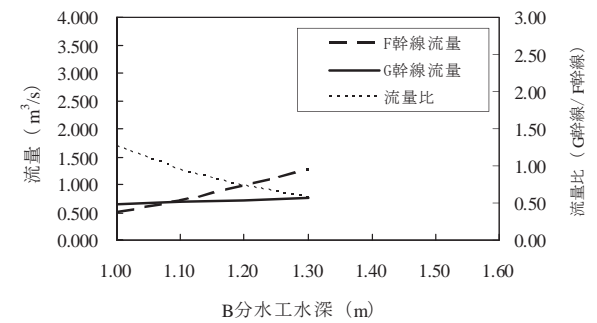
- ここで、 Q : F 幹線流量 (m^3/s)
- C : 流量係数
- B : 越流幅 (m)
- E : 越流水頭 (m)

4.2 線の診断

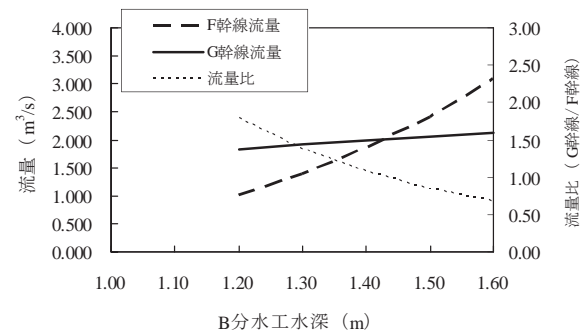
4.2.1 2012/8/14 降雨時の溢水状況の確認

Fig.14 は、2012/8/14 降雨時の B 分土工水深・流量の時間変化を示す。2014/8/14 降雨時、まず F 幹線が同日 8:40 に最大流量 $3.5m^3/s$ に達し、G 幹線は F 幹線が最大流量に達した時点で遅れて反応し、同日 9:00 に最大流量 $2.5m^3/s$ を記録し、同時刻に施設管理者により両幹線の溢水状況が確認された (Fig.5)。この F 幹線および G 幹線の流量変化の関係には、Fig.13 に示した B 分土工が有する分水機構の特徴が現れている。

Fig.15 は、2012/8/14 降雨時の G 幹線水位と C 放水工水位・余水放流量の時間変化を示す。2014/8/14 降雨時、B 分土工下流の G 幹線水位は、最大水位 $49.39m$



(a) ゲート開度 $d=0.16m$



(b) ゲート開度 $d=0.41m$

Fig.13 B 分土工水深と流量比の関係

(a) ゲート開度 $d=0.16m$, (b) ゲート開度 $d=0.41m$

Relationship between water depth of division work B and division discharge ratio

(a) Gate opening of $d=0.16m$, (b) Gate opening of $d=0.41m$

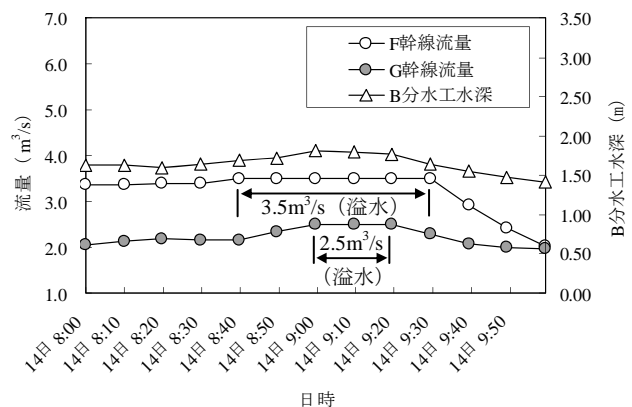


Fig.14 2012/8/14 降雨時の B 分土工水深・流量の時間変化
Fluctuations in water depth of division work B and division discharge at the time of the rain of 2012/8/14

(2012/8/14 9:10) に達し、C 放水工水位および C 放水工余水放流量は、それに追従し、それぞれ最大値 49.16m (HWL.49.18m と概ね同等)、0.59m³/s を記録した。

Fig.16 は、2012/8/14 降雨時の C 放水工水位と越流セキ高の関係を示す。図中には、越流セキ高よりも C 放水工水位が高い場合を正とし、C 放水工水位と越流セキ高の差 (Fig.17) を整理した。C 放水工水位と越流セキ高の差は、2014/8/14 降雨時、最大値 0.28m を記録した。この現象は、G 幹線の流量増加に対し、C 放水工における余水放流能力が不足し、越流セキ下流の水位が上昇し

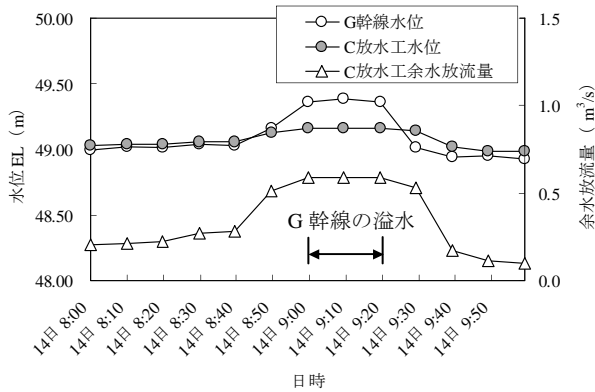


Fig.15 2012/8/14 降雨時の G 幹線水位と C 放水工水位・余水放流量の時間変化

Fluctuations in water level of canal G and spillway discharge and water level of wasteway C

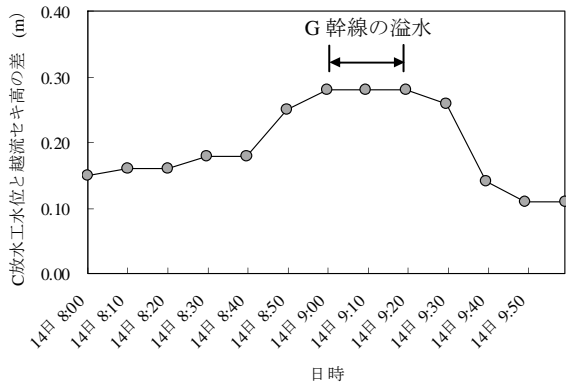


Fig.16 2012/8/14 降雨時の C 放水工水位と越流セキ高の関係

Relationship between water level and height of overflow weir in wasteway C

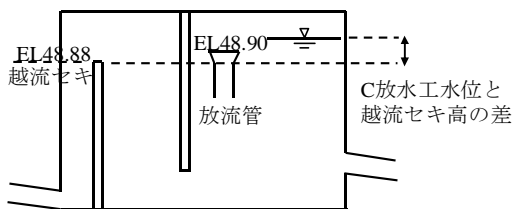


Fig.17 C 放水工水位と越流セキ高の差を示した模式図
Difference of water level and height of overflow weir in wasteway C

たものと推察される。また、越流セキ下流の水位上昇が、B 放水工下流における G 幹線の溢水に寄与していることも考えられる。

以上のことから、2012/8/14 降雨時に発生した溢水の要因としては、H 幹線への送水量の低減が遅れたということとはもとより、B 放水工が有する特有の分水機構、C 放水工の構造 (越流セキ、放流管) 等における問題が考えられる。

4.2.2 排水管理時における問題点の抽出および対策案の提案

前項までにおいては、排水管理の履歴の整理、分水機構の整理 (点の診断) を行うとともに、2012/8/14 降雨時の溢水状況の確認 (線の診断) を行い、用水制御施設 (B 放水工、C 放水工) における排水管理の現状を把握した。そこで、本項では、用水・排水管理、分水機構とその水位・流量制御方式の関係を整理するとともに、B 放水工および C 放水工における排水管理時の問題点の抽出と対策案の提案を行う。

Table 5 は、用水・排水管理、分水機構と水位・流量制御方式の関係を示す。なお、分水機構には、背割、オリフィス、セキの形式が挙げられ、水位・流量制御方式には、上流制御方式と下流制御方式が挙げられるが、Table 5 では、B 放水工および C 放水工が有するオリフィスとセキの形式、上流制御方式と下流制御方式を対象とする。

用水管理においては、用水制御施設における用水の配分 (分水均等性) に着目すると、オリフィスの形式よりも、下流水位の影響を受けず定比分水が可能なセキの形式を用いた分水機構の方が、性能を発揮できると言える。オリフィス形式の場合、オリフィス下流水位の上昇により、自由流出からもぐり流出の流れに変化すると、分水均等性が保たれないおそれがある。

一方、排水管理においては、用水制御施設における排水の配分 (用水管理時の分水比から排水管理時の分水比への変更) に着目すると、セキの形式よりも、ゲート開度の調整による排水配分が可能なオリフィスの形式を用いた分水機構の方が、性能を発揮できると言える。セキ形式の場合、上流制御方式での水位・流量制御を余儀なくされ、一方の水路に選択的に排水を集中させる管理ができない。その際、溢水対策として、セキ上流にて余水吐の設置を検討することが必要となる。

つまり、用水制御施設において、用水管理とともに、排水管理も行う必要が生じるか否かによって、分水機構 (セキの形式、オリフィスの形式) の適性を適切に判断することが重要である。

そこで、上述の考え (Table 5) をもとに、B 放水工および C 放水工における分水機構と水位・流量制御方式を再整理し、問題点の抽出を行う。B 放水工に関しては、Fig.2 および Fig.3 (b) に示すように、分水機構はセキの形式とオリフィスの形式の複合系であり、水位・流量制御方式は用水管理、排水管理ともに、上流制御方式で

ある。また、C放水工に関しては、Fig.3 (b) および Fig.4 (b) に示すように、分水機構はセキの形式であり、水位・流量制御方式は用水管理、排水管理ともに、上流制御方式である。上述のとおり、分水機構がセキの形式である場合、状況に応じて、溢水対策としてセキ上流での余水吐の設置が必要となる。しかし、B分水工下流のF幹線およびG幹線の開水路区間にて、溢水が生じている状況で、B分水工およびC放水工のセキ上流には余水吐が設置されていない。ここに、B分水工およびC放水工における、排水管理時の問題が内在する。

Table 5 用水・排水管理、分水機構と水位・流量制御方式の関係

Relationship among management methods of irrigation and drainage, division mechanism, and water level and discharge control methods

分水機構 管理	セキ	オリフィス
	上流制御	下流(上流)制御
用水	◎	○
排水	△	◎

※表中の◎, ○, △は、以下のことを意味する。

- ◎：優れた適正を有する。
- ：適正を有する。
- △：余水吐との併用により適正を有する。

Fig.18 は、水利機能平面図(対策案)を示す。上述の排水管理時の問題を踏まえた、B分水工～C放水工区間における対策案としては、B分水工上流およびB分水工下流のG幹線にて余水吐の設置を行うとともに、C放水工越流セキ下流にて余水吐の能力強化を図ることが挙げられる。また、G幹線開水路区間にて容量(水路幅)の拡大を図ることも対策として挙げられる。

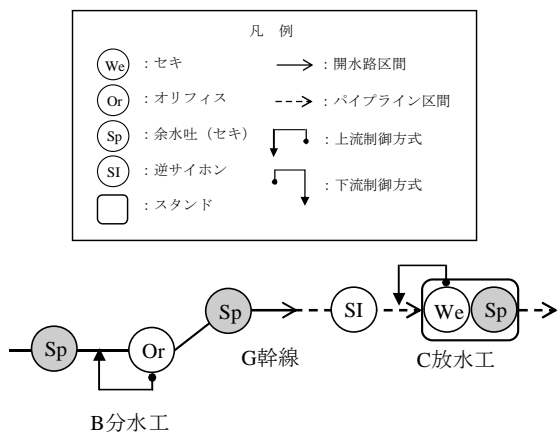


Fig.18 水利機能平面図(対策案)
Hydraulic function plan (Countermeasures)

VI 結 言

本研究では、樽屋ら(2012)が提唱する水利および水

利用に関する機能診断手順を用いて、現地水路システムにおける用水制御施設(分水工、放水工)を対象とした排水管理時の水利機能診断を実施し、以下のような所見が得られた。

- ① 点の診断にて、B分水工における排水管理の履歴を整理することにより、排水管理パターンを三つに区分した。パターン3に区分したゲリラ豪雨のような雨量増加に対しては、施設管理者による排水管理が遅れ、溢水に繋がるおそれがあること、また、パターン2に区分した通常降雨の場合には、G幹線のパイプライン化により、施設管理者による排水管理への変更判断を難しくしていることが推察された。
- ② 点の診断にて、B分水工におけるセキとオリフィスが複合した分水機構を明らかにした。G幹線が有するオリフィスの形式よりも、F幹線が有するセキの形式の分水機構の方が、分水位に対する流量の変化勾配が大きいこと、また、G幹線放水ゲート開度 d と流量係数 C の関係は、一次近似式にて表せることがわかった。
- ③ 線の診断にて、2012/8/14 降雨時の溢水状況を確認した。また、排水管理時の問題点を抽出し、対策として、B分水工～C放水工区間にて、余水吐の設置および能力強化が必要となることを提案した。

謝辞：本研究の実施にあたり、現地調査などにご協力頂きました関係各位に対し、ここに記して謝意を表します。

参考文献

藤山 宗・樽屋啓之・中田 達 (2014)：開水路からパイプラインに移行する水路システムの放水工改修に関する水利機能診断，農村工学研究所技報，215，1-16

翠川恒雄・土方英二・羽田野義勝 (2005)：生まれ変わる愛知用水，農土誌，73(2)，7-10

三春浩一・田中良和・向井章恵・樽屋啓之・中 達雄 (2009)：用水路システムの水利および水利用に対する機能診断事例，農業農村工学会論文集，260，113-119

中 達雄・樽屋啓之 (2008)：用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方，農業農村工学会論文集，256，9-16

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，東京大学大学院農学生命科学研究科，日本大学生物資源科学部 (2012)：農業水利施設の機能保全のための研究成果の活用の手引き，農村工学研究所，104-105

大谷 寛 (2013)：田園と散居の郷に安心と水土の環，ARIC 情報，109，47-54

樽屋啓之・三春浩一 (2009)：用水路系における水利・水利用機能診断のチェックポイント，水土の知，77(4)，11-14

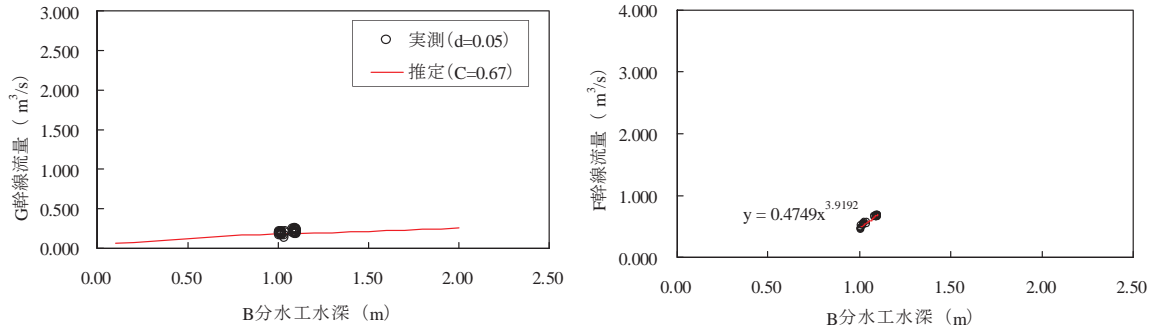
樽屋啓之・藤山 宗・中田 達 (2012)：分水施設機能診断のための基本的調査項目について，平成 24 年度農業農村工学会九州支部大会講演要旨集，94-95

樽東一郎 (1977)：水理学 I，森北出版，197-199

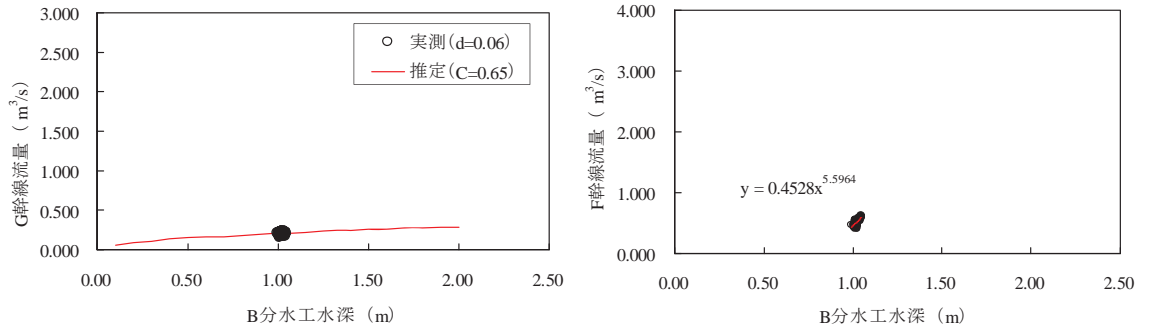
USBR (1991)：Canal Systems Automation Manual，1，9-11

安田克則 (2011) : 射水平野土地改良区の施設・維持管理について, 水と土, 162, 32-37

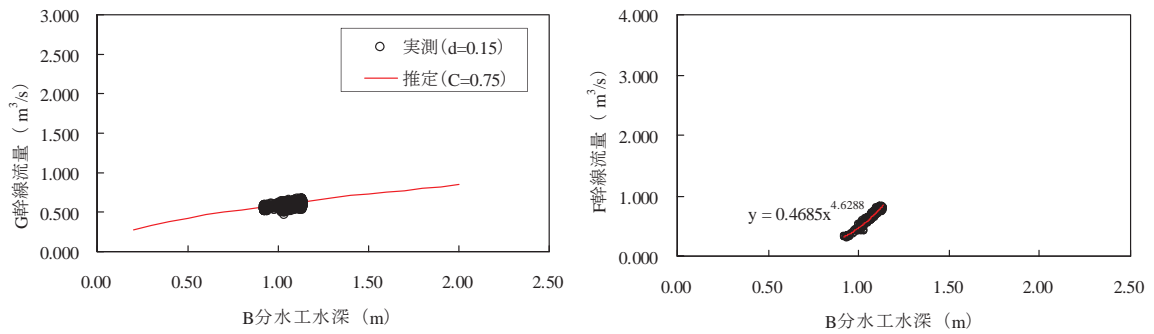
受理年月日 平成 25 年 11 月 6 日



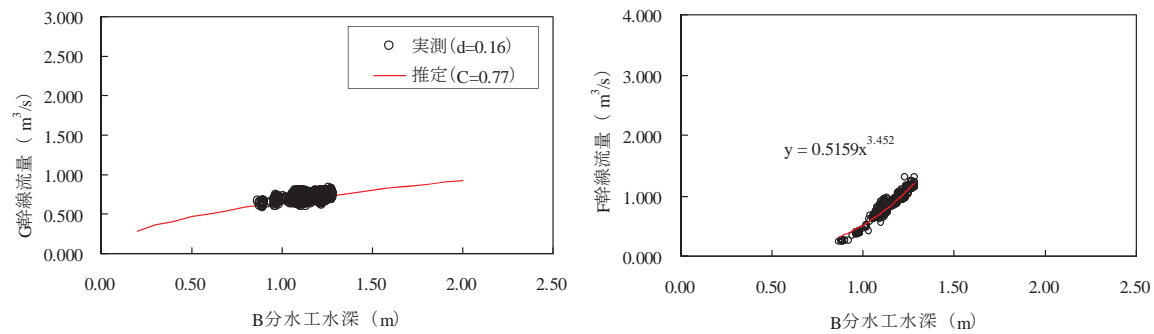
(a) ゲート開度 $d=0.05\text{m}$



(b) ゲート開度 $d=0.06\text{m}$



(c) ゲート開度 $d=0.15\text{m}$



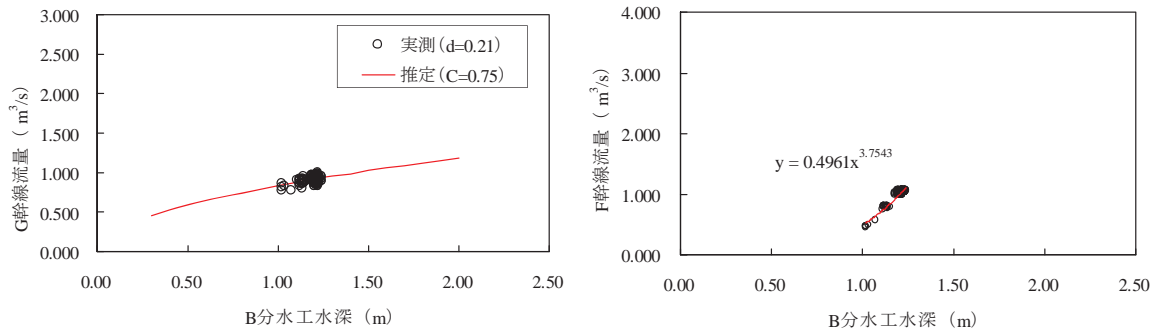
(d) ゲート開度 $d=0.16\text{m}$

付録 B 分土工水深と分水流量の関係 (1/4)

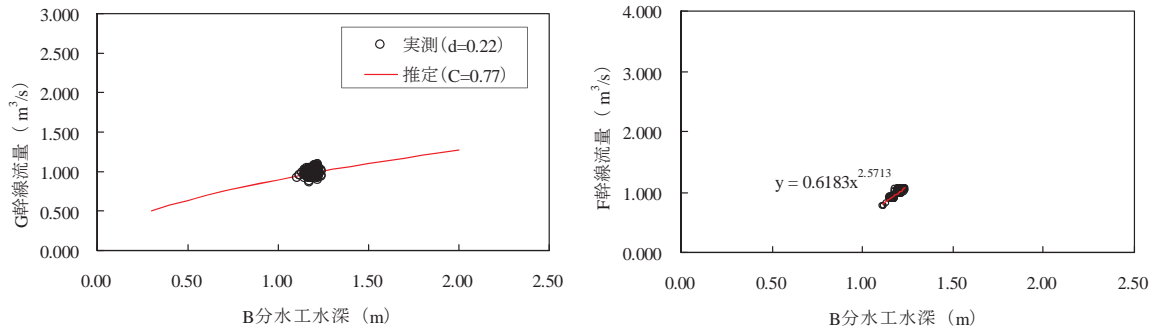
(a) ゲート開度 $d=0.05\text{m}$, (b) ゲート開度 $d=0.06\text{m}$, (c) ゲート開度 $d=0.15\text{m}$, (d) ゲート開度 $d=0.16\text{m}$

Relationship between water depth of division work B and division discharge (1/4)

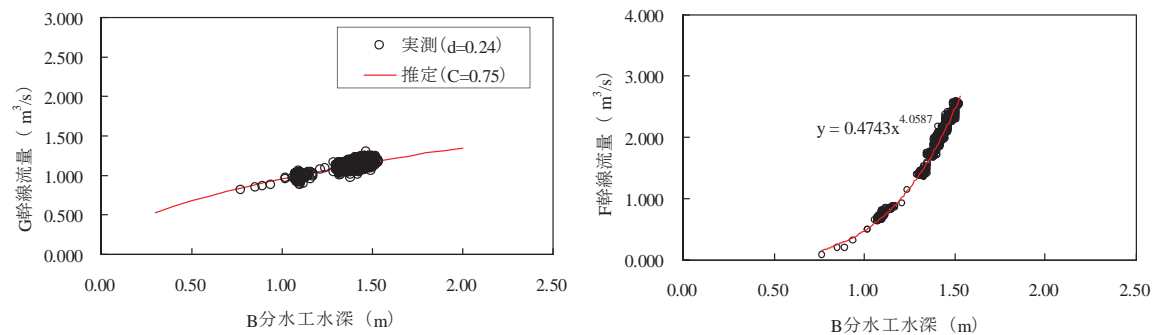
(a) Gate opening of $d=0.05\text{m}$, (b) Gate opening of $d=0.06\text{m}$, (c) Gate opening of $d=0.15\text{m}$, (d) Gate opening of $d=0.16\text{m}$



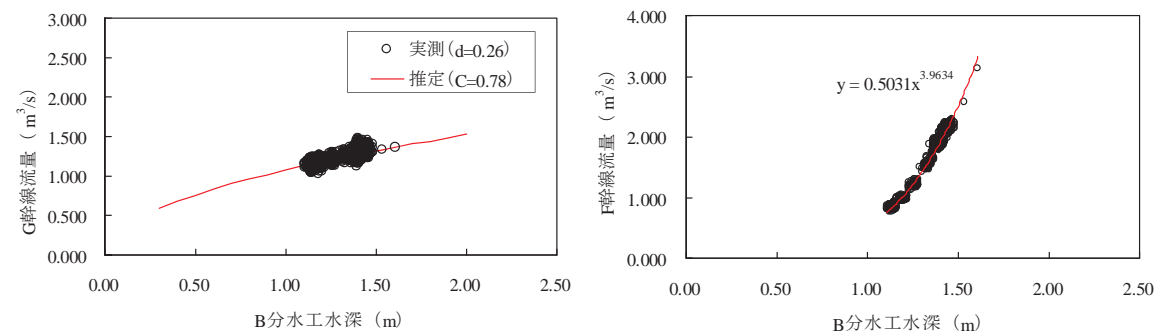
(e) ゲート開度 $d=0.21\text{m}$



(f) ゲート開度 $d=0.22\text{m}$



(g) ゲート開度 $d=0.24\text{m}$



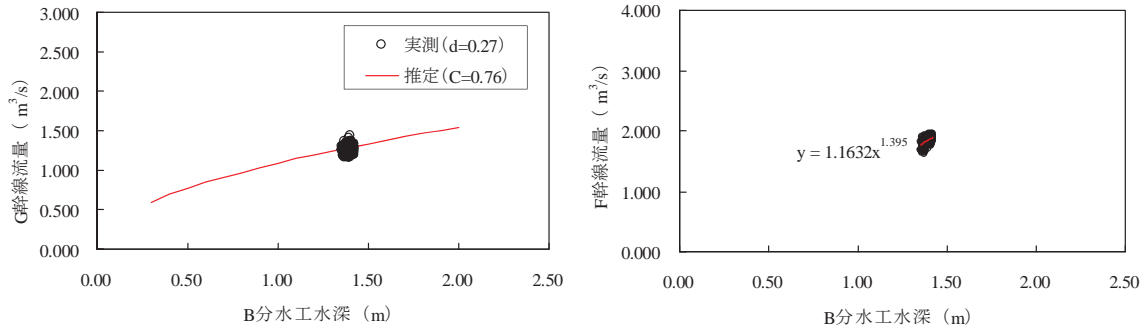
(h) ゲート開度 $d=0.26\text{m}$

付録 B 分水工水深と分水流量の関係 (2/4)

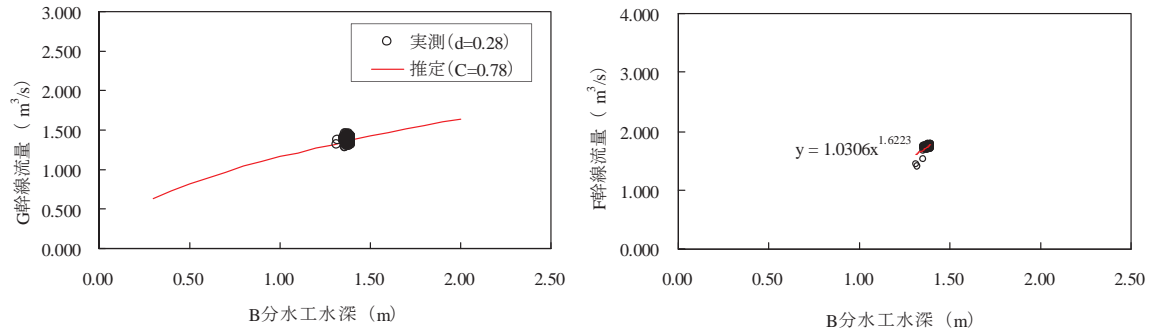
(e) ゲート開度 $d=0.21\text{m}$, (f) ゲート開度 $d=0.22\text{m}$, (g) ゲート開度 $d=0.24\text{m}$, (h) ゲート開度 $d=0.26\text{m}$

Relationship between water depth of division work B and division discharge (2/4)

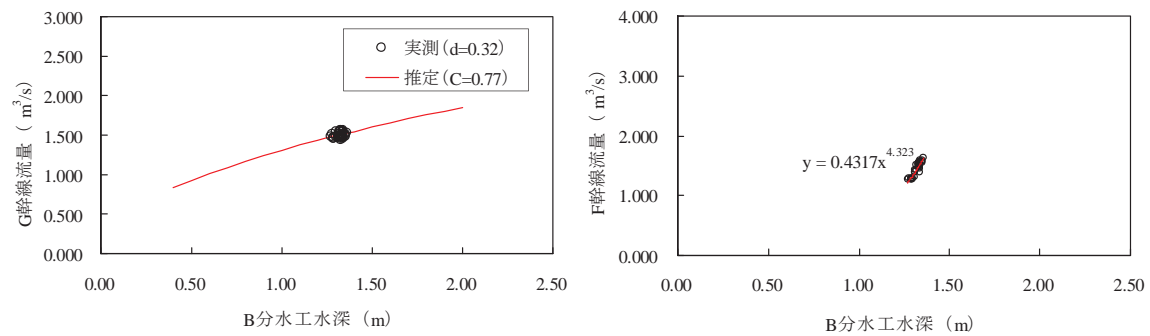
(e) Gate opening of $d=0.21\text{m}$, (f) Gate opening of $d=0.22\text{m}$, (g) Gate opening of $d=0.24\text{m}$, (h) Gate opening of $d=0.26\text{m}$



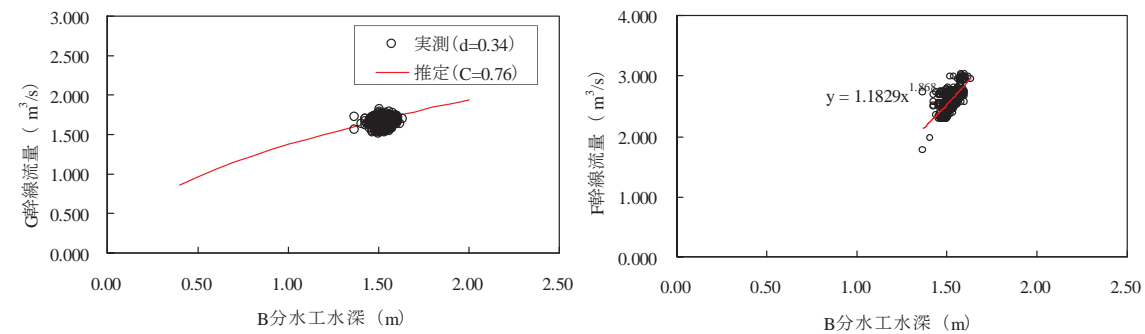
(i) ゲート開度 $d=0.27\text{m}$



(j) ゲート開度 $d=0.28\text{m}$



(k) ゲート開度 $d=0.32\text{m}$



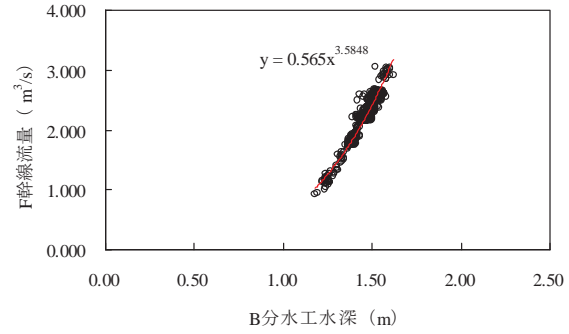
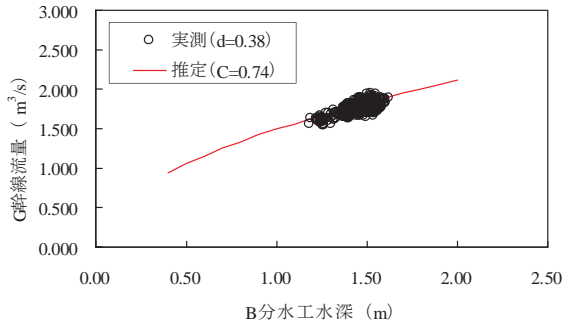
(l) ゲート開度 $d=0.34\text{m}$

付録 B 分水工水深と分水流量の関係 (3/4)

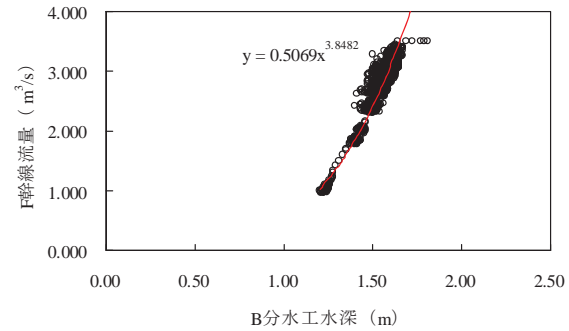
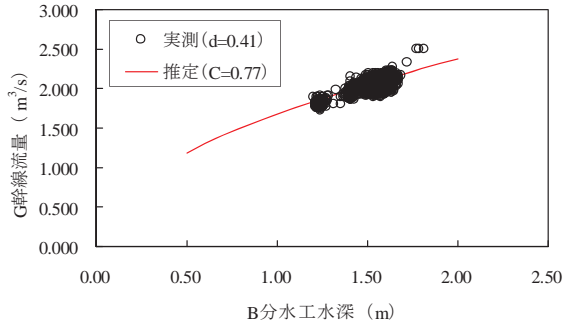
(i) ゲート開度 $d=0.27\text{m}$, (j) ゲート開度 $d=0.28\text{m}$, (k) ゲート開度 $d=0.32\text{m}$, (l) ゲート開度 $d=0.34\text{m}$

Relationship between water depth of division work B and division discharge (3/4)

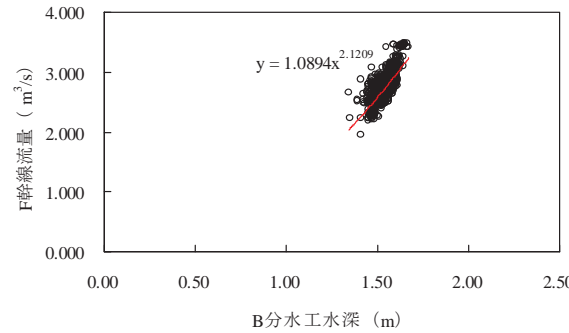
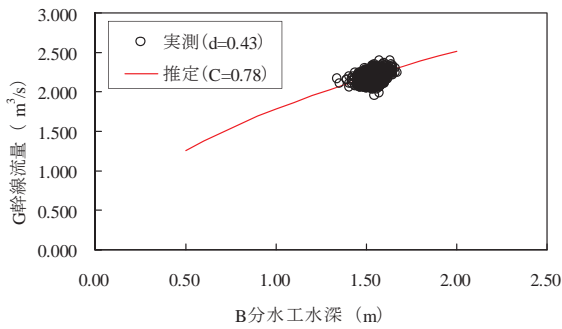
(i) Gate opening of $d=0.27\text{m}$, (j) Gate opening of $d=0.28\text{m}$, (k) Gate opening of $d=0.32\text{m}$, (l) Gate opening of $d=0.34\text{m}$



(m) ゲート開度 $d=0.38\text{m}$



(n) ゲート開度 $d=0.41\text{m}$



(o) ゲート開度 $d=0.43\text{m}$

付録 B 分土工水深と分水流量の関係 (4/4)

(m) ゲート開度 $d=0.38\text{m}$, (n) ゲート開度 $d=0.41\text{m}$, (o) ゲート開度 $d=0.43\text{m}$

Relationship between water depth of division work B and division discharge (4/4)

(m) Gate opening of $d=0.38\text{m}$, (n) Gate opening of $d=0.41\text{m}$, (o) Gate opening of $d=0.43\text{m}$

Diagnosis of Hydraulic Function in Irrigation Control Facilities during Drainage Management Periods

FUJIYAMA So*, TARUYA Hiroyuki **and NAKADA Toru**

Sanyu Consultants Inc*

Hydraulic Engineering Division, Canal Systems**

Summary

In this study, the diagnosis of hydraulic functions was performed in irrigation control facilities during drainage management periods. Target irrigation control facilities are some division works in main canal which has been managed by the government. Obtained results are as follows. 1) On the point diagnosis, drainage management patterns are classifiable into three by arranging histories of drainage management in division work B. At the time of the local severe rain classified into the pattern 3, administrators' operations in drainage management are delayed and overflow behaviors may arise in division work B downstream frequently. 2) On the point diagnosis, the division mechanism of division work B was cleared. Discharge of a weir reacts to division water level change sensitively rather than an orifice. The relation between gate opening of canal G and coefficient of discharge can be denoted by a primary approximate expression. 3) On the line diagnosis, the overflow behavior in division work B downstream at the time of the rain of 2012/8/14 was verified.

Key words : canal system, division work, diagnosis of functions, hydraulic function, coefficient of discharge

数値標高モデルを用いた流出の場としての斜面の 平均勾配計測方法の考察

堀川直紀* 吉田武郎* 工藤亮治* 皆川裕樹* 名和規夫*

*水理工学研究領域水文水利担当

キーワード：斜面の平均勾配，交点法（ホートン法），谷線法，キネマティックウェーブ法（等価粗度法），
流出解析，表面流出，数値標高モデル（DEM），数値地形モデル（DTM），分布型流出モデル

I 緒言

キネマティックウェーブ法は流出解析モデルの一つである。これは係数分布型の流出解析モデルであり、地形や土地利用等の流域の情報を用いてモデル化を行うことができる。この方法においては、流域は斜面と河道から構成される。斜面部分ではマニング式等が用いられるときには、土地利用等から推定する等価粗度と地形図を用いて測定される斜面勾配によってモデルが構築される。

この方法は、流域の情報を利用する必要があるため、比較的面積の小さな流域への適用が主であったが、最近は大きな流域に適用されるようになってきた。これを可能としたのが国土数値情報等のデジタルデータの整備である。数値地図の整備は土地利用面積や標高等のような以前は地形図からしか得られなかった情報の広域における利用を可能とした。キネマティックウェーブ法の広域への適用においては、地形図ではなくこれらのデジタルデータから必要な要素（等価粗度，斜面勾配，河道勾配等）を求めることが多くなっている。

このうち、斜面勾配はデジタルデータのうち数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）等から求められる。しかし、キネマティックウェーブ法およびそれを含む分布型流出解析モデルによって採用される斜面勾配の計測方法は多岐にわたっており多様である。流域のモデルの策定において斜面勾配が十分注意を払われているとはいえない状況であり、キネマティックウェーブ法の確立において用いられてきた斜面勾配とDEM等から求めた斜面勾配の同質性は必ずしも確認が行われていない。これまでのキネマティックウェーブ法およびこれに関連する流出解析において得られてきた多くの知見を担保するには、DEM等によって得られる斜面勾配がこれまで用いられてきた斜面勾配と等質であることが必要である。また、流出解析モデルが土砂流出等斜面勾配との関係が強い現象と結びつけられる機会は多くなっており、この面からも斜面勾配の検討は重要であると考えられる。

本報告では、地形図を平均斜面の計測方法として用いられてきた交点法に基づいて、DEM等を用いた計測方法を提

案し、この過程で従来のキネマティックウェーブ法で用いられてきた平均斜面と整合性を維持するための留意点を考察する。

II 斜面勾配とキネマティックウェーブ法

2.1 斜面の平均勾配の計測

斜面の傾きは勾配もしくは傾斜角度として表記される。斜面の平均勾配および平均傾斜角度についてはこれまで多くの計測方法が提案されている。

2.1.1 地形図を用いた計測方法

地形図を用いた斜面の平均勾配の計測方法としては、谷線法，交点法（ホートン法），寺田法等がある。計測方法によって得られる値が異なる。

①谷線法

谷線法は、キネマティックウェーブ法に用いる斜面の平均勾配を求めるときに広く使われている方法である。まず、河道を定めて河道上に一定間隔で測点を定める。左右それぞれの斜面方向にある測点近くの谷に沿って当該河道が支配する斜面の流域界まで雨水の流線（谷線）を設定する。この谷線において、流線の勾配を計測する。この谷線の勾配を求める方法はいくつかあるが全長全高度差比（流線の両端の標高差 h を流線の長さ l で除した値）が簡便であるので用いられることが多い。区切られた河道において得た勾配を流線の長さで加重平均した値を斜面の平均勾配とすることが適切であるとされている。流線の勾配を全長全高度差比としたときは加重平均勾配 s は式(1)で与えられる。

$$s = \frac{\sum h}{\sum l} \quad (1)$$

②交点法

交点法（Horton, 1932）はホートン法ともよばれ、地形図上に適当な等間隔の縦横線を引き格子を作り、その格子線と等高線との交点総数 N を数えて平均勾配を測定する方法である。ほかの方法と比較して計測が容易でありまた機械的であるので、広い範囲の平均斜面を求めるときに用いられる。格子線上における隣接する等高線の距離を l 、これと等高線が交わる角を α で表せば、この2つの等高線間の法

線距離は $l \sin \alpha$ である(Fig.1)。これを全交点数(N)において平均すれば、それが等高線の平均距離 d である。

$$d = \frac{1}{N} \sum l \sin \alpha \quad (2)$$

N が十分大きく α の値は0度から90度までの間をランダムにとると仮定すると $\sin \alpha$ の期待値は $2/\pi$ となる。平均勾配は等高線高度間隔(D)を平均距離で除して得られるから、平均勾配 s は、式(3)で推定される。

$$s = \frac{D}{d} = \frac{\pi ND}{2 \sum l} \quad (3)$$

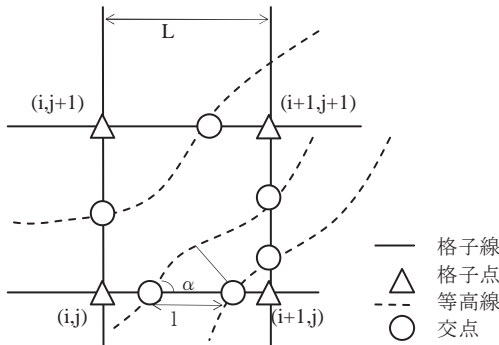


Fig.1 交点法

Intersection line method (Horton method)

③寺田法

寺田法(寺田,1930)は地形図に方眼を設定してその交点を中心に円を描き、その円内に含まれる等高線を数えて、次式で傾斜角 θ を求める方法である。この方法は、キネマティックウェーブ法における斜面勾配の測定には用いられることは少ないが、地すべりや水質の検討、傾斜区分の作成等広い分野で用いられている。また、その計測方法の特徴の検討も行われている。寺田法において平均傾斜角度(θ)は式(4)で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D}{RN} \right) \quad (4)$$

ここで、 D : 等高線の高度間隔、 R : 円の半径、 N : 円に含まれる等高線の本数

④その他の方法

傾斜角をそれぞれ方眼の交点を挟む複数の等高線の最短距離から求める松井法、方眼に含まれる等高線の本数から求める方眼法、等高線長さを計測して求める等高線延長法、等高線間の平均距離を計測して求める等高線面積法等の方法がある。

2.1.2 DEM等を用いた計測方法

斜面の勾配はこれまで、地形図に書かれた等高線(標高)から求められていた。地図情報のデジタル化において、標高は数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)もしくは数値地形モデル(DTM: Digital Terrain Model)として扱われる。DEM等は、平面を格子(四角形の集合)もしくはTIN(Triangulated Irregular Network: 三角形の集合)で表し、それぞれの点における標高を提供するものである。

DEMはDTMより広い分野において、それぞれの分野で異なった用語として使われている。例えば、DEMはDTMと同じく植生を取り除いた地表面を対象とする表現とされる場合もあり、また、植生上端を標高とする表現とされる場合もある。本報告が扱う範囲ではDEMの持つ意味の多様性は重要ではなく、DEMはより広く使われていることから、DEMとDTMをまとめてDEM等と呼ぶこととする。

DEM等を利用して最急勾配(S_s)は一般的に式(5)の様に表される。

$$s_s = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y} \right)^2} \quad (5)$$

ここで、 $\partial Z / \partial x$ はX軸方向の傾き、 $\partial Z / \partial y$ はY軸方向の傾きである。この最急勾配を一定範囲で平均して斜面の平均勾配が与えられる。

DEM等は平面的に離散した点の値を標高として与える。最急勾配を離散値から算定する方法としては、隣接する2点から求める方法、三角形の3点から求める方法、一つの格子の4(2×2)点から求める方法、田型格子の9(3×3)点から求める方法等がある。これらの方法には、メッシュ法(文献調査委員会,1972)や画像処理分野で用いられるオペレータ等が含まれる。また、周波数領域表現し、代表斜面長や平均斜面勾配を求める試みも行われている。

なお、斜面勾配と相関が高いことが示されている起伏量(ある範囲内の最高点と最低点の標高の差)は、地形図からの読み取りが簡易であることから、最長河川長で除して起伏比(起伏量比)が平均勾配として扱われてきた。DEM等を用いる場合においても、起伏量が平均勾配の指標として用いられることがある。

2.2 平均勾配計測における課題

まず、キネマティックウェーブ法の概要及び最近の適用状況を確認して、この流出解析法において必要な平均勾配計測方法の課題を明らかにする。

2.2.1 キネマティックウェーブ法の概要

流出解析モデルのうち、水の流れを基礎式に基づいて解析する水理学的なモデルは雨水流法と呼ばれている。雨水流法は、現象の物理性を考慮したモデルと見なすことができる。雨水流法には、低平地においてはダイナミックウェーブを前提とする低平地タンクモデル等がある。斜面勾配が比較的急であるときには摩擦勾配を斜面勾配と等しいと見なし、下流側の条件が上流側に及ばないとするキネマティックウェーブを前提とするモデルが構築されている。その代表的な流出解析モデルがキネマティックウェーブ法(末石(1955), Iwagaki(1955))である。

キネマティックウェーブ法は、等価粗度法とも呼ばれ、その適用手法や適用対象によっては表面流出法、中間流出法または特性曲線法とよばれることがある。この流出解析モデルは、流域を複数の河道とそれに隣接する矩形斜面から構成されるものと見なし、この上を雨水がキネマティックウェーブ流れで斜面流および河道流として流下するとし

て流出量を計算する。斜面流と河道流はそれぞれ運動方程式と連続式によって式(6)～式(9)の通り記述される。

(斜面流)

$$h = kq^p \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_E \quad (7)$$

ここで、 h は斜面水深、 q は斜面単位幅流量、 r_E は有効降雨強度、 k, p は斜面流定数、 t は時間、 x は距離である。

(河道流)

$$A = KQ^P \quad (8)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_E \quad (9)$$

ここで、 A は河道流水断面積、 Q は河道流量、 q_E は河道単位長さ流入量（斜面末端の単位幅流量）、 K, P は河道流定数である。

河道流の定数は河道の縦横断面等から推定する。斜面流において運動方程式は表面流においては Manning 形式もしくは層流形式、中間流においてはダルシー形式等が用いられる。 $p=3/5$ の Manning 形式が採用されるとき、斜面流定数 k は式(10)で与えられる。

$$k = (N / \sqrt{s})^p \quad (10)$$

ここで、 N は等価粗度、 s は斜面勾配である。等価粗度は斜面の土地利用に応じた値が求められている。このため、キネマティックウェーブ法は計算流量が合うように定数を決めることもあるが、流域の情報（土地利用および斜面勾配）からのみモデル化することができる。このため、溜池小流域等の流量観測値が欠落した流域や農地造成等改変される流域における将来流出特性の変化予測等に用いられてきた。

一般に、キネマティックウェーブ法の適用においては本来複雑な流域は単純化して扱われる。単純化すると斜面長は長くなり、河道は短くなる。一方で、等価粗度は斜面長によって異なることが示されている（角屋ら、1978）ので、適用における流域の単純化とこのとき用いる等価粗度が求められたときの流域の単純化は一致していなければならない。このとき、流域の単純化の程度は平均斜面長もしくは河道と見なす河川の次数等によって表される。

なお、地表流や中間流にキネマティックウェーブ流れを想定したモデル化は数多く行われており、これらは広くキネマティックウェーブ法もしくはキネマティックウェーブモデルと呼ばれる。しかし、斜面の捉え方がモデルによって異なるため、斜面勾配の検討を主題とする本報告においては、このうち矩形斜面と河道から構成されるモデルに限って「キネマティックウェーブ法」と呼び他の方法と区別する。

2.2.2 キネマティックウェーブ法の最近の適用

キネマティックウェーブ法の様な係数分布型の流出解析モデルは流域の情報を必要とすることから比較的小さな流

域に適用されてきた。この流出解析モデルに必要な平均勾配は地形図から上述の方法、特に谷線法及び交点法を用いて計測されてきた。

一方、大流域においては、過去の観測流量を再現できるように流域において定められた一組の係数を有する集中型の流出解析モデルがその適用の容易性から用いられてきた。最近では、大流域においても降水や流出特性の空間的分布特性を反映するために、流域を分割してそれぞれの細分流域でのモデル化し、それらを併せて流域の流出を解析する試みが行われるようになった。細分流域のモデル化には集中型の流出解析モデルが用いられることもあるが、最近では地表面、地下水帯、その中間の土壌帯等の様に層状に分割してそれぞれに物理性を考慮したモデルを用いられることが多い。

この様な流域を平面的に分割して流出解析を行うモデル（いわゆる分布型流出解析モデル）は数多く提案されている。キネマティックウェーブ法は表面流出および中間流出において物理的に水の流下を追跡することを試みた流出解析方法である。このため、流域を分割した多くの分布型流出解析モデルの地表面や中間流が発生する土層のモデルに採用されている。

キネマティックウェーブ法は大きな流域に適用されるようになってきた。これを可能としたのが国土数値情報等のデジタルデータの整備である。数値地図の整備は土地利用面積や標高等のような以前は地形図からしか得られなかった情報を広域において利用を可能とした。キネマティックウェーブ法の広域への適用においては、地形図ではなくこれらのデジタルデータから必要な要素（等価粗度、斜面の平均勾配、河道勾配等）を求めていることが多くなっている。

キネマティックウェーブ法において DEM 等を用いた斜面の平均勾配を用いた事例はいくつか見られる。しかし、斜面の平均勾配の計算方法についてはあまり重要視されておらず、計測方法が示されていない文献も多い。その中で DEM 等を用いた斜面の平均勾配の計算方法を提案した事例としては以下に示す報告がある。

東(2006)は、DEM を用いて谷線法を流域に適用することを試みた。面積 310km² の流域を対象とし、河道を 25,000 分の 1 の地形図から特定し、斜面勾配を 250m メッシュ数値標高データから求めた擬河道網をもとに支流流域分割を行った。その上で、支流流域における斜面勾配を擬河道網を用いて谷線法で求めた。佐藤ら(2009)は、分布型流域環境評価モデルの適用において、3 次の標準メッシュを一つの支流流域とする流域分割を行った。つまり、1km 四方のメッシュを長さ 1km の 1 本の河道とその両側の矩形斜面（幅 1km、斜面長 500m）から構成されるものとした。斜面では河道の落水方向に対して直角に水が流れると仮定して、落水方向と直角方向（斜面方向）の最高標高と最低標高から最急勾配を DEM 等の解像度(50m)単位で算出し、その平均値で斜面の平均勾配とした。吉田ら(2012)は、同様に 3 次標準メッシュを一つの支流流域とする流域分割を行い、そのメッシ

メッシュ内の標高(解像度 50m)の標準偏差をとり、その2倍の値を斜面長(この場合は 500m)で除してこれを、平均斜面勾配とした。

上記の方法はいずれも流域分割において勾配及び斜面長が一樣である斜面を持つ矩形の支流域を採用したが、流域を勾配及び斜面長とも一樣でない不定形の支流域に分割してキネマティックウェーブ流れで流れを追跡する研究も見られる。市川ら(2001)は流域を斜面素片のつながりとしてモデル化し、斜面勾配は斜面素片の上下流端(隣接する2点)から計算している。この方法は OhyMoS(水文モデル構築システム: Object-oriented Hydrological Modeling System)上で構築されている多くの流出解析モデルに用いられている。石塚ら(2008)は起伏比に相当する値(起伏量をメッシュ幅で除した値)を平均勾配としている。これらの流出解析モデルでは狭義のキネマティックウェーブ法と斜面の扱い方が異なることに注意が必要である。

2.2.3 平均勾配計測方法における課題

キネマティックウェーブ法の確立過程においては計測された斜面の平均勾配を前提として、多くの検討が行われ、適用方法が確立されてきた。

例えば、キネマティック法に用いられる斜面の等価粗度は、これまで土地利用毎に目安となる値が計測されている。キネマティック法を用いて流出解析を行う場合には、斜面の土地利用を特定し、これから適用する等価粗度を決定する。これらの等価粗度の計測値は、実験水路において得られたこともあるが、その多くは 1960 年代から 70 年代にかけて実際の斜面における流出量の観測およびそのときの斜面長、斜面の平均勾配から計算により得られている。

斜面の平均勾配は計測方法によっても異なってくるので、これらの蓄積された知見を継承するには、これまで使われてきた平均勾配と等質のものを今後も用いていく必要がある。しかし、DEM 等を用いた斜面勾配の計測方法の多くは、これまで用いてきた方法との整合性が必ずしも確認されていない。このため、従来の方法と整合性を持った斜面の平均勾配を DEM 等から計測する方法が求められている。

III 平均勾配計測方法とその評価方法

3.1 平均勾配計測方法の提案

従来から用いられていた地形図上で勾配や傾斜角を求める方法の多くを DEM 等を用いた方法に適用するには工夫が必要である。但し、これらの方法のうち交点法は広域の平均勾配を機械的に求めることを目的に提案されたものであることから、比較的数値地形モデルを利用することが容易である。また、キネマティックウェーブ法の斜面勾配を計測法として谷線法とともに用いることとされてきた(角屋, 1980)。このため、本報告では地形図を用いていた交点法に基づいて数値地形モデルを用いる計測方法を検討することを試みる。

対象範囲において間隔(解像度) L の正方格子で与えら

れた DEM 等の標高値を X 軸方向 i ($1 \sim I$)、 Y 軸方向 j ($1 \sim J$) の番号を用いて h_{ij} とする(Fig.1)。この対象範囲の平均勾配 s を次の手順で求めることとする。

手順1: 適当な等高線間隔 D を決め、すべての標高値 h_{ij} を D で除して小数点以下を切り捨てた整数値 h'_{ij} を得る。

手順2: X 方向または Y 方向に隣接する2点がいずれも陸域にあり標高値を持つ場合はこの組み合わせは有効と見なし、2つの整数値の差の絶対値を交点法において隣接する格子点を結ぶ格子線が等高線と交わる交点数とする。例えば、Fig.1において点(i, j)と点($i+1, j$)の標高がそれぞれ 325m, 295m で等高線高度間隔が 20m であるならば、この2点を結ぶ格子線上にある交点数は2と求められる。

手順3: この各格子線における交点数を対象範囲で合計した値を総交点数 N とする。

$$N = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} |h'_{i,j} - h'_{i,j+1}| + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I-1} |h'_{i,j} - h'_{i+1,j}| \quad (11)$$

手順4: 有効な組み合わせ数 n に格子間隔 L を乗じた値は交点法における隣接する等高線の間隔の合計 Σl と見なされるので、これと総交点数 N から交点法に基づき次式で平均勾配を算出する。

$$s = \frac{\pi ND}{2 nL} \quad (12)$$

交点法においては格子点上に交点为重なるとき(格子点を等高線が横切るとき)の交点の数え方に注意が必要である。対象範囲の内側の格子点上に交点为重なるときには、 X 方向および Y 方向の両方向について計上する必要があるため交点が2個あると見なし、上述した計算方法においても同様に計上される。一方、交点法においては対象範囲外枠の格子点上に交点为重なるときは交点を1.5個と見積もるのが適当であるが、上述した計算方法では1個と過少に見積もる場合と2個と過大に見積もる場合が生じるが、これは相殺されるものとする。

地形図から読み解くときの交点法と、上述した数値地形モデルを用いた計測方法で取扱が大きく異なる場合は、隣接する交点を結ぶ格子線に同じ等高線が2回以上横切るときに生じる。ここに示した方法では、このときの交点の数は0個(偶数回横切の場合)または1個(奇数回横切の場合)として計上される。格子に対して谷または尾根が Fig.2(a)の様に入り込んでいる場合がこれに当たる。但し、同じ規模の谷または尾根がある場合でも Fig.2(b)の様に入り込んでいる場合は、地形図による場合においても提案した方法においても同じ平均勾配を得る。DEM を使って格子4点から求める方法の多くではこの谷の横断方向の勾配は検出できない。なお、一つの格子に閉じた等高線が生じた時(Fig.2(c))では、地形図で計測する場合、提案した方法とともに交点法ではその勾配を検出しない。

以上の理由から等高線の形状によっては地形図から算出される平均勾配と比較して、提案した方法で算出される平均勾配は相対的に小さくなる。なお、DEM を使って格子4

点から求める方法の多くではさらに得られる平均勾配は小さくなる。

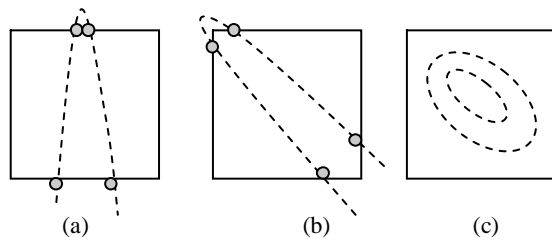


Fig.2 等高線と格子
Contour line and grid

実線：格子線，点線：等高線，点：交点

3.2 格子間隔と等高線高度間隔

提案した平均勾配計測方法は、2つの係数を含む。一つは格子間隔 (L) であり、もう一つは等高線高度間隔 (D) である。これらの係数は、本来の交点法に用いられているほか、寺田法等の他の傾斜や勾配の計測方法にも用いられている。これらの係数の影響は計測方法によってその特性は異なるが、いずれの計測方法においてもそれぞれの係数にどのような値を用いれば良いのかを明確に示した例は少ない。

大村ら(1976)は、寺田法において等高線高度間隔に関係の深い縮尺および格子間隔が計測される平均傾斜との関係を検討し、小縮尺(等高線間隔が大きい)と平均傾斜が小さく見積もられること、地形が複雑な場合は等高線の本数に応じて格子を小さくすべきこととした。また、角屋・福島(1980)は等高線延長法において等高線高度間隔を変えて平均勾配を算出し、高度間隔が50mでは値が小さく計測されることがあることを示した。

交点法においては、等高線高度間隔10mで格子間隔100m程度を用いて適用した事例が見られる(藤田(1976), 田中・鈴木(2007))が、格子間隔を粕谷(1976)のように2kmとした事例もある。吉越(1976)は淀川流域を対象に格子間隔4kmを用いて支川流域毎に平均勾配を求めたが、大きな差異が出なかった、つまり支川流域毎の特性を表現できなかったとしている。

DEMによる斜面勾配の計測においては標高値の精度や格子間隔によって値が変化することが指摘されている。例えば、岩橋(1994)は国内4ヶ所の山地で格子間隔を変えて傾斜を測定し、格子間隔が小さいほど計測された傾斜が急であることを示した。

これらの値の違いは、誤差またはばらつきによるものと扱われることが多い。しかし、地表面は様々なスケールの斜面が複合して形成されており、異なる格子間隔によって得られた値は、それぞれ異なるスケールの斜面の勾配を表していると考えられる。一方、キネマティックウェーブ法の適用においては複雑な地表面を単純化することによるモデルの集中化が行われる。このとき流出解析モデルで用いられる斜面勾配は、単純化された地表面の斜面勾配でな

ければならない。

このような単純化された斜面の平均勾配の計測に必要な等高線高度間隔や格子間隔の値は知られていない。このため、本報告ではキネマティックウェーブ法のモデル化において用いられてきた平均勾配と同質の値を与えることができる等高線高度間隔と格子間隔を提案した計測方法において明らかにする。なお、ここで得られた知見は提案した計測方法だけではなく、他のDEM等を用いた斜面勾配法においても利用が可能である。

3.3 評価方法

提案した平均勾配計測方法の特性および適合性を評価するために、検討対象地区を定めてこれを適用する。適用においては、係数である格子間隔および等高線高度間隔を変化させ、それが計測される平均勾配への影響を明らかにする。また、適合性を検討するために、検討対象地区内の複数の地点で、従来用いられてきた平均勾配計測方法を適用し、それと比較する。

検討対象範囲は標準地域メッシュの第1次メッシュ5640とする。これは、20万分の1地勢図福島にほぼ相当し、東部には阿武隈山地、中央部には郡山盆地等、北西部には奥羽山脈が含まれている。

DEM等は1m単位で地点標高が与えられている数値地図(50mメッシュ標高データ)を用いる。なお、隣接する地点標高間の距離は一律50mと見なす。

キネマティックウェーブ法は河道とそれに隣接する斜面を構成要素(支流域)とする。この最も小さい構成要素の大きさに関して、小尻ら(1998)は、河川次数3以上河川がメッシュ内に1本出現するのは1kmメッシュであるとしている。このため、斜面の平均勾配を求める一つの支流域は、緯度差は30秒、経度差は45秒で、1辺の長さは約1kmである第3次メッシュとする。検討対象範囲には6400の第3次メッシュがあるが、このうち水面等に該当する190メッシュを除く6210メッシュを検討対象支流域とした。

キネマティックウェーブ法における平均勾配の計測においては、これまで谷線法が用いられた例が多い。また、谷線法の適用においては、「河道」が定義されれば、他の方法の適用において決定が必要な格子間隔や等高線高度間隔、縮尺等の概念を必要としない。このため、提案する平均勾配計測法の結果を評価する計測法として谷線法を採用する。

IV 結果

4.1 格子間隔と斜面勾配

格子間隔と斜面勾配の計測値の関係を明らかにするために、提案した計測方法を用いて等高線高度間隔を1mに固定し、格子間隔を50m, 100m, 150m, 200m, 250mと変えて、メッシュの斜面平均勾配を計測した。検討対象全メッシュ(6210メッシュ)における斜面平均勾配の平均値をFig.3に示す。

斜面勾配の計測値は格子間隔が大きくなるにつれて小さ

くなる。これは、格子間隔が大きいと、それより小さな谷筋や尾根筋の勾配を計測できないことによると考えられる。格子間隔 50m の計測値を 1 としたときの格子間隔 100m の計測値は 0.67, 同じく 150m で 0.53, 200m で 0.45, 250m で 0.40 である。なお、等高線高度間隔を 5m および 20m と固定して同様の方法で得た計測値においても、この比率はほとんど変化しなかった。

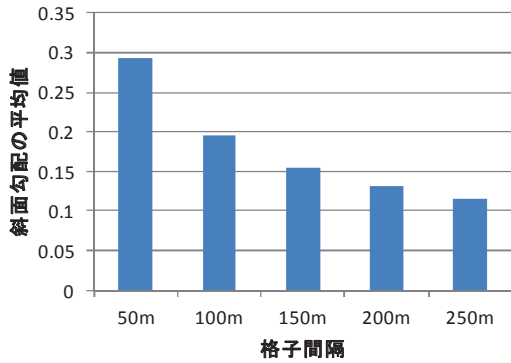


Fig.3 格子間隔と斜面勾配の平均値
Grid interval and average of the mean slope

4.2 等高線高度間隔と斜面勾配

等高線高度間隔と斜面勾配の関係を明らかにするために、提案した計測方法を用いて、格子間隔を 50m を固定し、等高線高度間隔を 1m, 2m, 5m, 10m, 20m, 50m と変化させて、メッシュの斜面平均勾配を計測した。検討対象全メッシュの斜面平均勾配の平均値を Fig.4 に示す。

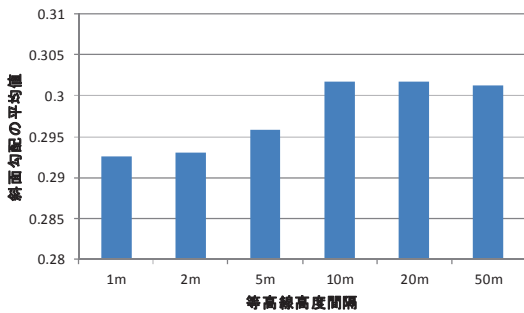


Fig.4 等高線高度間隔と斜面勾配の平均値
Contour interval and average of the mean slope

斜面平均勾配の検討対象メッシュにおける平均値は、等高線高度間隔 1m で最少、10m で最大であり、後者の値は前者の値の 1.031 倍であった。等高線高度間隔が斜面の平均勾配の計測値に与える影響は比較的小さいと言える。なお、勾配が小さいメッシュほどこの傾向は強い。

次に、検討対象メッシュにおける斜面平均勾配の変動(偏差二乗和)を Fig.5 に示す。等高線高度間隔が 50m の場合の変動は他と比較して大きい。また、等高線高度間隔 20m による平均値は 10m による平均値とほぼ等しいにもかかわ

らず、変動は大きい。真の値もしくは計測の偏りが明らかでないため、変動を直接計測のばらつきとは見なせないが、おおむね等高線高度間隔を 20m 以上とすることは推定のばらつきを大きくする傾向があるといえる。

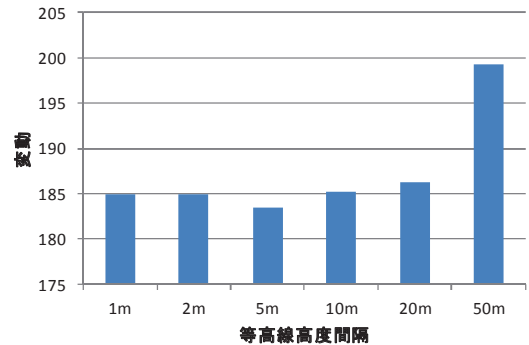


Fig.5 等高線高度間隔と斜面勾配の変動
Contour interval and average of the sum of squares

4.3 谷線法による計測値との比較

検討対象メッシュのうち、斜面の平均勾配がおおむね 0.1 以上となる 10 の標本メッシュを選定し、谷線法で平均勾配を計測し、これを提案した計測方法による計測値と比較する。メッシュの選定は格子間隔 50m—等高線高度間隔 1m による平均勾配の値が 0.1 以上のメッシュを平均勾配の大きさにより 10 に組み分けし、それぞれの組から一つのメッシュを定めることによって行った。

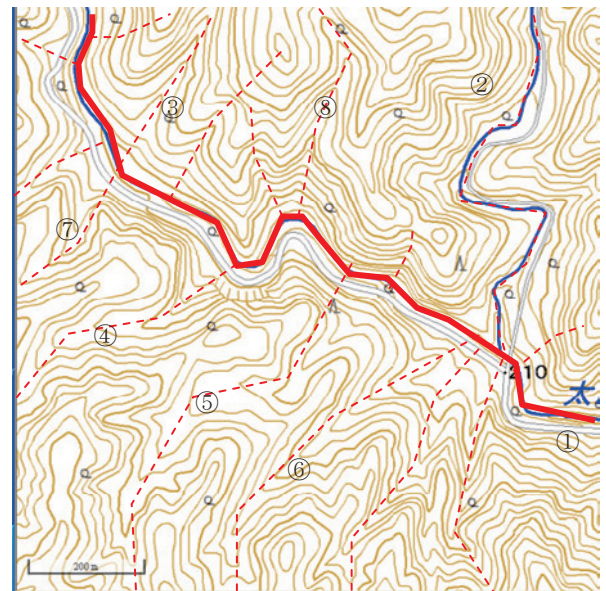


Fig.6 谷線法による勾配計測
Arrangement of valley lines

注) 実線は河道, 点線は谷線。標本メッシュ 8

谷線法による計測においては、2 万 5 千分の 1 の地形図を用いた。河道は標本メッシュに原則 1 本とし、測点間隔は約 200m, 用いる高度差は全高度差, 平均勾配は斜面長に

よる重み付き平均とした。谷線の配置の一例を Fig.6 に示す。この標本メッシュには 2 万 5 千分の 1 の地形図上の河川が 2 本あるが、このうち主河川（図中番号①）を河道とし、他方（図中番号②）は谷線のうちのひとつとした。

谷線法による計測結果（平均勾配および平均斜面長）を標本メッシュの情報とともに Table 1 に示す。

Table 1 谷線法による勾配計測
Measurement of slope on valley line method

標本番号	対象メッシュ		計測結果	
	メッシュ番号	地形図名	平均斜面長(m)	平均勾配
1	12-72	磐梯熱海	631.2	0.07
2	47-68	磐城鹿島	263.8	0.09
3	06-61	上川内	443.4	0.14
4	25-74	上移	377.9	0.18
5	44-72	月館	329.8	0.21
6	24-38	岩代小浜	398.9	0.23
7	17-11	浪江	398.2	0.28
8	26-99	下津島	451.1	0.33
9	50-26	白布温泉	658.3	0.45
10	37-70	原町	505.5	0.59

注)メッシュ番号は、第2次メッシュ番号-第3次メッシュ番号。第1次メッシュはいずれも 5640。地形図名は第2次メッシュに相当する 2 万 5 千分の 1 地形図名

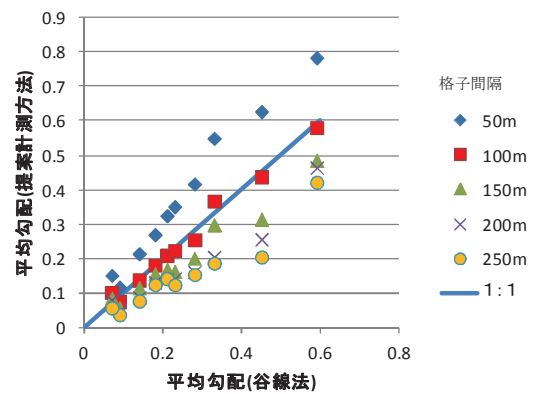
1km 四方である第 3 次メッシュを矩形斜面と中央配置した河道の組み合わせとしてモデル化するときには、長さ 1km の河道とその両側の斜面（幅 1km 斜面長 500m）として単純化を想定するが、実際には斜面長はそれぞれのメッシュである程度ばらつきを持っており、平均斜面勾配長も必ずしも 500m に一致していない。

標本メッシュにおける提案した計測法による平均勾配と谷線法により計測した平均勾配を比較して Fig.7 に示す。なお、Table1 において標本番号は谷線法による平均勾配の値の順序としているので、Fig.7 に示されている一連の値は左から標本メッシュ 1、標本メッシュ 2・・・の計測値である。

ここでは、等高線高度間隔 1m による計測値と等高線高度間隔 20m による計測値を示したが、傾向はいずれも同じである。提案方法による計測値はすべての格子間隔の場合においておおむね谷線法による計測値と比例している。また、谷線法による値と比較して、格子間隔 50m による値はおおむね過大、格子間隔 150m 以上による値は過少である。格子間隔 100m の値はおおむね勾配 1 の直線上に配置されている。このため、交点法に基づいた平均勾配計測方法においては、1km メッシュを河道-矩形斜面の組み合わせと見なすときの平均勾配の計測においては、格子間隔を 100m とすることが適切であると考えられる。

標本メッシュにおいて提案した計測法により求めた計測値と谷線法により求めた計測値での残差二乗和を、係数である等高線高度間隔（1m, 2m, 5m, 10m, 20m, 50m）と格子間隔（50m, 100m, 150m, 200m, 250m）のすべての組み合わせについて Table 2 に示す。

(a)等高線高度間隔 1m



(b)等高線高度間隔 20m

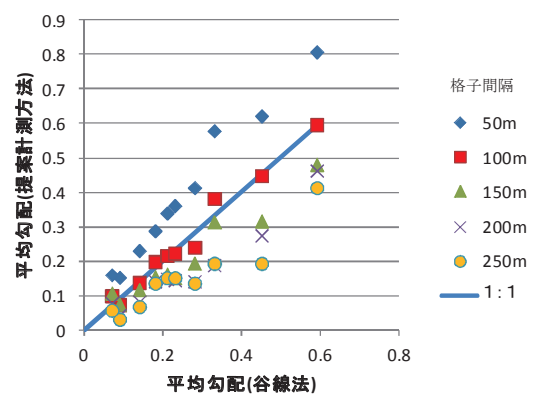


Fig.7 提案した計測方法と谷線法による平均勾配の比較
Mean slope obtained two methods

Table 2 残差二乗和
Sum of square deviation and coefficients

	格子間隔	格子間隔				
		50m	100m	150m	200m	250m
等高線高度間隔	1m	0.1846	0.0035	0.0452	0.1030	0.1512
	2m	0.1862	0.0037	0.0451	0.1028	0.1510
	5m	0.1934	0.0035	0.0428	0.1012	0.1494
	10m	0.2185	0.0051	0.0417	0.0988	0.1467
	20m	0.2236	0.0059	0.0483	0.1039	0.1562
	50m	0.2694	0.0169	0.0501	0.1106	0.1883

格子間隔を 100m としたときの残差二乗和はいずれの等高線高度間隔の場合でも他の格子間隔による値より小さい。等高線高度間隔が小さいと残差二乗和は小さくなりここには示していないが相関係数も大きくなるが、等高線高度間隔が 5m より下回ると残差二乗和はあまり変わらない。

V 考察

5.1 斜面長と格子間隔

上記の様に概ね格子間隔を 100m による値が谷線法の値

との差が小さくなるとしたが、標本メッシュによってはかならずしもそうではない。標本メッシュ1は格子間隔200mの値が適切であり、標本メッシュ2では格子間隔50m(等高線高度間隔1mの場合)が適切な値である。標本メッシュ1も標本メッシュ2も平均勾配が小さい(谷線法計測値でそれぞれ0.07, 0.09)ことが原因である可能性があるが、格子間隔200mの値が適合する標本メッシュ1の平均斜面長は631.2mと長く、格子間隔50mの値が適合する標本メッシュ2の平均斜面長は263.8mと短いことは、平均斜面長と格子間隔の関係を示唆すると考えられる。平均斜面長が658.3mと最も長い標本メッシュ9は格子間隔100mの値が適合するので、この結果だけでは平均斜面長と格子間隔の関係があるとは言えない。そこで、ある範囲で平均斜面長が変化したときの影響を検討することとする。

検討対象とするのは標本メッシュ8である(Fig.6)。ここでは地形図上に河川は2本あるが、河道1本として平均斜面長と平均勾配を計算した。この標本メッシュを対象として河道を増やして平均斜面長と平均勾配を求める。河道は当初谷線と定義されていた流路を斜面勾配が小さい順に河道として採用する。採用された順はFig.6上で○囲み番号で示している。追加された河道ではそれぞれ谷線を同様の方法で発生させ(煩雑になるため追加河道の谷線は図中には示さない)、平均斜面長と平均勾配を計算し、その結果をTable 3に示す。平均勾配は平均斜面長が短くなるにつれて大きくなっている。すなわち、キネマティックウェーブ法の適用において流域の単純化の度合いが高くなるほど、平均勾配は小さくなる。

Table 3 河道数と平均勾配

The number of rivers and the mean slope

河道数	平均斜面長(m)	平均勾配
1	451.1	0.33
2	347.5	0.41
3	339.6	0.44
4	316.4	0.47
5	250.1	0.49
6	217.2	0.52
7	215.4	0.53
8	186.7	0.56

平均斜面長と平均勾配の関係をFig.8に示す。黒実線は8つの計測値に対する回帰線である。青実線はこの標本メッシュにおける格子間隔50mによる平均勾配の計測値0.55と同じく格子間隔100mによる値0.37を示す(いずれも用いた等高線高度間隔は1m)。これらの値が回帰線と交わるときの斜面長を求めるとそれぞれ191.1m, 416.1mである。このことから、この標準メッシュにおいては格子間隔50mによる計測値は平均斜面長191.1mの平均勾配に相当し、格子間隔100mによる計測値は平均斜面長416.1mの平均勾配に相当すると考えられる。平均斜面長の格子間隔に対する比をとると、それぞれ3.8, 4.2である。

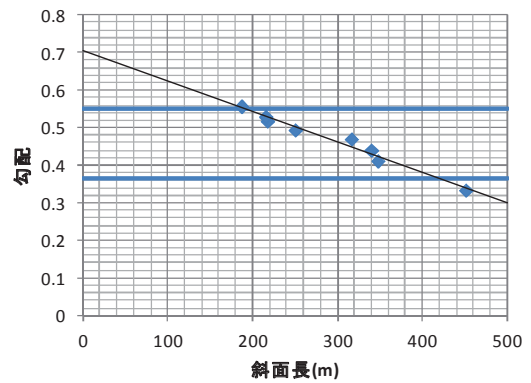


Fig.8 平均斜面長と平均勾配

The mean slope and its length

流域には様々な長さや方向の斜面が複雑に入り組んでいる。提案した平均勾配の計測手法においては、格子間隔のおおむね4倍の長さの斜面の平均勾配を計測していると思えることができると考えられる。検討対象範囲に限られており(第1次メッシュ5640)、対応する斜面長も200~500mに限られているが、この範囲では同様のことが他の方法、例えば地形図から読み解く本来の交点法やメッシュ法の適用にもあてはまると考えられる。但し、本来の交点法による平均勾配は提案した方法による値より少し大きくなることから、適切な斜面長/格子間隔はここに示した値より少し小さくなると考えられる。また、メッシュの4点の値から勾配を求めるメッシュ法には、いくつかの種類があるが交点法や提案した手法より平均勾配が少し小さくなると思えるので、適切な斜面長/格子間隔はここに示した値より少し大きくなると思える。

5.2 平均勾配の比較

国土数値情報は、第3次メッシュ毎に最大傾斜角度、最小傾斜角度、平均傾斜角度を提供している。これらは、当該第3次メッシュに含まれる第5次メッシュにおいて、隣接する2点から傾斜角度を求め、それぞれ、最大値、最小値、平均値を示したものである。メッシュの標高値利用の容易さからこの傾斜角度がいろいろな分野で用いられている。

これらの傾斜角度から得られた勾配と提案した勾配計測方法を用いて得た勾配を比較する。検討範囲である第1次メッシュ5640において国土数値情報は6203の第3次メッシュの傾斜角度を求めているので、これらのメッシュにおいて比較する。なお、平均勾配は等高線高度間隔1m-格子間隔100mにより算出した値を比較の対象とした。

相関係数および比較対象メッシュの平均値をTable 4に示す。また、最大傾斜角度から得た勾配と算出した平均勾配を比較してFig.9に示す。

提案した斜面の平均勾配計測方法を国土数値情報の値と比較すると平均傾斜角度より傾きは大きく最大傾斜角度とほぼ同じ傾きとなっている。また、勾配が緩やかなメッシ

ユでの傾きが大きい。なお、平均傾斜角度は格子間隔 250m で求めた平均勾配とほぼ同じ傾きであるが、相関係数は 0.84 と格子間隔 100m の値とあまり変化しない。

Table 4 3次メッシュの平均勾配の比較

Various mean slopes of grid square		
	平均勾配の 平均値	相関係数
提案計測方法	0.195	—
平均傾斜角度 (勾配表記)	0.121	0.85
最大傾斜角度 (勾配表記)	0.208	0.84
標準偏差による 方法	0.154	0.88

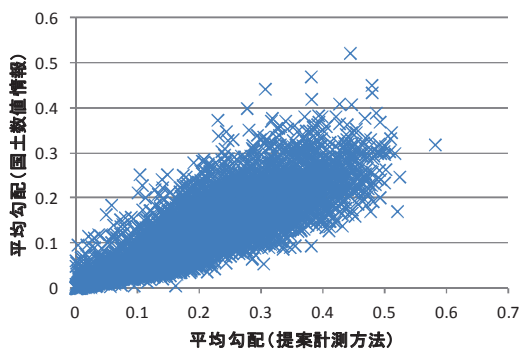


Fig.9 3次メッシュの平均勾配
Comparison of mean slopes obtained two methods

吉田ら(2012)が用いた標準偏差から平均勾配を求める方法との比較も併せて Table 4 に示す。提案した計測方法の値より小さいが相関係数は国土数値情報の値より高い本提案方法と相対的に適合性は高いと言える。

VI 結 言

キネマティックウェーブ法の適用において用いられる平均勾配の計測では、2つの要素に留意する必要がある。一つは計測の対象斜面である。キネマティックウェーブ法のモデル化においては、様々なスケールの斜面から構成されている複雑な流域を単純化して扱う。単純化の程度、言い換えれば対象斜面によって斜面平均勾配の値は異なる。

留意すべきもう一つの要素は計測方法である。観測流量データを用いないキネマティックウェーブ法のモデル化においては、係数の一つである等価粗度の値は土地利用毎に示された標準値等が用いられる。等価粗度の標準値は、流量データが得られた流域においてハイドログラフと斜面平均勾配等から算出されている。計測方法によって得られる値は異なるので、適用流域における斜面勾配の計測方法は、等価粗度の標準値を算出したときに用いた計測方法と同じ値を算出できることが必要である。流出解析においては斜面勾配の計測方法として谷線法が広く用いられてきた。広

域における平均斜面を求めるには数値標高モデル (DEM) 等を用いるのが容易であり、それに対応した多くの計測方法が提示されているが、従来の谷線法との整合性について確認されていない。

本報告では、地形図上で用いられてきた交点法を数値標高モデル (DEM) 等に適用する手順を提案した。このとき、計測方法において用いられる格子間隔および等高線高度間隔の適切な値を推定するために、これらの値を変えて平均勾配を求め、谷線法による計測値と比較し、検討対象範囲 (福島周辺) において次の結果を得た。

1) 流域を 1km メッシュの支流域に分割し、それぞれの支流域を 1km の長さの河道とその両側の一樣勾配を持つ矩形斜面 (斜面幅 1km、斜面長 500m) から構成されると単純化したときには、提案した計測方法において 100m の格子間隔、言い換えれば 100m 解像度の DEM 等を用いると、谷線法によって得られる計測値に近い値が得られる。

2) 単純化の程度に応じて、提案した計測方法において用いるべき格子間隔は異なる。単純化の程度を斜面長で表すと、適切な格子間隔 (DEM 等の解像度) はおおむね斜面長の 1/4 程度である (斜面長が 200m~500m の場合)。なお、提案した計測方法は本来の交点法より勾配を小さく見積もるため、地形図を用いた交点法における適切な格子間隔は、上記の値より少し大きくなる。

3) 交点法に基づいて提案した計測方法においては、等高線高度間隔、言い換えれば DEM 等の標高測定単位は 10m を越えないことが望ましいが、それより小さくしても顕著な精度向上は確認されない。

ここで示された斜面長格子間隔比は、キネマティックウェーブ流れを想定する流出解析モデルにおける斜面勾配を DEM 等を用いて得るときに必要な解像度等を定めるときに参考となる。しかし、検討対象範囲が一部に限られていることから、この関係が成立する範囲を特定する必要がある。また、今回は交点法に基づいて提案した計測方法のみを評価対象としたが、他の DEM 等を用いる方法およびその改良を含めて、平均勾配計測方法を策定していくことが望まれる。

参考文献

- 文献調査委員会 (1972) : 地形の計量化, 土木学会誌, 57(8),61-70
 藤田崇・平野昌繁・波田繁熙 (1976) : 徳島県川井近傍の地すべりの地質構造規制, 地すべり, 13(1),25-36
 東博紀 (2006) : 平成 16 年 7 月新潟・福島および福井災害における豪雨・洪水氾濫特性, 防災科学技術研究所主要災害調査, 40,79-92
 Horton,R.E. (1932) : Drainage basin characteristics, *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1),350-361
 市川温・村上将道・立川康人・椎葉充晴 (2001) : 流域値系の新たな数値表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, 691,II-57,43-52
 石塚正秀・江種伸之(2008) : 農業用水取水ルールを考慮した分布型水文流出モデルによる紀の川流出解析, 水工学論文集,

52,391-396

Iwagaki, Y., (1955). Fundamental Studies on the Runoff Analysis by Characteristics. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 5(10) 1-25.

岩橋純子 (1994) : 数値地形モデルを用いた地形分類手法の開発, 京都大学防災研究所年報, 37,B-1,141-156

角屋睦 (1979) : 流出解析法 (その 1) 1. 雨水流出現象とその計測・解析, 農業土木学会誌, 47(10),811-821

角屋睦 (1980) : 流出解析法 (その 6) 3. 雨水流法—表面流出モデルによる洪水流出解析, 農業土木学会誌, 48(6),419-425

角屋睦・福島晟 (1974) : 山地の地形こう配測定法に関する一考察, 農業土木学会大会講演会要旨集, 114-115

角屋睦・福島晟 (1978) : 丘陵山地モデルと洪水流出モデル, 京都大学防災研究所年報, 21B2,219-233

粕谷健二・平野昌繁・横山康二・奥田節夫 (1976) : 山腹崩壊と地形特性に関して—昭和 50 年台風による高知県下の山腹崩壊を対象として, 京都大学防災研究所年報, 19B,371-383

小尻利治・東海明宏・木内陽一 (1998) : シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, 41B2,119-134

大村寛・高橋敏男 (1976) : 地形解析による山崩れの研究 (I) — 斜面の傾斜と山崩れの関係, 新砂防, 99,5-13

佐藤嘉展・森 英祐・浜口俊雄・田中賢治・小尻利治・中北英一 (2009) : 気候変動に対する先行適応のための流域スケールでの洪水および渇水リスク評価, 京都大学防災研究所年報, 52B,573-586

末石富太郎 (1955) : 特性曲線法による出水解析について—雨水の流出現象に関する水理学的研究 (第 2 法) —, 土木学会論文集, 29,74-87

田中基樹・鈴木啓助 (2007) : 山岳地の渓流水質形成に及ぼす流域平均傾斜の影響, 日本水文学会誌, 37(3),115-121

寺田寅彦 (1930) : 地形図に於ける傾斜勾配分布の統計的研究方法に就いて, 地理学評論, 6(7), 653-661

吉田武郎・増本隆夫・工藤亮治・谷口智之・堀川直紀 (2012) : 広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化, 農業農村工学会論文集, 277, 9-19

吉越昭久 (1976) : 淀川流域の水収支, 奈良大学紀要, 5,244-263

受理年月日 平成 25 年 11 月 6 日

Study of the Mean Areal Slope Measurement Method for Runoff Analysis Using a Digital Elevation Model

HORIKAWA Naoki*, YOSHIDA Takeo*, KUDO Ryoji*, MINAKAWA Hiroki* and NAWA Norio*

Hydraulic Engineering Research Division, Hydrology and Water Resources Management*

Summary

The kinematic wave model is a runoff models which can be constructed with geometrical factors. The mean slope is a coefficient of kinematic wave model and is measured by various methods. In this study, the intersection line method is modified so as to use the digital elevation model(DEM) and this modified method is examined as follows.

- 1) When a basin is divided by sub-basins which consist of one river channel of 1 km length and two rectangle slopes (uniform slope, 1km width, 500m length), the suitable grid interval of DEM used by the modified method is 100 m.
- 2) The excessive dense grid interval may overestimate the mean slope. The suitable grid interval is about 1/4 of slope length for the extended intersection line method. This value should be small for the original intersection method.
- 3) It is desirable not to exceed 10 m as a contour interval advanced interval. The suitable grid interval is referred to when the kinematic wave model is constructed using a digital elevation model.

Key words : Mean slope of the basin, Intersection line method (Horton method), valley method, runoff analysis, Surface runoff model, Kinematic wave model (equivalent roughness model), Digital elevation model(DEM), Digital terrain model(DTM), Distributed runoff model

海岸保全施設の維持管理計画の改善のための課題

丹治肇* 桐博英* 中矢哲郎* 安瀬地一作*

*水理工学研究領域沿岸域水理担当

キーワード：LCC, 変状連鎖, パス, 費用対便益分析, 海岸保全施設の寿命

I 緒言

海岸保全施設については、既に、平成20年に「ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～」(農林水産省農村振興局他, 2008)(以下現行マニュアルと呼ぶ)が公開され海岸管理者の利用を促してきたところであるが、まだ、拡張の余地が大きい。このため、土木学会ではアセットマネジメント小委員会において、現行マニュアルの利用状況と問題点などが現地調査に基づいて調査され報告書(沿岸防災施設のアセットマネジメント研究小委員会, 2012)に取りまとめられた。筆者もこの小委員会のメンバーとして活動し、報告書作成にかかわった。筆者らは、既に、農業排水施設について、維持管理、費用対効果分析、性能設計は最終的には統合されるべき性質をもっていると主張してきた(丹治ら, 2013)。同様のことは海岸保全施設についてもあてはまると思われるが、これを整理した既往の文献はない。また、小委員会の調査の結果、現行マニュアルは、現場に応じた柔軟な運用がされていることがわかってきた。その原因については、明らかになっていない。恐らく、予算制約が大きな原因の一つであるが、それだけに限定できるかは不明である。また、現行マニュアルの1次点検項目は網羅的であって、実際の利用では、点検項目を絞込み、点検間隔を大きくとるなどの工夫がなされていた。この他に、逆に1次点検にない項目、工種を追加した沖縄県(2010)のような事例もある。このような状況を見ると、現状の維持管理点検作業の実態と現行マニュアルの偏差を説明するような仮説を提示し、それに基づいてマニュアルの内容と利用方法の改善方向を検討することを目的として、小論を作成することにした。

II 研究の方法

2.1 パスと変状連鎖の検討

海岸管理者が、点検項目を選別し、現行マニュアルを取捨選択する基準は、恐らく堤防の破壊経路(パス)または、堤防の劣化が破壊に至る連鎖過程(変状連鎖)を念頭に置いていると考える。現行マニュアルは変状連鎖図を示して

いるが、現実の破壊過程が、変状連鎖図に表されない場合には、現行マニュアルの取捨選択が起こっている可能性がある。事例を基にこの点を考察する。

2.2 統合手法の検討

丹治ら(2013)が排水機場で検討したような、性能設計、LCC、費用対効果分析を統合的に適用する技術的可能性を各手法の技術的な特徴を踏まえて検討する。

2.3 解析手法の補足

ストックマネジメントの現場では、施設寿命の推定方法について、統計手法の誤用の事例もある。ここでは、代表的な手法について、留意点を記載した。

2.4 維持管理計画の改善方向の検討

現行マニュアルの利用率の低い理由は、パスの問題を除けば、点検費用が大きな要因と思われる。費用問題を解決するには、予算措置により費用を増額すること、点検方法を変えて必要な費用を節減する方法がある。この点を、経営工学で使われるポジション図を使って考察する。

III パスと変状連鎖の検討

海岸堤防が規定の性能を満足しなくなり、破壊される原因には、複数のルートがあり、これは、パスと呼ばれている。海岸施設設計便覧では、パスは変状連鎖と呼ばれている。現行マニュアルも便覧(海岸施設設計便覧小委員会, 2000)から、Fig.1～4を引用している。Floodsiteでは、海岸堤防について、破壊にいたるパスについて詳細な分析があるが、これは、土構造物の緩傾斜堤防に、アスファルトフェーシングや草生被覆をしている場合が主で、我が国のように、コンクリート被覆護岸は少なく、参考にならない。しかし、パスの数は便覧より多く、現行マニュアル変状連鎖は網羅的なものではなく、見落とされているパスも多い。そこで、考えられるパスを示す。

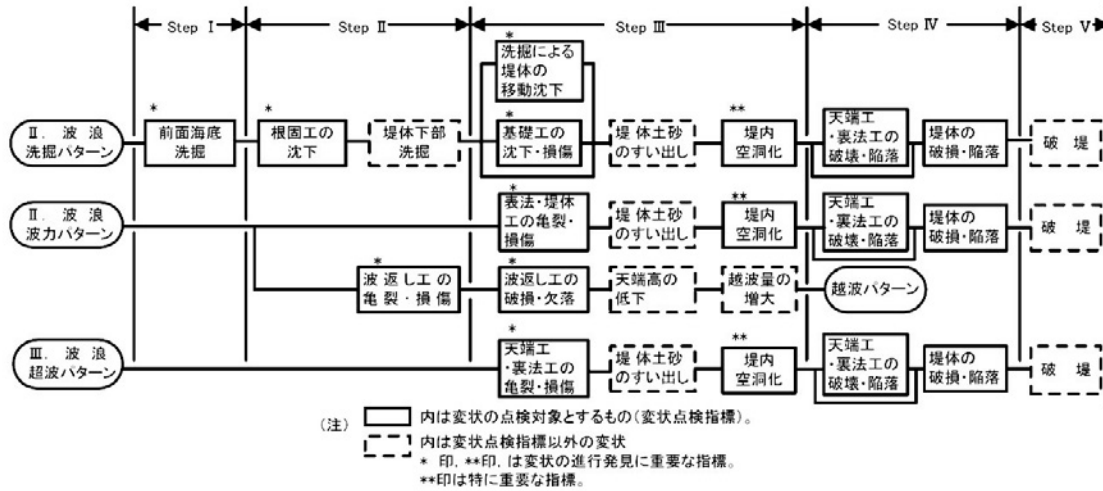


Fig.1 堤防（消波工なし）の主要変状連鎖
Main transition of degradation of coastal dykes without armor units

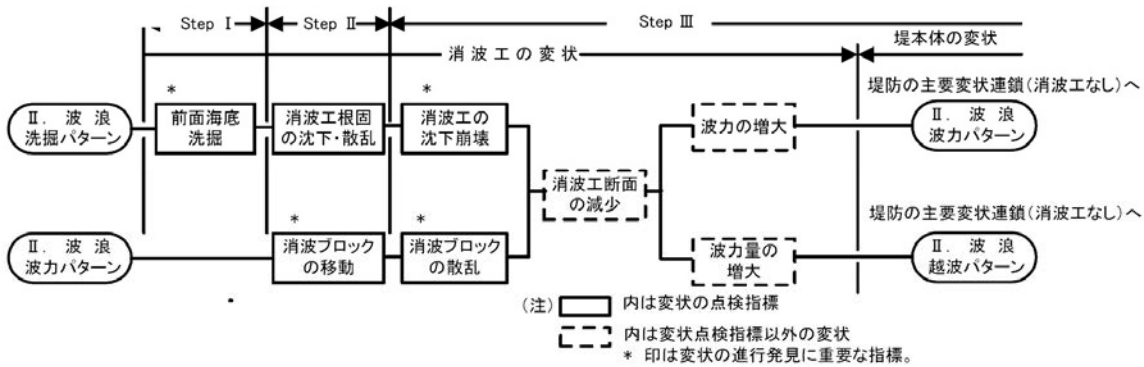


Fig.2 護岸・堤防（消波工被覆）の主要変状連鎖
Main transition of degradation of seawalls and coastal dykes with armor units

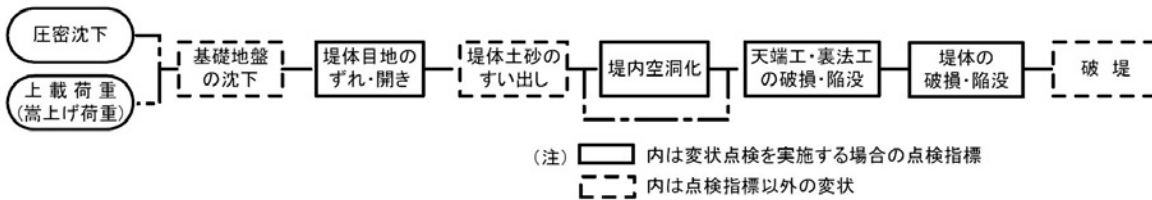


Fig.3 護岸・堤防の進行型変状連鎖
Progressive transition of degradation of seawalls and coastal dykes

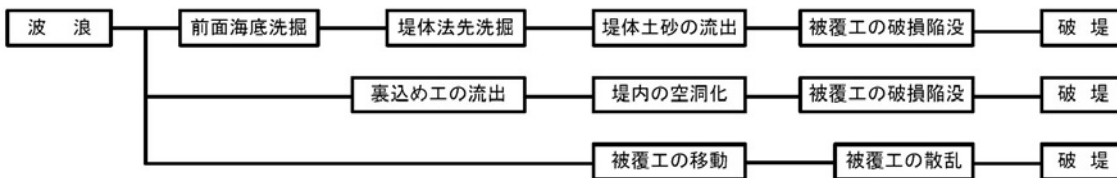


Fig.4 緩傾斜護岸の変状連鎖
Transition of degradation of gentle slope revetment

3.1 沈下

沈下は農地海岸に多い干拓地堤防の劣化の主な原因である。農地海岸である有明海周辺は有明粘土による沈下が著しい。その他、沿岸では東京湾、伊勢湾、大阪湾でも沈下が見られる。環境省(2010,2011)は平成23年の全国の地盤沈下地域をまとめているが、これには東日本大震災による沈下量が含まれているため、地震の影響のない平成22年をみると、最大の沈下は柳川市で年間2cmである。海岸堤防の沈下では、こうした広域の地盤沈下の他に堤防の自重による沈下、隣接する消波工の重量による沈下が加わるため、沈下量が年間10cm以上になることもある。沈下で堤防が破壊されることはないが、堤防高さが低下するので、所定の性能を満足できなくなる。また、不等沈下により、堤防スパンの継ぎ目の隙間が拡大して、海水が侵入することがある。これに対しては、事後保全で隙間を埋めて海水の侵入を防止する対策が取られている。Fig.5に類似の海岸堤防と樋門の継ぎ目の補修の例を示す。



Fig.5 海岸堤防と樋門の継ぎ目補修 (熊本県)
Repair of a gap between a coastal dyke and a base of sluices
by a filling plate (Kumamoto prefecture)

3.2 吸出しと空洞

2001年12月30日の明石市の大蔵海岸の事故以来、堤防の利用上の問題点として、吸出しと空洞の防止が堤防管理上の重要事項になっている。これは、防災性能ではなく、海岸利用の安全性の確保のためである。堤防からの吸出し(または、堤防からの砂等の噴出し)は、現象が干潮時に目視可能な場所で急激におこる場合には、目視による点検が可能である。そのような例外を除けば、吸出しの結果としての空洞の有無の点検が可能な安全対策になる。空洞の点検方法としては、堤防に予め検査孔を設けておくなどの方法も今後考えられる。既に建設済みのコンクリート堤防については、レーダー探査が必要な精度が得られる唯一の可能な方法である。ハンマーによる打音による判定は、打音の差が小さく、一般には困難である。



Fig.6 陥没の発生 (福井県)
Occurrence of a cave-in (Fukui prefecture)

また、空洞の発生を超えた大規模な吸出しが発生すれば、これは堤防の崩落の原因になる。

Fig.6は福井県の海岸堤防背後の道路の陥没である。このように陥没が目視で確認出来る状態になった時点では、内部の空洞がかなり成長している場合が多いので、地表に穴があく前に、レーダー探査などの点検方法で内部の空洞を見つけることが重要になる。

一方、吸出しによる空洞の発生と拡大は広い範囲でみられる。特に、Fig.7のような石積み堤防護岸は、吸い出しを生じやすく、陥没が発生しやすい。

3.3 コンクリートの劣化

これは現行の維持管理マニュアルで重点的に点検の対象となっている事項であるが、波力は圧縮応力であり、堤体の自重も大きく、次の事例に見るようにコンクリートの劣化が強度不足を引き起こし、堤防が崩落することは考えにくい。

高知県の菜生海岸事故では、まず、越波が発生し、その後、波がパラペット部にあたって、パラペットが飛散している。東日本大震災の津波でも、Fig.8のようにパラペットの飛散が広く見られた。沖縄県の海岸では、琉球政府時代に、琉球石灰岩を使った石積み堤防が建設された。琉球石灰岩はコンクリートではないが、一部にサンゴも含まれ、強度的には、コンクリートがもっとも劣化した状態に相当するともみなすことができる。沖縄県はリーフが発達しているため、堤防にかかる波力が本土より小さくなる利点がある点を割り引かなければならないが、堤防の破壊の状況を見ると、強度不足で、堤防が崩落する場合は、Fig.9のようにパラペットの崩落にとどまっている。これらから、パラペットについては、強度の確保が必要である。ただし、東日本大震災の津波被災から今後はパラペットを津波に耐えられるように設計するか、津波の弱点となるパラペットのない堤防を設計することが望まれる。



Fig.7 石積み海岸堤防の崩落（沖縄県）
Cave-ins on stone wall coastal dykes (Okinawa prefecture)



Fig.8 津波によるパラペットの飛散（岩手県）
Dispersion of parapet by a tsunami (Iwate prefecture)



Fig.9 パラペットの崩落（沖縄県）
Dispersion of parapet (Okinawa prefecture)

これを参考にすると、コンクリートの劣化で堤防が破壊されるパスには、コンクリートの強度不足で、堤防の一部（特にパラペット）が崩落するパスと、前述の吸出しを経て堤防が崩落するパスの2つがある。

3.4 高潮・高波

海岸堤防の災害に、防災機能が十分に発揮されない典型的な例として、高潮・高波における堤防の崩落がある。高潮・高波では、越波・越流がおり、流れが堤防裏に回り込んで、裏側から堤防が崩壊することが多い。前述のように堤防前面から、波力により堤防が破損する例もあるが、

事例は少ない。海水が堤防裏に回り込む経路には、この他に、沈下の項で述べた堤防のスパンの継ぎ目の隙間が拡大する場合がある。

Fig.10 は越流が起これ、堤防背後から堤防が破壊され、堤防が崩落した事例である。



Fig.10 越流による堤防背後からの崩落（福島県）
Collapse of coastal dykes by overflow from behind Fukushima prefecture)



Fig.11 矢板護岸の破壊（石川県）
Collapse of embankment of sheet piles (Fukushima prefecture)

3.5 鋼矢板の錆

海岸堤防に鋼矢板を用いる場合には、錆による劣化が発生する。**Fig.11** は矢板の錆による劣化の事例である。栈橋の錆による劣化については、横田らによるマルコフチェーンを使った劣化予測の研究（横田ら,2003）があり、この手法が鋼矢板にも利用できる。

農林水産省仕様では、軽量鋼矢板を排水路や海岸堤防などの恒久施設にも使っているが、国土交通省仕様では、軽量鋼矢板の利用は仮設構造物に限定される。この点についての改善が望まれる。

3.6 コンクリート構造物の鉄筋の腐食劣化

堤防に鉄筋が使用され、鉄筋が塩水で腐食劣化した場合

には、鉄筋の腐食劣化、コンクリートの剥離が起こる。**Fig.12**は鉄筋の腐食劣化の事例である。



Fig.12 堤防の鉄筋の劣化（静岡県）
Degradation of reinforcement bars in banks
(Shizuoka prefecture)

3.7 パスと変状連鎖の関係

以上のように、被災事例からみれば、現行マニュアルの4枚の変状連鎖では表せない場合がある。特に、実際の被災では、変状連鎖のフェーズがきれいに現れることは少ない。例えば、鉄筋の劣化を4つの変状連鎖に適用することは困難である。以上の事例は、あくまで筆者らの限られた経験を元に論じたので、これ以外のパスも多数あると思われる。今後、パス事例を広く集めることで、変状連鎖の追加改訂が望ましい。

IV 統合手法の検討

4.1 LCCの拡張

海岸堤防の維持管理の目標のひとつに、LCCによるトータル費用の節減がある。LCCでは、建設する海岸保全施設を限定した上で、費用を次のように分ける。

$$\text{費用} = \text{初期費用} + \text{維持管理費用} + \text{撤去費用}$$

毎年の維持管理費用は、施設が老朽化するにつれて増加する。i年目の維持管理費用を $m(i)$ とすると建設後、1,2,...,i年目までの積算費用は次式になる。

$$\text{費用} = \text{初期費用} + \sum m(i) + \text{撤去費用}$$

海岸保全施設の所定の性能により実現される便益は、経年変化により性能が低下するので、i年目の便益を $B(i)$ で表す。

$$\text{便益} = \sum B(i)$$

ここで、便益が費用より大きい場合には、海岸保全施設を維持管理して利用することが合理的である。この条件は $\text{便益} > \text{費用}$

であるが、上式を代入すると、次式が得られる。

$$\sum B(i) > \text{初期費用} + \sum m(i) + \text{撤去費用}$$

ここで、右辺と左辺が近似的に等しくなる年数は、最も経済的な更新間隔になる。

4.1.1 便益比に対する補足

便益が経年変化により減少することの解釈としては、海岸保全施設の破壊確率が経年変化により、増加すると解釈することもできる。あるいは、沈下により海岸堤防が経年的に高さを減ずると考えることもできる。

4.1.2 過疎化に伴う補足

海岸堤防の受益地域の過疎化により、人口と資産が減少する場合は、便益の経年減少として評価することができる。また、逆に、受益地の人口と資産が経年的に増加する場合は、便益の経年増加として評価することができる。

4.1.3 海面上昇に関する補足

温暖化により海面が上昇する場合は、経年便益の変化として評価することができる。

4.1.4 財政制約に関する補足

LCC解析により、n年目が、最適な更新時期と判断されても、n年目には、更新のための建設費用が手元がない場合がある。このように単純なLCCは財政制約条件を考慮しないため、最適更新時期が現実的にならないこと（財政制約）がある。この問題に対しては、資金の借入れと割引率をLCCに組み入れることでより、現実に近づけた検討が可能である。

以上のようにLCCによる解析では、経年変化を考慮し、最適な更新時期を求めることが重要である。

4.2 費用対便益分析と拡張

市場供給されない財は、市場の失敗により、供給量が最適より過少になる。公共事業は、こうした公共的な財を供給する手段を与える。しかし、公共事業で供給される財は、市場による需要と供給の均衡という効率化の制約条件を受けないため、非効率で不必要な財が供給される政府の失敗の可能性を内包している。この政府の失敗を回避するために模擬的な代替市場を作成することで、効率性の評価と改善ができる。費用対便益分析はそのための手法である。費用対便益分析では、効率性の評価指標として、次のいずれかを用いる（農林水産省他、2004）。

$$\text{費用対便益比} = \text{便益} / \text{費用}$$

$$\text{費用対便益差} = \text{便益} - \text{費用}$$

LCCは費用対便益分析からみた場合には、便益を一定とした場合に費用を最小化する手法になる。これに対して、費用対便益分析では、双方をパラメータにとる。すなわち、費用対便益分析では、複数の事業案を比較し、費用対便益が最大の事業を選択する。LCCは選択された事業案に対して、複数の維持管理案を比較し、最適な維持管理案によって、最適な更新時期を推定する。この点では、費用対便益分析がLCCを包含する関係にある。しかし、通常費用対便益分析では、複数の維持管理案が比較されることはまれであるので、費用対便益分析がLCCを包含するために、通常費用対便益分析に対して拡張をする必要がある。

4.3 性能設計法と拡張

性能設計法では、海岸保全施設の性能を確率分布関数として与える。

海岸保全施設の性能とは、防災施設の外力に対する抗力、堤防の高さ、越波の減少能力などが考えられる。海岸堤防が規定の性能を満たせなくなり、破壊される原因には、複数のパスが作用することを示した。性能評価項目は、堤防が破壊されるパスに対応していると考え方が簡単である。

海岸保全施設では、ある外力を超えると性能が維持できなくなり崩壊する。例えば、高潮の潮位は堤防天端以下の場合には、崩壊は生じないが、これを超えれば崩壊する可能性が高くなる。海岸堤防が安定を保てない条件は次に示す。

崩壊条件 = (外力 > 抗力) の場合

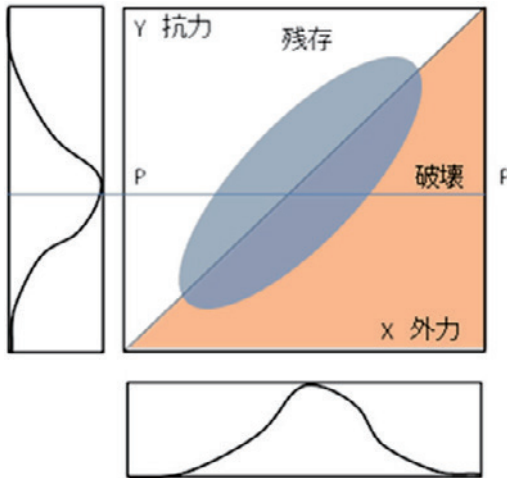


Fig.13 崩落条件
Collapse condition

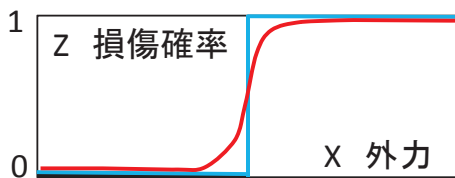


Fig.14 損傷関数
Damage function

この条件は、Fig.13 では右下のオレンジ色の三角形の部分になる。今、Fig.13 で崩壊確率が紙面に垂直な z 軸方向に示されている場合に、P-P 断面で切断した図が、Fig.14 の青い折れ線である。現実には、ここまで急激に、崩壊と安定が分かれることはないので、この図は不自然である。そこで、Fig.14 では青線を連続関数で置き換えたものも示してある。この赤線は損傷関数と呼ばれる。これから外力と、性能である抗力と、損傷関数が与えられれば、堤防が崩壊するか否かの判定ができ、寿命が推定できる。

4.4 維持管理点検と性能

ここで述べたすべての手法は、費用対便益分析を拡張することで統合化も可能である。また、各手法はあるパラメ

ータを一定として、最適値を求める手法になるので、数学的には局所最適解を求める計算になる。これに対して、費用対便益分析を拡張する方法は、大域的な最適解の導出になり、望ましい。ただし、費用対便益分析に統合化するためには、すべての操作変数は、最終的には費用または便益に変換される必要がある。

維持管理点検の直接的な調査項目は健全度であるので、維持管理点検を費用対便益分析の拡張に入れ込むためには、健全度を便益に変化する必要がある。

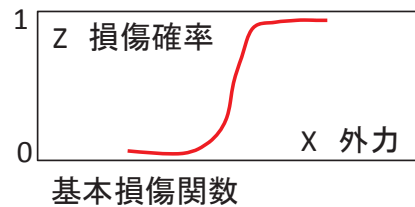
海岸保全施設の便益は、with-without で考えれば、次のように定式化される。

海岸保全施設の便益 = 海岸保全施設がある場合の便益 - 海岸保全施設がない場合の便益

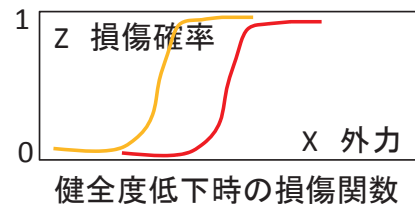
既に老朽化して、施設寿命を迎えている堤防のような海岸保全施設がある場合には、with-without は施設の更新を行うか否かになる。実際問題には、前者より本パターンが多いと思われる。この場合には、海外保全施設の便益は次式で与えられる。

海岸保全施設の便益 = 海岸保全施設が更新される場合の便益 - 海岸保全施設が更新されない場合の便益

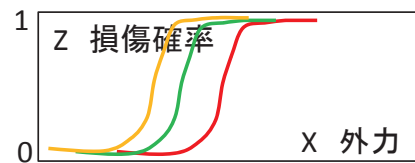
海岸保全施設では、防災施設を特定すれば、堤防等が崩壊しない確率は損傷関数で計算できることは既に述べた。次に、施設が劣化した場合や、適切に維持管理された場合の施設寿命の計算方法を示す。Fig.15 の上段は Fig.14 から、損傷関数だけを抜き出したものである。施設が老朽化して行くと、中段のオレンジの線のように、損傷関数が左にシフトする。適正な維持管理が、損傷関数を改善すれば、下段の緑の線のように、損傷関数が右にシフトする。これら



基本損傷関数



健全度低下時の損傷関数



健全度低下+維持管理時の損傷関数

Fig.15 劣化・維持管理と損傷関数
Degradation, maintenance and damage function

のシフト量のモデル化ができれば、性能劣化と維持管理を施設寿命予測に組み込める。

4.5 統合化の方向と標準偏差リスク

以上の3つの手法は、Fig.16のような包含関係にある。したがって、計算手順としては、Fig.16の箱単位でループを回せば統合化は可能である。統合化には、各手法の整合性が図れる理論的な長所があるが、実用的なプログラムを提供するまでには、今後多くの時間と労力が必要になる。このため費用対便益を考えながら統合化の検討を進めることになる。

この3つの手法のうち、性能設計では、変数を確率変数とみなして、分布を想定している。一方、LCCと費用対便益分析では、変数の確率分布を考えることは少ない。LCCにおいて変数の確率分布を検討した事例に赤石沢(2006)がある。費用対便益分析において確率分布を検討した事例にMechlarら(2008)がある。これらでは、Mrkovitzの標準分散モデルが使われている。このモデルは金融工学でも使われるもので、分散または標準偏差が大きくなると推定値が外れるリスクが大きくなることから、分散または標準偏差をリスクと呼び、リスクを最小化する方法を検討している。ここでは、防災のリスクとの混乱を避けるため、標準分散モデルにおけるリスクを標準偏差リスクと呼んで区別する。LCCと費用対便益分析においても、標準偏差リスクが大きくなると、推定の幅が広がってしまう。このことから、仮に予算制約があり、点検可能項目を絞り込まなければならない場合には、被害額・性能・寿命を左右する重要なパラメータのうち、調査前の標準偏差の期待値の大きなものから点検により、標準偏差を小さくしていく戦略が有効である。この条件にもっとも当てはまるパラメータは空洞の密度分布であると思われる。なお、ここでは確率計算が事前確率と事後確率を直接に扱うのでベイズ統計手法との相性が良くなる。

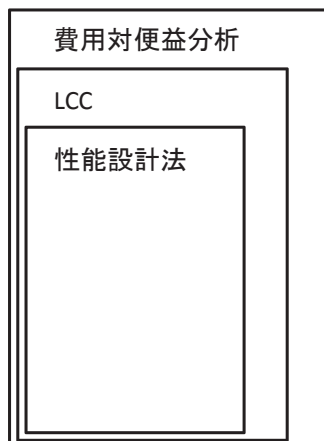


Fig.16 統合化の概要
Outline of integration

V 解析上の注意事項

維持管理の目的は、破壊パスに伴う性能と便益によって、重みづけられた健全度を、重要性に従って点検し、その寿命をできるだけ長く保つことと寿命の予測をすることである。寿命の予測は、次の2点で重要である。

第1に、LCCによる適切な更新時期を予測するために不可欠な条件になる。第2に、維持管理点検にかけられる資源（労力、時間、資金等）に制約がある場合には、すべての維持管理点検をおこなうことはできない。その際には、優先順位付けが必要になるが、これには、点検の1単位の資源当たり寿命の延長年数を重みに使うことが合理的である。このためには、維持管理点検においても寿命予測が重要になる。

いずれにしても、寿命予測関数（損傷関数のシフト量推定関数）の作成が、基本的な課題になる。そこで、ここでは解析方法について概観する。

5.1 マルコフ連鎖モデル

マルコフ連鎖モデルは、非線形性が簡単に表現できること、一旦モデルができれば、利用が容易な長所がある。一方欠点としては、健全度の劣化過程をマルコフ連鎖でモデル化する妥当性の検証と、モデルパラメータの妥当な同定方法の選出がある。この2つは、厳密性を考えるとモデルの利用に比べ困難である。しかし、工学的に考えれば、代替案がない場合には、第1次近似にマルコフ連鎖モデルを用いることは合理的である。逆に言えば、マルコフ連鎖モデルより、推定精度の高いモデルがある場合には、それを用いるべきである。

5.2 回帰モデル

回帰モデルはすべての統計モデルの中で、最も利用率の高いモデルである。一方では、最も誤った利用が多くなされているモデルでもある。回帰モデルの利用において留意すべき点は、回帰モデルの因果の変数選択を行う場合と、因果関係が既知である場合で大きく異なる。なお、回帰モデルでは説明変数として、時間（建設後の経過年数）以外のパラメータをとることが必要な場合もある。ただし、時間以外の説明変数を設定した場合には、LCCや寿命予測には説明変数を時間に変化させる必要がある。例えば、説明変数に通過した累加台風の数を取ることは因果関係としては、合理的であるが、その場合には、経過年数による性能劣化は台風の数と経過年数の変換を行う必要が出てくる。回帰モデルの場合には、因果関係に持ち込めれば、他モデルより優位になる。逆に言えば、説明変数に経過年を取った回帰モデルには、実際の原因である隠れ変数が残されている可能性が高く、誤用法である可能性が高い。

5.2.1 因果関係の推定

回帰モデルは、左辺の変数を目的変数（従属変数）、右辺の変数を説明変数（独立変数）として、説明変数で従属変数を予測する。

モデルの精度は、相関係数とP値で評価されるが、相関

係数が高いことは因果関係を意味しない。そこで、説明変数を原因、目的変数を結果に解釈できる条件が問題になる。古くは Hill の条件が使われてきたが、この条件では交絡条件を排除できない。現時点では、回帰モデルから因果モデルを作成する条件は、データサンプリングがランダム化され、交絡条件を考慮したモデル化を行う場合に限られる。詳しくは、Peal(2009)、星野(2009)、Angurist et al.(2009)を参照できる。現実問題として、海岸保全施設で回帰モデルから、因果関係を推定する変数の選択は難しい。この方法による因果モデルの作成は細心の注意と研究計画が必須である。

5.2.2 影響度合い

因果関係が事前にわかっている場合に、その影響の大きさを回帰モデルで推定する場合がある。この場合には回帰モデルを使うことは容易である。健全度は順序変数であることに注意すべきである。このため回帰モデルとしては一般化線形モデルを利用すべきである。因果関係が事前に分かっているとは、損傷過程が物理的または化学的に明示できる場合である。

5.3 生存時間解析

施設の寿命予測では、計測時点で、施設の寿命が終了していない海岸保全施設が、存在する。例えば、ある海岸堤防が建設されてから20年が経過して、ある堤防スパンが存している場合、スパンの寿命が20年以上であることは指摘できるが、そのスパンの最終的な寿命は不明になる。この時点で、既に寿命を終えた堤防スパンを集めて、平均寿命を推定することはできるが、その推定値は、全ての堤防スパンが寿命を迎えるまで観測して求めた平均値に比べれば、過小になってしまう。このように施設寿命を計測する上では、不完全データの存在は不可欠になる。このような不完全データに対して、施設の寿命を推定する手法に、生存時間解析がある。生存時間解析は、説明変数に相当するy軸に経過時間を取り、経過時間ごとの生存率を推定する。この方法の長所は生存確率を考えることで不完全データに対応した解析方法を提供する点にある。

VI 維持管理計画手法の検討の方向

III章で述べたように、理論的には、費用対便益分析を拡張して全ての手法を統合化することは、技術的には可能と思われる。また、この方向では、局所最適化問題が回避されるので、理論的な長所は明確である。しかしながら、現実の海岸堤防の維持管理では現行マニュアルの実用化に課題を残している。そこで、ここでは、「どのようにすれば、利用が拡大するか」あるいは「現実的に運用できる手法にはどのようなものがあるか」を考える。

6.1 各種法の特徴

現在使われている各種手法を、対象が部分：全体、計算が詳細：概算の2軸で Fig.17 にポジショニングした。この

図の第1、第3象限は、対象と費用の積が同じオーダーになり、安からず、高からずになる。一方、第2象限は過剰費用で実現性は低い。第4象限は、費用は安いが中身も少ない。実現可能な手法は、この図でいえば、第1、第3象限に表されなければならない。現在使われている費用対便益分析は、正確さより簡便さ（低価格）を重視している。費用対便益分析内容を細分化し、LCCを取り入れて、時間軸方向の検討を行うと、おそらく、検討が詳細になるので、費用対便益分析のポジショニングは第2象限に移動してしまい、使われることはなくなる。費用対効果分析の詳細か、時間軸報告の検討の追加は理論的には望ましいが、現実には、解析費用が低下した分を使って、徐々に拡張されるステップを踏むことになるとと思われる。

LCCは費用対便益分析に比べれば詳細な手法である。海岸堤防で現在点検されている主な項目は、コンクリートのひび割れ、亀裂、スパン間の隙間など限定された部分を対象にしている。現行マニュアルでは、全ての堤防スパンについて、詳細な原簿を作成し、変状について、追跡調査を求めているが、実際の管理の点検項目は限定されている。

設計は、従来は比較的簡単なものであった。最近では、性能設計を行うことが求められている。しかし、性能設計は潮位、波浪などの一部のパラメータにとどまり、多くの部分では従来設計法が使われている。

以上のように、実現可能な主張は、第1、3象限にポジショニングしている。

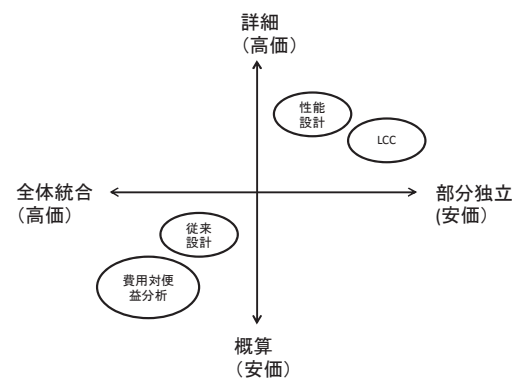


Fig.17 各種手法のポジショニング

Positioning of various methods

6.2 道路のLCCとの比較

LCCは舗装道路で多用されている。そこで道路との比較を試みる。まず、舗装道路では、健全度は道路の舗装厚が重要であり、修復は、舗装厚さを回復することが主眼になる。また、舗装厚さの減少原因は通過交通による摩耗である。このため交通量と車種（車重）を予測することで、舗装厚さの減少速度を予測するモデルが作られ、実用に供されている。これは、海岸堤防と比較すれば、摩耗による舗装厚の減少という特定のパスが卓越している。逆に言えば、海岸堤防のようにパスが複数あり、卓越したパスが見いだせない場合には、LCCは難しくなる。そこで、パスの数と点検の密度で、道路と海岸の転換のポジショニングを

Fig.18 に作成してみた。この図ではパスが少ないほど、点検密度が少ないほど安価になる。つまり、左上の第2象限が高価で、右下の第4象限が安価になる。第1、第3象限は程々の費用になる。

道路の場合には構造物が単純で、種類が少ないので、サンプル調査をしやすい。一方、海岸保全施設は、堤防だけでも形状、素材、構造が多様であり、間引いてサンプル調査を行っても調査ポイントを減らすことが困難である。現行マニュアルも、調査地点数を減らすことによるコストダウンは意識されており、点検を1次点検と2次点検に分けて行うことで、コストダウンを図っている。しかし、これは道路でも行われている手法である。海岸保全では、パスが多くなりがちなので、コストダウンのためには、更に、パスの絞込みをおこなうことが必要であると考ええる。

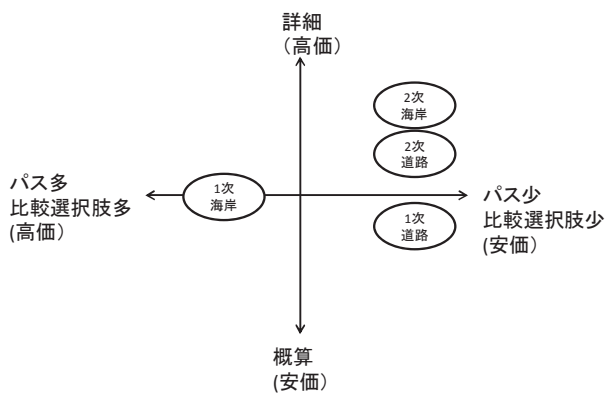


Fig.18 道路と海岸保全施設の点検のポジショニング
Positioning of road and coastal disaster prevention facilities

6.3 維持管理の現状の分析

現時点で、海岸堤防の維持管理点検が現行マニュアルに従って実施されない原因をポジショニングを使って考察する。

Fig.19 に現行マニュアルが想定しているポジショニングと実際に行われているポジショニングを示す。

現行マニュアルでは、まず1次点検では、考えられる点検項目を網羅的に列挙して落ちがないように心がけている。これに対して、まず、目視で、1次点検を行い、問題のある項目・地点を2次点検に送る。現実には、農地海岸では1次点検は行われているものの、Fig.19 に書いたように、現行マニュアルよりも簡略化されている。ここでは、枠なしが現行マニュアル、枠付きが実際に行われている点検である。その原因は、第1に、現行マニュアルがあまりに詳細なため現在の海岸管理者の労力と予算措置では現行マニュアル通りの点検が難しいことが挙げられる。第2に、地区ごとに重要なパスが異なるか、何が重要かを認識しているため、パスの選択が行われている。

例えば、佐賀、福岡、熊本などの有明海、八代海沿岸の干拓地堤防では、計画堤防高さ7.5mに対して、既に、沈下により、堤防高さが、これより低い地域も多い。この場合には、コンクリートのひび割れの補修よりも堤防高さの回

復が重要であるが、これは、維持管理時の補修レベルでは対応できない。仮に、コンクリートの強度が低下しても、有明海では、津波は想定していないし、海が浅いので、高知県の菜生で発生したような波浪によるパラペットの破壊の確率は低い。一方、沈下により堤防のスパンの間の隙間が拡大しやすい。実際に、Fig.9のように隙間を充填している例も多い。このため震度4以上の地震時の堤防の点検は重要であり、欠かさず行われている。

一方、石川県の七尾湾では、干拓地は一部で、仮に、堤防が崩壊しても高台の多い背後地では浸水するところはほとんどない。このため地震後の堤防の点検についても、有明海沿岸ほどの切迫感はない。

このように大きな被害を生じない範囲で、1次点検（目視点検）のパスを絞りこむ操作は、堤防建設が集中した伊勢湾台風直後から過去60年のノウハウとして、海岸管理者に織り込まれている。

これらから、Fig.20のように現行マニュアルの1次点検は絞込みを行うことができると考える。ただし、現行マニュアルの点検が、海岸保全施設の延命とトータルコストの縮小を目指しているのに対して、海岸管理者の経験的な絞込みは最小の1次点検費用で、とりえず重大事故を未然に防ぐことに重点が行われていると考えられる。このため、トータルコストダウンに繋がる項目については、1次点検費用を補助し、現行マニュアルほどではないにしても調査項目を確保すべきである。

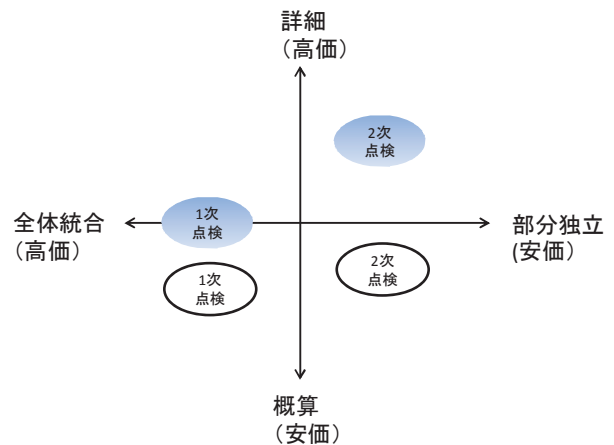


Fig.19 海岸保全施設の維持管理のポジショニング
Positioning of maintenance of coastal disaster prevention facilities

石川県や熊本県の過去のヒアリング事例では、2次点検については、1次点検でリストアップされたものについては、各海岸管理者は点検を希望していた。ただし、予算手当てがない場合には、2次点検はできない。また、1次点検が不十分な場合には、1次点検の対象漏れで本来は2次点検候補にリストアップされるべき個所が、リストに上がらなくなるが想定される。

6.4 維持管理の改善案の検討

維持管理点検が適切になされる条件には、財政的、技術的な合理性が必要である。

1) 建設時にしか財政補助が配慮されなかった結果、LCCが最小でない維持管理が行われてきたと考えられる。具体的に言えば、財政的に点検と補修ができずに、破壊した場合に修理する事後修復対応である。建設と維持管理に対する財政措置の非対称性が解消されれば、この問題は解決可能と思われる。

2) 点検の内容で、標準偏差リスクを減少できるレーダー探査のような手法は、リスク管理の面からも有効である。

3) 理論的には、LCC、費用対便益分析、性能設計は統合化が可能である。ただし、これを実施するには、費用の制約があるので、局所最適化を避けるために技術的に有効な統合化も、各種法にかかる費用のコストダウンを見ながら順次進めていく必要がある。

4) 現時点では、全体を大まかに評価する方法と部分を精密に点検評価する方法を組み合わせることが現実的である。費用が増大する要因は、破壊パスの多様性、海岸保全施設の多様性に原因がある。これらについて、評価パスを減少させ、評価箇所を制限することで費用を抑え、実施可能な維持管理計画が作成可能と考える。

5) 2次点検ではレーダー探査による空洞の探索が最も費用を要する調査になる。この調査も、財政支援は必要であるが、費用がかかることから、それだけでは、早急にすべての海岸堤防の調査を短期間に終了することは困難であろう。海岸保全施設の性能において、恐らく海岸の利用に関する性能が問題になる事項は、空洞が主体と思われる。この場合には、点検の終わっていない堤防については利用を抑制する方法も検討すべきである。

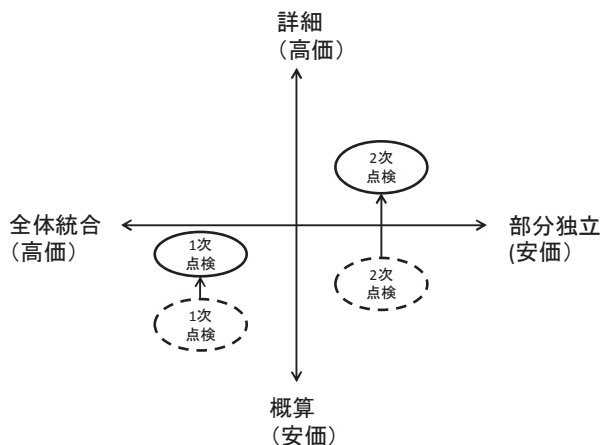


Fig.20 海岸保全施設の維持管理のポジショニングの改善案
Proposal on improvement of positioning of maintenance of coastal disaster prevention facilities

VII 結論

海岸保全事業の維持管理点検を対象にそのマニュアルの

実用性を図るために維持管理点検手法の実用化の方向を検討した。

1) 現行マニュアルで維持管理点検と健全度が寿命に変換される過程である変状連鎖とパスについて検討した。

2) LCC と関連する性能設計、費用対便益分析の関係について考察した。

3) 寿命予測手法について比較検討を行った。

4) 現在の海岸保全施設の維持管理点検の現状と現行マニュアルの期待している維持管理点検のギャップについて、費用に関連したポジション図を使って検討した。さらに、このギャップを解消する方法を提案した。

以上の検討から、今後、点検費用のレベルとパスを配慮した維持管理点検方法の改善を行うことが推奨できる。

参考文献

- 赤石 総光(2006):リスクマネジメント手法を利用した土木構造物の LCC 評価の応用技術に関する研究,早稲田大学理工学部, 学位論文, 190p.
- Angurist, J.D. and Pischke J.S.(2009): Mostly harmless economics: An engineer's computation, Princeton University Press, 392p.
- 海岸工学委員会.海岸施設設計便覧小委員会(2000):海岸施設設計便覧, 2000 年版,土木学会, 582p.
- 海洋開発委員会・沿岸防災施設のアセットマネジメント研究小委員会(2012):「沿岸防災施設のアセットマネジメントに関する現状と展望 成果報告書」, 土木学会
- 環境省(2011):平成 22 年度全国の地盤沈下地域の概況,平成 23 年 12 月, <http://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo22.pdf>
- 環境省(2012):平成 23 年度全国の地盤沈下地域の概況,平成 24 年 12 月, <http://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo23.pdf>
- Mechler, R. and The Risk to Resilience Study Team, (2008): The Cost-Benefit Analysis Methodology, From Risk to Resilience Working Paper No. 1, eds. Moench, M., Caspari, E. & A. Pokhrel, ISET, ISET-Nepal and ProVention, Kathmandu, Nepal, 32 pp.
- 農林水産省農村振興局,農林水産省水産庁,国土交通省河川 局,国土交通省港湾局(2004):海岸事業の費用便益分析指針 (改訂版)平成 16 年 6 月, 103p.
- 農林水産省農村振興局防災課,農林水産省水産庁防災漁村課,国土交通省河川局海岸室,国土交通省港湾局海岸・防災課(2008):ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～,平成 20 年 2 月, 105p.
- 沖縄県(2010):琉球政府護岸のライフサイクルマネジメントのための老朽化調査及び老朽化対策計画策定マニュアル(案),平成 22 年 3 月, 230p.
- Pearl,J(2009): Causality – Models, reasoning, and inference, 2nd Ed. Cambridge University Press, 484p.
- 丹治肇, 桐博英, 中矢哲郎(2013):排水計画における水理機能の信頼性設計法の概念について, 農村工学研究技報,214,89-100
- 星野崇宏(2009):調査観察データの統計科学, 岩波書店, 245p.
- 横田弘, 岩波光保, 関根好幸(2003):海岸保全施設の老朽化実態と

その進行モデルの構築，海岸工学論文集，50，911-195，土木学会

受理年月日 平成25年11月05日

Problems on Improvement of Maintenance Plan of Coastal Disaster Prevention Facilities

TANJI Hajime*, KIRI Hirohide*, NAKAYA Tetsuo* and AZECHI Issaku*

Hydraulic Engineering Research Division, National Institute for Rural Engineering, NARO*

Summary

At maintenance of coastal disaster prevention facilities, a present maintenance of coastal disaster prevention facilities published by the government is not well used. This paper discussed about how to improve this manual and how to adjust actual maintenance. First, transitions of degradation or failure paths are selected as the main connection point of the manual and actual maintenance. The relation between actual failure and standard failure process on the manual is discussed. Integration of LCC related analysis methods are discussed. Life time expectation analysis methods are compared. Finally, the gap between actual maintenance and standard maintenance on the manual is discussed by positing chart based on the axis of cost and accuracy. Under increasing of some supported cost for maintenance, to decrease the cost of maintenance with the minimum accuracy decrease of estimation of life time of coastal disaster prevention facilities are proposed..

Key words : LCC, Transitions of degradation, Failure path, Cost benefit analysis, Life time of disaster prevention facilities

時間領域電磁探査法による大規模地すべり地比抵抗調査

中里裕臣* 井上敬資** 鈴木尚登* 寺田剛***

*企画管理部

**施設工学研究領域広域防災担当

***北海道開発局（前東北農政局）

キーワード：キャップロック、地下水、広域地質調査

I 緒言

山形県鶴岡市の七五三掛^{しめかけ}地すべり地（寺田ら，2010）では、凝灰角礫岩を不動層として上位に向かって凝灰岩薄層を挟む泥岩，粗粒玄武岩が層状に分布し，すべり面は泥岩中もしくは泥岩層の上端，下端に位置する。最大すべり面深度は 120m におよび，粗粒玄武岩および泥岩の層厚は場所により大きく変化する。最も地表側に分布する粗粒玄武岩は一般に強風化を呈するが，泥岩に対して高い透水性を示し，キャップロックとしてすべり面への地下水供給源になると共に，亀裂の発達する弱風化～新鮮部ではより高い透水性を示し，後背斜面から地すべりブロックに至る地下水流動部を構成すると推定されている。

このような地質状況に応じて地すべり対策工の効率的な実施と長期的な地すべりの安定化を図るためには，地下水流動場となる粗粒玄武岩の分布（層厚）および岩相（風化程度）の把握が重要となるが，数 km^2 に及ぶ地すべり地全体に高密度のボーリング調査を行うことは経済的に困難である。そこで，本研究では経済的な調査が可能な物理探査の中から後述する理由により，電磁探査法の 1 つである時間領域電磁法（Time domain electromagnetic method, 以下 TDEM 法）を選定し，1 次元探査を高密度で実施することにより，比抵抗の 3 次元分布を求め，それを基に粗粒玄武岩の分布・性状を 3 次元的に把握することを試みた。TDEM 法は深さ数 10 ～ 数 100m の探査に適し，高効率の探査法とされるが（物理探査学会，1998），日本では地熱探査，金属鉱床探査および石油探査などの深部資源探査での利用が多く（物理探査学会，1998），土木分野でも土被り 300m のトンネル路線調査（原ら，1996）の事例が見られるなど，地表下 100m 程度までを探査対象とした実績が少ない。このため本研究では，探査結果とボーリング結果との比較により大規模地すべり調査における TDEM 法の適用性を検討した。

II 探査手法

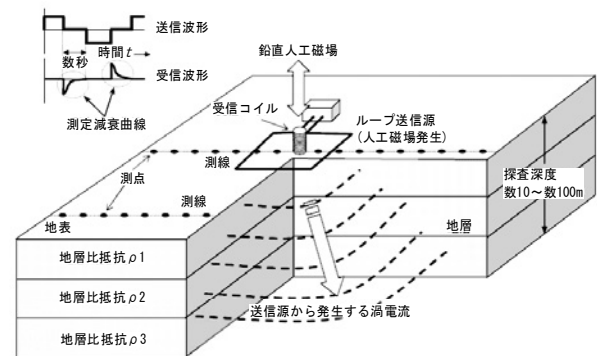


Fig.1 TDEM 法の概要（物理探査学会，2008）

Outline of TDEM method

2.1 探査手法の検討

本研究で調査対象とする粗粒玄武岩は，下位の泥岩に対して比抵抗が高く，両者の比抵抗コントラストが大きいことが期待されるため，適用する物理探査法としては比抵抗を求める電気探査法もしくは電磁探査法が候補として挙げられる。粗粒玄武岩は大規模な活動的地すべりブロックとその背後の山間地に位置する地すべりブロックにかけて広範囲に分布するため，このような現場で利用可能な探査技術を比較検討したところ，電線，電極設置の必要な 1 次元，2 次元比抵抗法電気探査を多数実施することは複雑な地形条件と立木等の障害から困難と考えられた。一方，電磁探査法では探査深度に対してセンサの展開規模が比較的小さく，大地と非接触で計測が可能で装置の移動が容易な手法があることから，ここでは電磁探査法を採用することとした。探査点間の移動能率の面では，自然信号もしくは遠方の固定送信源を利用し，受信機のみを移動させる超長波地磁気地電流法（very low frequency magnetotelluric method, VLF-MT 法），地磁気地電流法（magnetotelluric method, MT 法），人工送信源地磁気地電流法（controlled-source magnetotelluric method, CSMT 法）が有利である。しかし，VLF-MT 法は利用周波数が限られ深度方向の情報が得られず，後 2 者は地表下数 km を対象とする深部探査法であるため地表付近の分解能が不足する問題点がある。現場で送受信を行う手法としては周波数を変化させて深度方向の情報

を得る周波数領域電磁法 (frequency domain electromagnetic method, FDEM 法) と、信号切断後の経過時間 (以下、過度時間) と共に変化する 2 次磁場から深度方向の情報を得る TDEM 法 (Fig.1) がある。前者の一般的な装置では送受信機間 (探査深度程度) をデータケーブルで接続する必要があり林間地での移動率が低い。ヘリコプター等を利用し空中で電磁波の送受信を行う空中電磁法は、広域調査法として特に探査能率に優れるが、数 km² 未満の調査範囲ではコストが割高になる。一方後者は、一般的には探査深度数 100 ~ 数 1000m を対象とする資源探査の分野で利用される手法であるが、数 10 ~ 数 100m の探査深度を対象とする土木分野向けの装置も開発されている。また、送受信アンテナを調査地点ごとに設置する必要があるが、径数 10m の送受共用アンテナを利用することで山間地においても数分で設置が可能であり高能率で 1 次元探査が可能である。以上により、ここでは TDEM 法を採用した。

2.2 TDEM探査手法の最適化

本研究では粗粒玄武岩の分布状況を広域的に、高分解能でかつ経済的に把握することが課題である。そこで、探査装置としては小型軽量で、信号切断直後の過度時間分解能が高く、浅部探査に適した TEM-FAST48 (AEMR 社製) を使用し、12.5m 四方の送受信共用アンテナにより解析深度 50 ~ 100m 程度を目標とした 1 次元探査を実施した。さらに林間地ではアンテナを 2 組用意し、数名からなる班の 2 班体制で 1 班が測定中にもう 1 つの班が次点のアンテナ設置を行うことで、1 点あたりの移動および探査時間 20 分、最大 18 点/日の探査能率を実現した。探査データは解析ソフトウェア TEM Researcher (AEMR 社製) ver.6 および 8 を用いて 1 次元逆解析を行った。本ソフトウェアでは 6 層構造までの設定が可能だが、後述の見かけ比抵抗変化パターンから想定される構造が 2 - 4 層であることから 4 層構造を仮定し、100 Ω m 均質、各層厚 20m を基本初期モデルとして解析を行った。

TDEM 法のアンテナケーブルは、対象探査深度に応じて適切に選択する必要がある。Fig.2(a) は No.189 地点における 12.5m 四方アンテナのケーブルの導体径と送信電流の違いによる探査結果の違いを示している。信号切断後 25 μ sec 以降のデータ (より地下深部に相当) はアンテナによらず同一の値を示すが、それ以前の地下浅部に相当するデータは、同一地点にもかかわらず、ケーブル径および送信電流値によって異なる。これは、信号切断直後のアンテナの自己誘導の影響によるもので、最も浅層まで有効なデータが得られるのは導体断面積 0.25mm² ケーブル、1A 送信の場合である。これより太い 0.5mm² や 1.25mm² ケーブルでは、信号切断直後は上記の影響で左下りの曲線となってしまう、地表下数 m といった浅部の情報は正確に得られない。一方、細かいケ

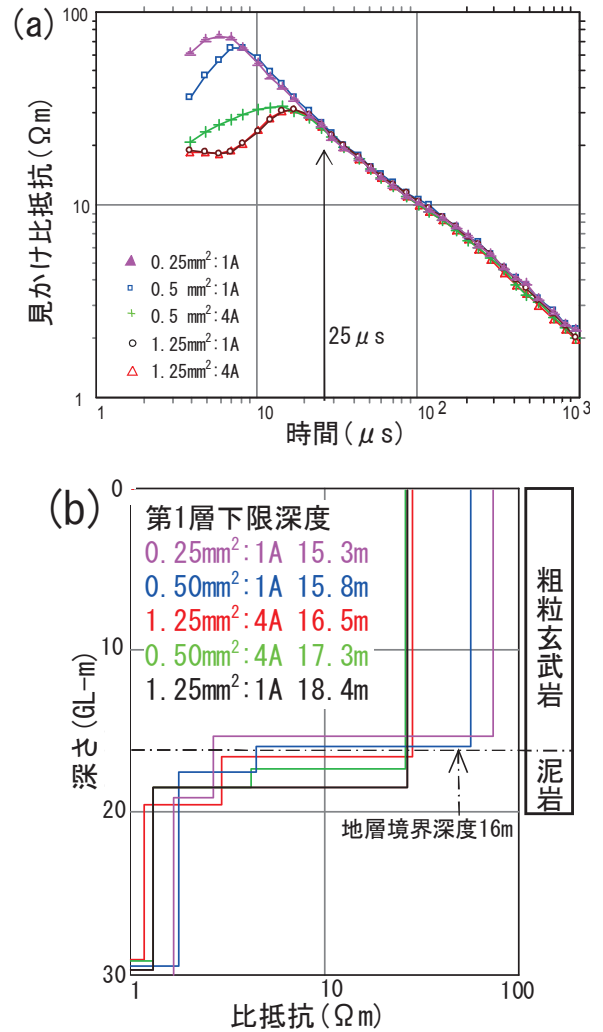


Fig.2 ケーブル・送信電流による浅部応答の比較
(a)時間一見かけ比抵抗曲線, (b)逆解析結果
Comparison of responses in early time corresponding to cable or sending current
(a) time-apparent resistivity curve, (b) inversion result

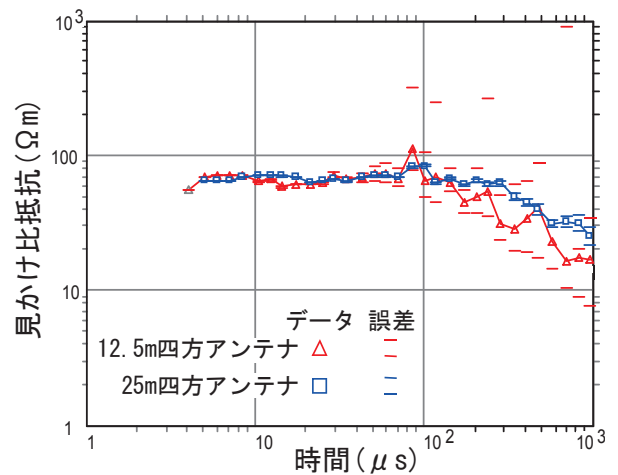


Fig.3 アンテナ径拡大による高圧線によるノイズの低減
Reduction of noise from power line with expansion of antenna diameter

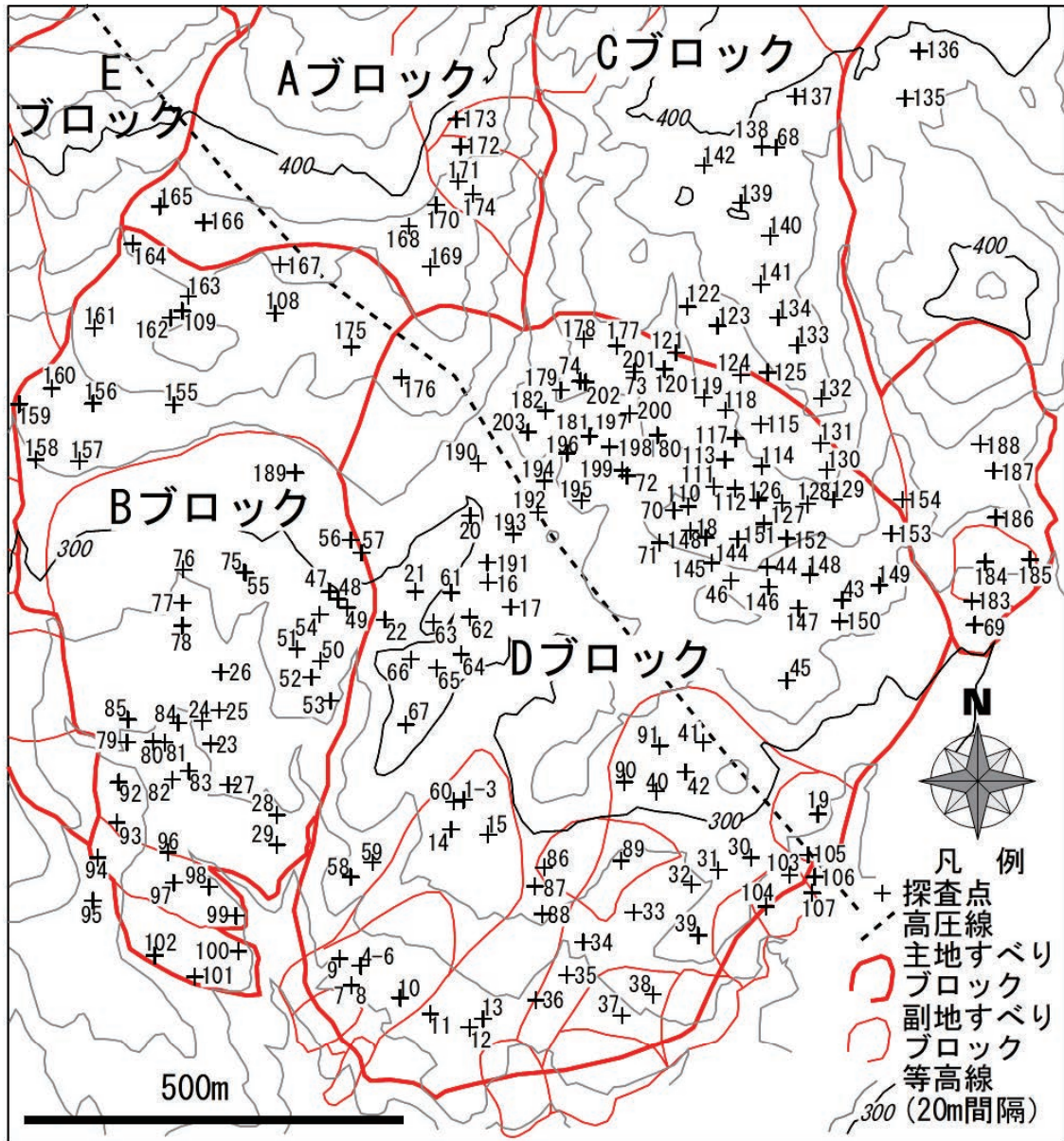


Fig.4 探査地点位置図

Locality map of survey points

ケーブルや送信電流が小さい場合は一般的に遅い時間で信号/ノイズ比 (以下 S/N 比) が小さく、データのばらつきが大きくなり、深部の情報を精度良く得られない。粗粒玄武岩の層厚は、斜面の上部で 100m 以上に及ぶことがボーリングにより把握されているため、ここでは 1.25mm² ケーブル使用、4A 送信を基本測定条件として、より深部の情報が精度良く得られるようにした。Fig.2 (b) は Fig.2 (a) の各データを逆解析した結果であり、粗粒玄武岩に相当する第 1 層の比抵抗は、より早い時間で高い見かけ比抵抗を示す 0.25mm² ケーブル、1A 送信の場合で高い値を示す。しかし、第 1 層の層厚は各ケースで大きく変わらず、近傍ボーリングにおける粗粒玄武岩下端深度の 16m に対し 15% 以内の結果を示し、地表付近の探査情報が欠如する場合でも、浅層の高比抵抗層下端深度が求められることを示している。

また、高圧線近傍では、特に深部のデータのばらつきが大きくなり、解析が困難となることが多かった。Fig.3 は高圧線真下の No.192 地点において、12.5m 四方アンテナと 25m 四方アンテナによる探査データを比較したもので、遅い時間すなわち深部のデータのばらつきが、アンテナ径の拡大により低減されることを示している。

2.3 調査地概要と探査点配置

七五三掛地すべりは、月山西麓の大規模地すべり地形群の南西端部に位置し、新第三紀中新世の硬質な凝灰角礫岩を基岩として、下位から泥岩、粗粒玄武岩が累重する流れ盤斜面からなっている。東北農政局庄内あさひ農地保全事業所の調査によれば、すべり面は泥岩上面もしくは泥岩中にあるが、主として粗粒玄武岩の層厚の違いによりすべり面深度は地すべりブロックにより大きく異

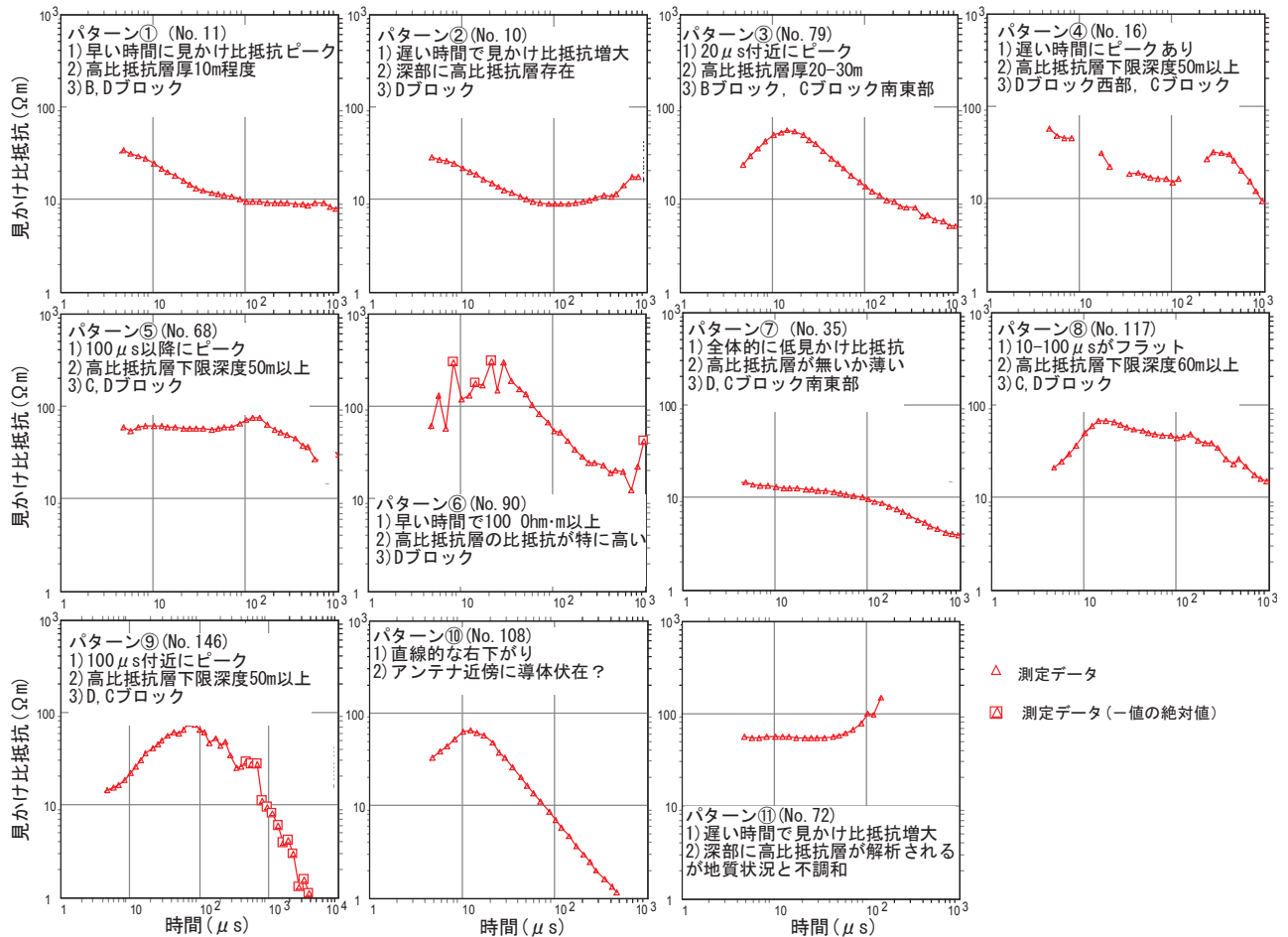


Fig.5 代表的な見かけ比抵抗曲線パターン

Typical pattern of apparent resistivity curve

なっている。2009年の災害時に大きく活動し現在は沈静化しているサブブロックを含むBブロックの中・下部では粗粒玄武岩層厚は28～40mであり、Bブロック上部から背後のAブロックにかけては50m以上と厚くなる。融雪期を中心とする緩やかな活動に対し対策が進められているDブロックの中・上部および背後斜面のCブロックでは粗粒玄武岩下端深度は120mに及ぶが、ブロック末端の南東部では粗粒玄武岩を欠き、下位の泥岩が地表に分布する。この七五三掛地すべりの約1300m四方の範囲において、2010年3月から2013年3月にかけてのべ21日間で203点(一部重複地点を含む)のTDEM法1次元探査を実施した(Fig.4)。探査結果の検証のため、調査ボーリング近傍には探査点を配置するように留意した。各探査の諸元は付表1, 2にまとめた。1日あたりの最大探査地点数は、水田主体の緩傾斜地を1名で探査した2011年11月24日と林間地を前述の2班体制で探査した2012年11月16日の実績である18点であった。

Ⅲ 探査結果と考察

3.1 見かけ比抵抗曲線パターン区分

各探査点における過度時間に対する見かけ比抵抗曲線は、場所により特徴が異なり、大きく10種類の応答パターンに分類できる(Fig.5)。おおむね早い時間から遅い時間に(浅層から深層)に向かって高比抵抗→低比抵抗もしくは低比抵抗→高比抵抗→低比抵抗の変化を示し、2～4層の層構造が推定された。このため、逆解析では4層構造を仮定して各層の層厚および比抵抗を求めた。

3.2 解析結果の取り扱い

1次元逆解析を行う中で、浅部の高比抵抗の比抵抗値が9999Ωmに発散しても、比抵抗モデルから計算される見かけ比抵抗曲線と実測データとのフィッティングは良好である場合が見受けられた。Fig.6の(a)と(b)は同じデータに対し、層比抵抗の上限をそれぞれ1000Ωm, 9999Ωmに設定して逆解析した結果である。下段の比抵抗柱状図では地表から2層目の比抵抗がそれぞれ設定上限値に解析される違いがあるが、逆解析のフィッティング程度を示す平均二乗残差(rms error)はいずれも約5%と良好であり、2層目の下端深度は33.5mと同一の

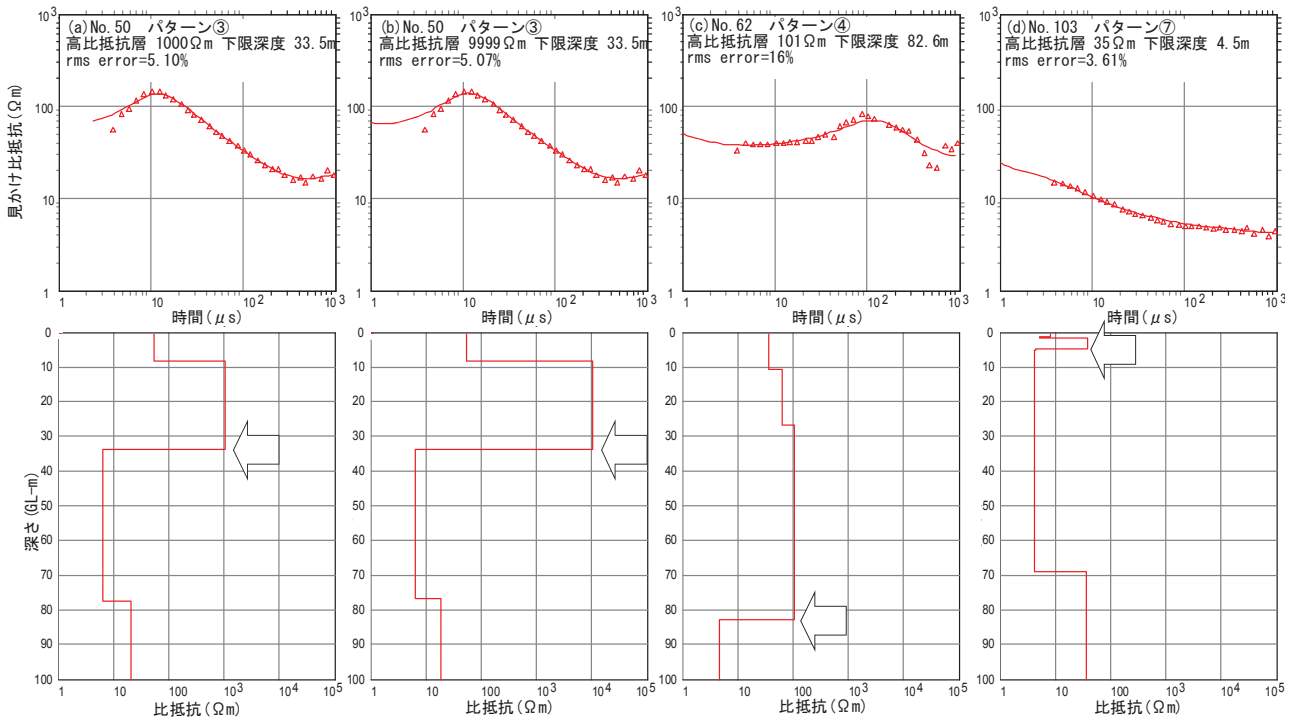


Fig.6 高比抵抗層下端深度の解析（上段：△測定見かけ比抵抗と逆解析結果の理論見かけ比抵抗曲線，
下段：逆解析による比抵抗柱状図（折れ線）と高比抵抗層下端深度（矢印））
Analysis of lower boundary depth of higher resistivity layer

結果が得られた。表層の高比抵抗層は粗粒玄武岩に相当すると考えられるが、上記のようにその比抵抗値が異なっても逆解析のフィッティング程度や層厚に影響しないため、高比抵抗層の比抵抗から風化度を評価することは難しいと判断した。このため、地質構造を考慮して粗粒玄武岩に相当すると考えられる表層の高比抵抗層とその下位のおおむね 10 Ω m 以下の低比抵抗層との境界深度を高比抵抗層下端深度と定義し (Fig.6 の矢印)，以降では各探査点における高比抵抗層下端深度のみを基に検討を進めた。

3.3 ボーリング近傍探査点における高比抵抗層下端深度

Fig.7 は、ボーリング近傍探査点における高比抵抗層下端深度とボーリングによる粗粒玄武岩層下端深度を比較したもので、逆解析の平均二乗残差による区分も行っている。両者は、全データで $R^2=0.72$ と比較的高い相関を示すが、粗粒玄武岩下端深度 60m 未満の探査点で $R^2=0.76$ と相関が高く、60m 以上の探査点では $R^2=0.02$ と相関は認められない。探査による高比抵抗層下端深度がボーリングによる粗粒玄武岩下端深度より小さめに解析される点の平均二乗残差はおおむね 10% 未満であり、逆解析は良好に行われていることを示す。No.133 探査点ではボーリングコア比抵抗が得られていることから、コア比抵抗に基づく比抵抗モデルから順計算で得られる理論測定値と実際の測定値を比較した (Fig.8)。ここでは深度 20 ~ 46m に比抵抗約 50 Ω m の風化砂岩を挟む

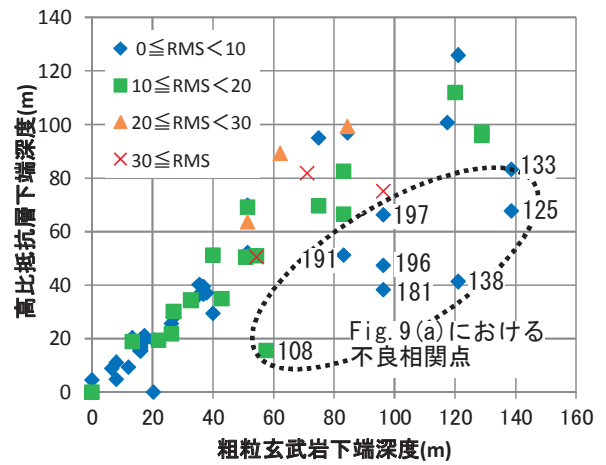


Fig.7 粗粒玄武岩下端深度と高比抵抗層下端深度の比較
番号は探査点 No.
Comparison of lower boundary depth between dolerite and higher resistivity layer

粗粒玄武岩が深度 139m まで分布し、そのコア比抵抗の範囲は 21 ~ 2156 Ω m であり、層構造モデルとしては 130 ~ 800 Ω m の範囲とした (Fig.8 下段比抵抗柱状図参照)。粗粒玄武岩の下位はコア比抵抗 9 ~ 18 Ω m の砂岩泥岩互層で、層モデルとしては 10 Ω m を与えた。Fig.8 下段の緑色折れ線で示される比抵抗モデルに対する TDEM 法の理論測定データは、Fig.8 上段の緑色の見かけ比抵抗曲線になるが、赤三角で示される実際のデータとは早い時間（浅い部分）の一部を除いて一致しない。

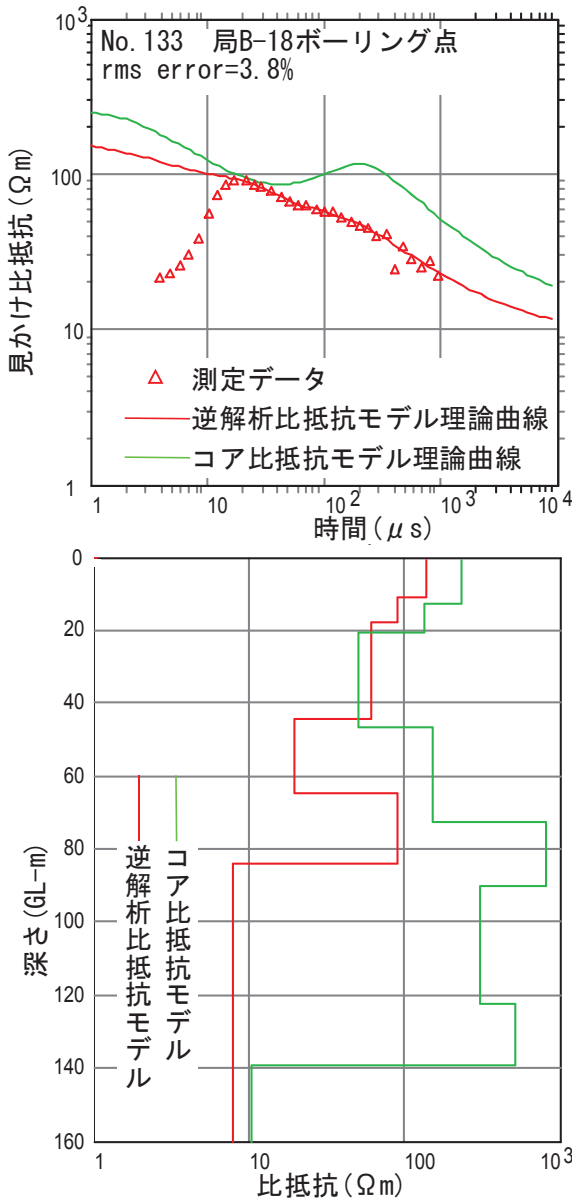


Fig.8 コア比抵抗に基づく比抵抗構造と探査結果の不一致例
 Example of disagreement between inversion result and resistivity structure based on core resistivity

このような地質構造（比抵抗構造）と探査結果の不一致の原因は不明であるが、60m 以上であっても粗粒玄武岩下端深度と相関のある探査結果が得られていることに着目し、調査範囲では TDEM 法探査による高比抵抗層下端深度は、粗粒玄武岩層下端深度に相当すると考える。

3.4 高比抵抗層分布と地下水流動

Fig.9(a) は TDEM 法探査によって得られた高比抵抗層下端深度等値線図である。この図からは、C,D ブロックで高比抵抗層厚 50m 以上の部分が広く分布し、C ブロックから D ブロックにかけて NNE-SSW 方向に層厚 70m 以上の部分が分布する。そして、D ブロック南東側の末端部は高比抵抗層が薄く、20m 未満を示す。ボーリングデータに基づき D ブロックについて作成された

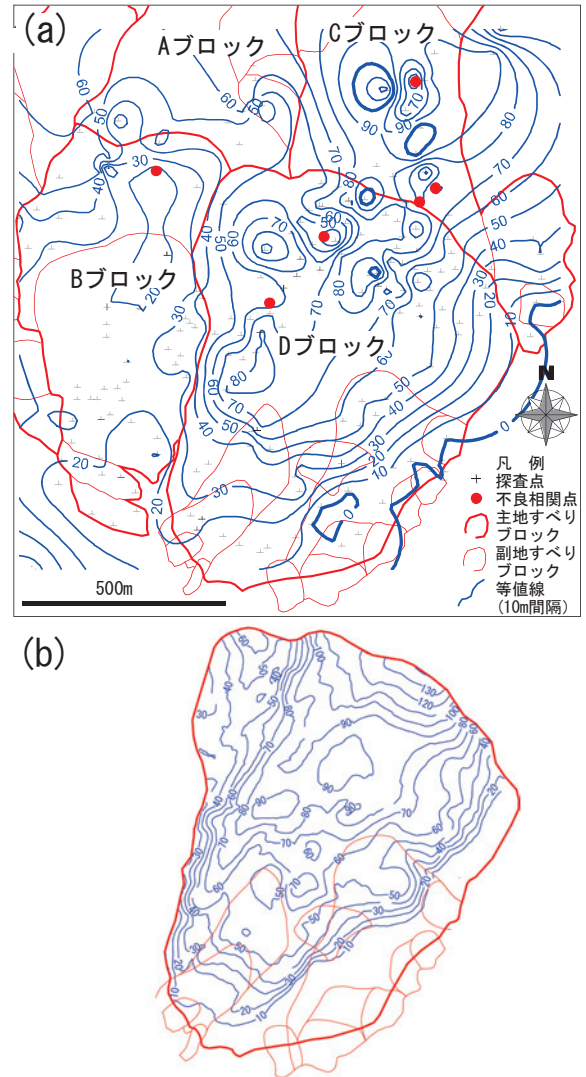


Fig.9 (a) 高比抵抗層下端深度分布図, (b) D ブロック粗粒玄武岩下端深度分布図 (庄内あさひ農地保全事業所資料)
 (a) lower boundary depth map of higher resistivity layer, (b) lower boundary depth map of dolerite in the D block

粗粒玄武岩下面深度等値線図 (**Fig.9(b)**) と比較すると、**Fig.9(a)** で高比抵抗層下端深度が 70m 以上の部分では **Fig.7** で検討したボーリング結果と探査結果の不良相関点とともにボーリングと離れた点で下端深度が小さく解析された点により複雑な等値線分布を示す。しかし、細かい起伏を無視すれば、高比抵抗層下端深度の分布傾向は粗粒玄武岩下端深度分布と調和的である。また、西側の B,A ブロックでは高比抵抗層厚はおおむね 30m 程度、最大でも 60m 程度であり、C,D ブロックと対照的な違いを示す。これらの特徴は、すでにボーリング調査により把握されていたものであり、それが追認できたことで本手法の有効性が示されたと考えられる。

Fig.10 は **Fig.9** データと地表標高から高比抵抗層および D ブロックにおける粗粒玄武岩の下面を標高表示したものである。C ブロックから D ブロックにかけての高比抵抗層および粗粒玄武岩の層厚の大きい部分の下面

IV 結 言

山形県鶴岡市の七五三掛地すべりに地下水を供給するキャップロックに相当する粗粒玄武岩の分布の把握のため、山間地における探査能率および粗粒玄武岩と下位の泥岩との比抵抗コントラストを考慮して TDEM 法電磁探査による 1 次元探査の多点適用を試みた。小型軽量探査装置の採用と現地作業の高能率化により、探査深度 50 ~ 100m の 1 次元探査を山間地においても 1 日あたり最大 18 点実施可能とし、約 1300m 四方の範囲について粗粒玄武岩相当層の層厚分布を把握した。ボーリング地点近傍の探査結果の比較から、探査による高比抵抗層下端深度と粗粒玄武岩下端深度は良い相関を示し、TDEM 法電磁探査が調査初期の概査やボーリング間の補間に有効であることを確認した。しかし、粗粒玄武岩下端深度が 60m を超えると相関が悪くなり、解析された高比抵抗層厚の大きい領域には層厚が小さく解析され層厚分布を複雑にする探査点が見受けられた。このようなところでは、特に深部データの S/N 比を改善するために、送信アンテナ径の拡大が必要と考えられる。また、逆解析において高比抵抗層比抵抗の解析結果への寄与が小さかったため、風化度と比抵抗との関係は検討できなかった。今後、高比抵抗層の探査解析精度の向上を図るため、TDEM 法浅部探査用細径ケーブルアンテナや垂直電気探査を併用し、地表付近から精度の高い比抵抗情報を得ることを検討する必要がある。

謝辞：本研究は平成 23 年度および平成 24 年度東北農政局庄内あさひ農地保全事業所受託業務の一環として、平成 25 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「沿岸域における効率的な深層地下水探査手法の開発」の支援を受けて行われた。本研究の実施に当たり、山形大学農学部奥山武彦教授、同大学学生諸氏、庄内あさひ農地保全事業所および株式会社日さくの関係各位にご協力いただいた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

寺田 剛・鎌田知也・森 一司・中原正幸(2010)：2009 年山形県鶴岡市七五三掛(しめかけ)地すべり災害における緊急対策および恒久対策，地盤工学会誌，58，634-635
 物理探査学会(1998)：物理探査ハンドブック手法編第 6 章電磁探査，297-398，物理探査学会，東京。
 原 敏昭・西牧 均・和田一成・斎藤 章・関根一郎(1996)：TDEM 電磁探査法によるトンネル調査，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，396-400
 物理探査学会(2008)：新版物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル 2008ー，物理探査学会，539p.

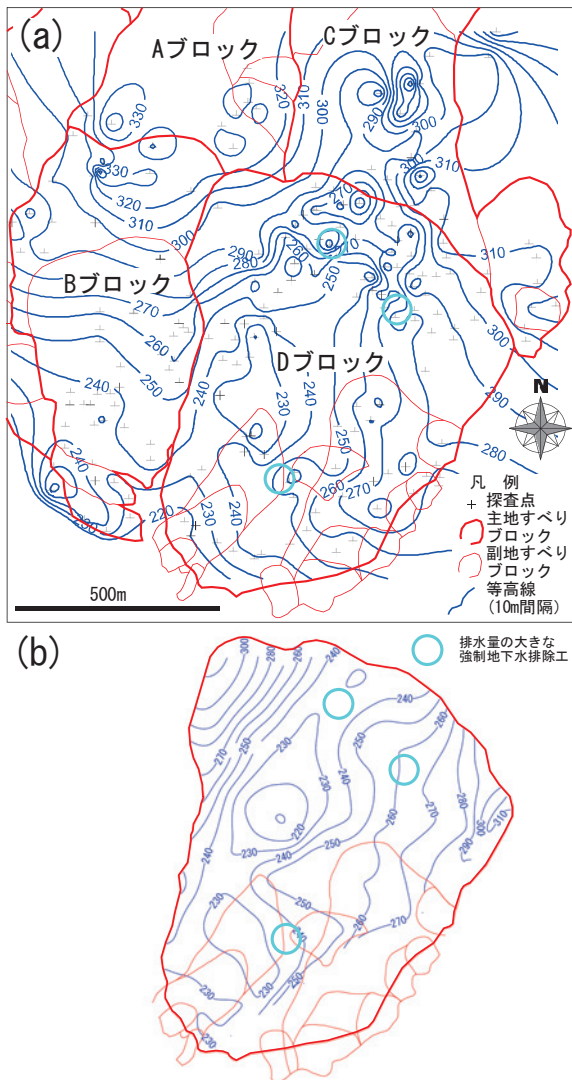


Fig.10 (a)高比抵抗層下面等高線図，(b)D ブロック粗粒玄武岩下面等高線図(庄内あさひ農地保全事業所資料)
 ○は排水量の大きい強制地下水排除工位置
 (a) base counter map of higher resistivity layer,
 (b) base counter map of dolerite in the D block

は船底状を呈していることから、これらの部分は山側からの地下水流動部として機能し、D ブロックの地すべり活動に影響を与えている可能性が高い。Fig.10 の○印は排水量が 600L/min 以上と大きい強制地下水排除工(ディープウェル)の位置を示しており、粗粒玄武岩の厚い部分での豊富な地下水の存在を示している。

以上の検討から、調査地区において TDEM 法電磁探査によりキャップロックである粗粒玄武岩の分布概要を把握することができ、TDEM 法電磁探査が調査初期の概査やボーリング間のデータ補間に有効であることが確認できた。

Appendix 2 TDEM 探査諸元 (2)

Parameters of TDEM survey (2)

Table with columns for No., 現場番号, 探査日, 時刻, 地すべりブロック, 応答曲線パターン, 高比抵抗層下端深(m), 高比抵抗層上端深(m), 近傍ポリング, 粗粒玄武岩下端深(m), 等厚線図用仮座標データ (基底標高, 下端深度, 地表標高), 探査諸元 (アンテナ径, ケーブル径, 電流, スキャン時間, rms error). The table contains 203 rows of detailed survey data.

Resistivity Structure Investigation of Large-scale Landslides Using Time-domain Electromagnetic Method

NAKAZATO Hiroomi*, INOUE Keisuke*, SUZUKI Hisato* and TERADA Takeshi**

*National Institute for Rural Engineering, NARO

**Hokkaido Regional Development Bureau

Summary

The application of the multipoint survey of the time-domain electromagnetic (TDEM) sounding was carried out for understanding the thickness distribution of dolerite, which supplied groundwater to landslide as caprock. The application of a small and light weight equipment and the efficiency improvement of field work enabled the sounding (survey depth: 50-100 m) of 18 points or more in a day, even in the mountainous area. We conducted such TDEM sounding of 203 points within the range of 1.7 km², and estimated the thickness distribution of the dolerite in the Shimakeke landslide, Yamagata Prefecture. The sounding results near the borehole points showed that there are high correlations between the lower boundary depth of higher resistivity layer and that of dolerite. It was confirmed that the multipoint TDEM sounding was effective for the running survey and interpolation between boreholes. However, it is necessary to improve signal-to-noise ratio such as the expansions of the sending and receiving antenna diameter so that the correlation may be lowered when the dolerite layer thickness exceeds 60 m. Moreover, because the contribution of the resistivity value of the higher resistivity layer to the analytical result was small in the inversion analysis, the relation between the weathering degree and the resistivity was not able to be examined. It will be necessary to improve the analysis accuracy concerning the higher resistivity layer by data acquisition with the fine cable antenna for near surface and using together the vertical electrical prospecting etc.

Key words: caprock, groundwater, wide-area geological investigation

平成 25 年度豪雨による決壊ため池の氾濫解析検証

正田大輔* 川本 治* 鈴木尚登** 吉迫 宏* 井上敬資* 小嶋 創***

*施設工学研究領域 広域防災担当

**企画管理部 防災研究調整役

***東京農工大学

キーワード：ため池，決壊，氾濫解析，計測，豪雨

I 緒言

近年，局所的で突発的な豪雨が発生しており，人や公共等の構造物，作物に対して被害を与えている。このような状況の中，気象庁では，平成 25 年 8 月から，「特別警報」を運用し，これまでに経験したことのないような大雨について，最大限の警戒を呼びかけるようになった。被害を受ける構造物の中に農業用ため池があり，その多くは江戸時代以前に造られており，老朽化が進み抜本的な改修を必要とするものも少なくない（佐々木ら，2013）。

近年の豪雨災害の 1 例として，ため池に大きな被害をもたらした 2004 年の台風 23 号では，淡路島内だけで 181 箇所のため池が決壊し，農地農業用施設の総被害額は，阪神淡路大震災を上回るものであった（兵庫県農林水産部，2005）。

このような中で，豪雨時のため池に関する技術開発及び研究が進められており，ため池管理者が行う防災対策を支援するシステムの構築（谷ら，1999）や，地域内での連絡体制を活用して防災情報から避難する検討（石垣ら，2009）が行われている。ため池決壊時の氾濫域に関する研究は，大竹ら（2006）がため池が密集する地域の 87 箇所を対象に氾濫時のシミュレーションを行っている。また，正田ら（2012）は実際に決壊したため池において氾濫解析を実施し，現地での聞き取りをもとに解析精度について検討している。さらに，川本ら（2013）は，ため池の氾濫解析における平面上の間隔の異なる標高データや，粗度係数，決壊位置についての考え方の整理を行っている。

海外においても，ため池やダムが決壊に関する研究が行われており，米国の連邦緊急事態管理局（FEMA，2007）が，米国やヨーロッパでの決壊実験や解析等を取りまとめている。また，英国においてもため池及びダムの危機管理あるいは決壊時における貯留水の流出量についてまとめている（Hughes, A. et al. 2000）。

ため池以外の氾濫に関する研究については，河川や天然ダムなどがある。河川の氾濫に関する研究は，河川堤防の

決壊を対象に昭和初期から行われている（松尾，1953）。この中では，昭和 28 年における九州水害時の降雨記録（6 月 25～29 日 623.7mm，最大日降雨量 311.3mm，最大時間降雨量 63.2mm）と，決壊原因との関連についてまとめられている。現在河川堤防の決壊時の氾濫シミュレーションの計算条件などで，使用されている氾濫シミュレーション・マニュアル（案）（栗城ら，1997）の中でも，上記の水害時に決壊した筑後川のデータを使用して検証が行われている。また，末次ら（1998）の研究では，上記の昭和 28 年の水害を対象に，計測された 5 箇所の最高浸水深及び 2 箇所の逆破堤時刻の実績データから，氾濫解析モデルの検証も行われている。

天然ダムの決壊に関する研究としては，森ら（2005）がフェレニウス法によりダムのすべり破壊の可能性を評価しており，里深ら（2007）が，平成 17 年 9 月の台風により形成された天然ダムの決壊を想定し，水流層と砂礫移動層をモデル化してシミュレーションを行っている。

ため池は主に営農目的の施設であり，比較的標高の高い場所にあり，決壊した場合の下流に対する影響は河川堤防等とは異なる。そこで本報では，決壊したため池において①決壊断面の測量結果を用いて，既存式でのため池からの最大流出流量の比較，②氾濫解析での最大水深結果の現地踏査による検証，③決壊による痕跡が大きかった箇所についての氾濫解析の最大流速結果と測量結果の比較，以上の点に着目し，ため池の氾濫解析の検証を行った。

II 決壊ため池周辺雨量と決壊点の流出流量

各決壊ため池の貯水量・堤高・堤長（(財)日本農業土木総合研究所 2000，谷ら 1999）と土砂流出面積，決壊断面の寸法，決壊時の雨量についてまとめたものを **Table 1** に示す。**Table 1** の決壊ため池について，後述する氾濫解析結果の現地検証または土砂流出域と決壊断面についての測量を実施した。2-中ため池については，現地検証・測量いずれも行っていない。

2.1 決壊ため池周辺雨量

決壊発生日の時間最大雨量とため池への積算流入量について参考のため Appendix 1 (a)~(i)に示す。各時間の流入量 I については以下の式 (農林水産省, 2006) により算出している。

$$I = A \times r \tag{1}$$

ここで、 A は流域面積と満水面積 ((財) 日本農業土木総合研究所 2000, 谷ら 1999) の和 (m^2)、 r は時間雨量 (m/h) である。また、各ため池の貯水量についても併記している。

雨量については、「ため池 DB (データベース) ハザードマップ」((財) 日本農業土木総合研究所 2000, 谷ら 1999) から得られる気象庁 1km メッシュ解析雨量を用いている。流入量の算出は、ため池地点の雨量データのみを使用している。

2.2 決壊点の流出流量

決壊ため池において、ため池決壊点から流出する最大流量について比較を行う。比較を行ったのは次の 3 つの式は、Costa (1998) と Froehlich (1995), 土地改良事業の費用対効果算定手法(農林水産省, 2007)で示された式で、それぞれ式(2)と式(3), 式(4)に示す。ここで、 Q_C は Costa 式による最大流量 (m^3/s)、 H は堤高 (m)、 V は貯水量 (m^3)、 V_C は貯水量 (m^3) を 10^6 で除した値、 Q_F は Froehlich 式による最大流量 (m^3/s)、 Q_L は費用対効果算定手法による最大流量 (m^3/s)、 H_w は決壊高さ (m) である。

$$Q_C = 325 (H V_C)^{0.42} \tag{2}$$

$$Q_F = 0.607 H_w^{0.295} V^{1.24} \tag{3}$$

$$Q_L = 4.5 H_w^{5/2} \tag{4}$$

Table 1 で示した諸元を用いて Table 2 の最大流量を算出した。Froehlich 式や費用対効果算定手法の式については、決壊高さを用いて算出しているが、計測できなかった 5-石原ため池と 11-上ジゲ池については堤高を用いて算出を行

っている。7, 8-野崎上下池については、貯水量は上池と下池の合計値、堤高は下池の堤高を用いて流出流量を算出している。

Table 2 より、1-谷内の池や 6-新堤池のように、決壊高さが堤高に比べて小さい場合、決壊高さを用いた Froehlich 式や費用対効果算定手法の式では流出流量が小さくなった。また、堤高を用いて算出した 5-石原ため池と 11-上ジゲ池については費用対効果算定手法の式で他の式に比べて大きな値となった。さらに、決壊高さが 5m を越えている 9-真山池についても費用対効果算定手法の式では他の式に比べて大きな値を示した。上下池ともに決壊した 7, 8-野崎上下池の場合は、決壊データを用いた Froehlich 式や費用対効果算定手法の式では流出流量が小さくなった。

以上のことから、①Costa 式と費用対効果算定手法の式は近い値を示した。しかしながら、堤高もしくは決壊高さが大きくなるケースについては費用対効果算定手法において大きな値となる。②Froehlich 式は他の式に比べて小さい値を示した。③上下池ともに決壊した場合、Costa 式では流出流量が大きくなった。

本報では、決壊高さを計測していないケースがあったため、氾濫解析時の流出流量の算定には Costa 式を用いる。

III 決壊ため池での最大水深による現地検証

ため池の氾濫解析について精度を検証するには、決壊現場での氾濫状況との比較が重要である。そこで、本項では Table 1 の決壊ため池について、土砂の流出や農地法面の侵食等で氾濫状況を確認し、二次元不定流の氾濫解析の妥当性について検証した。

氾濫解析には、上述の「ため池 DB (データベース) ハザードマップ」の簡易氾濫解析 (谷・井上, 2009) の改良版 (川本ら, 2013) を使用した。粗度係数は 0.04, 解析総時間は 60 分、標高データは国土地理院の基盤地図情報 5m メッシュで、未整備部分については 10m メッシュを用いた。粗度係数は、谷部の池が多かったため、土木学会 (1999) の二次元不定流モデルにおいて、樹林地帯の係数として提案

Table 1 決壊ため池の諸元と周辺雨量
Dimension of failure dam and rainfall around dam

No.-名称	県名	土砂流出面積 (m^2)	貯水量 (m^3)	堤高 (m)	堤長 (m)	決壊幅 (m)			決壊高さ (m)	累積24時間雨量 (mm)	時間最大雨量 (mm)
						下	上	平均			
1-谷内の池	富山県	-	2,200	4.0	25	-	5	-	1.6	149.3	23
2-中ため池	山形県	-	11,300	10.0	37	-	-	-	-	180.4	29
3-沖堤	新潟県	1786.79	12,500	15.0	60	4.37	13.54	8.96	4.19	76.5	35
4-火打岩ため池	山口県	2766.12	22,500	4.7	96	14.88	18.35	16.62	3.73	312	115
5-石原ため池 (重ね池)	山口県	-	12,000	5.2	72	-	-	-	-	536.8	85
6-新堤池	福岡県	1749.19	10,800	8.2	58	1.97	5.69	3.83	1.77	159.7	37
7-野崎下池	青森県	4641.74	23,400	4.0	80	3.48	10.22	6.85	3.11	116.8	22
8-野崎上池	青森県		21,600	2.0	127	3.88	7.98	5.93	1.73		
9-真山2号	秋田県	-	35,000	7.0	52	9.35	23.7	16.53	6.9	182.2	44
10-宝谷池	兵庫県	1207.97	9,000	5.8	37	3.74	7.04	5.39	2.65	210.7	22
11-上ジゲ池 (重ね池)	兵庫県	-	1,200	3.5	40	-	-	-	-	229	23

Table 2 最大流量算出結果
Calculation result of maximum outflow

No.-名称	Costa式 (解析で使った式)	Froehlich式	費用対効果の 算定手法
1-谷内の池	44.52	10.53	14.57
3-沖堤	160.90	58.03	161.96
4-火打岩ため池	126.50	59.67	120.79
5-石原ため池 (重ね池)	101.36	74.88*	277.47*
6-新堤池	117.41	19.08	18.76
7, 8-野崎上池+ 下池	158.16	58.36	76.48
9-真山2号	180.03	145.83	562.78
10-宝谷池	94.04	29.87	51.61
11-上ジグ池 (重ね池)	32.63	23.24*	103.13*

*印は堤高を使用

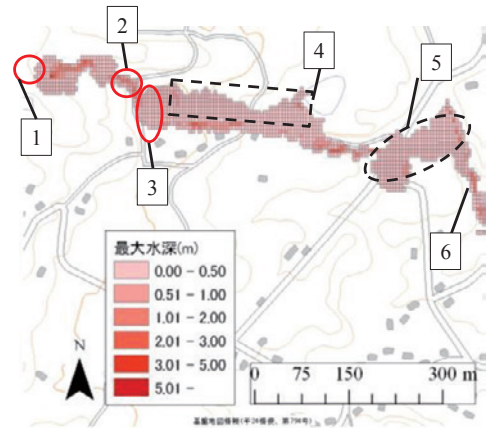


Fig.1 (a) 1-谷内の池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Yachino-ike using inundation analysis and each point of pictures

されている値を用いた。背景図には、農業・食品産業総合研究機構が開設した「基盤地図情報 25000WMS 配信サービス」による国土院理院の 25,000 分の 1 基盤地図を用いた。本項で対象としたため池は、著者らが踏査した以下 9 基の池、1-谷内の池、3-沖堤、4-火打岩ため池、5-石原ため池、6-新堤池、7-野崎下池、9-真山 2 号、10-宝谷池、11-上ジグ池である。

3.1 1-谷内の池

梅雨前線影響（内閣府，2013a）のため、6 月 19 日の豪雨により、堤体の一部が破堤した。**Fig.1(a)**に、谷内の池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、**Fig.1(b)**に、谷内の池周辺の各地点での写真を示す。**Fig.1(b)**の写真中の番号は **Fig.1(a)**中の番号位置で撮影したことを示しており、以後のため池も同様である。**Fig.1(b)** -1 が決壊断面である。堤体直下部にあった倉庫 (**Fig.1(a)** -2) の、高さ 1.8m の場所にあった **Fig.1(b)** -2 中の窓から、土砂が流入した。これは、**Fig.1(a)** -2 の最大水深結果ともほぼ一致する。さらに、流出した土砂が下流の池に埋没、農地（畑）にも流入した (**Fig.1(b)** -3)。また、**Fig.1(a)** -4 の箇所は踏査時には被災状況は確認できず、水路の標高が反映されていない箇所があることが考えられる。**Fig.1(a)** -5 の箇所には水路上に橋 (**Fig.1(b)** -5) があったため、氾濫解析においてはこの橋の標高が水路底面の標高と置き換わったため、水路がせき止められた結果、貯留・越流のため氾濫域が広がったものと示唆される。**Fig.1(a)** -6 の箇所からは **Fig.1(b)** -6 のように水路があり、解析結果同様ここを流れ下った。

3.2 3-沖堤

7 月 31 日の豪雨により、決壊した。堤体の一部が破堤（約幅 9m）した。**Fig.2(a)**に、沖堤の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、**Fig.2(b)**に、沖堤周辺の各地点での写真を示す。**Fig.2(b)** -1 が決壊断面である。**Fig.2(a)** -2 の堤体直下にある農地に土砂が流入しており、最大水深は 1~2m であった。さらに下流側の農機具小屋へ土砂が流入したようであるが、決壊日と調査日の間の期間が長くなったこともあり、**Fig.2(a)** -3 の範囲では大きな痕跡は確認できなかった。

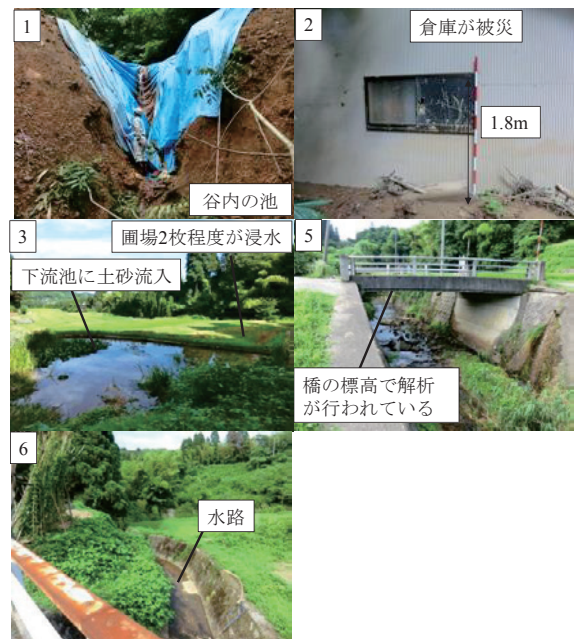


Fig.1(b) 谷内の池周辺の各地点での写真
Pictures around Yachino-ike

3.3 4-火打岩ため池

7 月 26 日から 8 月 2 日にかけて、島根県や山口県などで局地的に大雨となり、山口県の須佐で 1 時間降水量 138.5mm、24 時間降水量 351.0mm を記録した（内閣府，2013b）。この雨の影響で、火打岩ため池の堤体の一部が破堤（幅約 16.5m）した。**Fig.3(a)**に、火打岩ため池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、**Fig.3(b)**に、火打岩ため池周辺の各地点での写真を示す。**Fig.3(b)** -1 の赤丸部分が決壊断面である。決壊断面の右岸側の堤体にも越流侵食の痕跡が確認できた。**Fig.3(b)** -2 に堤体直下の写真を示す。農地に土砂流出し、決壊時の明確な痕跡が確認でき、最大水深は 0.5~1m であった。また、**Fig.3(a)** -2 に示す解析結果からは、この近傍で比較的水深が高くなっている。さらに、**Fig.3(a)** -3 に示す箇所では **Fig.3(b)** -3 に示すような田が広がり、調査日には目立った痕跡は見られなかった。比較的緩勾配であったことで大きな痕跡を残さなかった可能性

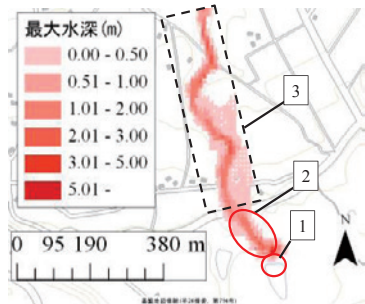


Fig.2 (a) 3-沖堤の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Oki-tsutsumi using inundation analysis and each point of pictures



Fig.2 (b) 3-沖堤の池周辺の各地点での写真
Pictures around Oki-tsutsumi

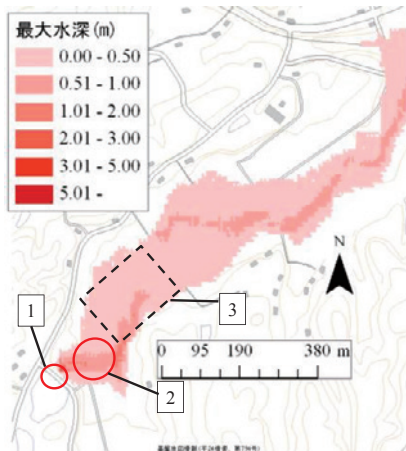


Fig.3 (a) 4-火打岩ため池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Hiuchiwa-ike using inundation analysis and each point of pictures

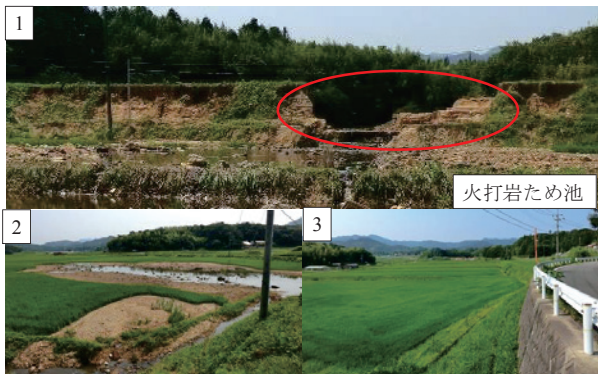


Fig.3 (b) 4-火打岩ため池周辺の各地点での写真
Pictures around Hiuchiwa-ike

がある。解析結果からも浸水範囲において最大水深 0 ~ 0.5m となっていた。

3.4 5-石原ため池

7月28日の豪雨により決壊した。Fig.4(a)に、石原ため池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、Fig.4(b)に、石原ため池周辺の各地点での写真を示す。Fig.4(b) -1 の上側の赤丸部分が決壊断面で、堤体に侵食跡が確認できなかったため、越流はなかったものと推察される。下側の赤丸部が下池堤体侵食部分である。上池貯水は直下流のため池に流入して、Fig.4(b) -1 の下側赤丸のように下池の堤体部分を越流し侵食した。さらに Fig.4(b) -2 のように、下池直下にあった2つのビニールハウスへ土砂の流入が確認できた。Fig.4(a) -2 の最大水深結果においては、最大水深 1~2m となっている。また、Fig.4(a) -3 の箇所には大きな痕跡は見られなかったが、Fig.4(a) -4 の赤丸箇所には Fig.4(b) -4 のように土砂が流出した痕跡が見られ、ここにも決壊時に水が流出したことがわかる。さらに、Fig.4(b) -4 の水路を解析結果の表示のように流れ下ったと推察される。

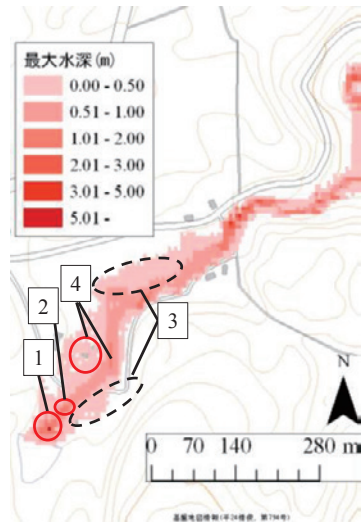


Fig.4 (a) 5-石原ため池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Ishihara-ike using inundation analysis and each point of pictures

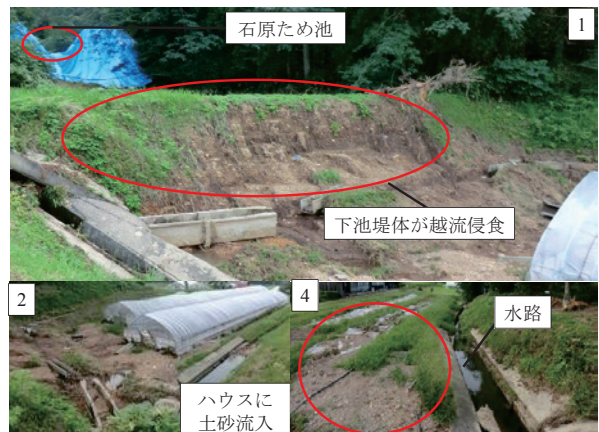


Fig.4 (b) 5-石原ため池周辺の各地点での写真
Pictures around Ishihara-ike

3.5 6-新堤池

台風第 15 号から変わった低気圧等の影響により九州・中国地方で大雨となり、福岡県福岡で 1 時間降水量 72.5mm、24 時間降水量 240.5mm を記録した（内閣府，2013c）。8 月 31 日の豪雨により、堤体の一部が破堤（幅約 4m）し、新堤池が決壊した。Fig.5(a)に、新堤池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、Fig.5(b)に、新堤池周辺の各地点での写真を示す。Fig.5(b)-1 の赤丸部分が決壊箇所である。Table 1 からわかるが、堤長や堤高に対して決壊箇所の断面は他の池と比べて小さい。Fig.5(a)-2 の箇所では土砂の痕跡があり最大水深は 5m 以上と他のため池と比較しても水深の高い場所に痕跡が見られた。Fig.5(a)-3 の箇所では Fig.5(b)-3 に示すように農地法面の侵食跡があった。Fig.5(a)-3 の最大水深の結果では、区画に沿うように水深が 3~5m と高い箇所が見られる。Fig.5(a)-4 の領域には、大きな痕跡は見られなかった。これは、決壊断面が小さく、貯水の流出量が少なかったことで、実際の浸水域の方が解析結果の浸水域より小さくなったと示唆される。

3.6 7-野崎下池・8-野崎上池

9 月 15 日は、前線や台風 18 号周辺から流れ込む湿った空気の影響で、東日本や北日本で局地的に激しい雨が降った。9 月 16 日は、台風に伴う雨雲により、四国から北海道

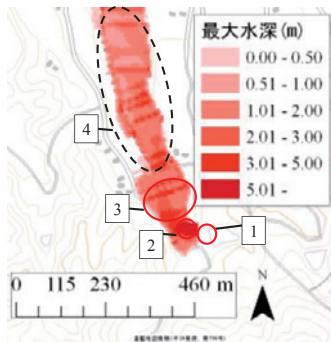


Fig.5 (a) 6-新堤の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Sintsutsumi-ike using inundation analysis and each point of pictures

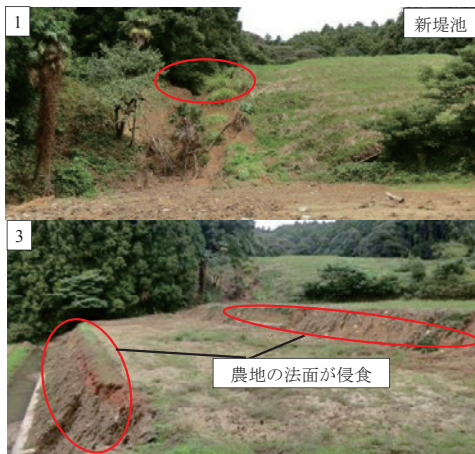


Fig.5 (b) 6-新堤周辺の各地点での写真
Pictures around Sintsutsumi-ike

にかけての広い範囲で大雨となった。特に福井県、滋賀県、京都府では、記録的な大雨となった（内閣府，2013d）。9 月 16 日 14:30 頃豪雨により、上池が幅約 6m にわたって決壊、その直後に下池も幅約 7m にわたって決壊した。Fig.6(a)に、野崎下池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、Fig.6(b)に、野崎下池周辺の各地点での写真を示す。Fig.6(b)-1 の赤丸部分が決壊箇所である。下流転作水田に土砂流入し、冠水した。Fig.6(a)-2 の箇所では土砂の痕跡があり、最大水深は 1~2m であった。Fig.6(a)-3 の箇所にはコンクリート製水路の崩落と農地法面の侵食跡が見られた（Fig.6(b)-3）。解析結果においては最大水深 0.5~1m であったが、周辺と比較して高い値ではなかった。今後も、水深と侵食の関連については情報集積が必要である。また、Fig.6(a)に示す水路や道路が、Fig.6(b)-4 のようにさらに下流に存在する。Fig.6(a)の点線で囲われた部分は目視での痕跡は確認できなかった。これは、氾濫水が道路を越えなかったあるいは水路を流下したことにより、大きな痕跡が残らなかったためと考えられる。

3.7 9-真山 2 号

9 月 16 日の豪雨により決壊した。右岸側からの道路伝いあるいは水路から溢れた水の影響で決壊が生じたと推察される。 Fig.7(a)に、真山 2 号の氾濫解析による最大水深と

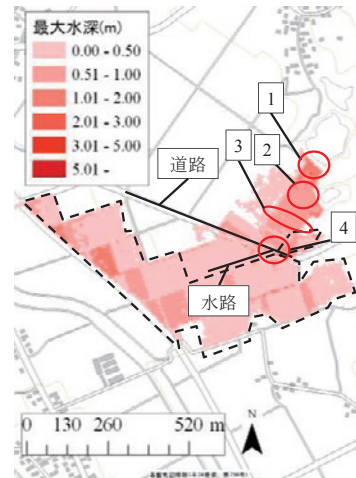


Fig.6 (a) 7-野崎下池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Nozakisimo-ike using inundation analysis and each point of pictures



Fig.6 (b) 7-野崎下池周辺の各地点での写真
Pictures around Nozakisimo-ike

写真位置図を、Fig.7(b)に、真山 2 号周辺の各地点での写真を示す。Fig.7(b)-1 の赤丸部分が決壊断面である。Fig.7(a)-2 が示す赤枠部分で土砂の流出が確認でき、最大水深としては 0 ~ 5m であった。その下流にある Fig.7(a)-3 の水路 (断面約 2m×2m) に到達後は、水路伝いに流下したものと推察される。解析結果についても Fig.7(a)点線黒枠のように水路伝いに流下した結果を示した。

3.8 10-宝谷池

9 月 16 日の豪雨により決壊した。決壊は前触れなく突如として起こり、全貯水が流出するのに 30 分はかからなかったとの証言もあった。Fig.8(a)に、宝谷池の氾濫解析による最大水深と写真位置図を、Fig.8(b)に、宝谷池周辺の各地点での写真を示す。Fig.8(b)-1 の赤丸部分が決壊断面である。Fig.8(a)-2 の箇所では土砂の痕跡があり、最大水深は 0.5 ~ 3m であった。Fig.8(a)に示した県道では、Fig.8(a)-3 の最大水深は 2~3m となっており、この県道が土砂流出により通行止めとなった。Fig.8(a)-4 の箇所 Fig.8(b)-4 のような農地法面の侵食跡が見られた。解析結果では最大水深 0.5 ~ 1m の箇所であった。また、Fig.8(a)の点線黒枠箇所については、水路の標高が反映されていない箇所があるため、浸水域としては若干広めであるが、水路伝いに流下したと推察される。

3.9 11-上ジゲ池

9 月 15 日から 16 日の台風 18 号による大雨により決壊した。Fig.9(a)に、上ジゲ池の氾濫解析による最大水深と写真位置図

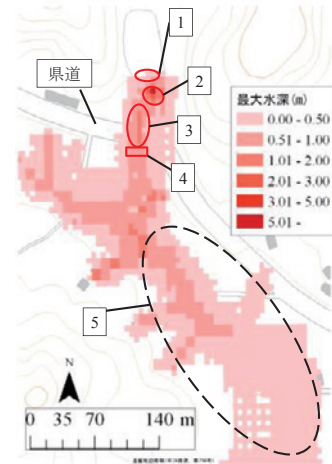


Fig.8 (a) 10-宝谷池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Hondani-ike using inundation analysis and each point of pictures



Fig.8 (b) 10-宝谷池周辺の各地点での写真
Pictures around Hondani-ike

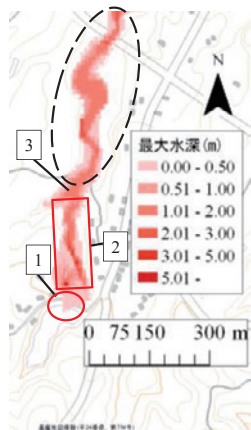


Fig.7 (a) 9-真山 2 号の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Sinzan2-gou using inundation analysis and each point of pictures



Fig.7 (b) 9-真山 2 号周辺の各地点での写真
Pictures around Sinzan2-gou

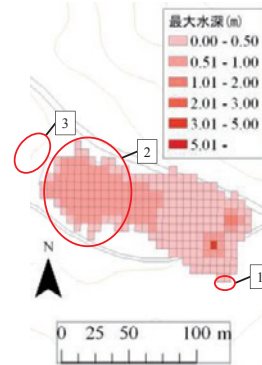


Fig.9(a) 11-上ジゲ池の氾濫解析による最大水深と写真位置図
Result of maximum water depth in Kamijige-ike using inundation analysis and each point of pictures

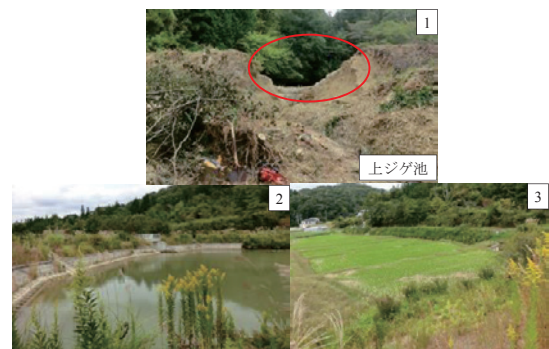


Fig.9(b) 11-上ジゲ池周辺の各地点での写真
Pictures around Kamijige-ike

位置図を、Fig.9(b)に、上ジゲ池周辺の各地点での写真を示す。Fig.9(a)-1の赤丸部分が決壊断面である。決壊した後貯水は、Fig.9(b)-2の下流にある池に流入した。Fig.9(b)-3に示す下池の下流農地に若干土砂の堆積が見られたが、大きな痕跡はなく、下池によって被害が抑えられていた。解析においても、Fig.9(a)と同じような浸水範囲が10分後から示されており、下池への流入した現象と解析結果とが整合していた。

IV 決壊ため池での最大流速と測量結果比較

氾濫解析における流速結果については、堤体近傍で大きな値をとっており、現場においては堤体近傍で土砂の流出という明確な決壊による痕跡が確認できた。そこで本項では、最大流速結果とあわせて土砂の流出範囲の計測結果についても示した。

4.1 計測の概要

決壊したため池について、土砂の流出域と決壊断面について計測を行った。計測を行ったのは5基のため池であり、3-沖堤、4-火打岩ため池、6-新堤池、7-野崎下池、10-宝谷池である。流出域の全体を見渡せるところに測量機を設置し、この点を原点としている。

土砂流出域については、Fig.10のように、ため池堤体からの土砂で埋没した領域を計測範囲とし、その領域の外枠にプリズムをたて計測を行った。プリズム間でデータの補間が必要な場合には、ノンプリズムで計測を行った。計測結果についてはTable 1に示す。

決壊断面については、上部は残った堤体の左と右の際にプリズムをたて、下部は決壊断面で最も低い箇所の左と右にプリズムをたてそれぞれ4点を計測し、決壊断面の幅と決壊高さを求めた。計測結果についてはTable 1に示す。

使用した機材はノンプリズム式の測量機材(TSTCR307JS)である。

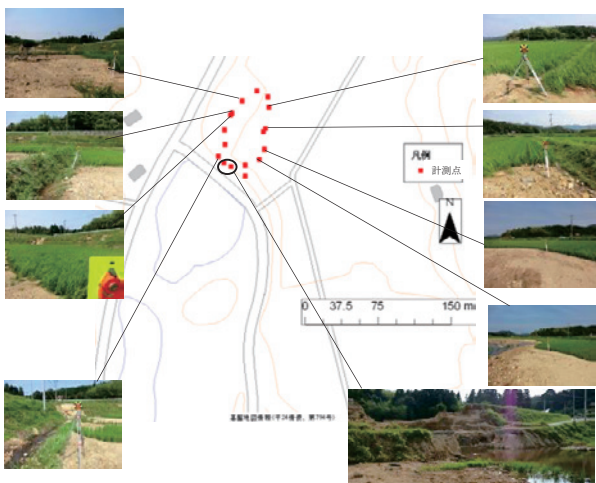


Fig.10 土砂流出域の計測時の写真
Picture of measurement washout area

4.2 最大流速と土砂流出の計測結果

Fig.11に最大流速と土砂流出の計測結果について示す。各池について黒点が計測点で、点を結んだ領域を土砂の流出範囲としている。また、コンタ図は最大流速を示している。Fig.11(a)の沖堤については、流速6m以上の速い領域へ土砂が進行していることがわかる。Fig.11(b)の火打岩ため池については、流速の速い領域は池から東方向に向かっているが、計測結果からはこれと若干異なる北方向に流出している。Fig.11(c)の新堤池については、流速6m以上の速い領域と土砂の計測領域とがほぼ一致している。Fig.11(d)の野崎下池については、池から南西方向の流下方向において流速3m以上の比較的流速の速い領域と計測領域とが概ね一致した傾向が見られた。Fig.11(e)の宝谷池については、流速6m以上の領域まで計測点が達していなかった。しかしながら、現地での聞き取りでは、図中の県道でアスファ

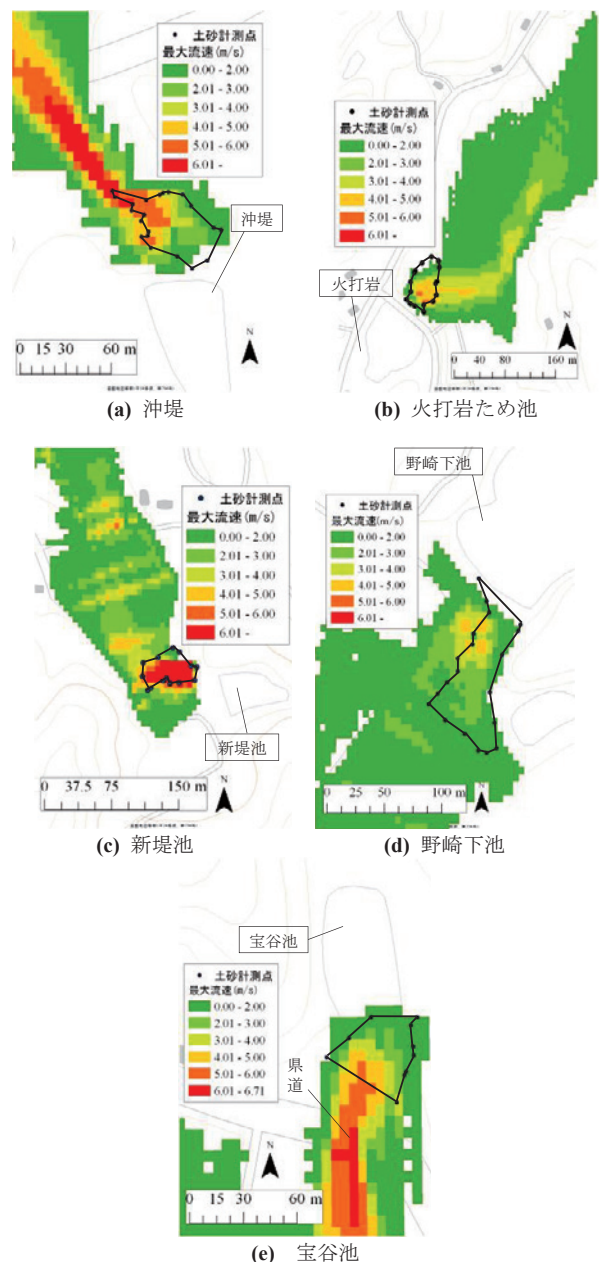


Fig.11 最大流速と土砂流出の計測結果
Result of maximum flow velocity and washout area

ルトが剥がれる被害があった。調査日はすでに復旧後であったことから、土砂の流出領域は道路方向へ広がっていたと示唆される。

以上のことから、各ため池において相対的流速が速い箇所
に土砂の流出した領域が概ね一致した。ただし、データ数
が 5 個と少ないことから、傾向についての妥当性は今後さら
に件数を増やしたうえで、判断が必要である。

VI 結 言

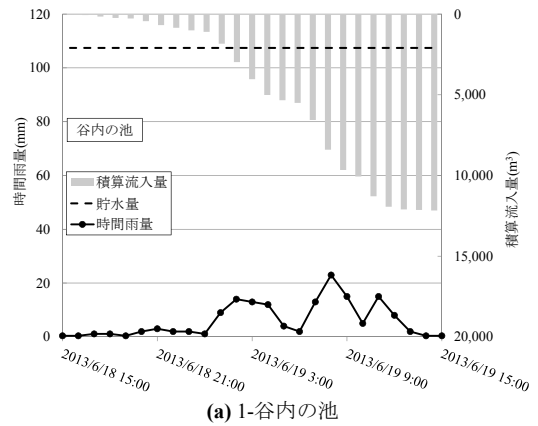
平成 25 年度の決壊ため池において、氾濫解析結果を検証
するという目的で、現地踏査と、土砂流出域の測量を行い、
以下の結論を得た。

- i) 決壊ため池を対象に、最大流出流量の経験式について比較を行った。結果として、①Costa 式と費用対効果算定手法の式は近い値を示した。しかしながら、高さに関する未知数が大きくなるケースについてはその傾向はみられなかった。②Froehlich 式は他の式に比べて小さい値を示した。
- ii) 最大水深結果について、現地踏査により検証を行った。
 - ①最大水深結果は実際の流下方向と概ね一致していた。
 - ②一方で、浸水域が若干大きくなる傾向があった。これは水路や周囲より少し高い道路の影響を加味していなかったことが要因として挙げられる。
 - ③農地法面の侵食やコンクリート製水路の崩落が踏査時には確認され、各ため池において比較的水深の高い箇所ですそれらの事象が確認された。ただし、解析結果でのこれらの事象の把握や定量評価については更なる情報蓄積が必要である。
 - ④重ね池の場合、上池の決壊に伴い下池が決壊したケースと、上池は決壊したが下池で貯水や土砂を受け止めたケースがあった。上池・下池ともに決壊した場合は、2 池分の被害の範囲が下池下流にみられた。上池のみの決壊ケースは下池で減勢され、下池下流への決壊の影響はあまり見られなかったケースと、上池決壊の影響が下池を越流して下流に見られたケースがあった。
- iii) 最大流速については、堤体近傍で流速が大きくなる傾向があり、現場ではこの周辺で土砂の痕跡が確認されたため、最大流速結果と土砂の流出領域について同一図面上に記載し、検討を行った。①各ため池において相対的流速が速い箇所に土砂の流出する領域が存在した。②データ数が 5 個と少ないことから、傾向についての妥当性は今後さらに件数を増やしたうえで、判断が必要である。

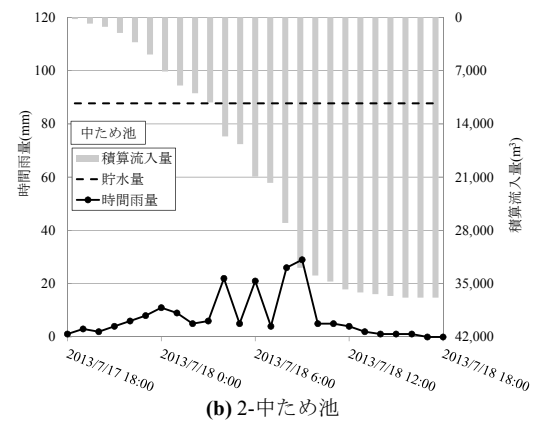
謝辞：本報は、農林水産省農村振興局整備部防災課をはじめ、東北農政局・北陸農政局・近畿農政局・中国四国農政局・九州農政局、青森県、秋田県、山形県、新潟県、富山県、兵庫県、山口県、福岡県等の行政部局には、ため池決壊時の現況把握という基礎研究としての本調査の主旨をご理解いただき、現場等での対応ならびに情報提供を賜った。現場ではこのような災害に対して迅速に対応されていることに敬意を表し、関係者各位へここに記して感謝申し上げます。

付録

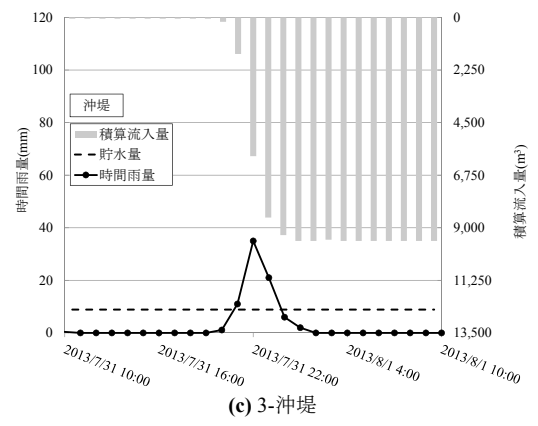
時間雨量と流入流量について、Appendix 1(a)～(i)に図を示す。



(a) 1-谷内の池

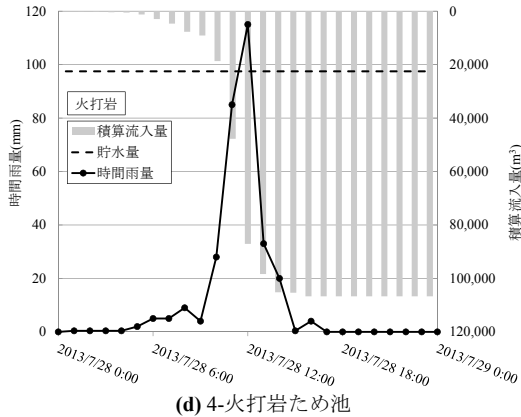


(b) 2-中ため池

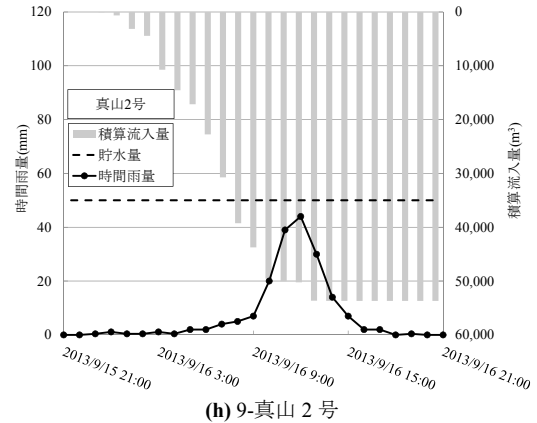


(c) 3-沖堤

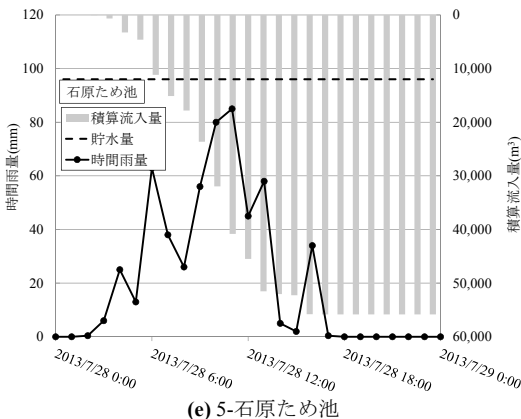
Appendix 1 決壊時近傍の時間雨量と積算流入量
Total inflow and 1-hour rainfall at dam failure



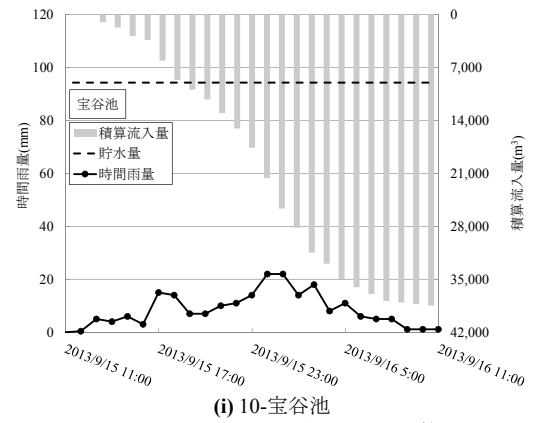
(d) 4-火打岩ため池



(h) 9-真山2号

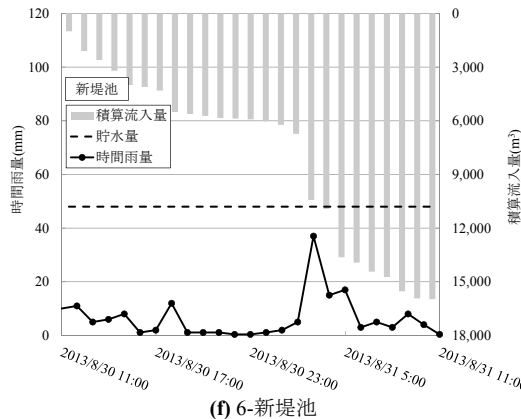


(e) 5-石原ため池

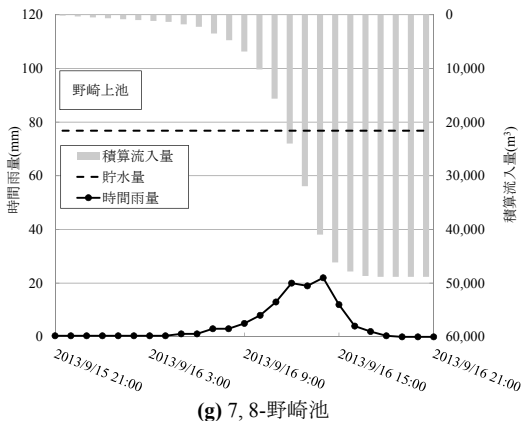


(i) 10-宝谷池

Appendix 1 決壊時近傍の時間雨量と積算流入量
Total inflow and 1-hour rainfall at dam failure



(f) 6-新堤池



(g) 7, 8-野崎池

Appendix 1 決壊時近傍の時間雨量と積算流入量
Total inflow and 1-hour rainfall at dam failure

参考文献

Costa, J. (1988) Floods from Dam Failure, Flood Geomorphology, 436-439.

土木学会 (1999)：水理公式集 平成 11 年版, 131

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2007)：The National Dam Safety Program

Froehlich, D. (1995)：Peak Outflow from Breached Embankment Dam, J. Water Resources Planning and Management, 121(1), 90-97

Hughes, A. et al. (2000)：Risk management for UK reservoirs, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA)

兵庫県農林水産部 (2005)：台風 23 号 (平成 16 年 10 月 20 日) 農地農業用施設災害記録誌, 兵庫県

石垣広男・新保博英・勝山達郎・北川 涼・道下真也 (2009)：ため池管理体制の構築による地域力の向上, 農業農村工学会誌, 77(11), 11-14

川本 治・鈴木尚登・福原正斗・吉迫 宏・井上敬資・鈴木智宏 (2013)：ため池決壊時の簡易氾濫解析の改善に関して, 農業農村工学会誌, 81(8), 7-11

栗城稔・末次忠司・小林裕明 (1997)：氾濫シミュレーション・マニュアル (案) - シミュレーションの手引き及び新モデルの検証 -, 土木研究所資料

内閣府 (2013a)：台風第 4 号及び梅雨前線による被害状況等について, http://www.bousai.go.jp/updates/h25taifuu04/pdf/h25taifuu04_02.pdf, (2013.10.17 アクセス)

- 内閣府 (2013b) : 7月26日からの大雨等による被害状況について, http://www.bousai.go.jp/updates/h25ooame07/pdf/h25ooame07_11.pdf, (2013.10.17 アクセス)
- 内閣府 (2013c) : 台風第15号及び前線の大雨等による被害状況等について, http://www.bousai.go.jp/updates/h25taifuu15/pdf/h25taifuu15_02.pdf, (2013.10.17 アクセス)
- 内閣府 (2013d) : 台風第18号の大雨等による被害状況等について (第11報), http://www.bousai.go.jp/updates/h25typhoon18/pdf/h25typhoon18_11.pdf, (2013.10.17 アクセス)
- 農林水産省 (2006) : 土地改良事業設計指針「ため池整備」, 133-136
- 農林水産省 (2007) : 新たな土地改良の効果算定マニュアル, 372, 大成出版社。
- 松尾春雄 (1953) : (1)堤防の決壊(九州水害について), 季刊土と基礎 1(3), 48-54
- 森 俊勇・伊藤達平・水山高久・小田 晃 (2005) : 天然ダム決壊時におけるすべり破壊可能性の検討, 砂防学会誌, 58 (4), 41-45
- 大竹 正・本岡利章・中川 剛・北村 聡・加藤宏司・大竹由紀夫 (2006) : 2次元平面モデルを用いたため池はん濫解析とため池ハザードマップ, 農業土木学会全国大会講演要旨集, 910-911
- 佐々木 聡・鈴木浩之・北田裕道 (2013) : ため池の防災・減災の施策について, 農業農村工学会誌, 81(8), 23-26
- 里深好文・吉野弘祐・水山高久・小川紀一郎・内川龍男・森俊勇 (2007) : 天然ダムの決壊に伴う洪水流出の予測手法に関する研究, 水工学論文集, 第51巻, 901-906
- 正田大輔・川本 治・鈴木尚登 (2012) : 豪雨を考慮したため池決壊時の氾濫解析, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム論文, 47-52
- 末次忠司・栗城 稔 (1998) : 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No.593/I-1-43, 41-50
- 谷茂・小林秀匡・福原正斗 (1999) : 高度地理情報を有する「ため池防災データベース」の構築, 情報地質, 10(2), 118-119
- 財団法人 日本農業土木総合研究所 (2000) : 平成11年度ため池防災データベース更新業務報告書

受理年月日 平成 25 年 12 月 6 日

Inundation Analysis of Failure Dam due to Heavy Rain in 2013

SHODA Daisuke*, KAWAMOTO Osamu*, SUZUKI Hisato**, YOSHISAKO Hiroshi*,
INOUE Keisuke* and KOJIMA Hajime***

Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Disaster Prevention*
Department of Planning and General Administration, Senior Disaster Prevention Research Coordinator**
Tokyo University of Agriculture and Technology Agency***

Summary

There were the cases of the dam failure caused by concentrated heavy rain in 2013. An inundation analysis was conducted on these failure cases in this study. Inundation areas were compared in the analysis result and the field survey result, measurement result. The flowing results are obtained. (i) Compared with peak outflows using the anamnestic calculations, the result of Costa equation is close to the equation of business effect. The result of Froehlich equation is smaller than the results of other equations. (ii) The collapsed slope of agricultural land is corresponding to the relatively high parts of maximum water depth in each analysis result. However the flowing study is needed about quantitative evaluation of the water depth. (iii) Measured washout area is corresponding to the relatively high parts of maximum velocity result in each analysis result.

Key words : Small earth fill dam, Failure, inundation analysis, Measurement, Heavy rain

鉄筋コンクリート梁を模擬した縮小模型の曲げ挙動

渡嘉敷勝* 浅野 勇* 森 充広* 西原正彦*

*施設工学研究領域施設機能担当

キーワード：鉄筋コンクリート梁，縮小模型，曲げ試験，縮小鉄筋，相似

I 緒言

II 試験方法

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の破壊現象の解明や理論の検証のために模型実験が行われている。しかし、一般の RC 構造物の模型実験は規模が大きく、実験施設の制約や実験費用の増大などから、模型の縮小化が重要な課題の一つとなっている。縮小模型製作の問題として、縮小鉄筋の入手が困難であることが挙げられる。実鉄筋の入手は容易であるが、縮小鉄筋は自作する必要があるが研究事例も少ない。その中で、先行的な研究として、試作した D3 鉄筋を用いた梁実験（村山ら，1982）や同じく試作した D2, D3 鉄筋等を用いた振動実験（隈澤ら，1997；上田ら，2003），主筋 $\phi 4$ と高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた縮小模型による振動実験（境ら，2004）などがある。また、最近、建築分野で開発・販売された 1/24 スケールの縮小鉄筋を用いた実験（細川ら，2010）も実施されている。今後、農業水利 RC 構造物の耐力等の性能照査のための模型実験の重要度が増す中、模型実験の一部を小縮尺の縮小模型で代用できれば、試験効率を向上させることができる。

本論文では、農業水利 RC 構造物の鉄筋比を考慮して縮小鉄筋を用いた梁縮小試験体による曲げ試験を行い、実寸試験体における荷重－変位関係およびひび割れ発生状況と比較し、縮小試験体の基本的な力学的挙動を明らかにする。

2.1 試験体の仕様

本研究で用いた試験体の形状および鉄筋配置を Fig. 1 に、また、試験体の仕様を Table 1 に示す。試験体は 3 種の縮尺で設計した。F 試験体は縮尺 1/1 の基準とする原型試験体であり、引張鉄筋比が 0.59%、1.19% および 2.11% の 3 種である。S および T 試験体は F 試験体と幾何学的に相似な縮小試験体であり、S 試験体は縮尺 1/7、また、T 試験体は縮尺 1/10 である。縮尺は、縮小鉄筋を用いた縮小試験体の引張鉄筋比が原型試験体の引張鉄筋比とほぼ同程度となるように選定した。なお、試験体は曲げ引張破壊となるように設計し、等曲げ区間以外は帯鉄筋によりせん断補強した。

F 試験体は各 1 体を製作し、S および T 試験体は各 6 体を製作して試験した。

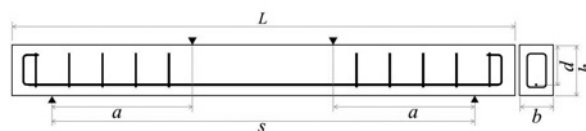


Fig. 1 試験体の形状および鉄筋配置
Shape of specimen and placement of reinforcing bar

Table 1 試験体の仕様
Specification of specimen

試験体	縮尺	試験体寸法 (mm)						引張鉄筋		帯鉄筋		G _{max} (mm)
		b	h	d	a	s	L	本数-径	p _t	径-間隔(mm)	p _w	
F1								1-D10	0.59			
F2	1/1	100	150	120	420	1260	1500	2-D10	1.19	D10-100	1.43	20
F3								2-D13	2.11			
S1								1-mD32	0.65			
S2	1/7	14	21	17	60	180	214	2-mD32	1.29	mD32-14	1.57	2.5
S3								2-mD41	2.35			
T1								1-mD22	0.63			
T2	1/10	10	15	12	42	126	150	2-mD22	1.26	mD22-10	1.52	2.5
T3								2-mD32	2.57			

b: 断面幅, h: 断面高, d: 有効高, a: せん断スパン, s: スパン長, L: 試験体長, p_t: 引張鉄筋比 (%),
p_w: 帯鉄筋比 (%) [p_w = A_w / (b · S_w), A_w: 区間 S_w における帯鉄筋断面積(mm²), S_w: 帯鉄筋の配置間隔(mm)]

2.2 材料

2.2.1 コンクリートおよびモルタル

F 試験体に使用したコンクリート配合を **Table 2** に、S および T 試験体に使用したモルタル配合を **Table 3** に示す。コンクリートは、セメントに早強ポルトランドセメント、粗骨材に碎石、細骨材に鬼怒川砂、混和剤として AE 減水剤 (マスターポゾリス 15S) および AE 剤 (マスターエア 202) を各々セメント質量の 0.6% および 0.003% 用いた。モルタルは、セメントに早強ポルトランドセメント、細骨材に鬼怒川砂の 2.5 mm ふるい通過分を使用した。また、混和剤として AE 減水剤 (マスターポゾリス No. 8) をセメント質量の 0.25% 用いた。

2.2.2 鉄筋

F 試験体では、異形棒鋼 D10 および D13 (SD295A) を使用した。これらの力学的性質を **Table 4** に示す。

S および T 試験体では、縮小鉄筋を使用した。縮小鉄筋は、実際の鉄筋を 1/24 スケールで模擬した鉄筋であり、鉄筋表面にはリブと節が再現されている (**Fig. 2**)。現在、D13、D16、D22、D32、D41、D51 に相当する縮小鉄筋が市販されている。本研究で用いた D22、D32、D41 の 3 種類の縮小鉄筋の仕様を **Table 5** に示す。なお、以下では実鉄筋と縮小鉄筋とを区別するため、縮小鉄筋を mD22、mD32、mD41 と各々表記する。

縮小鉄筋の応力-ひずみ関係を調べるために、mD22、mD32、mD41 の各 10 試験体を用いた引張試験を行った。長さ 200 mm の試験体の両端 30 mm をチャックで固定し、変位速度 0.5 mm/min で引張した。試験体中央部の 100 mm を標点距離とし、ひずみを計算した。また、求められた応力-ひずみ関係の弾性領域より弾性係数を算出した。

2.3 試験体の製作

F 試験体は鋼製型枠、また、S および T 試験体はアクリル製型枠を使用して打設した。打設翌日に脱型し、F 試験体は湿潤養生、S および T 試験体は水中養生とした。また、打設時には圧縮強度用試験体を各々製作し、F 試験体と S および T 試験体と同じ条件で養生した。各試験体は、材齢 7 日で養生を終え、試験に供した。

2.4 曲げ試験

梁試験体の曲げ試験は、3 等分点載荷試験とした。

変位は、F 試験体では試験体下部中央に変位計を設置してたわみを測定し、S および T 試験体では試験体上部の載荷点の変位を載荷試験機により測定した。**Fig. 3** に縮小試験体の試験状況を示す。

F 試験体は、繰り返し載荷試験とし、S および T 試験体は、各 3 体を単調載荷試験とし、残りの 3 体を繰り返し載荷試験とした。S および T 試験体の各試験の載荷方法を **Table 6** および **Table 7** に示す。

III RC 梁の曲げ挙動

Table 2 コンクリート配合および圧縮強度
Specified mix proportion and compressive strength of concrete

G _{max} (mm)	W/C (%)	配合 (kg/m ³)					σ ₇ (N/mm ²)
		W	C	S	G	A	
20	64	168	263	863	987	1.59	23.4

Table 3 モルタル配合および圧縮強度
Specified mix proportion and compressive strength of mortar

G _{max} (mm)	W/C (%)	配合 (kg/m ³)					σ ₇ (N/mm ²)
		W	C	S	G	A	
2.5	65	340	524	1310	-	1.31	32.3

Table 4 鉄筋の力学的性質
Mechanical properties of reinforcing bar

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
D10	358	498	32.5
D13	349	497	26.5

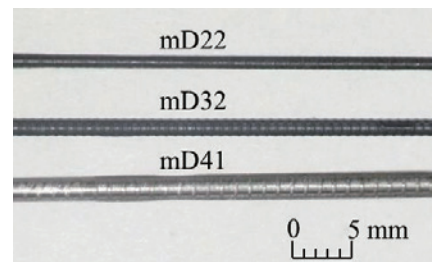


Fig. 2 縮小鉄筋
Miniature reinforcing bar

Table 5 縮小鉄筋の仕様
Properties of miniature reinforcing bar

呼び名	単位質量 (kg/m)	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	長さ (mm)
mD22	0.0060	0.98	0.759	200
mD32	0.0121	1.40	1.541	200
mD41	0.0220	1.89	2.796	200

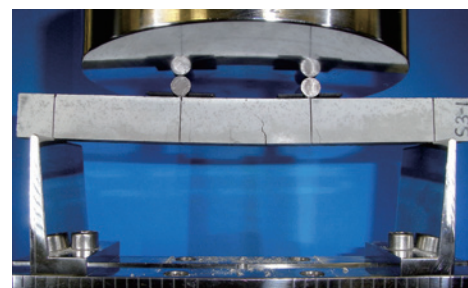


Fig. 3 縮小試験体の試験状況
Loading test of small scale specimen

3.1 曲げ挙動

曲げを受ける RC 梁の挙動の模式図を **Fig. 4** に示す。**Fig. 1** に示す 3 等分点載荷された RC 梁に荷重が作用すると、3 等分点の中央の等曲げ区間に最大モーメントが発生し、梁

Table 6 単調載荷の載荷方法
Loading conditions of monotonic loading

行程	荷重	制御条件	S および T
1	載荷	目標変位点(mm)	2
		変位速度(mm/min)	0.2
2	載荷	目標変位点(mm)	10
		変位速度(mm/min)	0.4

Table 7 繰り返し載荷の載荷方法
Loading conditions of cyclic loading

行程	荷重	制御条件	S1	S2	S3	T1	T2	T3
1	載荷	変位点(mm)	2	2	2	1	2	2
		速度(mm/min)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2	除荷	荷重点(kN)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		速度(kN/min)	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	0.6
3	載荷	変位点(mm)	4	4	3	2	3	3
		速度(mm/min)	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
4	除荷	荷重点(kN)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		速度(kN/min)	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	0.6
5	載荷	変位点(mm)	10	10	10	10	10	10
		速度(mm/min)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

下縁に曲げひび割れが発生する。曲げひび割れ発生後は、引張断面の軸方向の抵抗力は、引張鉄筋によって負担される。さらに荷重が増加すると鉄筋が降伏に至る。鉄筋降伏後は部材の抵抗力は大きくは増加せず、梁上縁部でコンクリートが圧縮破壊して、部材全体の破壊に至る。

本報文では、曲げ降伏点に着目し、原型試験体と縮小試験体における計算値と実験値について検討する。

3.2 曲げ降伏荷重

4点曲げを受ける単鉄筋 RC 梁の降伏荷重 P_y は、弾性理論から次式で求められる。

$$P_y = \frac{2M_y}{a} \tag{1}$$

$$M_y = A_s f_y \left(d - \frac{x}{3} \right) \tag{2}$$

$$x = ndp \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{np} \right)} \right) \tag{3}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \tag{4}$$

$$p = \frac{A_s}{bd} \tag{5}$$

ここに、 M_y ：梁断面の降伏モーメント (N・mm)、 a ：せん断スパン (mm)、 A_s ：鉄筋断面積 (mm²)、 f_y ：鉄筋の降伏強度 (N/mm²)、 x ：中立軸の位置 (mm)、 n ：ヤング係

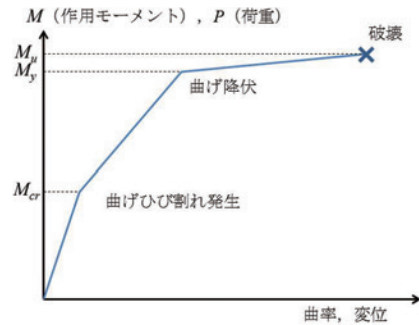


Fig. 4 曲げを受ける RC 梁の挙動
Behavior of RC beams subjected to bending

数比、 d ：梁の有効高さ (mm)、 p ：鉄筋比、 E_s ：鉄筋の弾性係数 (N/mm²)、 E_c ：コンクリートの弾性係数 (N/mm²)、 b ：梁の幅 (mm) である。

IV 結果および考察

4.1 縮小鉄筋の機械的性質

縮小鉄筋の応力-ひずみ関係を Fig. 5 に、実鉄筋の応力-ひずみ関係の 1 例を Fig. 6 に示す。また、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定されている鉄筋の機械的性

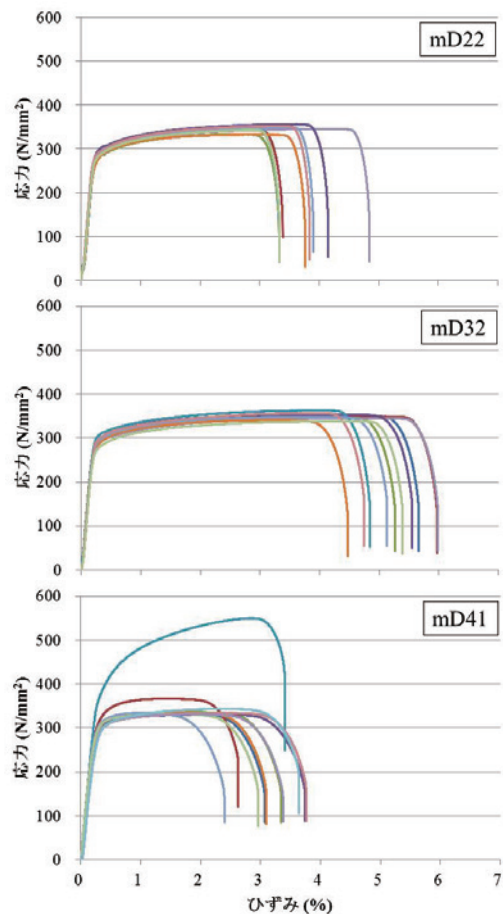


Fig. 5 縮小鉄筋の応力-ひずみ関係
Stress-strain relationship of miniature reinforcing bar

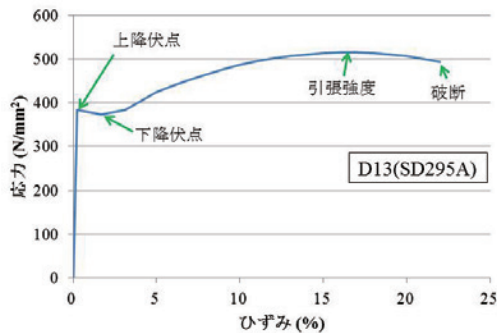


Fig. 6 実鉄筋の応力-ひずみ関係
Stress-strain relationship of real reinforcing bar

質のうち、降伏点、引張強度、伸びを **Table 8** に示す。縮小鉄筋の応力-ひずみ関係の特徴としては、①実鉄筋に見られる降伏点が明瞭に見られない、②弾性領域の挙動は 10 本の試験でほぼ一致しておりばらつきは少ない、③mD22 および mD32 の引張強度はほぼ等しい、④破断時のひずみはばらつきが大きい、⑤破断時のひずみは 2.3~6%程度と JIS 規定の SD295 の 16%に比べて小さい、⑥mD41 では引張強度が他の試験体の 2 倍近くを示す試験体が 1 体あった、⑦降伏耐力は JIS 規定の SD295 と同程度であるが引張強度は下回る、などが挙げられる。上記の①と③の理由としては、鉄筋の製造方法の相違が考えられる。実鉄筋が熱間圧延によって製造されるのに対して、縮小鉄筋は冷間鍛造により製造される。冷間鍛造とは、常温で金型のプレスにより成型する方法で寸法精度に優れる。しかし、冷間鍛造のように冷間加工された鋼材では降伏点が明瞭に出ないことが多いとされている (例えば、佐藤, 1979)。

応力-ひずみ関係の弾性領域より求めた弾性係数を **Fig. 7** に示す。鉄筋径が大きくなるにしたがい、弾性係数が小さくなっている。

4.2 原型試験体の曲げ試験

F シリーズ試験体の繰り返し载荷試験で得られた荷重-変位関係を **Fig. 8** に示す。同図には式(1)~(5)で求めた降伏荷重も図示した。なお、降伏荷重の計算で用いた材料物性を **Table 9** に示す。F1 および F3 試験体については、降伏荷重の試験値と計算値がほぼ一致している。F2 試験体では試験値が計算値を約 11%上回っているものの、F シリーズ試験体の降伏荷重の試験値と計算値は良く一致していると言える。

Table 8 鉄筋の機械的性質 (JIS G 3112)
Mechanical properties of reinforcing bar

種類の記号	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SD295A	295 以上	440~600	16 以上
SD295B	295~390	440 以上	16 以上
SD345	345~440	490 以上	18 以上

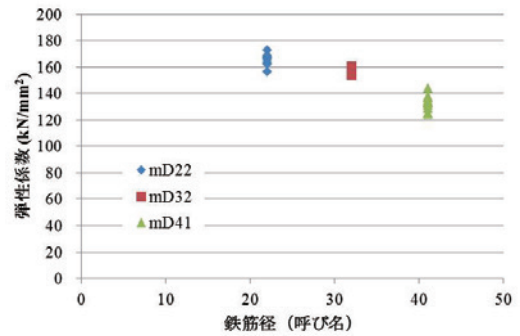


Fig. 7 縮小鉄筋の弾性係数
Young's modulus of miniature reinforcing bar

4.3 縮小試験体の曲げ試験

4.3.1 単調载荷

縮小試験体の単調载荷試験で得られた荷重-変位関係を **Fig. 9** に示す。図中の点線は計算で求めた降伏荷重である。降伏荷重の計算には **Table 9** の材料物性を用了。各シリーズとも 3 体の試験体の弾性領域から降伏までの荷重-変位関係はばらつきの少ない結果が得られた。S2 および S3 シリーズを除けば、降伏後の挙動のばらつきも少ない。しかしながら、原型試験体と比較すると、降伏荷重は、1/7 スケールの S1~S3 試験体では 19.6~53.4%で平均 33.0%、1/10 スケールの T1~T3 試験体では 1.8~24.4%で平均 15.3%も試験値の方が大きく、計算値との乖離が見られた。

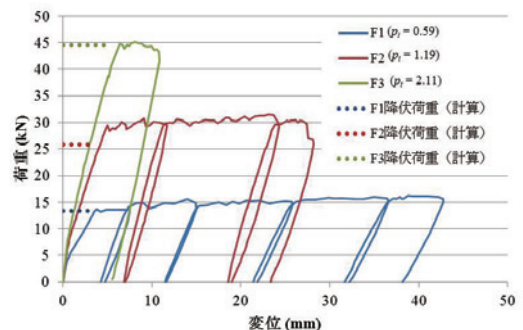


Fig. 8 原型試験体の荷重-変位関係
Load-displacement behavior of F-series beams

Table 9 材料物性
Mechanical properties of materials

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度* (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	断面積 (mm ²)
コンクリート	23.4	-	25,000	-
モルタル	32.3	-	19,800	-
D10	-	358	200,000**	71.33
D13	-	349	200,000**	126.7
mD22	-	294	165,000	0.759
mD32	-	301	157,000	1.541
mD41	-	316	132,000	2.796

*: mD22, mD32, mD41 については、0.2%耐力を示す。
**: 2012 年制定コンクリート標準示方書より。

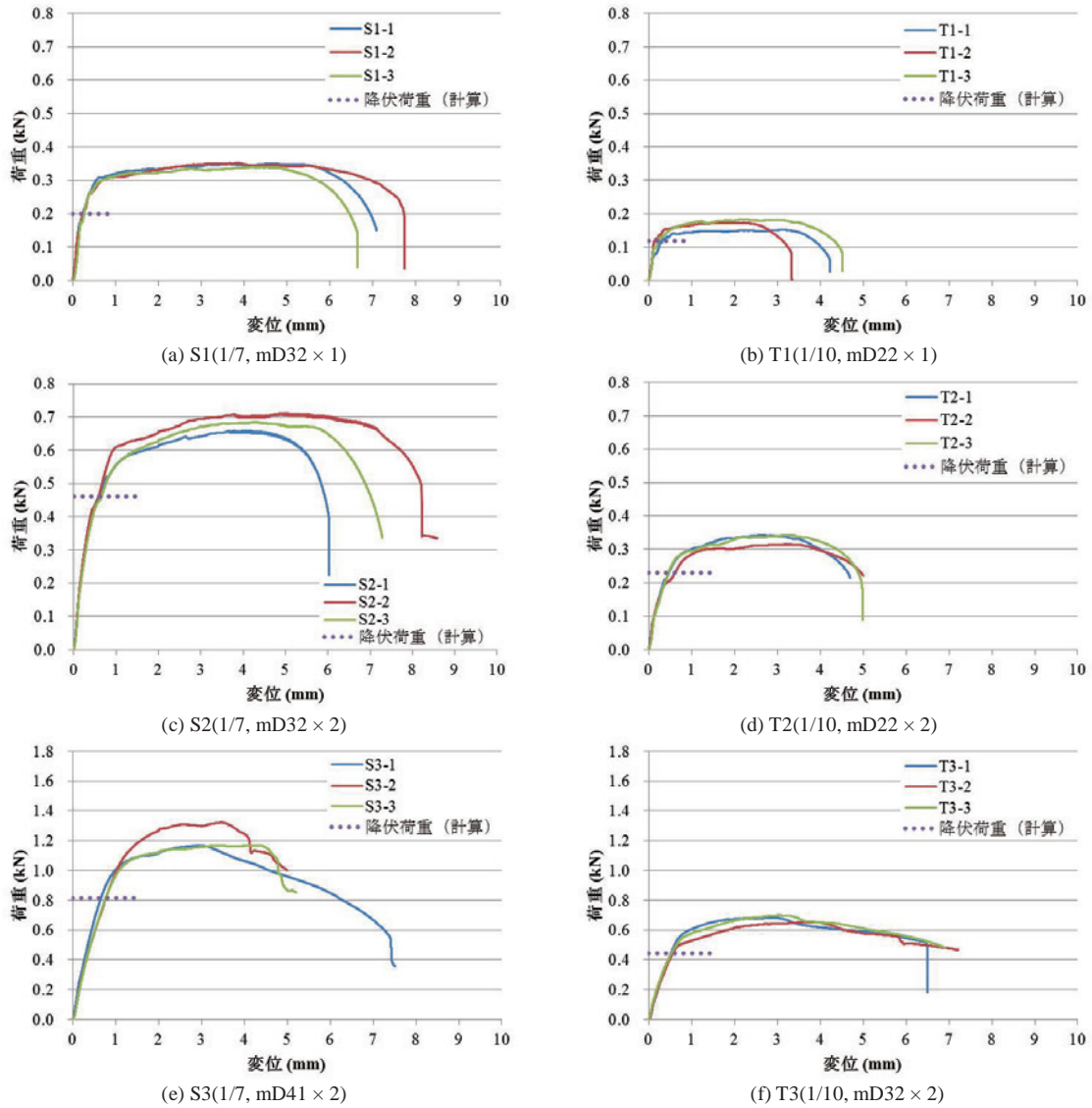


Fig. 9 単調荷重による縮小試験体の荷重－変位関係
Load-displacement behavior of small scale beams under monotonic loading

Fig. 9 に示した縮小試験体の荷重－変位関係を原型試験体の 1/1 スケールに換算した結果を Fig. 10 に示す。ここでは、相似則より次のように換算した (例えば, 香川, 1978)。原型試験体の代表寸法を l_p , 幾何学的に相似な縮小試験体の代表寸法を l_m とすれば, 縮尺を $1/\lambda$ とした時,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{l_m}{l_p} \quad \therefore \lambda = \frac{l_p}{l_m} \quad (6)$$

と表せる。この時, 縮小試験体の荷重を P_m とすれば, 縮尺 1/1 の試験体の換算荷重 P_p は,

$$P_p = \lambda^2 P_m \quad (7)$$

同様に, 縮小試験体の変位 δ_m の換算変位 δ_p は,

$$\delta_p = \lambda \delta_m \quad (8)$$

と表せる。ところで, Table 10 に示すように原型試験体と縮小試験体とは鉄筋比が相違しているため, 式(7)の換算荷重 P_p を修正する必要がある。修正係数を k_y とすれば, 縮尺 1/1 の試験体の換算荷重 P_p は式(7)より,

$$P_p = \lambda^2 k_y P_m \quad (9)$$

と表せる。ここで, k_y は, 式(1)において縮小試験体の鉄筋比で計算した荷重を P_{ym} , 原型試験体の鉄筋比で計算した荷重を P_{yp} とした時,

$$k_y = \frac{P_{yp}}{P_{ym}} \quad (10)$$

とした。S1 および T1 試験体は弾性領域から降伏後の変位 20 mm 程度の区間において原型試験体の荷重－変位関係と良く一致する (Fig. 10(a))。また, S2 および T2 試験体は降

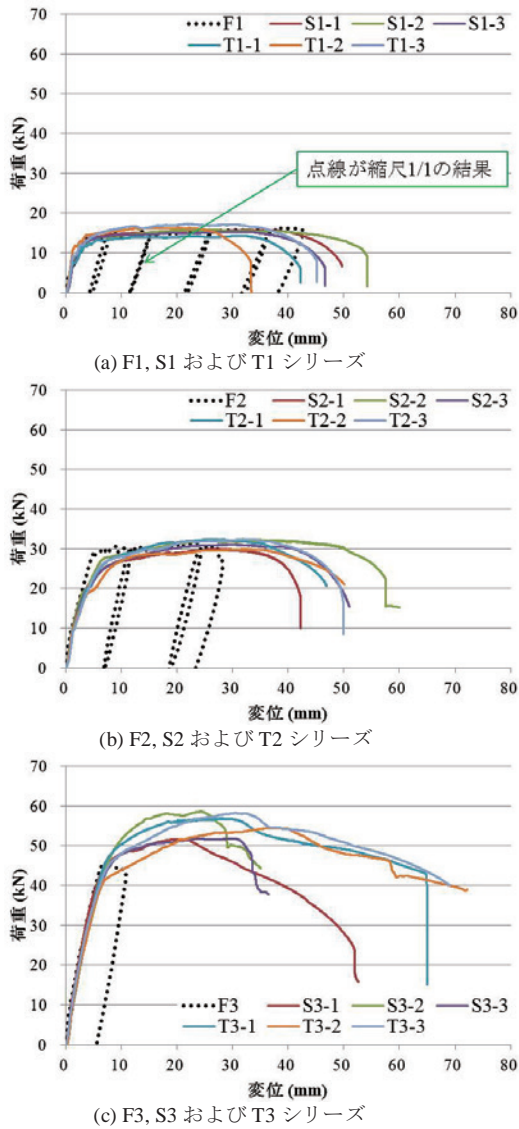


Fig. 10 縮尺 1/1 に換算された荷重-変位関係
Equivalent load-displacement behavior with full scale beams

伏荷重で F2 試験体を下回ることを除けば、弾性領域から降伏後の変位 30 mm 程度の区間において原型試験体の荷重-変位関係と良く一致する (Fig. 10(b))。これらに対して、S3, T3 試験体では、弾性領域から降伏までの挙動は一致するものの降伏後の挙動は荷重、変位ともに原型試験体よりも大きく、原型試験体の挙動と大きく相違している (Fig. 10(c))。すなわち、原型試験体における鉄筋比の増加による梁の変形の減少を再現できていない。つまり、F1, F2 のような鉄筋比が 1.19% 程度までの試験体においては縮小試験体の挙動は原型試験体の挙動をある程度再現できたが、鉄筋比が 2.11% 程度の試験体においては原型試験体より荷重、変位ともに大きくなり、挙動を再現することはできなかった。

なお、原型試験体の挙動を再現できていると考えられる低鉄筋比の試験体においても、Fig. 9 における降伏荷重の計算値と試験値の間に乖離が見られた。縮小模型による実大構造物の挙動再現の精度を向上させるためには、このような乖離の原因を解明し、降伏荷重の計算に反映させることが必要と考える。

4.3.1 繰り返し載荷

縮小試験体の繰り返し載荷試験で得られた荷重-変位関係を Fig. 11 に示す。原型試験体の挙動との類似性として、①除荷および再載荷過程における勾配は初期勾配と等しい、②除荷と再載荷曲線は閉じた履歴曲線を描く、③繰り返し載荷ループの終端は単調載荷曲線を包絡線とする、などが挙げられる。すなわち、縮小試験体により原型試験体の繰り返し挙動を再現可能と考えられる。

なお、Fig. 11 (e) の S3 試験体においては、Fig. 9 (e) と比較して荷重が大きな傾向を示している。これは、Fig. 5 に示したように使用した縮小鉄筋 mD41 の応力-ひずみ関係のばらつきが大きいためであると考えられる。

4.4 ひび割れ発生状況

各試験体のひび割れの発生分布を Fig. 12 に示す。縮小試験体は、①原型試験体と比較してひび割れ本数が少ない、②原型試験体と同様に鉄筋比が大きな試験体ほどひび割れ本数が多い、③縮尺 1/7 縮小試験体と縮尺 1/10 縮小試験体

Table 10 鉄筋比による修正係数
Correction factor by reinforcement ratio

試験体 No.		F1	F2	F3			
原型試験体	縮尺	1/1	1/1	1/1			
	鉄筋比 p_p (%)	0.59	1.19	2.11			
試験体 No.		S1	T1	S2	T2	S3	T3
縮小試験体	縮尺	1/7	1/10	1/7	1/10	1/7	1/10
	鉄筋比 p_m (%)	0.65	0.63	1.29	1.26	2.35	2.57
	使用鉄筋	mD32	mD22	mD32	mD22	mD41	mD32
	鉄筋比 p_p による計算荷重 P_{yp} (N/mm ²)	218.5	108.3	426.7	211.3	776.9	372.4
	鉄筋比 p_m による計算荷重 P_{ym} (N/mm ²)	239.8	115.3	460.6	223.1	859.8	448.0
修正係数 $k_y = P_{yp} / P_{ym}$		0.911	0.939	0.926	0.947	0.904	0.831

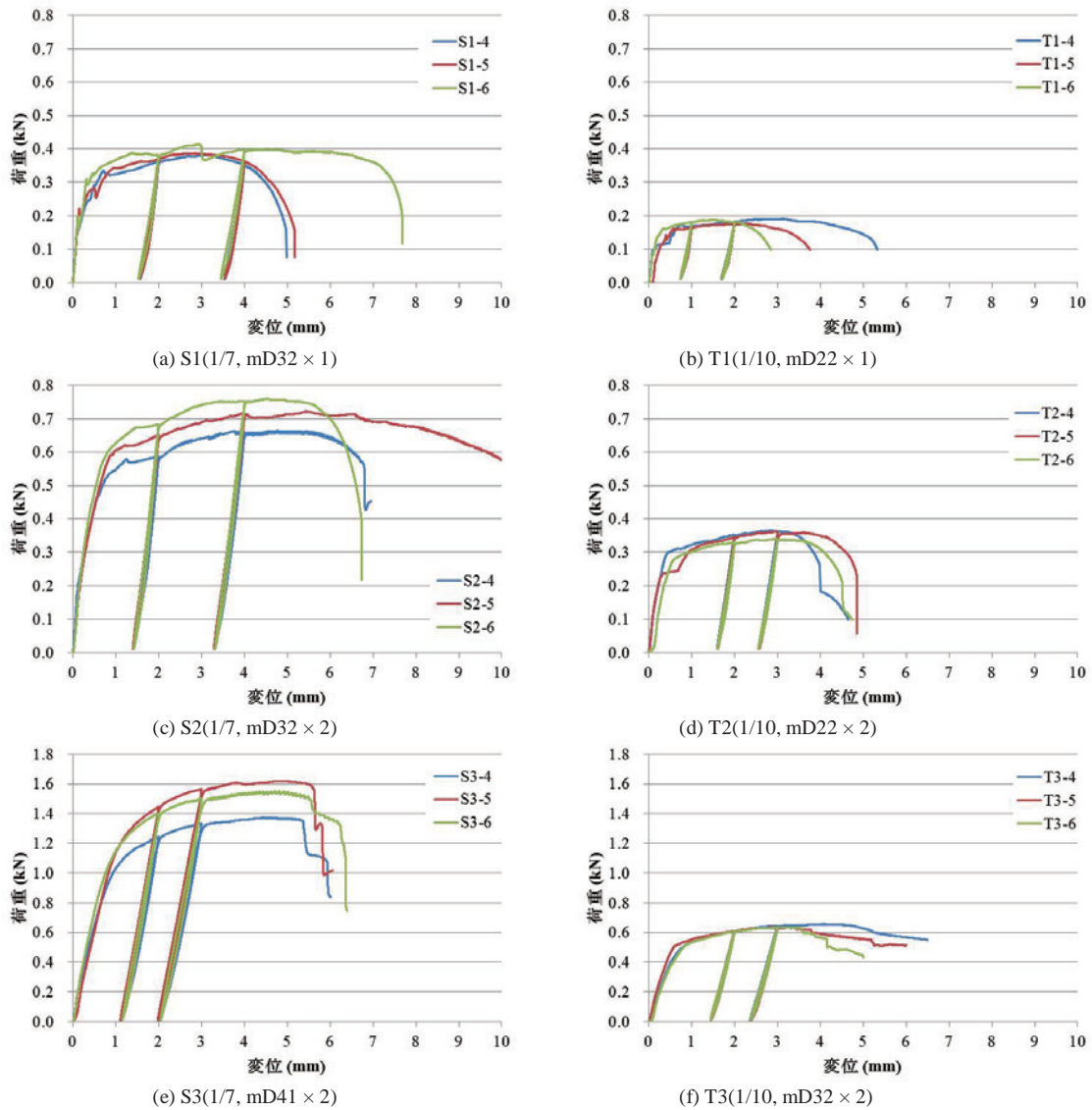


Fig. 11 繰り返し載荷による縮小試験体の荷重-変位関係

Load-displacement behavior of small scale beams under cyclic loading

とではひび割れ分布状況に差が見られない、などが特徴として挙げられる。①の縮小試験体のひび割れ本数が少ない原因としては、縮小鉄筋と実鉄筋の付着性状の相違がひび割れ分散性に影響を及ぼしていると考えられる。縮小試験体と原型試験体のひび割れ分散性の相違については今後引き続き検討が必要と考える。

V 結 言

本報文では、縮小鉄筋を用いた縮小模型の基礎的な力学的挙動について、RC梁の原型試験体と縮小試験体の曲げ試験における荷重-変位関係およびひび割れ発生状況を比較して検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 縮小鉄筋の機械的性質は、降伏点が明瞭でないなど実鉄筋と相違する特性を有している。
- (2) 縮小鉄筋の特性により、縮小試験体の荷重-変位曲線の降伏点は明瞭ではない。

- (3) 最大荷重に至るまでの縮小試験体の曲げ挙動のばらつきは少ない。
- (4) 1.19%程度までの低鉄筋比においては、縮小試験体で原型試験体の挙動が再現可能であることが示唆された。
- (5) 縮小試験体のひび割れ発生本数は、原型試験体に比較して少なく、ひび割れの分散性は小さい。
- (6) 縮尺 1/7 縮小試験体と縮尺 1/10 縮小試験体とではひび割れ分布状況に差が見られない。

今後の課題としては、次のことが考えられる。

- (1) 実大規模の RC 梁試験データを基に縮小試験体の比較試験を実施し、縮小尺の影響を評価する。
- (2) 高鉄筋比において原型試験体と縮小試験体の挙動が異なる原因を明らかにして、縮小試験体の適用範囲を検証する。
- (3) 原型試験体と縮小試験体におけるひび割れ分散性の相違について検討する。

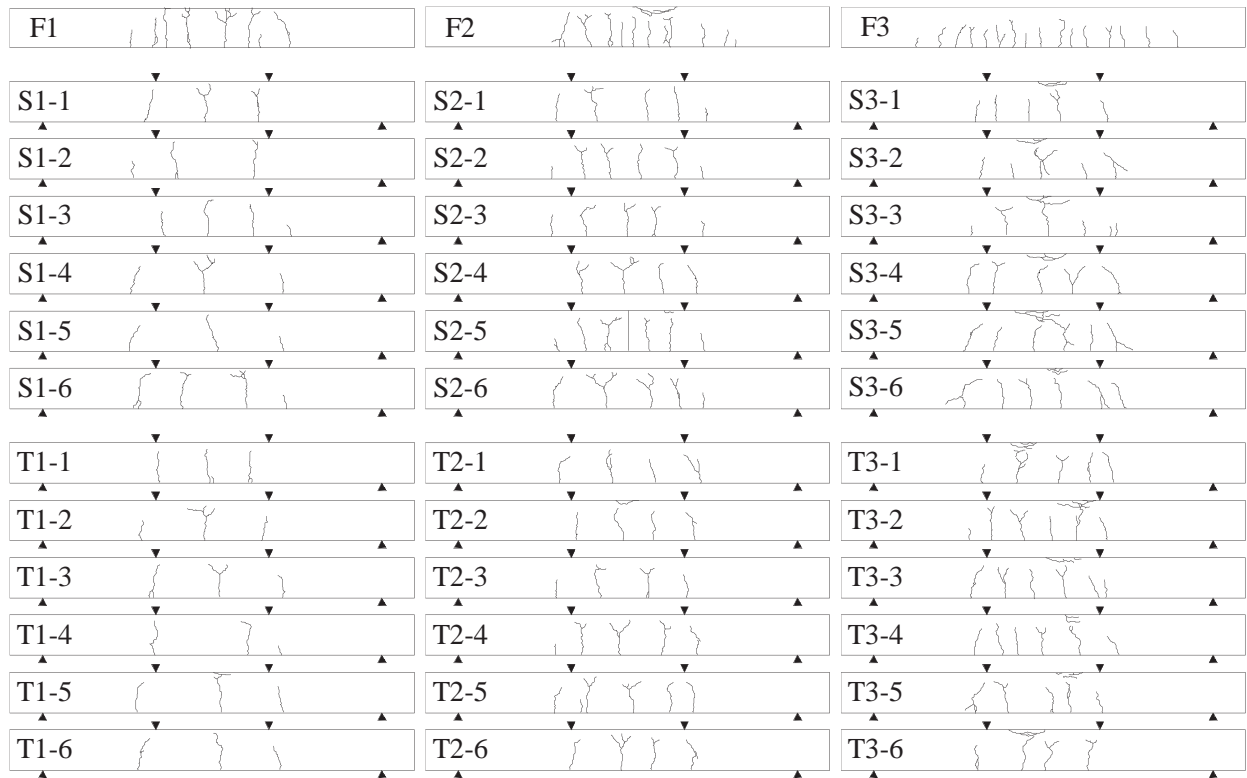


Fig. 12 試験体のひび割れ分布状況
Crack pattern of beams

謝辞：本研究は、農村工学研究所内強化研究費の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

参考文献

細川大介・松土雄紀・溝渕利明・満木泰郎 (2010)：鉄筋コンクリート工学における卓上破壊試験の教育効果，土木学会第 65 回年次学術講演会，13-14
 香川崇章 (1978)：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，275，69-77
 隈澤文俊・中埜良昭・岡田恒男 (1997)：鉄筋コンクリート造超小型立体模型建物の振動破壊実験—超小型立体模型による建物の

振動破壊性状に関する研究 (第 1 報) 一，日本建築学会構造系論文集，493，83-90
 村山八州雄・野田進・岩城良 (1982)：試作 D3 鉄筋を用いた縮小部材実験，コンクリート工学年次講演会講演論文集，277-280
 境有紀・徳井紀子・真田靖士・山内成人・中埜良昭・諏訪田晴彦・福山洋 (2004)：超縮小模型を用いた鉄筋コンクリート構造の簡易振動実験手法の開発，日本建築学会構造系論文集，584，147-152
 佐藤満次郎 (1979)：鋼材の基礎知識，コンクリート工学，7-16
 上田芳郎・藤井賢志・山内成人・真田靖士・中埜良昭 (2003)：偏心を有する鉄筋コンクリート造建物の縮小模型を用いた振動台実験，生産研究，55(6)，83-87

受理年月日 平成 25 年 12 月 6 日

Flexural Behavior of Small Scale Model of Reinforced Concrete Beam

TOKASHIKI Masaru*, ASANO Isamu*, MORI Mitsuhiro* and NISHIHARA Masahiko*

Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Facilities Engineering*

Summary

The flexural behavior in flexure test of two small scale mortar beams using miniature reinforcing bars is investigated by comparison with prototypic scale RC beams, whose tensile reinforcement ratios are 0.59, 1.19 and 2.11%. The load-displacement behavior of both 1/7 and 1/10 scale models agree well with that of the prototypes until the yield point. Beyond this yield point the load-displacement behavior of the models with tensile reinforcement ratios of 0.59 and 1.19% agrees with that of the prototypes, whereas the maximum loads of the models with tensile reinforcement ratio of 2.11% are about 20% greater than that of the prototypes. The ultimate strain values of each model are very scattered. These results are caused by mainly the dispersion of ultimate strain of miniature reinforcing bars. At the ultimate points the models have fewer cracks as compared to the prototypes. This result suggests the differences in bond strength to cement matrices between miniature reinforcing bars and real ones.

The results obtained in this paper suggest that the small scale beams using miniature reinforcing bars with tensile reinforcement ratio of less than about 1.19% have similar flexural behavior until ultimate failure with prototypic RC beams.

Key words: Reinforced concrete beam, Small scale model, Flexural test, Miniature reinforcing bar, Similarity

バイオ炭混入による砂質土壌の物理性の変化

—保水性・透水性・肥料成分の移動への影響について—

岩田幸良* 宮本輝仁* 亀山幸司**

*農地基盤工学研究領域畑地工学担当

**企画管理部業務推進室

キーワード：砂質土壌、バイオ炭、土壌改良、有効水分量、硝酸イオン

I 緒言

福井県北部を流れる九頭竜川の左右岸に広がる福井・坂井平野において、平成 11 年度より、老朽化した開水路のパイプライン化によって生み出される余剰水を、これまで質と量ともに不安定な水源に依存していた地域の水源に充て、灌漑用水の安定供給を図ることを目的とする国営農業用水再編対策事業「九頭竜川下流地区」が実施されている。この事業対象地域の一部である三里浜地域には約 320 ha の砂丘畑があり、園芸作物を中心に栽培が行われている。この地域は、これまで灌漑水を塩分が混じった地下水に依存し、塩害を避けるために十分な灌漑が実施できない場合があったが、本事業の実施により、良質な農業用水が供給される予定である。そのため、三里浜特産農業協同組合や JA 花咲ふくいを中心に、事業実施後に灌漑水を有効利用した営農を実現するための営農実証試験が行われている。しかし、対象土壌が砂質土壌であるため、保水性や保肥性に乏しく、肥料抜きの対策を行っているが、有効な手立てがまだ確立されていない状況にある。

土壌の保水性や保肥性を改善するための方法として、バイオ炭を用いた土壌改良が考えられる。バイオ炭 (Biochar) は、有機物 (バイオマス) の熱分解生成物のうち、土壌改良資材として利用される炭のことをいう。これまでに、バイオ炭を土壌に混入することで、作物の生産性が向上することが報告されている (陳ら, 2007; Chan et al., 2007; 陳ら, 2008; Asai et al., 2009; Hunt et al., 2010)。これは、バイオ炭を混入することで土壌の物理性や化学性、微生物活動が変化することに起因している (Lehmann and Joseph, 2009; Steinbeiss et al., 2009)。特に、バイオ炭混入による物理性の改善効果については、保水性の向上 (Kameyama et al., 2010; Abel et al., 2013) や熱伝導率の低下 (亀山ら, 2013) が報告されている。また、肥料成分の保持能力の向上についての報告がある (Laird et al., 2010)。これらの結果は、保水性や保肥性の乏しい土壌にバイオ炭を混入することで、土壌の保水性・保肥性が改善されることを示唆している。

本研究で対象とする九頭竜川流域では、土壌改良材として地元の九頭竜森林組合が木材のリサイクルで生産しているバイオ炭が販売されている。そこでこのバイオ炭を活用して、三里浜

砂丘地の砂質土壌の物理性を改善できないか検討することとした。土壌改良を行うためには多量な資材を必要とするため、その近隣地域で生産されたバイオ炭を用いる方が輸送面等から合理的と考えられるためである。物理性の改善による肥料抜きの対策としては、土壌改良資材を投与することにより、土壌の保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くすること、および肥料成分を吸着する特性を向上させること等が考えられる。そこで、本研究では、九頭竜森林組合で製造されているバイオ炭の混入による保水性の改善と肥料成分の移動への影響について実験室レベルで試験を行い、バイオ炭の混入による保水性・保肥性の改善の可能性について検討した。

II 試験方法

2.1 供試試料と物性評価

畑地灌漑を予定している福井県三里浜地区の典型的な砂質土壌畑の作土層 (0~15 cm 深) から採取した土壌を供試土とした。土性は砂 99%, シルト 1% の砂土である (谷口ら, 印刷中)。

土壌に混入させるバイオ炭は 2 種類とし、バーク炭 (森もり炭; 九頭竜森林組合) と、比較対象として木炭 (農業用みのり炭素; 奈良炭化工業株式会社) を用いた。バーク炭は製紙用チップ製造の際に出る樹皮を原料とし、平窯により炭化したものであるが、温度管理はしていないようであった。木炭は広葉樹を原料とし、土釜により炭化温度 600~700°C で炭化したものである。バイオ炭の理化学性を Table 1 に示す。

試験に使用したバーク炭と木炭を Fig. 1 に示す。木炭は粒状で粒径が 5~10 mm 程度であるのに対し、バーク炭は粉状で粒径は数 mm 程度と細かい。土壌に混入したバイオ炭は、農業現

Table 1 実験に用いたバイオ炭の理化学性
Physicochemical properties of biochar used in this experiment

	真比重 (Mg m ⁻³)	炭素 (%)	水素 (%)	窒素 (%)	硫黄 (%)
バーク炭	1.67	63.7	1.5	1.5	<0.3
木炭	1.54	69.3	2.0	1.0	<0.3

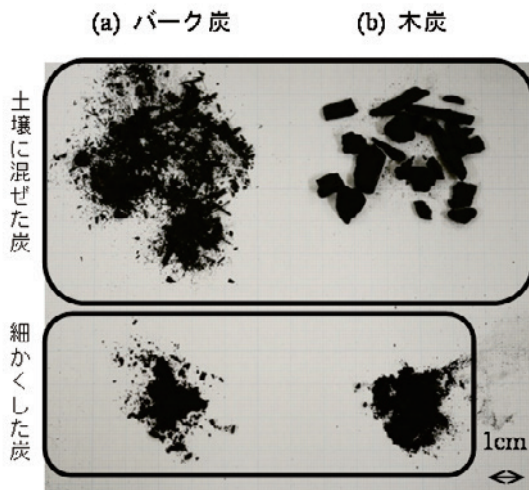


Fig. 1 試験に使用したバーク炭と木炭

Biochars made from bark (a) and wood (b), which were used in this experiment.

場で作土に混入する場合を想定し、粒度の調整をせず、購入したものをそのまま使用した。一方、後述の水銀圧入法で間隙分布を求める試験では、粗大な間隙の影響を避けるため、粉碎機でバイオ炭を粉碎後、0.5 mm の篩を通過し、0.2 mm の篩に残ったものを使用した。

2.2 バイオ炭混入試料の準備

バイオ炭の施用についてのこれまでの研究をみると、混入割合が 0.5~5% の範囲で土壤に施用し、その効果が確認されているものが多い(陳ら, 2007; Chan et al., 2007; 陳ら, 2008; Asai et al., 2009; Hunt et al., 2010; Laird et al., 2010; Zheng et al., 2013)。そのため、本研究でも既存の研究に倣い、乾燥重量割合が 1%, 3%, 5% となるように土壤にバイオ炭を混入した。土壤の乾燥密度 (ρ_{ds}) とバイオ炭の乾燥密度 (ρ_{dc}) は次式で計算される。

$$\rho_{ds} = W_{ds} / V_{ds} \quad (1)$$

$$\rho_{dc} = W_{dc} / V_{dc} = r_c \times W_{ds} / V_{dc} \quad (2)$$

ここに、 W_{ds} と W_{dc} は土壤とバイオ炭の重さ、 V_s と V_c は土壤とバイオ炭の容積、 r_c は土壤に対するバイオ炭の混入比(上記の乾燥重量割合の 1/100)である。一方、土壤とバイオ炭を混ぜた試料の乾燥密度 ($\rho_{d(c+s)}$) は次式で表現される。

$$\begin{aligned} \rho_{d(c+s)} &= (W_{ds} + W_{dc}) / (V_{ds} + V_{dc}) \\ &= (1+r_c) \times W_{ds} / (V_{ds} + V_{dc}) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)の V_{ds} と V_{dc} に式(1)と式(2)を代入することで、 $\rho_{d(c+s)}$ を ρ_{ds} と ρ_{dc} と r_c から計算する式(4)が得られる。

$$\rho_{d(c+s)} = (1+r_c) / (1/\rho_{ds} + r_c/\rho_{dc}) \quad (4)$$

谷口ら(印刷中)を参考にし、100 cm³ 円筒ステンレス容器に乾燥密度が約 1570 kg m⁻³ になるように土壤を充填し、コントロール(土壤のみの試料)とした。同様に、100 cm³ 円筒ステンレス容器にバイオ炭を密に詰め、105°C で 48 時間以上乾燥させることで ρ_{dc} を測定した。コントロールの乾燥密度 (ρ_{ds}) と式(4)から $\rho_{d(c+s)}$ を計算し、この値を用いて 100 cm³ 円筒容器に

バイオ炭を混入した試料を充填した。コントロール、バイオ炭を重量比で 1%, 3%, 5% 混入した試料をそれぞれ 8 個ずつ、バイオ炭を密に充填した試料(バーク炭、木炭)を 5 個ずつ用意した。

2.3 バイオ炭混入の透水性・保水性への影響評価

バイオ炭混入による透水性の変化について評価するため、コントロールとバイオ炭を混入した試料の各処理からそれぞれ 3 サンプルを任意に抽出し、定水位法(土壤物理性測定法委員会, 1972)により飽和透水係数を求めた。

また、バイオ炭混入による保水性の変化について評価するため、各処理について 5 個のサンプルを用いて水分特性曲線を求めた。pF1.0 (-0.98 kPa) ~ pF1.5 (-3.10 kPa) は砂柱法(Jamison, 1958), pF1.8 (-6.18 kPa) ~ pF4.2 (-1553 kPa) は加圧板法(土壤物理性測定法委員会, 1972)にて測定を行った。

得られた土壤水分特性データから、圃場含水量(pF1.8 のときの土壤水分量)、成長有効水分量(pF1.8 の水分量から pF3.0 の水分量を差し引いた値、 $\theta_{3.0}$)、有効水分量(F1.8 の水分量から pF4.2 の水分量を差し引いた値、 $\theta_{4.2}$)を求めた(駒村, 1992)。バイオ炭混入割合による保水性の向上効果を検証するため、有意差検定を行った。有意差検定は、①コントロールと各試料の間、②バーク炭と木炭それぞれにおける炭の混入割合が異なる試料の間、③混入割合が同じバーク炭と木炭の混入試料の間の 3 段階で平均値の差の有意性を t 検定により判定した。

混入するバイオ炭の水分特性が事前にわかっている場合、混入割合に応じた保水性の変化が予測できると便利である。そこで、土壤とバイオ炭の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ からバイオ炭混入試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を推定することを試みた。

式(3)で示したように、バイオ炭を混入した試料の重さ ($W_{d(c+s)}$) は $W_{ds} + W_{dc}$ なので、 W_{ds} と W_{dc} は土壤に対する炭の混入比 (r_c) を用いて次式で計算される。

$$W_{ds} = W_{d(c+s)} / (1+r_c) \quad (5)$$

$$W_{dc} = W_{d(c+s)} - W_{ds} = W_{d(c+s)} \times \{r_c / (1+r_c)\} \quad (6)$$

ここで、土壤とバイオ炭を混入したことによりそれぞれの水分特性は単体のときと変わらないと仮定する。この仮定の下で、コントロールの水分特性曲線から求めた土壤の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ をそれぞれ $\theta_{s3.0}$ と $\theta_{s4.2}$ 、バイオ炭の水分特性曲線から求めた $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ をそれぞれ $\theta_{c3.0}$ と $\theta_{c4.2}$ とすると、バイオ炭混入時の試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ は次式であらわされる。

$$\begin{aligned} \theta_{3.0 \text{ or } 4.2} &= (\theta_{s3.0 \text{ or } 4.2} / \rho_{ds}) \times W_{ds} + (\theta_{c3.0 \text{ or } 4.2} / \rho_{dc}) \times W_{dc} \\ &= W_{d(c+s)} \times [\theta_{s3.0 \text{ or } 4.2} / \{\rho_{ds} \times (1+r_c)\} \\ &\quad + (\theta_{c3.0 \text{ or } 4.2} \times r_c) / \{\rho_{dc} \times (1+r_c)\}] \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)により計算した値を実測値と比較することで、計算結果の妥当性を検討した。

$\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を式(7)により計算する際、100 cm³ 円筒ステンレス容器にバイオ炭を詰めて求めた $\theta_{c3.0}$ と $\theta_{c4.2}$ の代わりに、水銀圧入法により求めた微細間隙構造を用いる方法も検討した。バイオ炭自体は水につけた時、撥水性を示す場合がある。そのため、撥水性に影響されず間隙分布を得られる水銀圧入法の測定結果も比較検討した。水銀圧入法により得られた間隙分布から

θ_{c30} と θ_{c42} を求めるため、間隙径を等価毛管直径と等しいとみなし、以下のジュレンの式により相当する圧力水頭 (pF 値) に換算した (成岡, 1989)。

$$h = 0.3/d \quad (8)$$

ここに、 h は毛管上昇高さ、 d は等価毛管直径 (共に単位は cm) である。水銀注入法による間隙分布の測定には、0.3 kPa ~ 400 kPa を Carol Erba Institute 社の Pascal140 を、0.1 MPa ~ 400 MPa を同社の Pascal440 を使用した。

2.4 バイオ炭混入の硝酸イオンの流出への影響評価

畑地に施肥された窒素は、土壌中に生息する硝酸化成菌の作用を受けて、そのほとんどが最終的には硝酸態窒素になる (田淵ら, 1998)。そのため、土壌中の肥料成分の移動を評価するために硝酸イオンの流出に着目した。

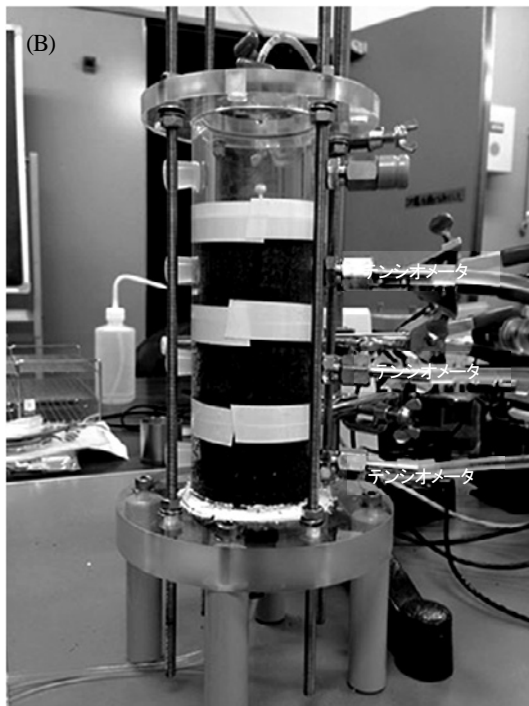
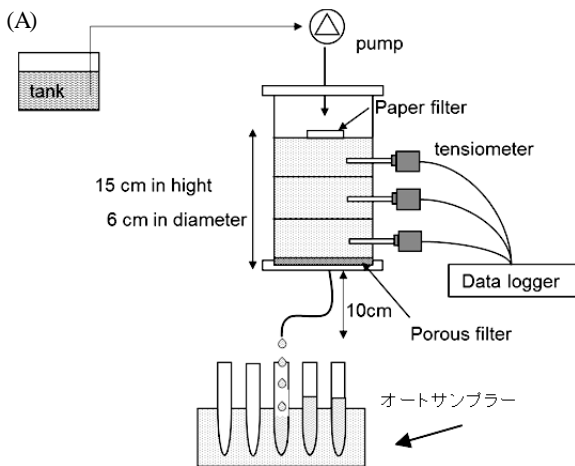


Fig. 2 実験装置の概要図 (A) と作成した土壌カラム (B) Schematic diagram of the experiment setup (A), and photo of soil column (B).

バーク炭の混入が肥料成分の移動に与える影響を評価するため、コントロール (土壌のみ) とバーク炭を 3%, 5% 混入した試料について、カラム試験を実施した。三里浜砂丘地で実施された営農実証試験では 10a 当たり 28 kg N の基肥を施用した実績があり、その量 ($87.5 \text{ mg N kg}^{-1}$) よりわずかに多い施肥を想定し、硝酸カリウム 478 mg をそれぞれの試料に均一になるように混ぜた試料を用意した。これは土壌に対して 100 mg N kg^{-1} を施用したことに相当する。各試料を内径 6 cm、高さ 15 cm の容器に、少量ずつできるだけ均等になるように詰めてカラムを作成した (Fig. 2)。カラム下端から蒸留水を毛管上昇させながら土壌試料へ給水を行った。24 時間以上かけてカラム下端からの給水を終了することで土層内の水ポテンシャルの初期条件を各処理で同じにした。試験開始と同時にカラム上端から一定フラックス (4.4 mm h^{-1}) で水を供給した。この量は現地で実施されている約半分の灌漑強度に相当する。水フラックスの調整には送液ポンプ (Masterflex, Cole-Parmer Instrument Company) を用いた。カラム下端から 10 cm 低い位置を自由水面とし、流出水をオートサンプラー (CHF161RA, ADVANTEC) で 1 時間毎に採水した。実験終了後、イオンクロマトグラフ (DIONEX, ICS-1500) により流出水に含まれる硝酸イオン濃度を測定した。実験中、カラム下端から高さ 2.5, 7.5, 12.5 cm の 3 地点でテンシオメータによりマトリックポテンシャルを測定した。テンシオメータの圧力センサー (PA-500-102V, Copal electronics) からの出力を 1 時間間隔でサンプリングし、データロガー (CR1000, Campbell Sci. Inc.) に記録した。得られた結果から硝酸イオンの流出量を求め、バーク炭の混入が硝酸イオンの移動に与える影響を評価した。供試土壌が砂質土であり保肥性が低いことと、作物栽培期間ではないときに土壌をサンプリングしていることから、元々の窒素はほとんど無いと考え、試験前に添加した硝酸態窒素の量を基準に流出率を計算した。

III 結果と考察

3.1 バイオ炭混入が透水性と保水性に与える影響

飽和透水係数の測定結果を Fig. 3 に示す。バーク炭は混入量の増加に伴い透水係数が低下する傾向がみられたのに対し、木炭は混入量の増加に伴い透水係数が増加する傾向がみられた。混入量の異なる各試料とコントロールとの間に有意な差が認められたものは、木炭を 5% 加えた試料のみであった。また、バーク炭は、混入量 1% と 5% の試料の間に有意な差が認められた。一方、木炭は、混入量 1% と 3% の試料間および混入量 1% と 5% の試料間に有意な差が認められた。バイオ炭の種類の違いについては、混入量 5% のときに有意な違いが認められた。

一般に大きな間隙ほど間隙内を流れる水の流速が速くなるため、粗大な間隙が多いほど飽和透水係数が高くなる傾向がある (例えば、安中ら, 1992)。従って、木炭を加えたことで粗大な間隙が増加したことが、コントロールよりも木炭 5% で有意に透水係数が増加し、木炭を入れた試料との比較では木炭を入れるほど透水係数が増加傾向にあった要因として挙げられる。このような違いが認められたものの、本試験では各処理間で飽和

透水係数にオーダーレベルの違いは認められず、バイオ炭投入による明確な改善効果は期待できないと考えられる。陳ら(2008)は島尻マージにバイオ炭を投入しても透水係数に明確な違いがみられなかったことを報告している。また Uzoma et al. (2011) が砂質土壌にバイオ炭を投入したときに透水係数が低下していることを示している。Laird et al. (2010) は、壤土でもバイオ炭投入による飽和透水係数の増加効果はみられなかったことを報告している。これらのことを考慮すると、本来の透水性が良好な土壌の場合、バイオ炭投入による透水係数の顕著な増加は期

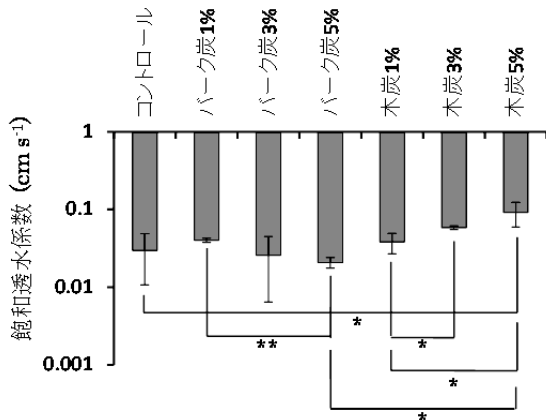


Fig. 3 飽和透水係数の平均値 (n=3)。エラーバーは標準偏差を意味する。*は5%水準で、**は1%水準で処理区間の平均値に有意な差があったことを意味する。

Averaged saturated hydraulic conductivity (n=3). Error bars mean standard deviations. * and ** mean respectively that there are significant differences with significance levels of 5 % and 1% between mean values.

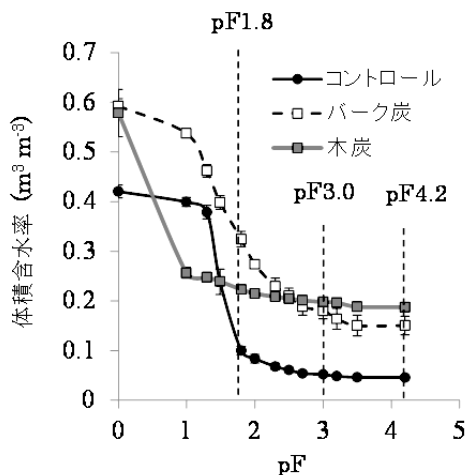


Fig. 4 土壌試料のみ (コントロール)・バーク炭のみ (バーク炭)・木炭のみ (木炭) の水分特性曲線。エラーバーは標準偏差 (n=5) を意味する。

Soil water characteristic curves of soil (solid circle) and charcoals made by bark (open square) and wood (solid square). Error bars mean the standard deviations (n=5).

待できないと考えられる。

コントロールとバーク炭・木炭を詰めた試料の水分特性曲線を Fig. 4 に示す。コントロールは pF1.3 から pF1.8 にかけて急激に土壌水分量が低下するが、pF1.8<の範囲では土壌水分量の変化が少ない、典型的な砂質土壌の水分特性曲線を示した(中野, 1991)。バーク炭は pF1.0 から水分量が下がりはじめ、pF3.0<の範囲では顕著な減少はみられなかった。木炭は毛管飽和時 (pF0.0) から pF1.0 にかけて急激に水分が低下したが、その後は pF の増加に伴い水分量が緩やかに減少した。バーク炭・木炭共に飽和時と pF4.2 の水分量は土壌 (コントロール) よりも大きかった。水分特性曲線から求められた θ_{30} は、コントロールが $0.048 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に対し、バーク炭と木炭はそれぞれ $0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と $0.025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。同様に θ_{42} は、コントロールが $0.054 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に対し、バーク炭と木炭の θ_{42} はそれぞれ 0.17 と $0.034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。バーク炭の θ_{30} と θ_{42} はコントロールの 3 倍程度だったのに対し、木炭はコントロールよりも小さな値である。

バイオ炭混入試料の成長有効水分量 (θ_{30}) の測定結果を Fig. 5A に示す。バイオ炭混入試料とコントロールを比較すると、木炭 5%混入試料を除き、コントロールとバーク炭・木炭混入試料との間にそれぞれ 1%・5%水準で有意な差が認められた。一方、バーク炭・木炭ごとに混入量の違う試料間で比較すると、バーク炭・木炭いずれも、炭混入量の違いによる有意差は認められなかった。混入量が同じバイオ炭混入試料間で比較すると、資材の違いについては、混入量 5%の試料間に 1%水準で有意な差が認められた。

バイオ炭混入試料の有効水分量 (θ_{42}) の測定結果を Fig. 5B に示す。バイオ炭混入試料とコントロールを比較すると、バーク炭を混入したすべての試料で有意な差が認められた。一方、木炭を混入した試料ではコントロールと 1%混入試料の間に 5%水準で有意な差が認められた。しかし、それ以外の試料では有意な差が認められなかった。バーク炭・木炭ごとに混入量の違う試料間で比較すると、バーク炭を 1%混入した試料と 5%混入した試料との間に 1%水準で、3%混入した試料と 5%混入した試料の間に 5%水準で有意な差が認められたバイオ炭の混入割合が等しい試料間の比較では、混入割合が 1%の試料が 5%水準で、混入割合 3%と 5%の試料が 1%水準で有意な差が認められた。

以上の結果から、全てのバーク炭の混入試料で θ_{30} と θ_{42} が増加したことから、バーク炭は保水性を増加させるための土壌改良資材として有望であると考えられた。この結果は、島尻マージにバガス炭を混ぜたときの結果 (Kameyama et al., 2010) や、砂質土壌に木炭を混ぜたときの結果 (Uzoma et al., 2011) と一致している。一方、木炭を混入した試料については、1%の混入でコントロールよりも有意に増加したものの、それ以上混入量を増やすと逆に有意な差がなくなった。そのため、木炭を粒度の調整をせずに混入すると、保水性の向上効果があまり現れない場合があることが確認された。本試験と同じ砂質土壌で木炭を用いたにもかかわらず、Uzoma et al. (2011) では木炭投入により保水性の増加が期待できるという結果を示している。Uzoma et al. の結果と本試験の結果が異なる理由として、前者が炭を細

かくすりつぶしているのに対し、本試験では木炭をそのまま使用したことが考えられる。この結果から、混入する木炭の粒径によって保水性の改善効果が異なる可能性が示唆されるが、本

試験ではこれを検討するための十分なデータは得られておらず、これについては今後検討する必要がある。

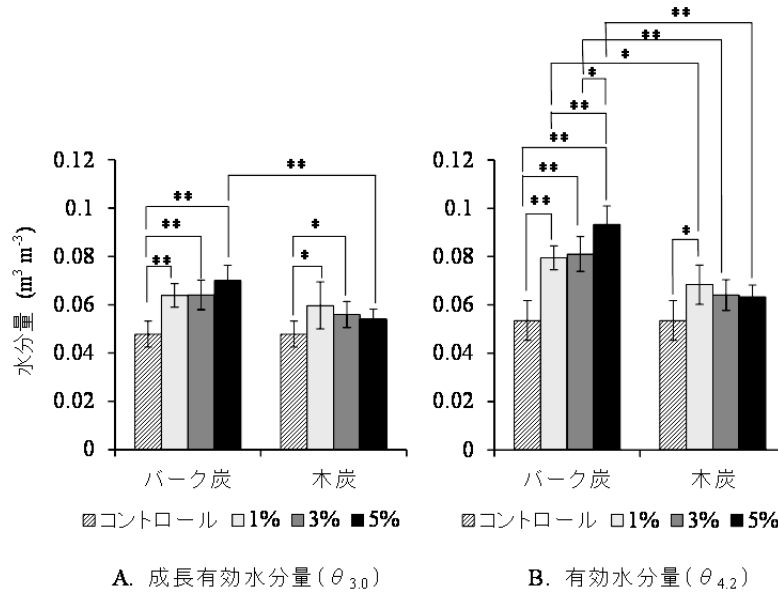


Fig. 5 成長有効水分量と有効水分量。エラーバーは標準偏差(n=5)を意味する。*は5%水準で、**は1%水準で処理区間の平均値に有意な差があったことを意味する。

Depletion of moisture content for optimum growth and available soil moisture. Error bars mean standard deviations (n = 5). * and ** mean respectively that there are significant differences with significance levels of 5 % and 1% between mean values.

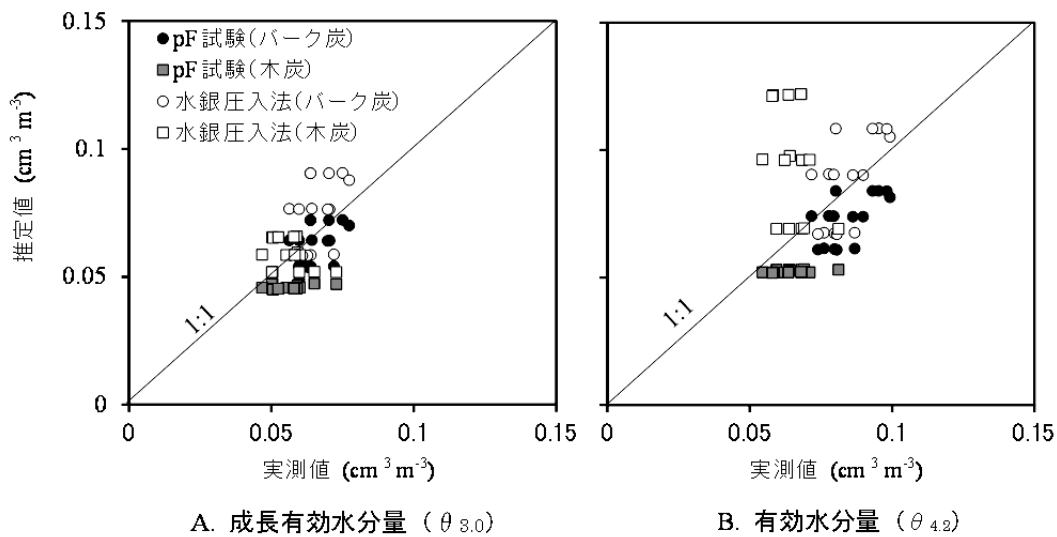


Fig. 6 成長有効水分量と有効水分量のモデルによる推定値と実測値の比較。pF試験と水銀圧入法により求めたバーク炭と木炭の成長有効水分量と有効水分量の比較。図中の黒丸はpF試験から得られたバーク炭の成長有効水分量と有効水分量を (Fig. 5 参照)、灰色の四角は木炭の成長有効水分量と有効水分量を (Fig. 5 参照)、白丸と白四角はそれぞれ水銀圧入法により得られたバーク炭と木炭の成長有効水分量と有効水分量を意味する。

Scatter diagrams between measured and estimated values of moisture content for optimum growth (A) and available soil moisture (B). Values in vertical axis of black circles and gray squares were respectively estimated using dataset obtained from the water retention curves of biochars by pF experiment. Values in vertical axis of open and solid squares were calculated using dataset obtained from the pore space volume, which was measured by mercury press-in method. Values of biochars made from bark and wood were shown as circles and squares, respectively.

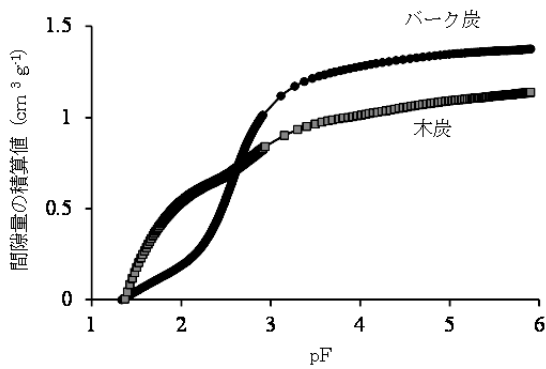


Fig. 7 水銀圧入法によるバーク炭と木炭の間隙構造の違い
Distribution of pore space volume of charcoals made by bark and wood, which were measured by mercury press-in method.

コントロールとバーク炭・木炭を詰めた試料の水分特性曲線から求めた θ_{30} と θ_{42} を用いて式(7)により推定したバイオ炭混入試料の θ_{30} と θ_{42} を実測値と比較した結果を Fig. 6 に示す。 θ_{30} と θ_{42} の推定値と実測値の間の平均自乗誤差 (RMSE) はそれぞれ 0.010 と 0.014 であった。これらの値は、それぞれ実測した θ_{30} と θ_{42} の 17% と 19% であり、推定誤差は大きくはなかった。しかし、 θ_{30} と θ_{42} 共に過小評価の傾向がみられ、特に θ_{42} でこの傾向が顕著だった。

水銀圧入法による間隙分布の結果から間隙量と pF の関係を求めた結果を Fig. 7 に示す。バーク炭では単位重量当たりの θ_{30} と θ_{42} はそれぞれ $0.93 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ 、 $1.17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ であり、水分特性曲線から得られるものより $0.31 \sim 0.42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ 大きい値となった。また、木炭ではさらに分析法による θ_{30} と θ_{42} の違いが顕著であり、pF 試験により求めた $\theta_{30} = 0.079 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ と $\theta_{42} = 0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ に対し、水銀圧入法により求めた値は $\theta_{30} = 0.39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ 、 $\theta_{42} = 0.59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ g}^{-1}$ であった。

上と同様に水銀圧入法から求めた θ_{30} と θ_{42} を用いて式(7)により推定したバイオ炭混入試料の θ_{30} と θ_{42} を実測値と比較した結果、 θ_{30} は実測値と推定値の RMSE が $0.013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、 θ_{42}

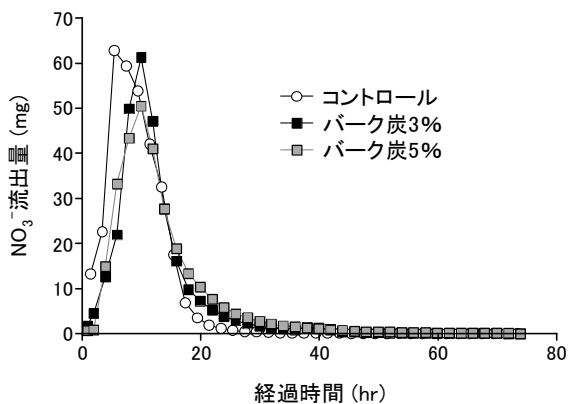


Fig. 8 バーク炭混入による硝酸イオンの流出量の違い
Nitrate leachate from soil columns with different biochar contents (0, 3, 5% [w/w])

は $\text{RMSE} = 0.029 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、特に θ_{42} では pF 試験で得られたバイオ炭の値を使用した方が実態をよく反映すると考えられた。水銀圧入法で測定する際に試料を細かくしたことが、バイオ炭の保水性を過大評価した要因の一つと考えられる。

Fig. 5 から、木炭の混入量の増加に伴い、有意な差は認められないものの、 θ_{30} と θ_{42} が減少する傾向がみられた。一方、コントロールと木炭を 1% 混入した試料の間には θ_{30} ・ θ_{42} 共に有意な差が認められた。これらを同時に満たすよう評価するためには、土壌と木炭の保水性を別々に加算するだけでなく、土壌と木炭の境界にできる間隙による保水性も考慮する必要があることが示唆される。木炭の混入試料の θ_{30} と θ_{42} が式(7)で推定した値よりも大きかった理由の一つには、こうした効果を式(7)では表現できていないことに原因があると考えられる。しかし、これについては今回の実験では明らかにすることができず、今後の課題として残されている。

3.2 バイオ炭が硝酸イオンの流出に与える影響

保水性の向上に向けた試験で用いた 2 種類のバイオ炭のうち、現地での施用が期待されるバーク炭について、その混入が硝酸イオンの移動に与える影響を試験した (Fig. 2)。その結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

Fig. 8 を見ると、コントロールはバーク炭混入試料に比べて流出ピークと流出の低下が早いことがわかる。バーク炭混入試料の硝酸イオンの流出ピークはコントロールに比べておよそ 4 時間半遅く現れた。また、硝酸イオンの流出量が 1 mg 以下になる時間は、コントロールでおよそ 25 時間、バーク炭 3% でおよそ 35 時間、5% でおよそ 40 時間であった。バーク炭を混入することで硝酸イオンの流出が遅れることが確認されたが、顕著な差ではなかった。この理由として、今回用いたバーク炭は硝酸イオンの吸着があまり期待できないものであったことが考えられる。バイオ炭は炭化温度により性質が異なり、固相表面の吸着能力は、炭化温度が高いバイオ炭ほど大きい。木炭、竹炭、バガス炭では炭化温度 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 以上の高温で生成された場合に硝酸イオンの吸着能力を有するものとなる (伴野ら, 2009;

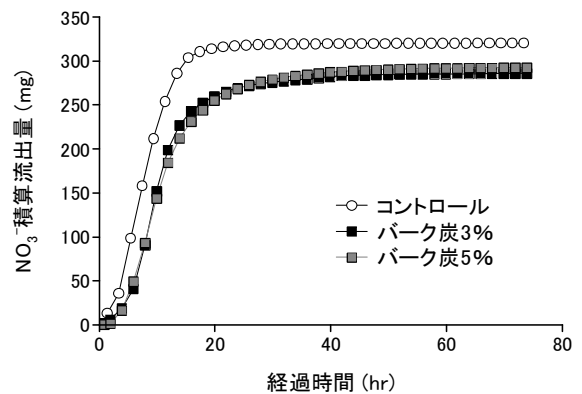


Fig. 9 バーク炭混入による硝酸イオンの積算流出量の違い
Cumulative nitrate leachate from soil columns with different biochar contents (0, 3, 5% [w/w])

Dempster et al., 2012; Kameyama et al., 2012)。今回用いたバーク炭は炭化温度を管理して製造されたものではなく、固相表面の吸着能力が発揮される 600~700°C 以上で炭化されたものではないと推察される。また、硝酸イオンの流出の低下がバーク炭で遅れた理由として、バーク炭の混入によって間隙率が増加したことが挙げられる。間隙率はコントロールでは 0.40 であったが、バーク炭 3% で 0.47、バーク炭 5% で 0.50 と増加した。しかし、4.4 mm hr⁻¹ 前後の灌漑強度で連続的に給水を行ったため、間隙率の違いに比べて給水量が十分大きく、顕著な遅れは現れなかった。

一方、バーク炭の混入は硝酸イオンの積算流出量を減少させる傾向があった (Fig. 9)。今回のカラム試験では全ての試料に、硝酸カリウムを 478mg (土壌に対して 100 mg N kg⁻¹ 相当) 混入した。この場合、混入した硝酸イオンは 388mg となる。流出率はコントロールで 83%、バーク炭混入試料で 75% であった。今回のカラム実験では給水強度を一定とし、下端の負圧も小さかったため、浸透水量の経時変化やポテンシャル分布はコントロールとバーク炭混入試料で同様のものとなった。また、測定期間 (73 時間) における積算浸透量も全ての試料で 900 ml 以上であった。そのため、硝酸イオンの積算流出量の違いは、浸透量の違いによるものではなく、実験初期に硝酸イオンがバーク炭の微細間隙中に不動水として保持されたことや不溶化・脱窒等により硝酸が減少したことに起因していると考えられた。

Zheng et al. (2013) や Yao et al. (2012) も類似の結果を得ているが、メカニズムについては不明な点が多い。硝酸イオンの流出量の減少についての詳細なメカニズムの解明については今後の課題であるが、今回の試験でバーク炭混入による肥料成分の移動特性に関する概略は得られたものと考えている。

IV 結 言

国営農業用水再編対策事業「九頭竜川下流地区」の対象地区の一部である三里浜砂丘地では、事業実施後に灌漑水を有効利用した営農を実現するための営農実証試験が行われている。しかし、土壌が砂質土壌のため、保水性の確保や肥料持ちの改善が必要とされている。そこで、地元の九頭竜森林組合が木材のリサイクルで生産しているバイオ炭に注目し、これを地産地消の観点から活用できないかどうか検討した。特に、これまでの営農実証試験の中で問題となっている肥料抜けに対しては、土壌の保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くすること、および肥料成分を吸着する特性を向上させること等が重要となる。そのため、本研究では、九頭竜森林組合で製造されているバイオ炭 (バーク炭) の混入による保水性の改善と肥料成分の移動への影響について実験室レベルで試験を行い、バイオ炭の混入による保水性・肥保性の改善の可能性について検討した。

バイオ炭の混入による保水性の改善については、バーク炭を混入した土壌の成長有効水分量と有効水分量は、すべての混入割合 (1%, 3%, 5%) の試料について、コントロールよりも有意に値が大きくなった。一方、比較対象とした木炭を 1% 混入

した試料ではコントロールよりも有意にこれらの値が上昇したが、木炭を 3% と 5% 混入した試料ではコントロールとの間に有意な差が認められなかった。バーク炭は土壌の約 3 倍の成長有効水分量と有効水分量を持つのに対し、木炭は土壌よりもこれらの値が小さかった。このことが、木炭を混入した試料で明確な保水性の増加効果が認められなかった要因と考えられた。バイオ炭と土壌の成長有効水分量と有効水分量を足し合わせたものが混合試料の各水分量になると仮定したモデルで計算した値は、実測値よりも若干小さかった。このことから、土壌とバイオ炭の保水特性から混合土壌の保水特性を精度良く推定するためには、土壌とバイオ炭との間に形成される問題も考慮する必要があることが示唆された。

硝酸イオンの移動については、使用したバーク炭は硝酸イオンを吸着する能力は期待できないが、バーク炭を入れると間隙構造の変化により土壌のみの場合よりも溶脱のタイミングが遅くなることが明らかになった。また、バーク炭を混入することにより、バーク炭の微細間隙中の不動水として硝酸イオンの保持や脱窒・不溶化等の促進により、下層への溶脱量は減少することを示唆する結果も得られた。ただし、その差は小さく、効果の発現には降雨条件等も十分考慮する必要がある。

以上のことから、九頭竜川流域で製造されているバーク炭の混入は保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くする効果が期待できる材料であることが明らかになった。しかし、肥料成分を吸着して肥料抜けを抑える効果は期待できないことも示唆された。ただし、今回の溶脱試験は土壌が比較的飽和に近い状況のもと、灌漑強度 4.4 mm hr⁻¹ 前後で 300 mm 以上の灌漑を行った場合に相当する。そのため、現地条件でバイオ炭を用いた保水性の改善が肥料抜けの対策としてどのくらい有効であるかは、今後、現地での実証試験等も踏まえて確認していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、北陸農政局九頭竜川下流農業水利事業所の倉田進氏と大塚直輝氏から試料提供の便宜を受けた。中谷美喜子氏に実験とデータ整理の一部を担当いただいた。ここに記して感謝いたします。本研究は、農研機構農村工学研究所研究活動強化費 (課題化可能性検討費) の補助を受けて実施した。

参考文献

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, *Geoderma*, **202–203**, 183–191
- 安中武幸, 井上久義, 成岡市 (1992): 圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造, *土壌の物理性*, **66**, 3–9
- Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T. (2009): Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: I. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield, *Field Crops Research*, **111**, 81–84
- 伴野雅之・久場隆広・市川瞬平・酒井雄介・佐野弘典・河野直哉 (2009): 竹炭における硝酸イオン吸着能とその機構, *水環境学会誌*, **32**, 369–374
- Chan, K. Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. (2007):

- Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment, *Australian Journal of Soil Research*, **45**, 629–634
- 陳 嬌・平良正彦・川満芳信・凌 祥之 (2007): サトウキビの品質向上および硝酸態窒素汚染の抑制に対する試み—宮古島におけるバイオマス炭化物の有効利用—, *農業農村工学会論文集*, **251**, 25–30
- 陳 嬌・平良正彦・上野正実・凌 祥之 (2008): 島尻マーヅ土壌における消化液やバガス炭の施用効果について—地下水質を考慮したサトウキビ, ソルガムの輪作栽培—, *農業農村工学会論文集*, **254**, 31–37
- Dempster, D.N., Jones, D.L., Murphy, D.V. (2012): Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil, *Soil Research*, **50**, 216–221
- 土壌物理性測定法委員会 (1972): 土壌物理性測定法, 養賢堂, 505p.
- Hunt, J., DuPonte, M., Sato, D., Kawabata, A. (2010): *The basics of biochar: A natural soil amendment*, SCM-30, Cooperative Extension Service, University of Hawai'i at Manoa.
- Jamison, V.C. (1958): Sand-siult suction column for determination of moisture retention., *Soil Science Society of America Proceedings*, **22**, 82–83
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shinogi, Y. (2010): Increase in available water content of soils by applying bagasse-charcoals, *19th World Congress of Soil Science Proceedings*, 105–108
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T., Shinogi, Y. (2012): Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil, *Journal of Environmental Quality*, **41**, 1131–1137
- 龜山幸司・宮本輝仁・塩野隆弘 (2013): バイオチャーを混入した土壌の熱伝導率, 土壌の物理性, **123**, 81–88
- 駒村正治 (1992): IV畑地の灌漑・排水, 穴瀬真・安富六郎・多田敦編著, 新版農地工学, 129–131, 文永堂出版, 344p.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010): Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil, *Geoderma*, **158**, 436–442
- Lehmann, J., Joseph, S. (2009): *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London.
- 中野政詩 (1991): 土の物質移動学, 東京大学出版社, 193p.
- 成岡市(1989): 土壌の孔隙の計測法とその物理機能に関する研究, 東京農業大学総合研究所紀要, **1**, 1–56
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity, *Soil Biology & Biochemistry*, **41**, 1301–1310
- 田淵俊雄・安楽 敏・中曾根英雄・柚山義人 (1998): 清らかな水のためのサイエンス—水質環境学—, 地域環境工学シリーズ 4, 農業土木学会, 207p.
- 谷口邦仁・中村俊治・山本忠史・宮本輝仁・弓削こずえ (印刷中): 風洞実験による三里浜砂丘地土壌の風食発生条件の検討, 畑地農業
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., Nishihara, E. (2011): Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **9**, 1137–1143
- Yao, Y., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A.R. (2012): Effects of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil, *Chemosphere*, **89**, 1467–1471
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S., Xing, B. (2013): Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil, *Geoderma*, **206**, 32–39

受理年月日 平成 25 年 12 月 6 日

Effect of Biochar Application on Soil Physical Properties of Sandy Soil

IWATA Yukiyooshi*, MIYAMOTO Teruhito* and KAMEYAMA Kohji*

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

Summary

Adding biochar to soil is one means to improve soil physical properties. To examine the effects of biochar on soil physical properties, biochar of two types was mixed in sandy soil. Soil was taken from farmland in Sanrihama in the Kuzuryu river basin, a main irrigation area in Japan. Biochar made from bark (Bark-char), manufactured in this basin, was used as one type of biochar. Charcoal was used for the other biochar samples. Biochars of 1, 3, and 5% of the soil weight were mixed with the soil and were packed into cylindrical containers of 100 cm³ in volume. The soil without biochar was also repacked into the container as control. Saturated hydraulic conductivity (k_s), moisture content for optimum growth ($\theta_{3.0}$) and available soil moisture of these samples ($\theta_{4.2}$) were determined. $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ of biochars were also determined using biochar samples repacked densely into the 100 cm³ container. No significant change of k_s was found from adding Bark-char. In contrast, k_s of the sample with 5% added charcoal was slightly larger than that of the control, probably because of numerous macropores in the charcoal. $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ increased significantly by adding Bark-char, irrespective of the added amount. In contrast to the Bark-char, no significant difference of $\theta_{3.0}$ was found between control and soil samples with 5% added charcoal. Moreover, $\theta_{4.2}$ increased only when 1% charcoal was added to the soil. These results coincided with significantly larger $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ of Bark-char compared with those of charcoal. To examine nitrate movement, three samples were packed into a 150-mm-height cylindrical column of 60 mm in diameter: no biochar, 3% Bark-char mix, and 5% Bark-char mix. Before packing into the column, KNO₃ of 100 mgN kg⁻¹ was mixed with the samples. NO₃⁻ leaching from the soil column was delayed slightly by the addition of Bark-char. From this leaching experiments, we speculated that Bark-char was not considered to absorb substantial amount of nitrate. It is more likely that nitrate solution in soil water stayed longer in the soil column resulting from improved water holding capacity by adding Bark-char.

Keywords: sandy soil, biochar, soil amelioration, available soil moisture, nitrate

浮遊物質移動を組み込んだ分布型水循環モデルの構築

名和規夫* 吉田武郎* 堀川直紀* 工藤亮治* 皆川裕樹*

*水工学領域水文水利担当

キーワード：浮遊物質，ウォッシュロード，浮遊砂，分布型物質移動モデル

I 緒言

国内においては、沖縄県における赤土流出などに代表される土地利用の変化に伴う土壌流亡が報告されている。また、降雨による浸食で、強度の土壌劣化を受けた土地は全世界で約 2.2 億 ha に及んでおり、農業を継続するうえで大きな課題となっている（大倉，2010）。

福島第 1 原発事故によって広域に拡散した放射性物質は土壌表層 3cm 以内に約 9 割近くが留まっている（農林水産省，2013）。降雨による表土流亡に伴い、表土の粘土等に付着した放射性物質が浮遊物質とともに移動し、上流から下流に輸送される。更に、浮遊物質は取水施設により農業用水として水田域に配水され、放射性物質も運搬・拡散される恐れがある。このため、ダム、頭首工等の取水・貯水管理にあたっては、降雨特性、流出特性を考慮した管理を行うとともに、浮遊物質の移動を考慮した管理及び浮遊物質の対策が重要となっている。このように、東日本大震災以降の新たな社会的必要性からも、浮遊物質の移動を時空間的に明らかにすることが重要な課題と言える。

土壌浸食に関する研究は、長澤ら(2000)、塩野ら(2004)、高木ら(2008)、中ら(2008)、大澤ら(2008)をはじめとして多くの研究者により畑地、草地などの農地圃場、農地を含めた小流域の土壌浸食を主対象として研究が行われている。一方で、ダム、頭首工等の集水流域を対象として、降雨による表土浸食に起因する浮遊物質移動を考慮した取水・管理に関する研究は少ない。

また、代表的な土壌浸食予測手法として USLE, WEPP, SWAT があげられる。USLE は土壌浸食の物理的な生産過程、運搬過程を表現できない。また WEPP, SWAT は日降水量から地表流出量、ピーク流出量等を算出し土壌浸食量を推定するもので、降雨によって発生する浮遊物質移動を時空間的に明らかにするのは難しいと考える。

このため、ダム、頭首工などの集水流域から地表流によって浮遊して流下する浮遊物質（浮遊して移動するウォッシュロード、浮遊砂、それらと共に移動する物質を含めた総称）の移動を予測するとともに、ダム、頭首工から取水

されて農業用水と共に運搬される浮遊物質の移動を予測する手法の整備が重要となっている。

本報文では、ダム等の集水流域の表土浸食に起因する浮遊物質の移動に関する既存の研究を概観し、浮遊物質の生産と移動の基礎理論を整理し、浮遊物質移動を組み込んだ分布型水循環モデル（以下、分布型物質移動モデル(仮称)と言う。）の構築を行うとともに、モデルに必要な表土等の物性値の整理を行う。

II 分布型物質移動モデル

2.1 全体構成

清水（1995）、平林ら（2004）、舛屋ら（2006）により 1 次元移流方程式による浮遊土砂濃度連続式が提案され、雨水の流出を表現するキネマティックウェーブ法による連続・運動式と浮遊物質濃度連続式を連続して解き、河道内の土砂動態を予測する手法が提唱されている。

また、流域内の空間分布情報を取扱い、任意の地点での流水の挙動を明らかにする分布型流出モデルの研究が進められている。佐山ら（2003）による分布型流出モデルに土砂の生産、堆積過程を組み込んだモデルの研究がされているが、研究例は少ない。

吉田ら（2012）による分布型水循環モデルは、土地利用、土壌特性、地形等の空間データベースを活用したモデルで、各メッシュで得られる河道流量、利用可能水量を再現するとともに、灌漑地区内における用水の取水、用水配分、河道への還元を再現できる。

本研究で構築を試みる分布型物質移動モデルは、前述の分布型水循環モデルによる各時間ステップ、各メッシュでの地表流量、河道流量を基に、斜面部の浮遊物質の生産・堆積・運搬の過程、河道部の斜面部からの横流入を踏まえた巻上・堆積・運搬の過程のモデル化を図り、流域における浮遊物質移動の予測を試みるものである。

分布型物質移動モデルに関する考察の流れを Fig. 1 に示す。

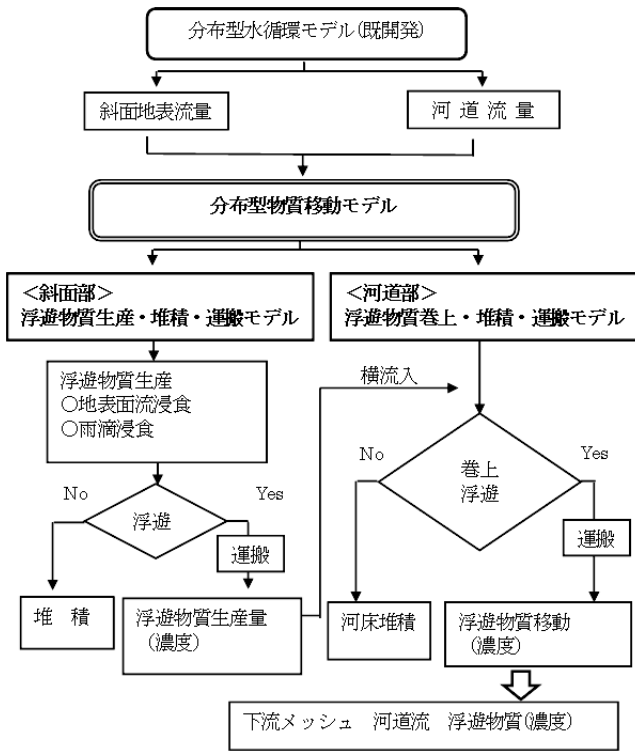


Fig. 1 分布型物質移動モデル構築の概要図
Outline to build a distributed water circulation model incorporating suspended solid movement

2.2 斜面部の浮遊物質生産・堆積・運搬

2.2.1 斜面地表面流

斜面地表面流は分布型水循環モデルによって解析を行い、追跡手法はキネマティックウェーブ法を用いている。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_e \tag{1}$$

$$h_s = k \times q_s^p \tag{2}$$

$$k = (N / I_b^{1/2})^{3/5} \quad p = 3/5 \tag{3}$$

ここで、 x : 斜面の下流方向距離、 t : 時間、 h_s , q_s : 地表面流の水深及び流量、 r_e : 有効降雨強度、 N : 等価粗度係数、 I_b : 斜面勾配である。土地利用ごとの等価粗度係数 N は、角屋 (1980) による標準値を参考に決定する。メッシュの等価粗度は、メッシュ内の土地利用で重みを付け平均した値を用いる。

有効降雨強度 r_e は、降雨強度が浸入強度を越えた時に生じる浸透余剰地表面流と、土壌が完全飽和時の降水によって生じる飽和地表面流からなり、地表面流の浸入強度は Green Ampt 式 (Green and Ampt, 1911) により推定する。

地表面流の差分法は nonlinear scheme (Li et al., 1975) を用いている。また、2.3.1 の河道流についても同様である。

2.2.2 斜面部の浮遊物質濃度連続式

清水 (1995) は、河道内のウォッシュロードの動態を移流拡散方程式により解析している。その後、平林ら (2004)、舩屋ら (2006) は、流下方向の拡散は無視できるとし、生成項を有する浮遊物質濃度連続式(4)を提案している。降雨による斜面部の浮遊物質生産は、斜面地表面流の浸食作用に

起因した浮遊物質生産、雨滴の地表面衝突による浸食作用に起因した浮遊物質生産、浮遊物質の堆積の3生成項としている。

$$\frac{\partial (C_s(d)h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (C_s(d)q_s)}{\partial x} = R_{E1}(d) + R_{E2}(d) - C_s(d)w_f(d) \tag{4}$$

ここで、 $C_s(d)$: 浮遊物濃度、 $R_{E1}(d)$: 地表面流による表面土浸食量、 $R_{E2}(d)$: 雨滴による表面土浸食量、 $C_s(d)w_f(d)$: 浮遊物質の沈降堆積量である。

斜面地表面流の流出を表現するキネマティックウェーブ法による連続式(1)と運動式(2)により h_s , q_s を、後述する式(5), (14), (15)により $R_{E1}(d)$, $R_{E2}(d)$, $w_f(d)$ を求める。これらを浮遊物質濃度連続式(4)に代入すると未知数は $C_s(d)$ だけとなり $C_s(d)$ を解くことができる。これを繰り返すことによって浮遊物質濃度が追跡でき、浮遊物質の移動が予測できる。

斜面部の浮遊物質濃度の差分法には、斜面流と同様に nonlinear scheme (Li et al., 1975) を用いる。また、2.3.2 の河道部の浮遊物質濃度も同様である。

2.2.3 地表面流浸食による浮遊物質生産

市川ら (2003) は、地表面流による表土浸食は、地表面流水が表土の土壌をはぎ取る(せん断)ことによって発生すると式(5)を提案している。この式で重要となる浸食速度： E は、芦田ら (1974) により摩擦速度に比例するとし、その後、西森ら (2009) は、粘着性土としてカオリン材を用いて水路実験を行い、地表面流による浸食速度として式(6)を提案している。

$$R_{E1}(d) = \rho_s \times E \times (1-r) \times p_f(d) \tag{5}$$

$$E = \alpha_1 \times \alpha(T) \times R_{wc}^{2.5} \times u_*^3 \tag{6}$$

$$\alpha(T) = 3.3 \times T + 58.0 \tag{7}$$

$$u_* = (gh_s(I_b^2 / (1 + I_b^2))^{1/2})^{1/2} \tag{8}$$

ここで E : 浸食速度、 ρ_s : 土粒子密度、 r : 間隙率、 $p_f(d)$: 各粒径の構成率、 R_{wc} : 水含有率、 u_* : 摩擦速度、 T : 水温、 α_1 : 係数である。 R_{wc} は、粘土の重量に対する含有水の重量の比率で 1.0 以下であるが、計算においては表土の飽和度を代入する。水温は日平均気温を代入する。

粒径が異なる土粒子は、地表面流によって浸食作用を受けても、その流況時に浮遊し運搬されるのかの判断が必要であり、運搬の判断は式(9)により行う (荒井ら, 1988)。

$$\frac{u_*}{1.08} \geq w_f(d) \tag{9}$$

ここで、 $w_f(d)$: 沈降速度であり、後述する Rubey 式により求める。

2.2.4 雨滴浸食による浮遊物質生産

平林ら (2004) は初期フラッシュにより浮遊砂のピークが流水のピークより早く発現する事例があり、雨滴による土壌浸食の影響が大きいと指摘している。Wicks ら (1996) は雨滴及び樹冠落下滴の運動エネルギーに着目した雨滴による浮遊物質生産式を提唱しており、雨滴の運動エネルギーによる浮遊物質生産式(10)を、雨滴の直径は Laws ら (1943) の式(13)を用いる。

$$D_R = k_r \times F_W \times (1 - C_G)(1 - C_C) \times M_R \quad (10)$$

$$F_W = \exp(1 - h_s / D_m) \quad h_s > D_m$$

$$F_W = 1 \quad h_s \leq D_m \quad (11)$$

$$M_R = \alpha \times R^\beta \quad (12)$$

$$D_m = 0.00124 \times R^{0.182} \quad (13)$$

ここで、 D_R ：雨滴による浸食量、 k_r ：雨滴による生産浮遊物質離脱係数、 F_W ：地表流の水深補正係数、 C_G ：樹木地表被覆率、 C_C ：樹冠の地表被覆率、 M_R ：雨滴による単位面積当たりの運動量、 D_m ：雨滴の直径、 R ：降雨強度、 α 、 β ：係数である。

D_R は雨滴衝撃による表面土の浸食量であるため、式(14)により表土の土粒子構成率を乗じて各粒径の雨滴浸食量を求める。

$$R_{E2}(d) = D_R \times p_f(d) \quad (14)$$

2.2.5 浮遊物質の堆積

式(4)右辺に堆積項が含まれている。浮遊物質として、微細粒であるために沈降せずに表流水と共に移動するウォッシュロード、地表流の流況によって浮遊、堆積する浮遊砂を対象とする。このため、斜面流では浮遊物質の粒径毎に浮遊と堆積を判断する。各浮遊物質の沈降速度 $w_f(d)$ の算定は Rubey 式(15) (荒木ら, 1962) を用いた。

$$w_f(d) = \left(\left(\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{36\nu^2}{sgd^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right) (sgd)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

ここで、 $w_f(d)$ ：沈降速度、 d ：浮遊物質の代表粒径、 s ：浮遊物質の水中比重、 ν ：動粘性係数、 g ：重力加速度である。また、浮遊、堆積の判断は式(9)により行う。

2.3 河道部の浮遊物質運搬・巻上・堆積

2.3.1 河道流

河道流は、上流端からの流入量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 、単位幅当たりの横流入量 $q_{\text{side}}(\text{m}^3/\text{s})$ をキネマティックウェーブ法で追跡する。

$$\frac{\partial A_R}{\partial t} + \frac{\partial Q_R}{\partial x} = q_{\text{side}} \quad (16)$$

$$A_R = k \times Q_R^p \quad (17)$$

ここで、 A_R ：河道流下断面積、 Q_R ：河道の流下量、 q_{side} ：斜面流下端流量、 k 、 p ：定数である。

地表流のメッシュ間の移動を担う河道網は、メッシュ毎の平均標高を用いて周囲の最急勾配方向を流下方向とする方法を適用した。河道勾配は、対象メッシュにおける平均標高値、上流メッシュにおける平均標高値、両メッシュ中心間の距離から、対象メッシュにおける河道勾配 I_b を決定する。

2.3.2 河道部の浮遊物質濃度連続式

浮遊物質のうち土粒子の小さいウォッシュロードは、沈降することなく流水と共に流下するが、浮遊砂は流況によって粒径毎に浮遊・堆積の他に河床からの巻上を考慮する必要があるなど、斜面部とは違いがある。河道部の浮遊物質濃度は、上流メッシュからの浮遊物質濃度を引き継ぎ、メッシュ内の浮遊物質濃度は斜面からの横流入、河道流水

による河床からの巻上、堆積を考慮した浮遊物質濃度連続式(18)により運搬(移動)を追跡解析する。

なお、浮遊物質のうちウォッシュロードは、土粒子が小さいために河道流水に浮遊して移動するため、巻上、堆積作用を考慮しない。

$$\frac{\partial(C_R(d)A_R)}{\partial t} + \frac{\partial(C_R(d)Q_R)}{\partial x} = B_R \times C_{ES}(d) \times w_f(d) - B_R \times C_b(d) \times w_f(d) + C_{SLE}(d) \times q_{\text{side}} \quad (18)$$

ここで、 $C_R(d)$ ：水深平均浮遊物質濃度、 $C_{SLE}(d)$ ：斜面末端の浮遊物質濃度、 $C_{ES}(d)$ ：河床からの巻上による浮遊物質濃度、 $C_b(d)$ ：河床面での浮遊物質濃度、 B_R ：河道幅である。

2.3.3 河床からの巻上浮遊

河道流水の乱れによる拡散作用によって河道において巻上が発生する。巻上発生について、Ikeda ら (1983) が浮遊砂を対象とした水路実験結果を基に巻上浮遊濃度式(19)を提案している。

$$C_{ES}(d) = \alpha_2 \left(\frac{u_*}{w_f(d)} \right)^2 \quad (19)$$

ここで、 α_2 ：巻上浮遊濃度係数である。

なお、洪水時の浮遊物質移動予測を行う場合、実際の河床堆積以上の巻上となることが懸念されるため、河床堆積物の構成を調査し、初期条件として与えて過剰巻上を防止する。

2.3.4 河道内の浮遊物質の堆積

式(18)右辺に堆積項が含まれており、浮遊物質の粒径毎に浮遊と堆積を判断する。浮遊物質の濃度は、水深平均濃度で追跡するが、水深によって濃度が異なるため、平林ら (2004) は沈降堆積について河道底面濃度 $C_b(d)$ に補正して行っており、水深平均濃度 $C_R(d)$ との関係性を式(20)に示す。

$$C_b(d) = C_R(d) \times \frac{6Z(d)}{1 - \exp(-6Z(d))} \quad (20)$$

$$Z(d) = \frac{w_f(d)}{\kappa u_*} \quad (21)$$

ここで、 κ ：カルマン係数である。

III 対象流域の物性値調査とメッシュ作成

3.1 対象流域の概要

本研究の対象流域は O ダム流域とし、ダムに流入する浮遊物質の移動予測を目的としている。O ダムは、昭和 49 年から 63 年に実施された国営 U 土地改良事業により、U 川の上流に建設され、流域面積は 110km² である。本ダムは、福島県浜通りの 1 市、2 町にまたがる 3,525ha の水田に農業用水を安定的に供給し、地域農業の持続的な発展の礎として重要な役割を担ってきている (Fig. 2)。

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による津波により、東京電力福島第一原子力発電所事故が発生し、本地域を含めて広域に放射性物質により汚染された。このため、放射性物質を吸着した浮遊物質の移動を考慮した O ダムの取水・貯水管理が重要となっている。

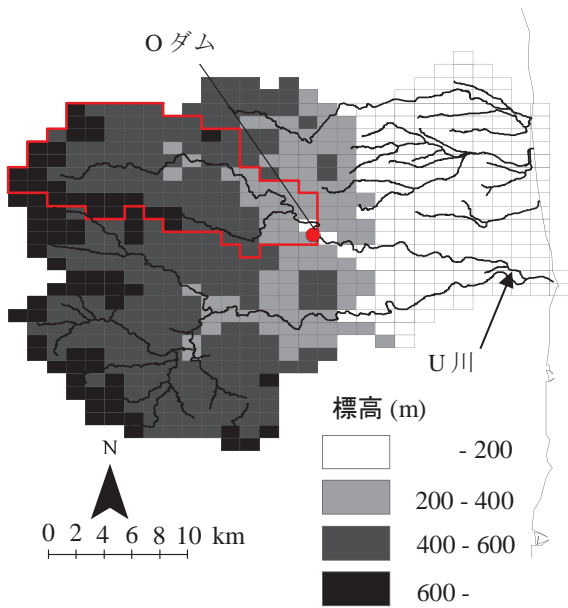


Fig. 2 灌漑地域のメッシュ分割
Mesh division of irrigation area

3.2 斜面部の表土特性

浮遊物質の生産は、流域規模、地形、勾配、表層地質、地被条件、水文・気象、水理特性、更には人為的諸作用が支配要件としてあげられる。

このため、「20 万分の1 日本シームレス地質図データベース(産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2007)」をもとに、ダム流域の地質を把握した。流域のほとんどで表層地質は花崗岩であり、表土は花崗岩を母体とした真砂土である。樽屋ら(1998)は農業用ダムにおける濁水問題を調査しており、浮遊物質の生産母体である表層地質によって濁水発生が大きく異なり、流域に堆積岩、花崗岩、破

層岩を含む地区での濁水問題の発生が高率となっていると指摘しており、対象流域は濁水問題を発生しやすい表層地質と言える。

表土の物理特性を把握するために表土採取を行った(Fig. 3)。表土の物理特性を地表流による浸食量式(5)、雨滴による浸食量式(14)に反映させる。対象流域において、河川沿いに水田、畑が点在するが、ほとんどが山林であり、山林(針葉樹:杉)3カ所、山林(広葉樹:ブナ)3カ所の表土を採取し、土質試験による粒度曲線の結果を Fig.4 に示す。

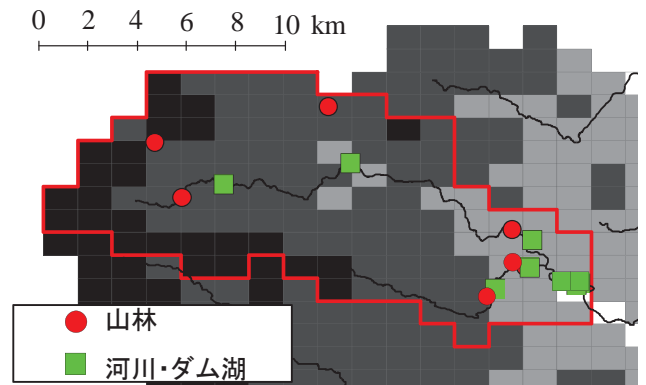


Fig. 3 表土及び堆積砂採取位置図
Extraction point of surface soil and river bed sediment

各地点での表土に大きな礫は含まれず、追跡対象粒径は0.038mm~7.125mmの8代表粒径とする。また、本川流域と支川流域において、針葉樹と広葉樹による粒度分布に大きな違いが見られず、表層地質の影響をより多く受けていると判断した。また、本川流域と支川のK川流域とで粒度分布に違いが見られた。このため、対象流域を本川流域と支川流域に分け、表土物理特性を Table 1 に整理した。

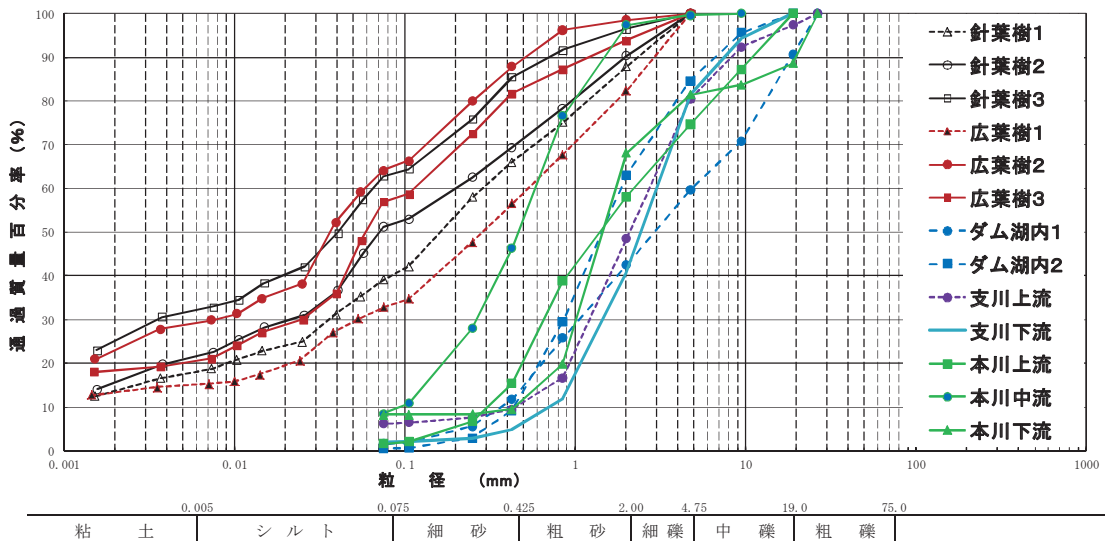


Fig. 4 山林表土及び河床堆積砂の粒度曲線
Grading curve of forest surface soil and river bed sediment

Table 1 山林表土の物理特性
Physical-properties values of forest surface soil

採取地点	土地利用	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	間隙率 r (%)	土粒子の構成率 $p_i(d)$ (%)										
				代表粒径 (mm)										
				$d1$	$d2$	$d3$	$d4$	$d5$	$d6$	$d7$	$d8$			
本川流域	山林(針葉樹②)	2.406	0.706	57.8	5.3	1.7	11.4	9.6	6.1	4.9	3.4			
	山林(広葉樹②)	2.486	0.714	48.0	8.9	1.8	13.7	9.3	5.6	6.5	6.2			
	山林(針葉樹③)	2.393	0.705	45.1	6.1	1.7	9.0	6.9	9.0	11.9	9.7			
	山林(広葉樹③)	2.472	0.712	39.1	5.0	2.2	13.6	7.9	8.5	2.3	1.4			
	平均値	2.442	0.709	52.5	6.3	1.9	12.1	8.4	7.3	6.4	5.2			
K川流域 (支川)	山林(針葉樹1)	2.467	0.712	35.4	3.7	3.0	15.8	8.2	9.0	12.8	12.1			
	山林(広葉樹1)	2.570	0.720	30.1	2.7	1.9	13.0	8.8	11.2	14.7	17.6			
	平均値	2.519	0.716	32.8	3.2	2.5	14.4	8.5	10.1	13.8	14.9			

3.3 河床堆積砂の特性

河床に堆積する浮遊砂粒径を把握するため、本川上流、中流、下流(濁度観測地点)の3カ所、K支川上流、下流(濁度観測地点)の2カ所、更に東日本大震災後に貯水位を低下させて貯水管理をしており、貯水低下によって露出したダム湖内堆積砂を2カ所で採取した (Fig. 3)。堆積砂の粒度分布を Fig. 4 に示す。特に湖内堆積砂は大きな岩石質材料は確認できず、堆積砂粒径が整っている。研究の目的はOダムに流入する浮遊物質の移動予測であるため、実際にダム湖内に堆積している堆積砂粒径を追跡対象粒径0.038mm~32.000mmの11代表粒径とする。また、本川中流の粒度分布以外は大きな違いが見られないことから、2.3.3巻上浮遊における堆積砂構成の初期値は、本川中流を除いた平均値を用いる。間隙率は湖内の不攪乱試料で得た値を使用する (Table 2)。

Table 2 河床堆積砂の物理特性
Physical-properties values of river bed sediment

採取地点	区分	堆積砂密度 ρ_s (g/cm^3)	間隙率 r (%)	堆積砂の構成率 $p_i(d)$ (%)										
				代表粒径 (mm)										
				$d1$	$d2$	$d3$	$d4$	$d5$	$d6$	$d7$	$d8$	$d9$	$d10$	$d11$
ダム湖内	湖内1	2.702	0.370	-	1.7	0.2	3.7	6.2	14.0	16.7	17.3	11.2	19.7	9.3
	湖内2	-	-	0.5	0.3	2.3	6.4	20.3	33.4	21.6	11.1	4.3	0.0	
本川流域	上流	-	-	1.6	0.4	4.6	8.7	23.5	19.2	16.6	12.7	12.7	0.0	
	中流	-	-	8.4	2.4	17.2	18.4	30.1	20.9	2.2	0.4	0.0	0.0	
	下流	-	-	8.2	0.1	0.1	1.1	10.4	48.2	13.3	2.2	5.0	11.4	
K川流域 (支川)	上流	-	-	6.2	0.2	1.2	1.8	7.3	31.8	32.0	11.9	5.0	2.6	
	下流	-	-	2.0	0.1	0.8	1.9	6.9	28.8	41.1	12.8	5.6	0.0	
平均値		2.702	0.37	-	3.4	0.2	2.1	4.4	13.7	29.7	23.7	10.3	8.7	3.9

3.4 モデルメッシュの作成

流域分割には国土数値情報標準地域メッシュ体系の3次元メッシュを用いた。同メッシュの大きさは経度差45秒、緯度差30秒であり、日本の中央部においては約1km四方の領域に相当する。メッシュに、次に述べる多様な情報を内挿し、分布型物質移動モデルメッシュを作成する (Fig. 5)。

斜面勾配は数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)から求める。斜面勾配は斜面地表面の流下現象に影響を与えるとともに、斜面地表面による浮遊物質生産・運搬過程に影響を及ぼすため、斜面勾配は重要な要素である。堀川ら (2013) は、平均斜面勾配の計算法として用いられてきた交点法をDEMによる計算法に拡張し、キネマティックウェーブ法の平均斜面勾配を求めるのに用いられてきた谷線法の値と比較検討し、DEM情報を用いた斜面の平均勾配計測方法を提案している。この方法によりメッシュ毎に平均斜面勾配を計算する。

河道幅は現地での概略的な調査結果を踏まえ、式(22)によって推定する。

$$B_R = 1.19 A_m^{0.61} \tag{22}$$

ここで B_R : 各メッシュ点における河道幅, A_m : 各メッシュ点における集水面積である。

気象データのメッシュ化は、降水量は気象庁アメダス、ダム地点の時間降雨量を収集し、メッシュ平均値2010の空間分布に従って内挿する。

IV 今後の検討内容

ダム地点においては、単位時間当たりのダム貯水変化量にダム放流量を加えてダム流入量として整理している。東日本大震災後は、被災の影響で正確なダム流入量を観測しているとは言えない。

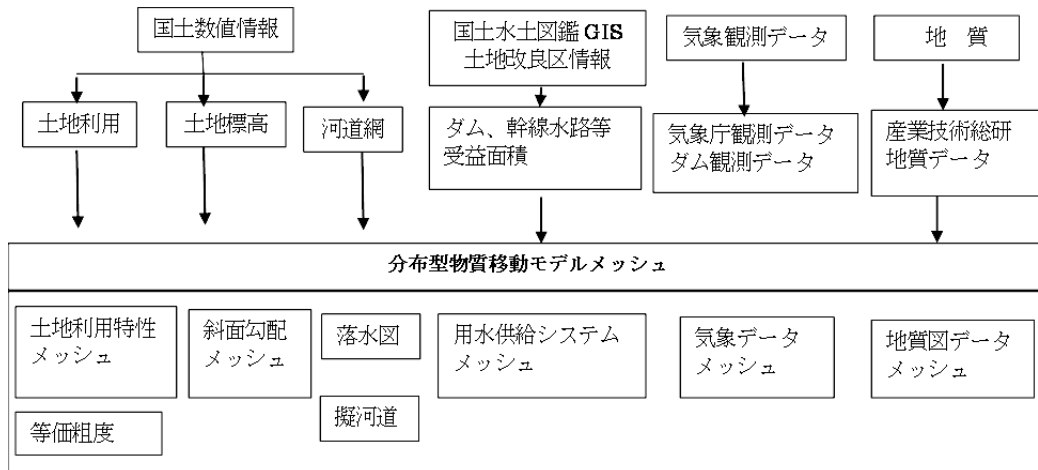


Fig.5 モデルメッシュの作成概要
Process to prepare mesh division model

このため、流出解析はダム地点で2005年1月から2013年10月まで時間単位の降雨量を与え連続計算を行う。検証はダム地点での流入量により行い、期間はモデル初期の影響を受けない2007年から東日本大震災前日(2011.3.10)までとする。この検証を踏まえて流出特性を把握し、流出に関する諸係数を確定させる。また、Oダム流域内でのSS等の観測データの収集を行う。

舛屋ら(2006)は、浮遊物質の中でウォッシュロードが多くを占めると指摘している。今後の分布型物質移動モデルによる浮遊物質の研究は、ウォッシュロードについての検討を先行することとし、ウォッシュロードの移動予測はSS観測データにより検証を行い、さらにウォッシュロードに浮遊砂を加えた浮遊物質移動の予測を行う計画である。

V 結 言

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 斜面地表面流、河道流の流出を表現するキネマティックウェーブ法による連続・運動式と浮遊物質濃度連続式を連続して解き、浮遊物質の移動を追跡する手法が近年に提唱されている。これらの浮遊物質移動の研究を概観し、浮遊物質移動を組み込んだ分布型水循環モデル(分布型物質移動モデル)の構築を行った。
- ② 降雨による斜面部の浮遊物質生産は、斜面地表面流の浸食作用、雨滴の浸食作用、浮遊物質の堆積作用の3生産過程とし、これまで実施された水路実験結果などを踏まえて各生産過程を表現するモデル化を行った。
- ③ 河道内の浮遊物質移動については、河川管理の面から多くの研究が行われており、それらの成果を踏まえて巻上、堆積過程を表現するモデル化を行った。
- ④ 対象流域の特性を反映した物性値としてモデルに反映するため、解析実施に必要な表土、河床堆積砂の物性値調査を行った。
- ⑤ 地形、勾配、土地利用、植生、土壌特性、気象データ等の空間データベースを活用した分布型物質移動モデルメッシュの整備を行った。

以上を踏まえ、今後、対象流域において浮遊物質移動予測へと新たな研究展開を図る計画である。

参考文献

荒井信行・清水康行(1988):現場のための水理学(3)
<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/suirigaku.htm>
 荒木正夫・椿東一郎(1962):水理学演習下巻,森北出版,203-204
 芦田和男・田中健二(1974):粘土分を含有する砂れき床の浸食と砂流機構に関する研究,京都防災研究所年報,17-B,571-584
 Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911): *Studies on Soil Physics-Part I, The flow of air and water through soils, journal of Agric. Sci.*, **4**, 1-24
 平林桂・砂田憲吾・大石哲・宮沢直季(2004):片庭川流域におけ

る洪水時の浮遊砂・ウォッシュロード観測と流域土砂動態モデルの検討,土木学会論文集,768/2-68,33-43
 堀川直紀・吉田武郎・工藤亮治・皆川裕樹・名和規夫(2013):数値標高モデルを用いた流出の場としての斜面の平均勾配計測方法の考察,農村工学研究所技報(投稿中)
 市川温・藤原一樹・中川勝広・椎葉充実・池淵周(2003):沖縄地方における赤土流出モデルの開発,水工学論文集,47,751-756
 Ikeda, S., Izumi, N. and Ito, R., (1983): *Effects of pile-dikes on flow retardation and sediment transport, J. Hydraulic Eng.*, **117-11**, 1459-1478
 J. M. Wicks, J. C. Bathurst (1996): *SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system, J. Hydrology*, **175**,213-238
 角屋 睦(1980):流出解析手法(その6)-雨水流法—表面流出モデルによる洪水流出解析—,農土誌,48(6),37-43
 Laws, J.O. and Parsons, D.A., (1943): *The relation of raindrop size to intensity, Trans. Am. Geophys. Union*, **24**,452-460
 Li, R-M., Simons, D.B. and Stevens, M.A. (1975): *Nonlinear kinematic wave approximation for water routing, Water Resour. Res.*, **11-2**, 245-252.
 舛屋繁和・清水康行・ウオンサ サニット・村上泰啓(2006):流域規模での洪水流出および土砂流出特性について,水工学論文集,50,319-324
 中達雄・島崎昌彦・樽屋啓之: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
 長澤徹明(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
 西森研一郎・関根正人(2009):粘着粘土の浸食過程と侵食速度式に関する研究,土木学会論文集B,**65-2**,127-140
 農林水産省(2013):農地除染対策の技術書,2
 大澤和敏・池田駿介・久保田龍三郎・乃田啓吾・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
 大倉利明(2010):世界の土壌劣化,地球環境,15-1,3-7
 佐山敬洋・寶馨(2003):斜面侵食を対象とする分布型土砂流出モデル,土木学会論文集,726/2-62,1-9
 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壌侵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
 清水康行(1995):沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について,土木学会論文集,521/2-32,69-78
 樽屋啓之・中達雄・藤井秀人(1998):農業用ダムの濁水問題に関する全国調査の分析,農業土木学会誌,66-11,1103-1109
 高木東・塩野隆弘・中野政詩(2008):リルリンクの特性値を用いたリル網からの土砂生産量の簡易予測手法,農業農村工学会論文集,253,11-20
 吉田武郎・増本隆夫・工藤亮治・谷口智之・堀川直紀(2012):広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化,農業農村工学会論文集,277,9-19

Study to Build a Distributed Water Circulation Model Incorporating Suspended Solid etc. Movement

NAWA Norio*, YOSHIDA Takeo*, HORIKAWA Naoki*, KUDO Ryoji* and MINAGAWA Hiroki*

Hydraulic Engineering Research Division, Advanced Hydrology and Water Resources Management*

Summary

In Japan, it is reported that soil erosion such as red soil loss, etc. resulting from change of land use has occurred in Okinawa Prefecture. It is said that land where rainfall has caused strong soil degradation has reached about 220 million ha(s) worldwide. And, management considering the movement of a suspended solid etc. became important after the accident at Fukushima No. 1 nuclear power plant.

For these reasons, the authors investigated the movement of a suspended solid etc. caused by surface soil erosion in a catchment basin of dam or head works. We tried building a distributed water circulation model incorporating suspended solid etc. movement, and researched the physical-properties values of surface soil and river bed sediment, which were values required by this model.

Key words : suspended solid etc., wash load, suspended load, distributed water circulation model incorporating suspended etc.solid movement

人為的攪乱を受けない水田環境における食物網と物質フロー

森 淳* 森岡伸介** 小出水規行* Bounsong Vongvichith*** 渡部恵司*

*資源循環工学研究領域生態工学担当

**国際農林水産業研究センター水産領域

***Living Aquatic Resources Research Center, Lao PDR

キーワード：炭素安定同位体比, 窒素安定同位体比, 物質フロー, 環境要素, メコン川

I 緒言

メコン川流域に位置するラオスでは、人口増加に伴う食糧自給力の強化が喫緊の課題とされている。タンパク資源として淡水魚は重要な存在であるが、天然魚の生産量は近年停滞しており、養殖による魚類生産の増加が同国政府により施策化されている。東南アジアや中国では、水田は魚など水生生物の養殖の場として利用されてきた歴史がある。国際農林水産業研究センター (JIRCAS) ではラオスにおいて水産資源の増殖のため、水田を淡水魚の養殖に活用するための研究を行っている。水田で供された餌の利用動態すなわち物質フローを把握することによって、給餌の魚類生産に与える影響を把握し、より効率的な養殖を実現することができる。

この分析には炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) と窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) が有用な手法である。餌となる生物と上位消費者の間では、生物体全体としての平均的な炭素安定同位体比はほとんど変わらず、上位消費者の窒素の安定同位体比は約 3‰ 高くなる性質がある。このため $\delta^{13}\text{C}$ からは食物網の起源に関する、 $\delta^{15}\text{N}$ からは栄養段階に関する情報を得ることができる (和田, 1984; Canaba and Rasmussen, 1991)。食物網は物質の伝達ルートであるから、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ をマーカーとして利用できる。

アジアモンスーン地域の多くでは、水田は流域における物質発生源としての役割を有している。水路単独の生態系と溜池とつながっている水路の生態系では、後者の方が炭素・窒素安定同位体比の標準偏差が大きくなり (森ら, 2012)、これらの安定同位体比を「生息環境の多様性」の評価に用いることが出来る可能性がある。これを実用化するには、溜池や水路だけでなく、有機物や栄養塩類の挙動に影響を与えていると考えられる水田が水域の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 動態に果たしている機能を明らかにする必要がある。

日本の水田においては、灌漑水や肥料に含まれ、水田内の生態系の中で利用される人為的な無機態窒素がノイズとなる。ラオスには、無施肥で、かつ上流に都市や畜舎が存在しない水田が残されており、これらに人為的な有機物としての餌料を供す

ることにより、物質フローからみた水田の機能が解析出来ると考えた。すなわち養殖に用いられた餌に含まれる窒素の物質フローを、可能な限りノイズの影響を軽減させたうえで把握できる。そして餌が直接的・間接的に水田内の生物が利用する態様を解明できると考えられる。本研究では給餌の有無を条件とした調査水田において食物網と、水田における物質フローを解析する。この研究は我が国の物質フロー特性を踏まえた生息環境の多様性評価手法の開発に資する。

II 調査方法

Vientiane 市の北西約 15km, Nonteng 試験場の畜養池に、ナマズ目パンガシアノドン科に属する *Pangasianodon hypophthalmus*, ナマズ目ヒレナマズ科に属する *Clarias macrocephalus* およびコイ目コイ科の *Barbonymus gonionotus* の 3 種を、2012 年 6 月 2 日から 7 月 18 日まで畜養した。餌は市販の配合飼料を与えた。中央研究院 (2013) によれば、*P. hypophthalmus* はカイヤンとも呼ばれるメコンオオナ

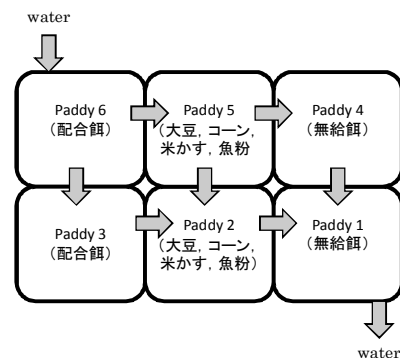


Fig. 1 実験水田の位置関係

Position of experiment paddies

マズの1種である。食性は雑食であり、植物だけではなく魚や甲殻類の他植物も食べる。*C. macrocephalus*は昆虫、プランクトン無脊椎動物、魚だけでなく幼鳥や腐肉、植物も餌とする。

*B. gonionotus*は、植物や無脊椎動物を餌とする。

7月18日に、中山間地域であるPongsavang村(Vientianeの北西約160km)に設定した実験水田に、水田1枚あたり*P. hypophthalmus*を130匹、*C. macrocephalus*を20匹、*B. gonionotus*を250匹それぞれ放流した。放流時の大きさは体長、体重の順に、*P. hypophthalmus*は7.0cm、2.6g(n=20)、*C. macrocephalus*は6.6cm、2.2g(n=20)、*B. gonionotus*は7.1cm、9.3g(n=19)であった。

水田は6区画で(いずれもほぼ10m×10m、水深は10~15cm程度)、無施肥、無農薬栽培である(Fig. 1)。灌漑は田越して行われ、Paddy1およびPaddy4は無給餌、Paddy2およびPaddy5は大豆、コーン、米かす、魚粉を混ぜたものを給餌、Paddy3およびPaddy6は市販の配合餌を与えた。ただし大豆、コーン、米かす、魚粉の構成比が正確に記録されていなかったため、Paddy2とPaddy5は本稿における考察から除外した。給餌量は1日2回、放流魚の体重の5%を目安に与えた。

7月25日、8月20日、9月22日および10月22日の4回にわたり、6試験区から魚の他、水、水田の土、プランクトン、ベントス、陸上昆虫をサンプリングした。サンプルのうち生物は乾燥・粉碎し、土は60°Cで乾燥させ、水は60°Cで濃縮したのち、それぞれ専用のスズカップに充填し、サーモエレクトロン社製の質量分析器DeltaV ADVANTAEを用いて $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を測定した。

III 結果

3.1 畜養池で畜養された魚の特長

畜養池で供された配合飼料の $\delta^{13}\text{C}$ は-20.3‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6.0‰となった。仮に配合餌のみを利用していたとすれば $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰程度、 $\delta^{15}\text{N}$ は9‰程度の値を示すと考えられる。

B. gonionotus、*P. hypophthalmus*および*C. macrocephalus*の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップをFig. 2に示す。 $\delta^{13}\text{C}$ は*C. macrocephalus*の一部を除き-20‰以下となった。種別に見ると、*B. gonionotus*は $\delta^{13}\text{C}$ は-26‰から-22‰に、 $\delta^{15}\text{N}$ は9‰から6‰の間に分布する。*P. hypophthalmus*は $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の偏差が小さく、特定の餌を利用する傾向がある。また $\delta^{15}\text{N}$ は高い値を示さず、高次捕食者ではないと考えられた。

*C. macrocephalus*は $\delta^{13}\text{C}$ が-22‰から-19‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が7‰から9‰となり、3種の中では配合飼料に近い $\delta^{13}\text{C}$ とこれより3‰高い $\delta^{15}\text{N}$ を示し、これをよく利用していると考えられる。

*B. gonionotus*は体長と $\delta^{13}\text{C}$ の間に強い正の相関 $r=0.70$ ($p<0.05$)、体長と $\delta^{15}\text{N}$ の間に強い負の相関 $r=-0.74$ ($p<0.05$)が認められた。他の2種はこれらに相関は認められなかった。

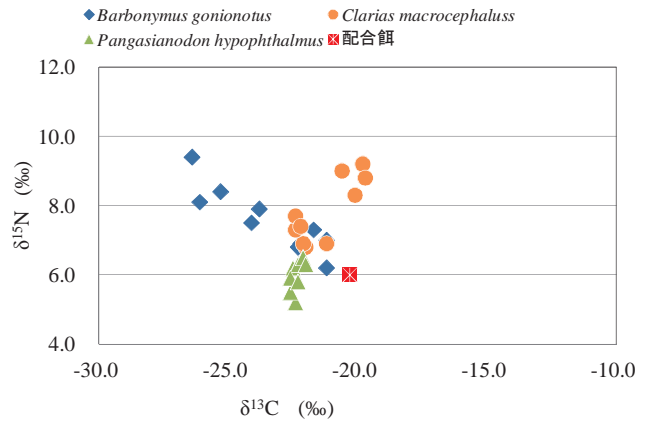


Fig. 2 畜養池で採捕した3種の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ
 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ map of 3 species caught in the pond

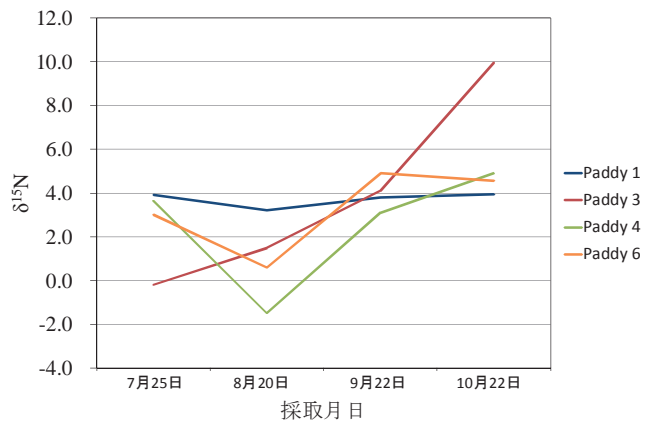


Fig. 3 水田の水の $\delta^{15}\text{N}$ 変化
 $\delta^{15}\text{N}$ variation of paddy water

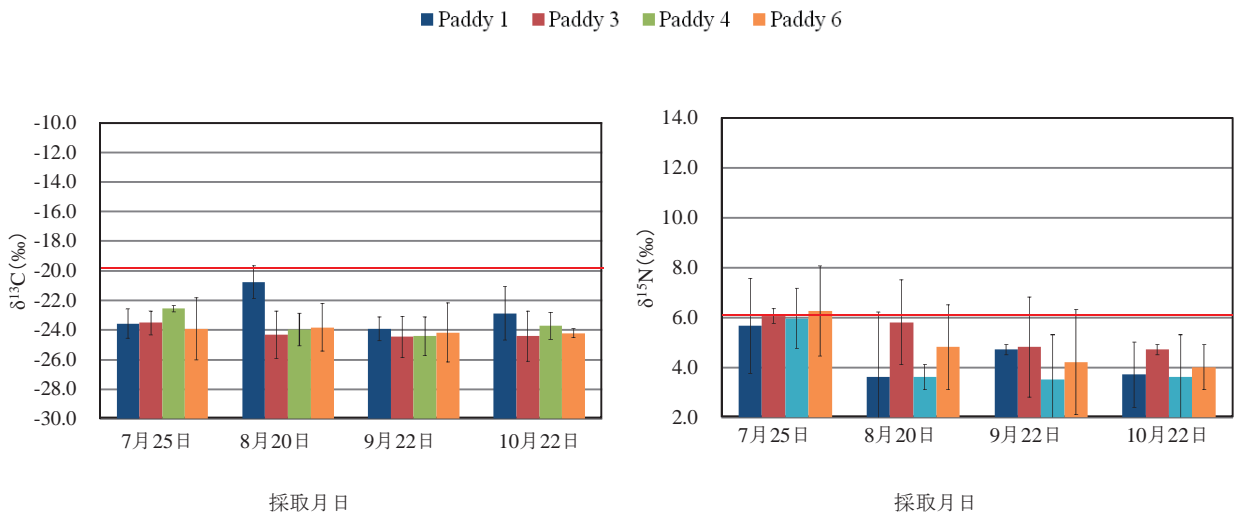
3.2 水田養魚

3.2.1 魚以外の環境要素、無脊椎動物の特徴

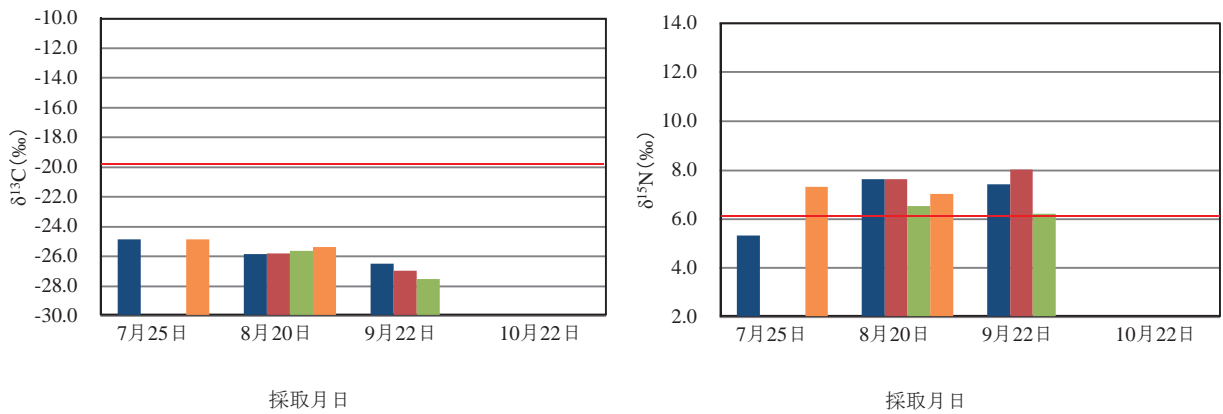
本項以降の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ は、プランクトンを除き複数のサンプルの平均値である。水の $\delta^{15}\text{N}$ はPaddy3を除き7月から8月にかけて低下し9月に上昇した(Fig. 3)。Paddy3は8月にも上昇し、10月には10.0‰に達した。8月から9月は高水期で流入量が多かった時期にあたる。土は、 $\delta^{13}\text{C}$ は8月のPaddy1でやや高い値を示したが、-22‰から-25‰の間の値を示し、また季節変化も認められなかった(Fig. 4a)。これに対して $\delta^{15}\text{N}$ は全般的に低下する傾向が認められた。

プランクトンは $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ はほとんど変化が認められなかった(Fig. 4b)。水田間の違いも認められなかった。

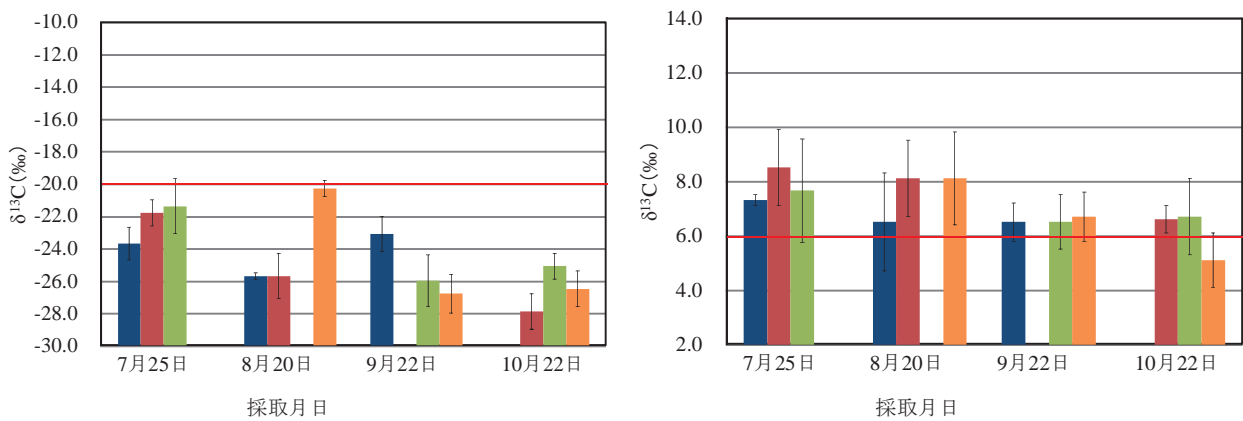
ユスリカ類は、 $\delta^{13}\text{C}$ は約-20‰から次第に低下し-25‰以下になった。 $\delta^{15}\text{N}$ はほぼ6‰から8‰の間の値を示し明らかな季節変化は認められなかった(Fig. 4c)。水田間の差も認められなかった。エビは、 $\delta^{13}\text{C}$ はわずかに低下した水田が多かった(Fig.



a 水田土壌の δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of paddy soil



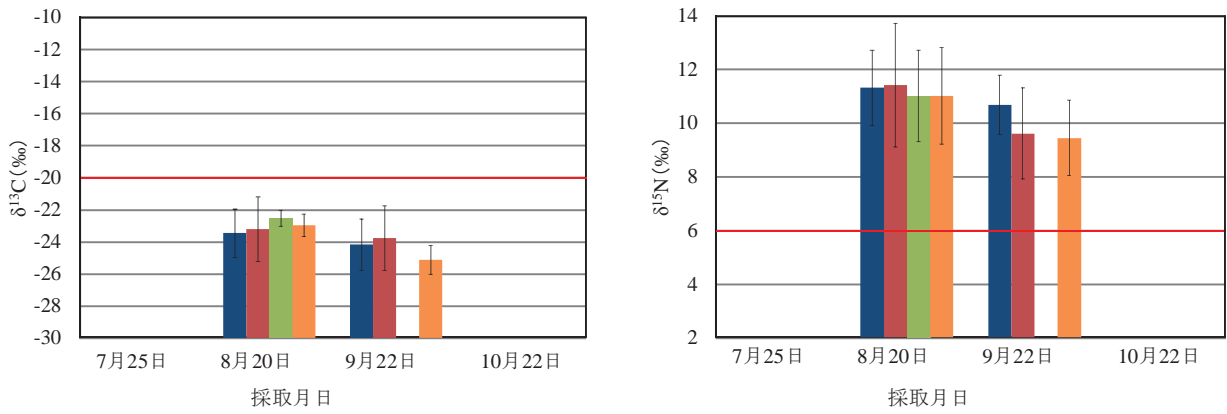
b プランクトンの δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of plankton



c ユスリカ類の δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of chironomid

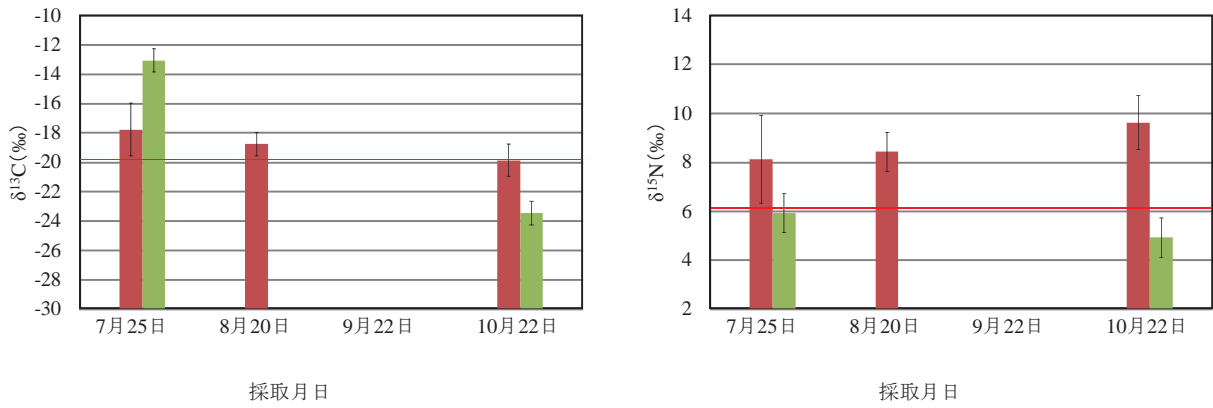
Fig. 4 環境要素, ベントスの δ¹³C と δ¹⁵N
δ¹³C and δ¹⁵N of environmental elements and benthos

■ Paddy 1 ■ Paddy 3 ■ Paddy 4 ■ Paddy 6



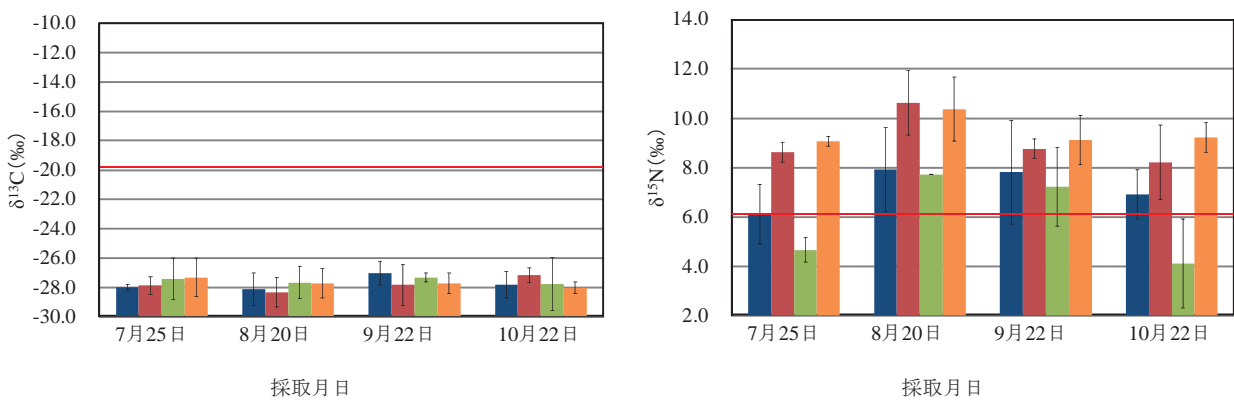
d エビ類の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of shrimp



e ミミズ類の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of earthworm

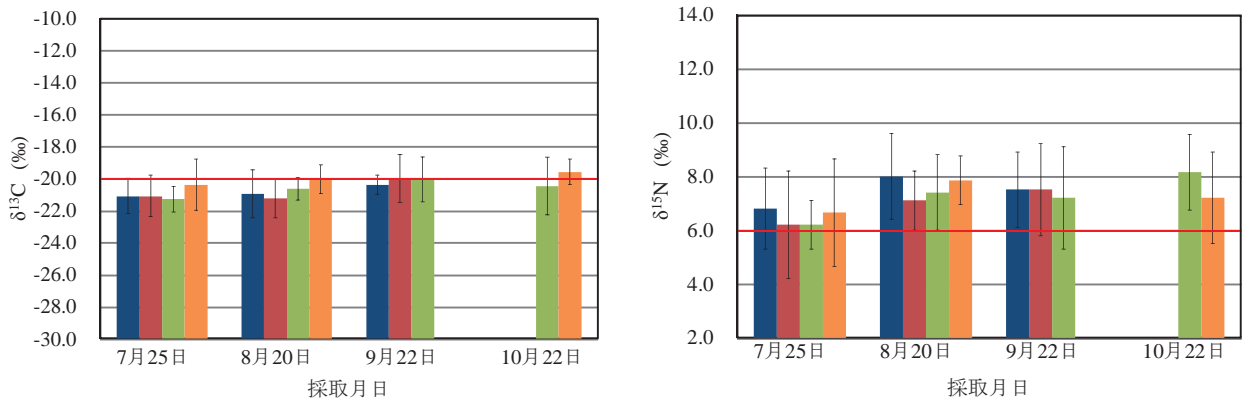


f イネの葉の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

Fig. 4 環境要素, ベントスの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$

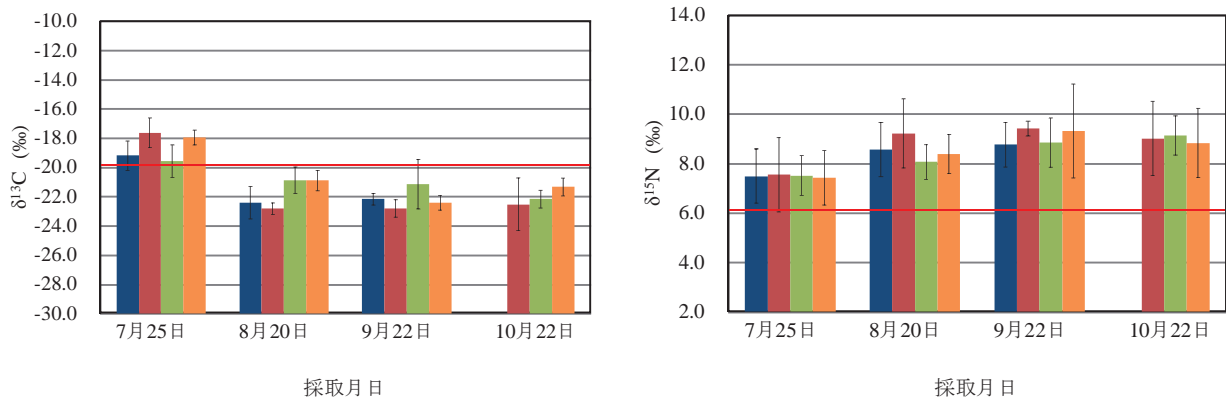
$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of environmental elements and benthos

■ Paddy 1 ■ Paddy 3 ■ Paddy 4 ■ Paddy 6



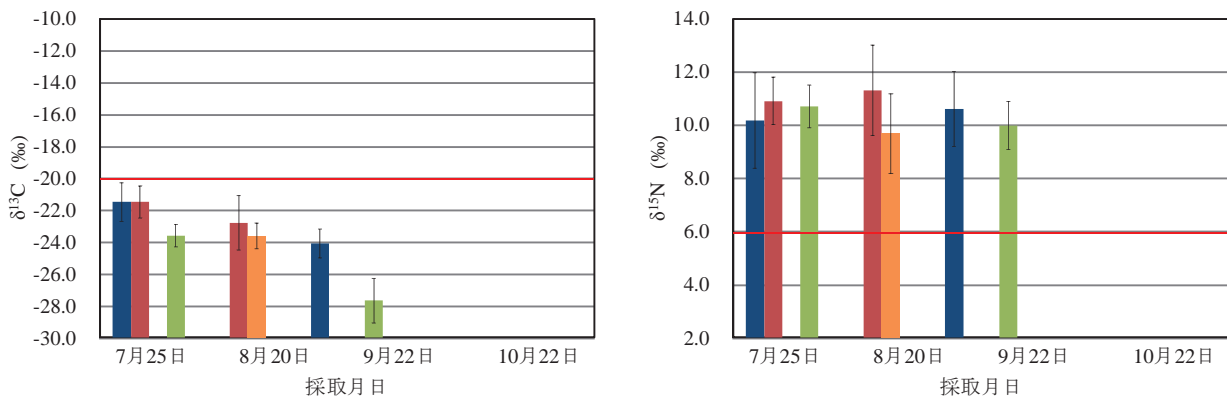
a *Pangasianodon hypophthalmus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *P. hypophthalmus*



b *Barbonymus gonionotus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *B. gonionotus*



c *Esomus metallicus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ map of *E. metallicus*

Fig.5 水田で養殖された魚の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of fishes cultured in paddies

4d)。 $\delta^{15}\text{N}$ もわずかに低下した。ミミズ類は採捕された個体が少なかったが、Paddy3で $\delta^{13}\text{C}$ が低下、 $\delta^{15}\text{N}$ が上昇し、 $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌の値に近くなり、 $\delta^{15}\text{N}$ は配合餌より3%高い値を示した (Fig. 4e)。稲の葉は、 $\delta^{13}\text{C}$ は-26‰から-28‰の間の値を示し、季節変化は認められなかった (Fig. 4f)。 $\delta^{15}\text{N}$ も季節変化は認められなかったが、Paddy3およびPaddy6は、Paddy1およびPaddy4より高い値を示した。

陸上昆虫についてはイナゴ類、ショウリウウバツカ類、クモ類が採捕されたが、同じ採捕区においても $\delta^{13}\text{C}$ に著しいばらつきが認められたことから、試験区における物質フローを表していないと判断し、解析から除外することとした。

3.2.2 水田の魚の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の特徴

調査水田では *C. macrocephalus* がほとんど採捕されなかった。このため水田における調査結果については *P. hypophthalmus*、*B. gonionotus* に加え、水路から迷入し水田で採捕された個体数が多かった、メコン川流域の頻出種である *Esomus metallicus* についても解析することとした。

P. hypophthalmus はいずれの水田でも $\delta^{13}\text{C}$ はほとんど変化しなかったが、 $\delta^{15}\text{N}$ は若干上昇した。分布範囲は $\delta^{13}\text{C}$ は-22‰から-20‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6‰から8‰だった (Fig. 5a)

B. gonionotus は、Paddy1で $\delta^{13}\text{C}$ が低下し $\delta^{15}\text{N}$ は上昇した (Fig. 5b)。この傾向はPaddy3、Paddy4およびPaddy6でも認められた。分布範囲は、 $\delta^{13}\text{C}$ が-24‰から-18‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が7‰から9‰だった。

E. metallicus は、Paddy3は時間とともに $\delta^{13}\text{C}$ は低下、 $\delta^{15}\text{N}$ は上昇した (Fig. 5c)。Paddy6は $\delta^{13}\text{C}$ 低下、 $\delta^{15}\text{N}$ はわずかに低下した。分布範囲は、 $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰から-28‰と広がった。 $\delta^{15}\text{N}$ は7‰から11‰と高い値を示した。

3.2.3 水田の食物網

水田ごと、採取期ごとに食物網を解析したところ、プランクトンと *E. metallicus*、土壌とユスリカ類の間には、 $\delta^{13}\text{C}$ が近く、*E. metallicus* またはユスリカ類の $\delta^{15}\text{N}$ がプランクトンや土壌より3%程度高い関係が散見された。この結果を Table 1 に示す。これらの関係はプランクトンから *E. metallicus* に、土壌からユスリカ類にエネルギーが伝達されていることを示唆している。

IV 考察

4.1 池における畜養結果

C. macrocephalus と *P. hypophthalmus* は同じナマズ目であり、ともに雑食とされているが、 $\delta^{15}\text{N}$ に差が生じた。*P. hypophthalmus* は低い値を示したことから、かなり植物食に近いと考えられる。

分析した3種のうち、後述する *C. macrocephalus* の一部からなるグループを除いて、 $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌より低いので、配合餌は体の組成にほとんど影響していない。プランクトンを採取し

Table 1 土壌-ユスリカ類、プランクトン-*E. metallicus* の関係
Relationship between soil-chironomid, plankton-*E. metallicus*

	採取月	土壌-ユスリカ類	プランクトン- <i>E. metallicus</i>
Paddy 1	7月	○	○
	8月	×	—
	9月	○	○
	10月	—	—
Paddy 3	7月	○	—
	8月	○	○
	9月	—	—
	10月	×	—
Paddy4	7月	○	—
	8月	—	○
	9月	○	—
	10月	○	—
Paddy6	7月	—	○
	8月	○	—
	9月	○	○
	10月	○	—

注：○は $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ の関係から餌資源として利用している可能性があるもの、×は可能性が認められなかったもの、—は片方または双方が採取できなかったもの

なかったため水域内の生産者 $\delta^{13}\text{C}$ は不明であるが、池に陸上植物から落葉落枝が供給される立地条件ではなかったため、外部からの有機物供給は少ないと考えられる。*B. gonionotus* は成長とともに-22‰~-23‰付近に移行し、*P. hypophthalmus* と *C. macrocephalus* の一部も同様の値を示したことから、水域内生産、すなわち藻類の $\delta^{13}\text{C}$ はこの近辺の値である蓋然性が強い。魚類の $\delta^{15}\text{N}$ は餌の $\delta^{15}\text{N}$ より約3%高いから、藻類による水域内生産の $\delta^{15}\text{N}$ は4%程度と考えられる。この値は、池の水は生物濃縮の影響が小さく雨水の $\delta^{15}\text{N}$ —一般的にゼロ前後の低い値を示す—に近いと推察され、栄養段階が1上昇することと整合する。

$\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の分析結果から、畜養していた魚のうち $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ に影響が生じる程度配合餌を利用していた可能性があるのは $\delta^{13}\text{C}$ が-20‰程度、 $\delta^{15}\text{N}$ が9‰程度を示した、*C. macrocephalus*の一部である。*C. macrocephalus*が2つのグループに分かれた理由は不明である。

いずれの種についても、配合餌を含む複数の餌を利用していた可能性は否定できない。しかし配合餌の $\delta^{15}\text{N}$ が6‰であるから、主に配合餌を利用していたとすれば9‰程度を示すと考えられ、前述の *C. macrocephalus* の一部を除き、配合餌の影響は小さいと考えられる。

4.2 水田における給餌と水、ペントスなどの $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係

水の $\delta^{15}\text{N}$ は水田間に明確な差が認められず、水の無機態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ に対する給餌の影響は認められなかった。したがって下流に位置する無給餌区に給餌の影響はないと考えられる。土の $\delta^{15}\text{N}$ についても、ほとんどの水田において配合餌より低い値を示したことから、給餌の影響は認められなかった。

給餌された餌の窒素が魚以外の水田内の生物に利用されるとすれば、①直接または直接利用した生物を餌とする、②無機化された後イネ、プランクトンを通じて用いられる、のいずれかである。①の可能性があるのはユスリカ類、エビおよびミズミズ類である。配合餌の $\delta^{15}\text{N}$ は6.0‰であり、ユスリカ類がこれを利用したとすれば、配合餌が与えられた Paddy3 および Paddy6 における $\delta^{15}\text{N}$ は、施肥されていない Paddy1 および Paddy4 より高くなると考えられるが、有意差は認められず、 $\delta^{15}\text{N}$ に影響を与える窒素源とはなっていると認められなかった。

また配合餌がユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与えているならば-20‰程度の値を示すと考えられるが、配合餌を投入した Paddy3 および Paddy6 のユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ は7月に-20‰程度の値を示したものの、次第に低下した。このことと7月のユスリカ類 $\delta^{13}\text{C}$ は無給餌の Paddy4 でも同程度の値であったことから、炭素についても配合餌はユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える炭素源とはなっていないと考えられる。

エビについても、 $\delta^{13}\text{C}$ が-20‰から離れた、低い値を示したことから、エビの $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える炭素源とはなっていないと考えられる。

ミズミズ類については、配合餌を与えた Paddy3 は $\delta^{15}\text{N}$ が次第に上昇し、無給餌区の Paddy4 とは異なる値を示した。Paddy3 の $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌の値に近く、 $\delta^{15}\text{N}$ の値は配合餌より約3‰高かった。ミズミズ類の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が土壌の影響を受けていなかったのは、土壌を採取した深さ、またはミズミズ類の餌選好性に起因する可能性がある。

以上から、①のルートでは配合餌はミズミズ類が餌として利用したと考えられる。

②のルートが機能していたならば、 $\delta^{15}\text{N}$ は Paddy3 および Paddy6 のプランクトンは Paddy1 および Paddy4 より高くなると考えられる。しかしいずれも明確な差は認められず、投入した配合餌は水田水域内の窒素フローに大きな影響を与えていなかったと考えられる。

イネの葉の $\delta^{15}\text{N}$ については、Paddy3 および Paddy6 は Paddy1 および Paddy4 より高くなり、配合餌がイネに吸収され利用されたと考えられる。

4.3 水田における給餌と魚の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係

*P. hypophthalmus*については、Paddy3、Paddy6 では配合餌を利用していると考えられる $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を示したが、この値は無給餌区でも同様であり、本種が主に配合餌を利用したと

は断定できない。本種の $\delta^{15}\text{N}$ は、池と同様に *B. gonionotus* より低く、植物食が強いと考えられる。給餌の有無、種類に関わらず $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰から-22‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6‰から8‰の狭い範囲に分布した。水田内のプランクトンはほぼ-25‰から-27‰の間の値を示したから、*P. hypophthalmus*の餌の起源は水域内で生産された有機物とは考えられない。水田内でもっとも生物生産量の大きなイネやプランクトンより高い $\delta^{13}\text{C}$ を示す有機物起源が存在し、*P. hypophthalmus*に伝達されていると考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ の高い生産者としては C_4 植物を餌とした無脊椎動物が水田に落下し本種の餌となる可能性もあるが、本種の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与えるほどの生物量が水域に落下するとは考えにくい。 $\delta^{15}\text{N}$ も動物食は濃くないことを示唆している。今回の研究では高い $\delta^{13}\text{C}$ を持ち魚類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える有機物起源を明らかにすることができなかった。

*B. gonionotus*については、成長とともに配合餌の $\delta^{13}\text{C}$ から離れていくことから、給餌は同種の $\delta^{13}\text{C}$ に大きな影響を与えていない。この種は成長とともに餌資源が変化することが明らかになった。池では成長とともに $\delta^{13}\text{C}$ が上昇し $\delta^{15}\text{N}$ は低下したのに対し、水田では $\delta^{13}\text{C}$ は低下、 $\delta^{15}\text{N}$ は上昇し、池と逆の結果となった。この機序は不明である。

*E. metallicus*については、給餌の有無による $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の違いは認められなかった。成長とともに $\delta^{13}\text{C}$ は低下し、配合餌の値から離れていくことから、配合餌は同種の $\delta^{13}\text{C}$ に大きな影響を与えていないと考えられる。本種は $\delta^{13}\text{C}$ の分布域が広く、利用している餌が多様であることを示しているが、Paddy1、3、4のようにプランクトンを餌としていると推定できるケースがあった。 $\delta^{15}\text{N}$ が水田で採取された3種のなかで最も高かったことは、動物プランクトンを利用していることを示唆している。

*E. metallicus*は、既往文献において動物プランクトン、陸上昆虫、水生昆虫の幼虫を餌とするとされている。2010年に Vientiane 市付近で採取した *E. metallicus* は、植物プランクトンを餌としている結果となったが(森ら、2012)、本研究においては $\delta^{15}\text{N}$ が高い結果となったことから、動物プランクトンを主要な餌としている可能性がある。このことは、*E. metallicus*の餌は、利用している環境や物質など、生息環境による生態的地位の固有性があることが示唆されたこと(森ら、2012)と整合している。本種は生息地に存在する餌資源を広範囲に利用していると考えられる。

4.4 水田における物質フロー

本調査を行った水田における物質の生産・フローは Fig. 6 で表すことができる。これは考えられるフローをすべて記したものであり、 $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{15}\text{N}$ では確かめられなかったルートを含む。今回本研究で用いた水田は無施肥であるから、外部から供給される窒素は雨水と灌漑水に含まれる溶存態無機窒素であり、給餌区においては餌に含まれる窒素化合物がこれに加わる。調査水田の立地条件を考慮すれば、水に含まれる窒素は一般的な

日本の水田より少なく、餌由来の窒素をより鋭敏に検出できたと考えられる。

餌に含まれる窒素化合物は体内で同化され魚の体に転移するルートは、今回の水田調査では明確に出来なかった。水域で分解され主にアンモニア態窒素としてイネに吸収されるルートは、給餌区のイネの葉の $\delta^{15}\text{N}$ が高かったことにより明らかになった。また餌を直接ミミズ類が利用するルート、ユスリカ類が土壌を利用するルート、プランクトン—餌に由来しない溶存態無機炭素と、灌漑用水・雨水に含まれる溶存態無機窒素を利用—から *E. metallicus* に至るルートが認められた。

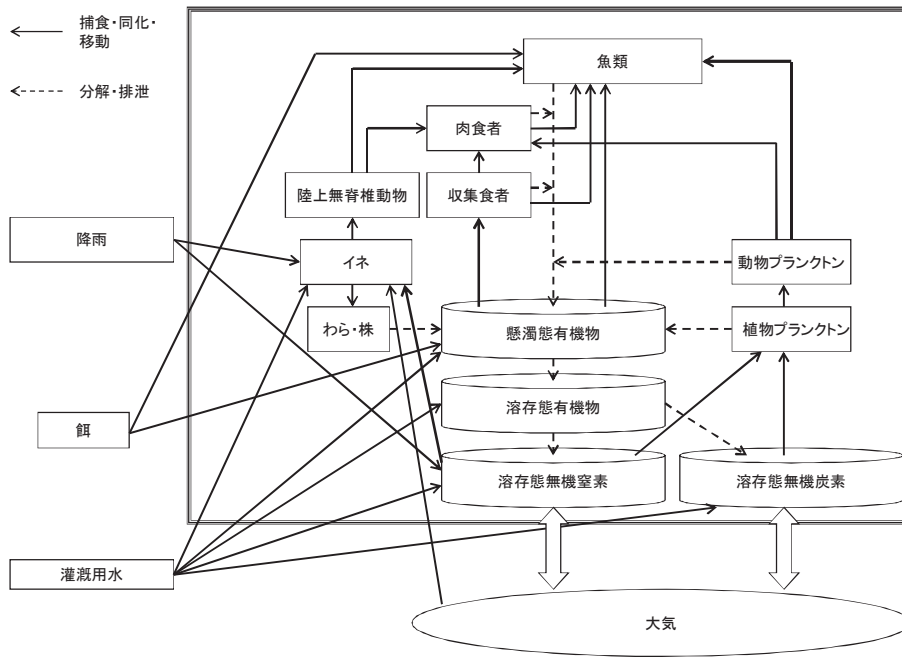
同じ収集食者であっても、ユスリカ類よりミミズ類が給餌された $\delta^{15}\text{N}$ を利用していた。我が国におけるユスリカ類の炭素安定同位体比の分析でも季節と共に $\delta^{13}\text{C}$ が低下することが報告されている (森ら, 2007)。ユスリカ類には季節による餌資源の変化など能動的な要因による $\delta^{13}\text{C}$ 変動が存在するようである。窒素起源も同様に、環境以外の要因の影響を受けている蓋然性がある。このことは物質フローを単純化して解析する上で阻害要因となり得る。水田を含めた水域で生物を用いた生息環境の多様性評価を行うには、ユスリカ類よりミミズ類の方が適していると考えられる。

V 結 言

今回の研究において、池で畜養された *C. macrocephalus* の一部について、給餌された配合餌を魚体の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ に影響する程度まで利用していると推測された。*B. gonionotus* は成長に従って餌資源が変化することが明らかになった。その他の魚類、ユスリカ類などのベントス等は、それぞれに含まれる炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 、窒素の $\delta^{15}\text{N}$ は、身体の組成に影響を与えるほど配合餌を利用していなかった。

$\delta^{15}\text{N}$ が比較的高い配合餌を供した水田において、イネが配合餌由来の窒素を吸収していることが確かめられた。またミミズ類が配合餌を餌としていることが示された。一般的にユスリカ類が土壌の影響を、*E. metallicus* がプランクトンの影響を受けていることが明らかになった。水田で発生した有機物は、複数のルートを通じて上位消費者に伝達され、水域の下流へ、あるいは羽化した昆虫によって近隣の陸域へ有機物が移動していると考えられる。

ユスリカ類とミミズ類は双方とも収集食者であるが、利用する餌資源が異なる。ユスリカ類は季節により、利用する餌資源が変化すると考えられる。炭素・窒素安定同位体比を用いて物



(森, 2008) をもとに作成

注: 太い線は、本研究において物質フローが示されたもの

Fig. 6 調査水田 (給餌区) における物質フロー
Material flow in an experiment paddy (feed section)

質フローや生息環境を評価するにはユスリカ類に比しミミズ類の方が適していると考えられる。

この研究により、水田における物質、とりわけ窒素フローはベントスの生態に起因する固有性を有することが示された。すなわち同じ摂食機能群に位置づけられる収集食者間においても、おそらく餌選好性により利用する餌が異なり、複数の窒素フローが存在していると考えられる。また魚類についてもこれまでの知見によれば同じ雑食と位置づけられてきた種間においても、*P. hypophthalmus* のように植物食に近い種とこれより動物食に偏る *C. macrocephalus* のように栄養段階に違いがみられることも明らかになった。このような物質フローの多様性は水田内の生態系が複雑であること、餌資源を含めた生息環境が多様である資源を利用しながら生活していることを示している。

今回水田に生息する生物の炭素・窒素同位体比分析により明らかになったフロー特性は、水田の立地環境や営農の違いにより異なる結果を示す可能性があると考えられる。なぜなら、少なくともこれらの生物は「そこにあるもの」を選好性のもとに利用しているからである。水田により生物相は異なると考えられ、上位消費者はその中から効率的な摂食行動をとる。ラオス国の小河川で採捕した *E. metallicus* は植物食に近い値を示したが(森ら, 2012)、本研究において分析した魚種の中で最も高い $\delta^{15}\text{N}$ を示したことも、この理由によると考えられる。

本研究結果は炭素・窒素安定同位体比を「生息環境の多様性」の評価に用いる可能性を増強すると同時に、水田生態系の多様性・固有性を明らかにした。

参考文献

- Canaba, G., Rasmussen, J. B. (1991): Modeling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes, *Nature*, 372, 255-257
- 中央研究院: Fish Base,
<http://fishbase.sinica.edu.tw/search.php?lang=Japanese>
- 南川雅男 (1997): 安定同位体比による水圏生態系構造の解明, *水環境学会誌*, 20 (5), 12-16
- 森 淳 (2009): 安定同位体比からみた水田・水路の生態系、春の小川の淡水魚—その生息場と保全水谷正一・森 淳編著・, 学報社, 149-176
- 森 淳・森岡伸介・小出水規行・渡部恵司 (2012): 人為的攪乱を受けない環境における魚類の炭素・窒素安定同位体比特性—ラオス国農業水路系を例とする水域環境多様性の検討—, *農村工学研究所技報*, 214, 197-208
- 森 淳・水谷正一・塩山房男・中茎元一・柿野亘・松澤真一 (2007): 安定同位体比法による水田に生息するドジョウの餌の推定, 平成 19 年度農業土木学会講演要旨集, 540-541

Food Web and Material Flow in Paddy Environment Free from Human Influence

MORI Atsushi*, MORIOKA Shinsuke**, KOIZUMI Noriyuki*, Bounsong Vongvichith*** and WATABE Keiji*

Renewable Resources Engineering Research Division, Ecological Engineering*
Fisheries Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences**
Living Aquatic Resources Research Center, Lao People's Democratic Republic***

Summary

Paddy fields are one dominant source generating organic matter in a watershed. Our previous study showed that $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ standard variations in irrigation systems with lakes are larger than in systems without lakes. Both systems were used to evaluate environmental diversities after clarification of the role of paddies as generating sources. Considerable numbers of paddies are unaffected by human influenced nitrogen. Clarification of such paddies is possible because material flow does not contain polluted nitrogen that contributes to noise in an analysis. We studied fish cultures in paddies located in a hilly and mountainous area of Laos to analyze material flow in a food web by using blended pellets that contained high $\delta^{15}\text{N}$. Our findings were as follows:

- [1] *Clarias macrocephalus* in the pond evidently ate the pellets because their $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were influenced by the pellets.
- [2] Nitrogen absorption from pellets to rice and from pellets to earthworms was observed.
- [3] *Barbonymus gonionotus* changed food resources as it grew.
- [4] Pellets influenced $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were not observed in other animals and environmental elements.
- [5] Organic matter generated in paddies was transmitted to superior consumers via plural routes. This organic matter may have been transferred from paddies to downstream or nearby terrestrial areas by emerging insects.

Key words: Carbon stable isotope ratio, Nitrogen stable isotope ratio, Material flow, Environmental elements, The Mekong River

地下水位の潮汐応答の分析による 淡水レンズ帯水層の水理定数推定手法

白旗克志* 石田 聡* 吉本周平* 土原健雄*

*資源循環工学研究領域水資源工学担当

キーワード：淡水レンズ，不圧帯水層，地下水位，自記連続観測，調和解析，潮位伝播，水頭拡散率

I 緒言

沿岸域で淡水を含む帯水層が海底に露出しているとき、淡水は海に流出し、海水は淡水の下にくさび状に浸入する。これら淡水と海水は動的平衡を保っており、境界面は内陸に向かって下っている（山本，1983）。陸側から海に向かって流出している不圧地下水の淡水とその下部に浸入した塩水が定常状態の塩淡境界面を形成しているとき、海岸線付近を除いて淡水地下水の鉛直方向の浸透流速は小さいため、鉛直断面内で水平方向の浸透流速は一樣であると仮定し（デュプイの準一様流の仮定）、塩淡境界面の深さと地下水位標高が比例することが知られている（ガイベンヘルツベルグの近似）（例えば佐藤・岩佐，2002）。周囲の全方位を海岸線に囲まれた島嶼で全域に不圧帯水層が分布する場合には、海岸付近では地下水位標高は海水準にほぼ等しく淡水の厚さはほぼ零となり、海岸から内陸に離れるにつれて地下水位標高は高く淡水は厚くなる。したがって島嶼全体の地下水の淡水部分の形状は、地下の塩水の上に浮かぶ薄いレンズのような形状となる。このような、海水が浸入した不圧帯水層の上部に密度差によってレンズ形状となって浮かぶ地下水の淡水部分は、淡水レンズと呼ばれる。

淡水レンズに関する研究は、1970年代以降、その分布や水資源量を報告するものが多くある（例えば Vacher, 1978; Cant and Weech, 1986; Anthony, 1996; 石田ら, 2010）。これらの研究は、いずれも淡水レンズの静的な規模・水量に注目するもので、淡水レンズの分布や厚さを把握する手段として淡水レンズ下部の塩淡境界位置の把握とあわせて地下水位を測定することはあっても、日周期の潮汐に応答する速い地下水位変動を連続的に観測して分析する観点はなかった。

国内における淡水レンズ分布地域としては、南西諸島の石灰岩からなる多良間島、南北大東島などの島嶼があり、内閣府沖縄総合事務局および農林水産省農村振興局によって淡水レンズの水資源開発技術の確立が図られてきた（岸ら、

1998; 農林水産省, 2009)。沖縄県の多良間島においては、平成 23 年度までの調査により（祖父江, 2008; 白旗・長田, 2009）農業用水源の一部として淡水レンズから取水を行う事業の構想が策定されており、引き続いて平成 24 年度から実施中の調査では淡水レンズからの持続的に可能な取水量と管理手法を検討するため、地質調査、取水試験、淡水レンズ挙動および取水可能量の解析が計画されている（山田ら, 2012; 仲間, 2013)。

淡水レンズに限らず地下水の水資源開発計画を検討するに当たっては、帯水層の水理性状を表す定数、すなわち帯水層定数（透水量係数、貯留係数など）を把握することは基本的な要件である。大規模な地下水開発計画の検討では、揚水量や総合的水利用計画の検討のため地下水シミュレーション解析の手法が用いられるが、解析を行う上で必要な基本的パラメータのひとつが帯水層の水理定数である（農林水産省, 2009)。帯水層の水理定数を把握する方法としては、揚水試験、放射線水分検層、ボーリングコア試料を用いた室内試験などが挙げられる（緑資源機構, 2006) が、これらの方法では、揚水試験の実用的な影響圏から類推して最大でも 300m（不圧帯水層の場合）（山本, 1983) までの局所的な情報しか得られない。

一方、不圧帯水層が海底に露出する沿岸域や淡水レンズ賦存地域では、潮汐による海水位の周期的変動が内陸に向かって伝播することによる地下水位の変動（地下水位の潮汐応答）を分析することによっても、帯水層の水理性状を推定することが可能である。この方法では、潮位の正弦振動の伝播による内陸地点地下水位の振動を水頭拡散率と呼ばれる帯水層定数を介して表現する水位変動式を用いる。水頭拡散率は、ある地点の水頭変化がその周辺にいかにか速く及ぶかを示す尺度であり、透水量係数の貯留係数に対する比に等しい。この方法は、地下水観測孔の配置によっては 1km 以上の広範囲の淡水層の水理性状を推定できる点で有利である。

潮汐応答する地下水位の現場での観測データを用いて、水位変動の式から帯水層の水理性状の推定を行った研究としては、次のものがある。近森ら（1972）は、高知県沿岸

域の地区の不圧地下水を対象として、近傍の検潮所における既知の潮位変動を境界条件として帯水層定数を色々に仮定して水位変動式により内陸地下水位を推定し、実測した地下水位との差を最小二乗法的に評価して帯水層定数の最適推定値を求めている。愛知ら (2011) は、潮汐の主要振動成分を境界条件とする摂動解 (主要 4 分潮からなる潮位変動の伝播による地下水位変動の式) を導出した上で、伊豆諸島新島の不圧地下水を対象とし、近傍検潮所の潮位の主要成分を用いて色々な帯水層定数に対して計算される地下水位変動の振幅・位相と、実測との比較により、帯水層定数を推定した。このとき計算値と実測の振幅・位相の比較において、各振動成分の振幅の大ききで重み付けして成分間で優先度に差をつけて定義した平方根平均二乗誤差が最小となる帯水層定数を探索して、その推定値とした。

これら 2 例の研究の手法は、地下水位変動の式において潮位変動を境界条件とし帯水層定数を仮定して地下水位変動を出力させることを色々な帯水層定数に対して行い、出力が実測の地下水位変動に近くなったときの帯水層定数をもって帯水層定数の推定値とする点で共通している。この方法は、帯水層定数の最適推定値を得るために、複数の試行錯誤的な計算と、計算結果と実測値とのフィッティングの評価が必要となる。

一方で、本報告で提案するように、1 年程度の連続的な潮位または水位の観測値があれば基本的な三角関数の計算によって周期が既知の振動成分を抽出できることから、潮位 (または海岸にごく近い位置の地下水位) から抽出した周期既知の成分と内陸の地下水位から抽出した同じ周期の成分に水位変動の式をあてはめることで、試行錯誤的な計算をせずとも帯水層定数 (水頭拡散率) を直接推定することが可能である。

愛知ら (2011) によれば、複数の正弦振動成分からなる潮位変動の影響をうける不圧帯水層で実測した水位変動を、異なる周期成分に分離して応答を分析する方法は、愛知ら (2011) 以前に検討例がない。我が国では、南西諸島の淡水レンズのほか沿岸域の不圧帯水層の地下水利用は普通にみられ (例えば磯崎, 1970; 森ら, 2012), また上述のように将来的な開発構想もあることから、不圧帯水層の地下水位の潮汐応答や水理性状に関する上記のような分析方法の検討は重要である。

本報告では、潮汐に応答する淡水レンズ地下水について、水位の時系列連続観測データから、三角関数等の単純な計算による調和解析手法と潮位伝播による水位変動の式を用いて帯水層の水理定数 (水頭拡散率) を推定する簡易な手法を提案し、沖縄県多良間島におけるその適用例を示す。

なお用いる観測データは、内閣府沖縄総合事務局および農林水産省農村振興局による大規模淡水レンズ開発技術の確立に係る調査および地域整備方向検討調査により得られたものである。

II 手法

本研究で用いた手法の構成を、構成要素の特徴とともに **Table 1** に示す。本手法は、①水位観測、②調和解析および③水位変動式の適用を順次行うことによって、帯水層の水頭拡散率を推定するものである。

用いる水位変動式は山本 (1983) による単一周期の正弦振動の伝播を表す式であるが、現実の観測データでは、潮位変動は周期が異なる複数の正弦振動成分 (分潮) をもち、その伝播により変動する地下水位も同様である。観測により得られた水位データに山本 (1983) の水位変動式を適用するためには、個々の分潮成分を分離・抽出する必要がある。複数の分潮の重ね合わせである潮位や水位の観測データから個々の分潮を抽出することを、調和解析と呼ぶ。ここで分潮を抽出するとは、具体的にはその成分の正弦振動式の振幅と初期位相を算出することである。

2.1 地下水位の連続観測

本研究で対象とした調査地は、沖縄総合事務局が多数の地下水観測孔を設置して淡水レンズの調査を継続して行っている沖縄県多良間島である。**Fig. 1** に、本研究で用いた地下水位データを取得した観測地点の位置を示す。

本手法では、同一の潮位変動の伝播により変動する、海岸からの距離が異なる 2 地点の地下水位観測データを用いる。海岸に近い観測地点の位置はできるだけ海岸に近いほうが、観測機器の誤差に対する相対的な水位変動幅が大きくなり有利と考えられる。多良間島においては、海岸にごく近い位置での水位観測データはこれまでのところ 19T6 地点しかない。そのため 2 地点のうち海岸に近い地点は

Table 1 手法の構成要素
Components of the study method

①地下水位の時系列連続観測	<ul style="list-style-type: none"> ・海岸からの距離が異なる2地点 ・測定・記録間隔：1時間に1回 ・観測期間：369日間 (8856時間) (2地点同期間)
②調和解析 (分潮の抽出)	<ul style="list-style-type: none"> ・フーリエ級数展開を応用 ・対象分潮：主要4分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1) →各観測地点の各分潮について振幅と初期位相を算出
③潮位伝播による水位変動式の適用 (水頭拡散率の推定)	<ul style="list-style-type: none"> ・単一周期の正弦振動の伝播による水位変動式 ・2地点間の各分潮の振幅減衰比と時間遅れを代入 →4分潮から水頭拡散率の推定値を8つ算出して平均

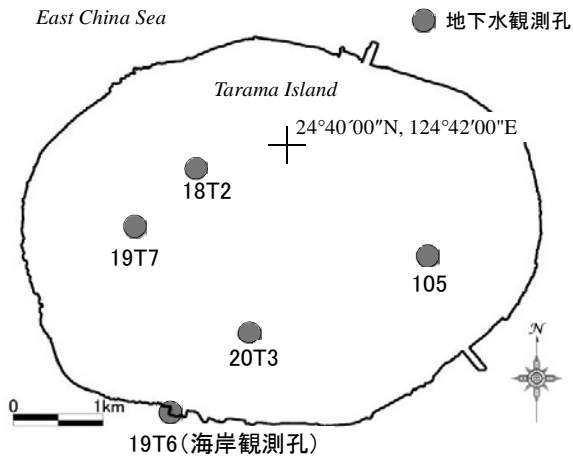


Fig. 1 調査地区および対象観測孔位置図
Study area and location of the groundwater observation holes

Table 2 観測孔の諸元
Specifications of observation holes

孔名	位置	海岸からの距離	管頭標高	孔底深度	自記計設置深度
19T6	南部海岸	0.02km	2.50m	4m	管頭-4.0m
18T2	北西部	1.22km	13.75m	30m	管頭-19.5m
19T7	西部	1.24km	11.98m	63m	管頭-16.1m
20T3	南部	1.05km	11.01m	30m	管頭-14.8m
105	東部	1.07km	11.22m	(スクリーン下端) 13.7m	管頭-11.7m

19T6 地点とし、内陸地点は、19T6 と反対の北東側海岸に近い地点を避けて 4 地点を選定した。4 地点それぞれから直近の海岸の地下水位変動が、19T6 の地下水位変動と同等であると仮定して、島の中央からみて北西～西～南～東方向の沿岸の帯水層の水理定数を推定することとした。

多良間島の帯水層は、厚い石灰岩の層（後述）の全体が一枚の不圧帯水層と考えられており、観測孔は原則として孔底まで有孔のオールスクリーン構造となっている。本研究で用いた 5 地点の観測孔の諸元を **Table 2** に示す。

地下水位の連続観測は、現地観測孔に水圧式の自動記録型観測機器（自記計）を設置して行われた。用いられた自記計は、海岸の 19T6 地点は In-situ 社製自記水位計 Leveltroll、他の 4 地点は同社製自記水位電気伝導度計 Aquatoll（但し 2008 年 7 月からの観測期間の当初約 2 ヶ月間は、19T6 地点は同社製自記計 Aquatroll、105 地点は同社製自記計 Troll9000）である（分解能はいずれも約 1mm）。設置深度は、海岸の 19T6 地点を除いて淡水レンズの下面（電気伝導度 200mS/m で定義）付近であり、**Table 2** 最右列に示したとおりである。

測定・記録間隔は 1 時間に 1 回であり、2 ヶ月に 1 回程度現地においてデータ回収等管理作業が行われた。用いられた自記計はいずれも通気管をもつ通信ケーブルにより本体内部の圧力センサー背面に大気圧がかかる大気圧自動補正型のもので、観測位置に設置した状態でノートパソコン

に接続してセンサーが感知している水深と水位を表示させることが出来るため、携帯型触針式水位計による水位測定値と比較することで、設置深度や観測水位のずれを確認できる。管理作業時には、自記計の自動記録動作を一度終了して観測データを回収し、自記計内部の時計のずれを確認して補正し、携帯型触針式水位計での水位測定結果と比較して水位観測値のずれと設置深度のずれを確認して調整したのち、新たな自動記録動作が再開された。

管理作業時の実績から観測データの時刻のずれは Troll9000 および Leveltroll で概ね 1 分以内、Aquatoll で概ね 10 秒以内であった。また水位は携帯型触針式水位計による測定値との差が ±1cm 以下となるように補正した。

本研究で用いた観測データは 2008 年 7 月 1 日 0:00 から 2009 年 7 月 4 日 23:00 までの 1 時間に 1 回の水位データである。この間の欠測率はいずれの地点も 0.1～0.2% であった。

2.2 水位観測データからの分潮の抽出（調和解析）

本研究で用いる、観測データから個々の分潮を抽出する手法は、フーリエ級数展開の方法を応用したものである。

一般に、周期 t_0 の任意の周期関数 $f(t)$ は、次のように書き表すことができる（Feynman et al., 2013）（付録 1 参照）。

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n \frac{2\pi}{t_0} t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n \frac{2\pi}{t_0} t \tag{1}$$

但し n は整数であって、

$$a_0 = \overline{f(t)} \tag{2}$$

$$a_n = 2 \overline{f(t) \cdot \cos n \frac{2\pi}{t_0} t} \tag{3}$$

$$b_n = 2 \overline{f(t) \cdot \sin n \frac{2\pi}{t_0} t} \tag{4}$$

（上線は周期 t_0 に亘る平均を表す）

式(1)の右边を $f(t)$ に対するフーリエ級数あるいはフーリエ級数展開という。 t_0 は基本周期と呼ばれる。

式(1)～(4)は周期 t_0 の周期関数について導出されるものであるが、非周期関数であっても $f(t)$ が t の有限区間でのみ定義されているときには、その区間を基本周期 t_0 とすれば区間内において周期関数と同一であるから、式(1)～(4)はそのまま成り立つ。

式(1)右边から特定の n に対応する項を取り出すと次式となる。

$$a_n \cos n \frac{2\pi}{t_0} t + b_n \sin n \frac{2\pi}{t_0} t \tag{5}$$

式(5)は、三角関数の加法定理から直ちに導かれる次の式(6)から分かるように、適当な振幅 h_n と初期位相 ϕ をもつ正

弦振動成分 $h_n \sin(n\omega t + \varphi)$ (なお $\omega = 2\pi/t_0$) に置き換えることができる。

$$\begin{aligned} h_n \sin(n\omega t + \varphi) &= h_n (\sin\varphi \cos n\omega t + \cos\varphi \sin n\omega t) \\ &= (h_n \sin\varphi) \cos n\omega t + (h_n \cos\varphi) \sin n\omega t \end{aligned} \quad (6)$$

このとき式(5)中の a_n と b_n の組は、正弦振動成分の振幅 h_n と初期位相 φ の組と、以下の式により 1 対 1 に対応する。

$$h_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (7)$$

$$\sin \varphi = a_n / \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (8)$$

$$\cos \varphi = b_n / \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (9)$$

したがって式(1)~(4)は、周期関数 $f(t)$ が、全ての n に対して適当な a_n および b_n 、すなわち適当な振幅および初期位相を与えてやれば、基本周期 t_0 の整数分の 1 (t_0/n) を周期とする複数の正弦振動成分の重ね合わせによって表現できることを表している。

このことを利用して、水位の連続観測データから特定周期の分潮を抽出する。 t と $f(t)$ の組 ($t, f(t)$) が水位の時系列観測データとして連続的に与えられているとき、観測期間全体を基本周期 t_0 とし、分潮の周期をその整数分の 1 (t_0/n) で表せば、当該分潮成分は式(5)で表される。その a_n および b_n は式(3)および式(4)で得られ、2 式の形から他の分潮成分とは関係なく独立に求められることが分かる。

分潮には数多くの種類があり気象庁のホームページ (気象庁, 2013a ; 2013b ; 2013c および 2013d) では 60 分潮を挙げているが、本研究では愛知ら (2011) と同様に主要 4 分潮と呼ばれる下記の分潮成分を対象とした。下記の周期は気象庁ホームページ分潮一覧表の「速度 (度/時)」欄から計算して時間単位で小数点下 6 桁までで四捨五入したものである (S_2 分潮の周期は正確に 12 時間)。

- ・ M_2 主太陰半日周潮 周期 12.420601h
- ・ S_2 主太陽半日周潮 周期 12.000000h
- ・ K_1 日月合成日周潮 周期 23.934470h
- ・ O_1 主太陰日周潮 周期 25.819342h

ここで水位観測データに式(3)および式(4)を適用する際、基本周期 t_0 とそれに応じて決まる各分潮成分に対応する n 値の設定には工夫が必要である。

式(3)および式(4)中の平均は基本周期 t_0 に亘る平均であるから、この計算をするためには t_0 と同じ長さの期間の観測データが必要となる。

一方、上記のように分潮の周期は S_2 を除いて時間単位で割り切れないため何らかの近似値にせざるを得ないが、 t_0 は 4 分潮の各周期の整数倍である必要がある (4 分潮の周期の公倍数とする必要がある) から、分潮周期の取り方によっては t_0 が極端に大きくなってしまふ。

例えば 4 分潮の周期を 0.01 時間刻みに丸めることとし

1242, 1200, 2393, 2582 とした場合、 t_0 は 4 つの値の最小公倍数をとって次の式(10)のようになり、また各分潮成分についての n は式(11)~(14)のようになる。

$$t_0 = 767,397,769,200 \text{ (0.01 時間単位)} \quad (10)$$

$$n_{M2} = 617,872,600 \quad (11)$$

$$n_{S2} = 639,498,141 \quad (12)$$

$$n_{K1} = 320,684,400 \quad (13)$$

$$n_{O1} = 297,210,600 \quad (14)$$

上記の t_0 は 7,673,977,692 時間 (約 875,443 年) であり、このような長期間の観測は不可能である。

本研究では以下のようにして基本周期 t_0 を設定した。まず時系列観測データは 1 時間間隔としているから t_0 は 1 時間単位の長さにはかなりえず、さらに S_2 分潮の周期 12 時間の整数倍である。本研究では原則として日単位の基本周期とすることとした。

例えば仮に t_0 を 280 日間 (6720 時間) とした場合、その中には M_2 分潮の周期 (12.4206...時間) が 541.036...個だけ含まれるが、この、基本周期 t_0 を M_2 分潮の周期で割った商が、整数に近くなるような t_0 を見つければよい。上述のように S_2 以外の 3 分潮の周期は近似して扱うが、左記の商がある整数にごく近いとき、 t_0 をその整数で割ったもので分潮周期を近似しても他の近似に比べて特別不利になることはない。例えば上記のように t_0 を 6720 時間とした場合は M_2 分潮の周期を $6720/541 (=12.4214...)$ で近似することになるが、一つ前の例において 0.01 時間刻みに丸め 12.42 時間と近似した場合に比べて、本来の周期 (12.4206...) からのずれの大きさは同じ程度である。

そのような、 t_0 を分潮周期で割った商が整数に近くなるような t_0 は、 t_0 を順次大きくしていくとき規則的に現れると見込まれる。Fig. 2 は、その様子を示したものである。横軸で基本周期を 1 日ずつ増やしていったとき、基本周期の整数分の 1 で近似された分潮周期が本来の分潮周期からどれだけ異なるかの、本来の分潮周期に対する割合 (乖離率) を縦軸にプロットした。なお S_2 分潮は基本周期が日単位なら常に零にプロットされるので省いた。横軸は 750 日までの範囲を表示している。

この図に示したようなプロットを用いて、対象とする分潮成分と許容する乖離率のしきい値を設定することで、基本周期をどの値にすればよいかを検討することが出来る。例えば、もし M_2 分潮だけを用いることとし乖離率 0.001% 以下を条件とするなら、基本周期の候補として 192 日, 251 日, 310 日, ...などが選ばれる。

本研究では、現実的に観測可能な長さの期間とすることも考慮しつつ、主要 4 分潮全てについて乖離率 0.003% 以下となる 369 日 (8856 時間) を基本周期とすることにした。

このとき、4 分潮の成分は次のようになる。

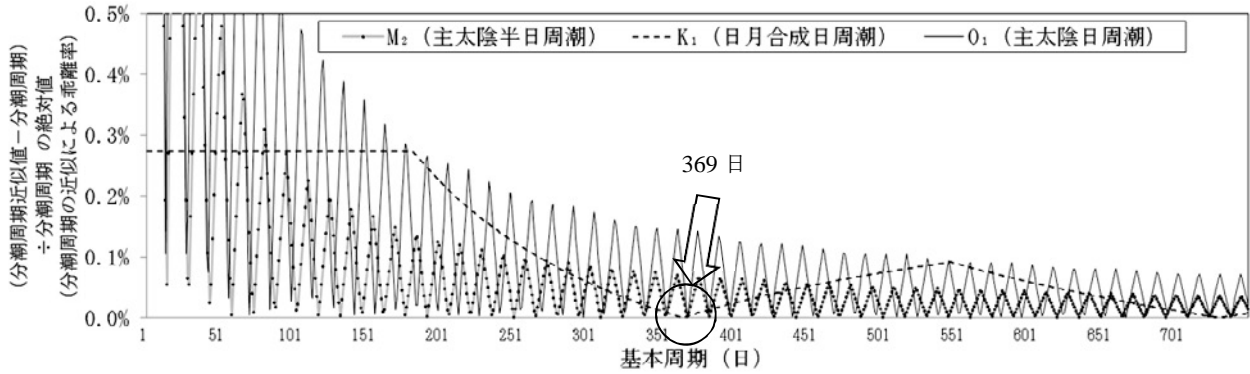


Fig. 2 基本周期の検討
Choice of the fundamental period

$$\begin{aligned}
 M_2 \text{成分} : & \left(2 f(t) \cdot \cos n_{M2} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \cos n_{M2} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 & + \left(2 f(t) \cdot \sin n_{M2} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \sin n_{M2} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 \text{但し } n_{M2} = & 713 \text{ (近似周期} = 8856/713 \approx 12.4208)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 \text{成分} : & \left(2 f(t) \cdot \cos n_{S2} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \cos n_{S2} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 & + \left(2 f(t) \cdot \sin n_{S2} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \sin n_{S2} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 \text{但し } n_{S2} = & 738 \text{ (近似周期} = 8856/738 = 12.0000)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 K_1 \text{成分} : & \left(2 f(t) \cdot \cos n_{K1} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \cos n_{K1} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 & + \left(2 f(t) \cdot \sin n_{K1} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \sin n_{K1} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 \text{但し } n_{K1} = & 370 \text{ (近似周期} = 8856/370 \approx 23.9351)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 O_1 \text{成分} : & \left(2 f(t) \cdot \cos n_{O1} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \cos n_{O1} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 & + \left(2 f(t) \cdot \sin n_{O1} \frac{2\pi}{t_0} t \right) \sin n_{O1} \frac{2\pi}{t_0} t \\
 \text{但し } n_{O1} = & 343 \text{ (近似周期} = 8856/343 \approx 25.8192)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

連続する t と $f(t)$ の組が水位の時系列観測データとして与えられていれば、各分潮成分の a_n および b_n の計算は式(15)~(18)の括弧内のおり三角関数、乗算および平均の計算であるから、一般的な表計算ソフト上で可能である。得られた a_n および b_n から、先に示した式(7)~(9)を用いてその分潮の振幅と初期位相を算出した。

2.3 海岸から異なる距離の2地点への水位変動式の適用

海岸の潮位 $h(t)$ が周期 t_n で振動する ($h(t) = h_0 \sin(2\pi/t_n \cdot t)$) とき、その伝播によって変動する内陸に距離 X だけ離れた位置の不圧帯水層の水位 h_x は、次式で表される (山本, 1983)。

$$h_x(t) = h_0 \exp\left(-X \sqrt{\frac{\pi S}{t_n T}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{t_n} t - X \sqrt{\frac{\pi S}{t_n T}}\right) \tag{19}$$

(h_0 : 海岸における潮位変動の振幅, t_n : 海岸における潮位変動の周期, X : 海岸からの距離, S : 貯留係数, T : 透水量係数)

この式で表される地下水位変動の振幅は、右辺の指数関数までの部分、すなわち

$$(\text{振幅}) = h_0 \exp\left(-X \sqrt{\frac{\pi S}{t_n T}}\right) \tag{20}$$

であり、海岸からの距離 X が大きくなるにしたがって振幅が指数関数的に小さくなり減衰していくことを示す。また地下水位変動の海岸潮位変動に対する時間遅れは、式(19)右辺の正弦関数の部分から

$$(\text{時間遅れ}) = X \sqrt{\frac{t_n S}{4\pi T}} \tag{21}$$

であり、海岸からの距離に比例して時間遅れが生じることを表している。

式(20)および式(21)は潮位と内陸地下水位の関係を示すものであるが、これらの式から、海岸から異なる距離にある2地点の地下水位同士について以下のことが容易に導ける。

地下水位観測データが得られた地点 A (海岸からの距離: X_A) および地点 B (海岸からの距離: X_B) (但し $X_A < X_B$) について、2地点の水位が海岸における同一の潮位変動 $h_0 \sin(2\pi/t_n \cdot t)$ の伝播により変動しているとき、A地点の振

幅に対する B 地点の振幅の比 (減衰比) h_B/h_A は

$$h_B/h_A = \exp\left(- (X_B-X_A)\sqrt{\frac{\pi}{t_n} \frac{S}{T}}\right) \quad (22)$$

であり, また A 地点の水位変動に対する B 地点の水位変動の時間遅れ Δt は

$$\Delta t = (X_B-X_A)\sqrt{\frac{t_n}{4\pi} \frac{S}{T}} \quad (23)$$

である。

式(22)および式(23)より, 減衰比 h_B/h_A と時間遅れ Δt からそれぞれ水頭拡散率 T/S が次式によって計算される。

$$\frac{T}{S} = \frac{\pi}{t_n} \cdot \frac{(X_B-X_A)^2}{(\ln(h_A/h_B))^2} \quad (24)$$

$$\frac{T}{S} = \frac{t_n}{4\pi} \cdot \frac{(X_B-X_A)^2}{\Delta t^2} \quad (25)$$

2 地点 A および B の地下水位観測データから前節に示した方法で得た周期既知の分潮の振幅と初期位相から, 2 地点間の水位変動の減衰比と時間遅れを計算し, 分潮周期 t_n とともに式(24)および式(25)にそれぞれ代入することによって, 2 式からひとつずつ T/S (水頭拡散率) を算出した。

なお 2 地点の分潮の初期位相から時間遅れ Δt を求める計算は, 初期位相の差 (位相遅れ) $\Delta\omega$ を度単位で求めたのち, $\Delta t = \text{分潮周期} \times \Delta\omega / 360$ により計算した。

Table 3 多良間島の地質層序 (沖縄総合事務局農林水産部 (1981) をもとに大我ら (1974) を一部修正) Stratigraphic sequence in Tarama Island (modified from Ooga et al. (1974) based on Agriculture, Forestry and Fisheries Department, Okinawa General Bureau, Cabinet Office (1981))

年代	地層		層厚
第四紀	完新世	海岸堆積物 および 低地堆積物 仲筋砂層 (旧期砂丘砂)	10m
	更新世	琉球層群 琉球石灰岩 (多良間石灰岩)	50~60m
新第三紀	鮮新世	島尻層群 多良間砂層	

III 調査地区の概要

多良間島は沖縄県宮古郡多良間村に属し, 那覇市から約 350km 南西に位置する 東西約 5.8km, 南北約 4.4km, 面積 19.75km² の楕円形の島である (既出 Fig. 1)。北部に一部見られる標高 30m 前後の小丘を除いて標高 10~15m 前後の平坦な地形である。

地質は上位から, 石灰質砂からなる層厚 10m 前後の砂丘砂層, サンゴ, 石灰藻球, 有孔虫殻を含む層厚 50~60m の琉球石灰岩層, 下部島尻層群に対比される石英質砂からなる多良間砂層が分布している (Table 3)。透水性の高い石灰岩が厚く分布するため (Fig. 3), 降雨は蒸発散分を除いて大部分が浸透して, 地下で淡水レンズを形成している。淡水レンズ (電気伝導度 200mS/m 以下の水で定義) の面積は島の面積の約半分に相当する 10km² 前後, その厚さは最も

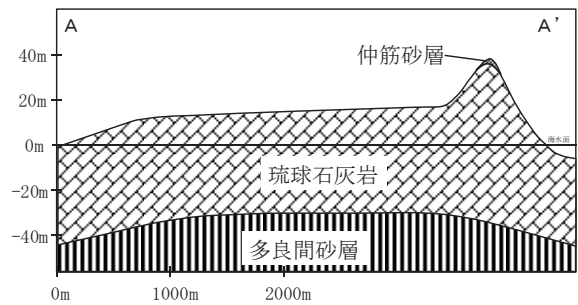


Fig. 3 多良間島地質断面図 (断面線の位置は Fig.4 に示す) (沖縄総合事務局農林水産部, 1983) Geological section of Tarama Island (Section line is shown in Fig.4) (Agriculture, Forestry and Fisheries Department, Okinawa General Bureau, Cabinet Office, 1983)

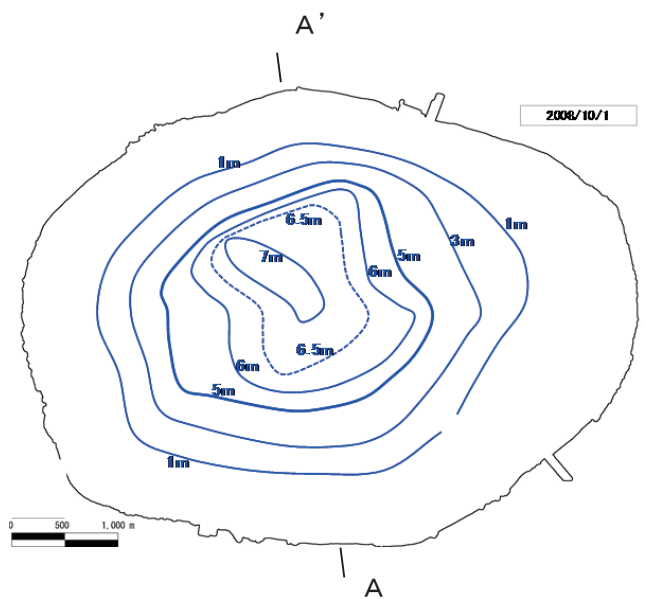


Fig. 4 調査地区の淡水レンズ等厚線図 (白旗, 2010) Distribution of freshwater thickness (Shirahata, 2010)

厚い部分で7m前後である。また多良間島の淡水レンズは、島の中央部よりもやや北西側に偏って分布する（白旗、2010；石田ら、2011）（Fig. 4）。

約1,300人の人口（沖縄県企画部統計課、2013）の生活用水は、全量を淡水レンズを水源として高度浄水処理を行う簡易水道に依存している。農業用水は降雨と溜池に依存する不安定なものになっていることから、内閣府沖縄総合事務局および農林水産省農村振興局は、平成23年度までに農業生産の向上と農業経営の安定化のための淡水レンズ開発を含む事業構想を策定し、引き続いて平成24年度からの調査により、淡水レンズからの持続的開発可能量と管理手法の検討を行っている（仲間、2013）。

IV 結果と考察

Fig. 5に、5地点の水位観測グラフを示す。またその一部の拡大図をFig. 6に示す。

Fig. 5では、1日1m前後の変動幅をもつ海岸（19T6地点）の地下水位に対し、海岸から約1km離れた内陸4地点では減衰によって変動幅が1/10程度以下になっていることが分かる。またFig. 6を詳しくみると、次のことが確認できる。

- ・海岸地点（19T6）の水位変動の山と谷に対して、内陸4地点の水位変動の山と谷は、見かけ上数時間遅れて生じている。
- ・内陸4地点の海岸からの距離はほとんど変わらないにもかかわらず1日の水位変動の大きさは明らかに異なり、105地点（東部）が最も大きく、18T2地点（北西部）が最も小さい。

手法の説明の中で示した振幅に関する式(20)から、海岸からの距離が同じであれば、水頭拡散率（ T/S ）が大きいほど振幅は大きくなることが分かる。したがって、上記の105地点と18T2地点の水位変動の傾向は、定性的には水頭拡散率が東部で大きく北西部で小さいことを示している。以下で、本研究の手法によってこのことが定量的に確認されることになる。

Table 4に、5地点の地下水位観測データから本研究の調和解析手法で得られた主要4分潮の振幅と初期位相を、海岸の19T6地点に対する減衰比と位相遅れとともに示した。なお2地点の初期位相から位相遅れを計算する際には、一旦算出された位相遅れに 360° の整数倍を加えたものが真の位相遅れであるとも考えられるあいまいさがあるが、本事例の場合、次の段階で水頭拡散率を算出する際、Table 4に示した位相遅れに 360° 加えた値を使って算出される水頭拡散率が1桁小さい値になったため、減衰比から算出される水頭拡散率と明らかに異なるため不相当であると判断できた。

Table 4の結果でも、4分潮とも、105地点が18T2より振幅および減衰比は大きく位相遅れは小さく、また19T7、20T3はそれらの中間であることが分かる。当然であるが、

先に水位観測グラフから読み取った地点間の水位変動の大きさの定性的傾向は、Table 4のこのような振幅の傾向と整合する。

Table 5に最終的に得られた水頭拡散率を示す。手法の説明で述べたように、水頭拡散率は、ひとつの分潮に対して減衰比からひとつ、時間遅れからひとつの値が算出されるから、4分潮であれば全部で8つの水頭拡散率が算出される。したがって、このばらつきを見ることによっても異常値の判別や推定の妥当性の判断がある程度可能である。Table 5の結果をみると、19T7を内陸観測孔とした算出結果はややばらつきが大きい、それを含めて4種の対象観測孔それぞれで8つの値の相対標準偏差は概ね10%程度となっている。一般に、揚水試験など現場での調査による帯水層の水理定数の推定では有効桁2桁で推定されれば十分と考えられるから、本手法による結果のばらつきも概ね満足できる程度と判断する。

島の北西側、西側、南側および東側それぞれの海岸から約1km内陸までの範囲の帯水層の水頭拡散率の推定値である、それぞれ8つの値の平均値は、全体としては $6\sim 15\text{m}^2/\text{s}$ の範囲であり、島の北西部で小さく東部で大きい結果となった。

山田ら（2009）は、多良間島で行った揚水試験から推定した透水係数として、 $1.05\sim 2.91\times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ を報告している。本研究の結果である水頭拡散率に帯水層の厚さと貯留係数を仮定して透水係数を計算し、山田ら（2009）と比較すると次のようになる。

多良間島の基盤岩上面の深さは標高-40m～-50m（山田ら、2009）とされていることから帯水層の厚さは40m～50m程度と考えられ、概ねの値として45mと仮定する。また貯留係数は、近傍の宮古島に分布する琉球石灰岩について、完了した地下ダム事業の計画において0.1とされている（緑資源機構、2006）ことから類推して仮に0.1を用いると、本研究の水頭拡散率（ $6\sim 15\text{m}^2/\text{s}$ ）から計算される透水係数は、 $1.3\sim 3.3\times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ となる。これは上記の山田ら（2009）の透水係数とよく整合する結果である。

また長田ら（1988）は、地質ボーリングと水位観測から多良間島の水理地質と淡水レンズ形状を整理した中で、島の西部、北部、東部を比べ、透水性について順に「やや高い」、「低い」、「高い」としている。

上述のように水頭拡散率は透水係数だけでなく帯水層の厚さや貯留係数にも関係するため直接対比することはできないが、少なくとも長田ら（1988）が示した西部・北部と東部の間の透水性の不均質の傾向と、本研究による北西部と東部の間の水頭拡散率の不均質の傾向は、帯水層の厚さや貯留係数が島内で大きく変化しないと考えたとき、整合する結果となっている。

これらのことから、本研究の手法によって、妥当な水頭拡散率の推定ができたものとする。

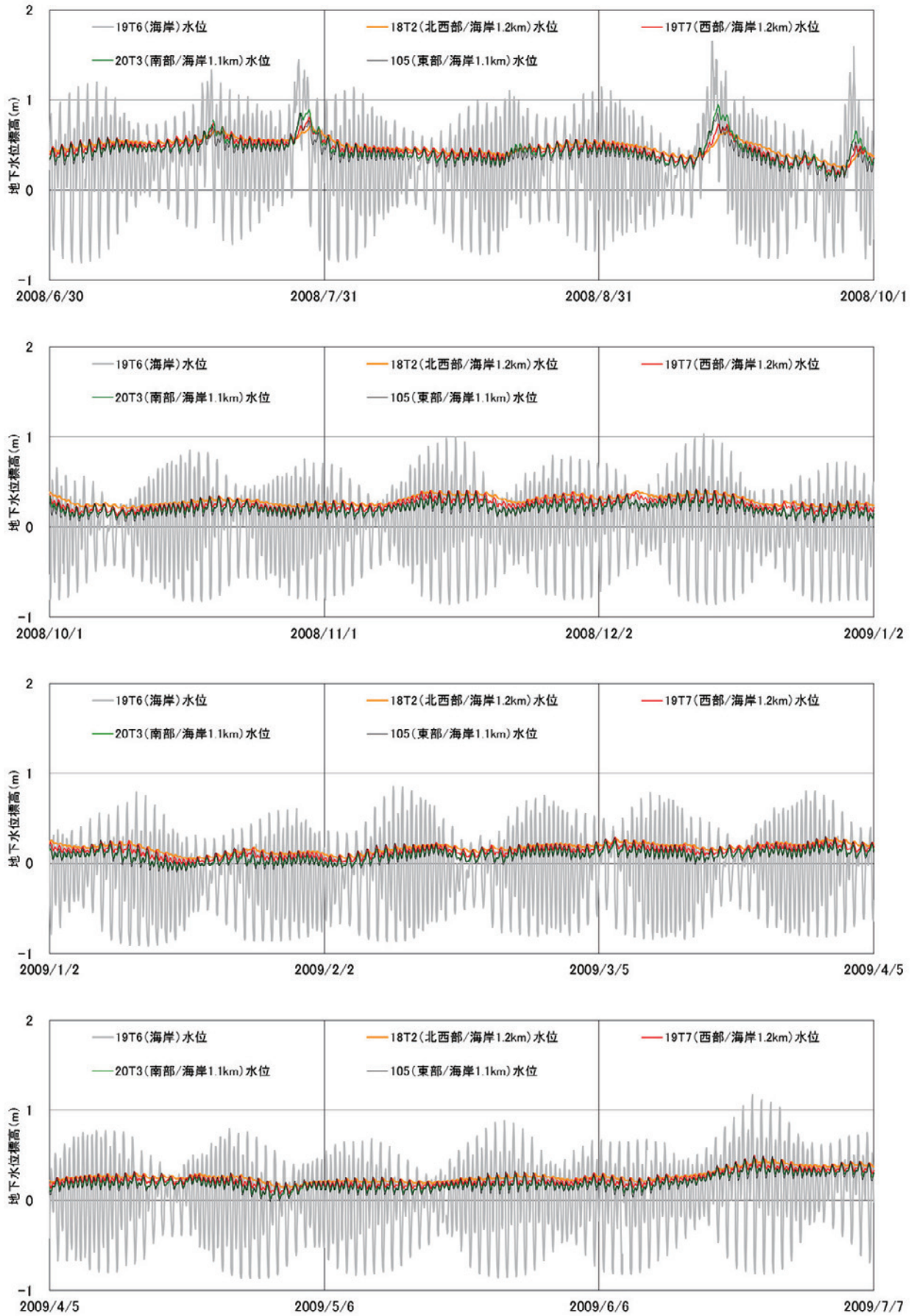


Fig. 5 調和解析対象の地下水位観測データ (2008年7月1日~2009年7月4日)
 Groundwater level monitoring data used in harmonic analyses in this study (July 1st, 2008 to July 4th, 2009)

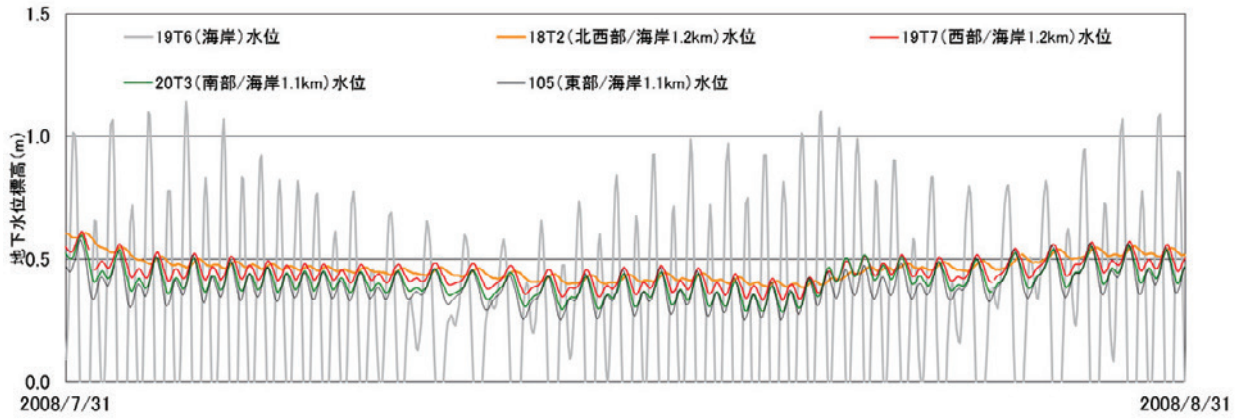


Fig. 6 調和解析対象の地下水位観測データ (Fig. 5 の一部拡大)
Groundwater level monitoring data used in harmonic analyses in this study (a part of Fig. 5 on larger scale)

Table 4 5地点の観測水位からの主要4分潮の調和解析結果
Major four tidal components as results of harmonic analyses of groundwater level monitoring data obtained from five observation sites in Tarama Island

		M_2	S_2	K_1	O_1
19T6 (海岸)	振幅	0.4649m	0.1954m	0.1916m	0.1736m
	初期位相	303.6°	210.8°	53.5°	108.0°
18T2	振幅 (減衰比)	0.0056m (1.21%)	0.0025m (1.28%)	0.0079m (4.13%)	0.0085m (4.91%)
	初期位相 (位相遅れ)	83.1° (220.5°)	345.5° (225.3°)	237.6° (175.9°)	292.5° (175.6°)
19T7	振幅 (減衰比)	0.0244m (5.26%)	0.0087m (4.48%)	0.0227m (11.86%)	0.0217m (12.48%)
	初期位相 (位相遅れ)	156.8° (146.8°)	60.1° (150.7°)	296.6° (116.8°)	350.5° (117.5°)
20T3	振幅 (減衰比)	0.0297m (6.39%)	0.0108m (5.52%)	0.0272m (14.19%)	0.0261m (15.05%)
	初期位相 (位相遅れ)	160.2° (143.4°)	58.5° (152.3°)	299.7° (113.8°)	356.3° (111.8°)
105	振幅 (減衰比)	0.0444m (9.55%)	0.0165m (8.43%)	0.0383m (19.97%)	0.0356m (20.48%)
	初期位相 (位相遅れ)	178.7° (124.9°)	78.8° (132.0°)	318.7° (94.8°)	13.2° (94.9°)

※初期位相：調和解析の時刻原点である2008/7/1 0:00における正弦波式での位相
※減衰比および位相遅れ：19T6に対して

Table 5 算出された水頭拡散率
Calculated hydraulic diffusivities

対象観測孔	島内位置	水頭拡散率 (m ² /s)				8つの値 の平均値	8つの値の 標準偏差 (相対標準偏差)
		M_2	S_2	K_1	O_1		
18T2/19T6	北西側	減衰比による	5.2	5.5	5.2	5.4	5.7 0.7 (12.3%)
		時間遅れによる	6.8	6.8	5.6	5.2	
19T7/19T6	西側	減衰比による	12.1	11.2	11.9	11.6	12.9 1.8 (14.2%)
		時間遅れによる	15.9	15.6	13.1	12.0	
20T3/19T6	南側	減衰比による	9.8	9.2	10.1	10.0	10.2 0.9 (8.6%)
		時間遅れによる	11.9	10.9	9.8	9.4	
105/19T6	東側	減衰比による	14.0	13.1	15.5	14.8	14.6 1.0 (7.1%)
		時間遅れによる	16.3	15.1	14.7	13.6	

V 結 言

本研究では、沖縄県多良間島を対象として、潮位の周期変動の伝播の影響をうける淡水レンズ帯水層の水位観測データに、フーリエ級数展開を応用した主要 4 分潮の調和解析手法と不圧地下水の水位変動の式を適用することで、重要な帯水層定数である水頭拡散率を推定できることを明らかにした。

この手法では、試行錯誤的な計算を必要とせず、一般的な表計算ソフト上で三角関数等の単純な計算によって水頭拡散率が算出できる。

海岸からの距離が異なる 2 地点における約 1 年間の連続水位観測データを必要とするが、逆に 2 地点の水位観測データさえあれば地点間の平均的な帯水層定数が推定されるため、帯水層水理性状の広域的な概況把握に適している。また地域内に多数の観測地点があれば、帯水層水理性状の平面的な不均質が把握できる。

今後、多良間島でこれまで観測が少ない北部海岸近くを含め島内に観測地点が増えれば、色々な地点の組合せに適用して島内の帯水層の水理性状の不均質を明らかにできるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、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」（課題番号 91150）の支援を受けて実施した。沖縄総合事務局農林水産部 藤元栄一氏、同土地改良総合事務所 仲間雄一氏、白石晋氏および祖父久徳氏（当時）には、現地調査や観測データ提供のほかあらゆる面で協力をいただいた。現地調査においては、多良間村役場をはじめとする地元の方々にも協力をいただいた。記して関係各位に感謝の意を表する。

付録 1 フーリエ係数の式の導出

本文中の式(2)~(4)の導出過程を示す。

一般に、周期 t_0 の任意の周期関数 $f(t)$ は、数学的に次のような形に書き表すことができる (Feynman et al., 2013)。

$$\begin{aligned}
 f(t) = & a_0 \\
 & + a_1 \cos \omega t \quad + b_1 \sin \omega t \\
 & + a_2 \cos 2\omega t \quad + b_2 \sin 2\omega t \\
 & + a_3 \cos 3\omega t \quad + b_3 \sin 3\omega t \\
 & + \dots \quad + \dots \\
 & + a_n \cos n\omega t \quad + b_n \sin n\omega t \\
 & + \dots \quad + \dots
 \end{aligned}
 \tag{A1}$$

(なお $\omega = 2\pi/t_0$)

式(A1)の右辺を $f(t)$ に対するフーリエ級数あるいはフーリエ級数展開といい、定数の列 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, b_1, b_2, \dots, b_n, \dots$ をフーリエ係数という。また t_0 は基本周期と呼ばれる。

ここで、 $f(t)$ が連続的に与えられたとき、フーリエ係数 (各 a_n および b_n) は、以下のように比較的容易に求めることができる。

非周期成分 (定数) a_0 は次のようにして求められる。式(A1)の両辺の基本周期 t_0 に亘る平均値をとれば、右辺の余弦関数および正

弦関数の平均は全て零となるから、左右辺を入れ替えれば次のようになる。

$$a_0 = \overline{f(t)} \tag{A2}$$

(上線は平均を表す、以下同じ)

a_1, a_2, a_3, \dots は、次のように求められる。例えば a_3 を求めるためには、式(A1)の両辺に $\cos 3\omega t$ を掛けて

$$\begin{aligned}
 f(t) \cdot \cos 3\omega t = & a_0 \cdot \cos 3\omega t \\
 & + a_1 \cos \omega t \cdot \cos 3\omega t \quad + b_1 \sin \omega t \cdot \cos 3\omega t \\
 & + a_2 \cos 2\omega t \cdot \cos 3\omega t \quad + b_2 \sin 2\omega t \cdot \cos 3\omega t \\
 & + a_3 \cos 3\omega t \cdot \cos 3\omega t \quad + b_3 \sin 3\omega t \cdot \cos 3\omega t \\
 & + \dots \quad + \dots \\
 & + a_n \cos n\omega t \cdot \cos 3\omega t \quad + b_n \sin n\omega t \cdot \cos 3\omega t \\
 & + \dots \quad + \dots
 \end{aligned}
 \tag{A3}$$

とし、この両辺の基本周期 t_0 に亘る平均をとる。

右辺第 1 項の t_0 に亘る平均は、 $\cos 3\omega t$ の周期 ($t_0/3$) の 3 倍の区間に亘る平均となるから、零である。

$$\overline{a_0 \cdot \cos 3\omega t} = a_0 \cdot 0 = 0 \tag{A4}$$

式(A3)の右辺第 2 項は、三角関数の積和の公式から

$$a_1 \cos \omega t \cdot \cos 3\omega t = \frac{1}{2} a_1 \cos (4\omega t) + \frac{1}{2} a_1 \cos (-2\omega t) \tag{A5}$$

であり、式(A5)の右辺についても、周期 t_0 に亘る平均は、2 つの余弦関数の周期の整数倍に亘る平均の和であるから、零である。

$$\overline{\frac{1}{2} a_1 \cos (4\omega t) + \frac{1}{2} a_1 \cos (-2\omega t)} = 0 \tag{A6}$$

式(A3)の右辺第 3 項は、三角関数の積和の公式から

$$b_1 \sin \omega t \cdot \cos 3\omega t = \frac{1}{2} b_1 \sin (4\omega t) + \frac{1}{2} b_1 \sin (-2\omega t) \tag{A7}$$

であり、この右辺についても、周期 t_0 に亘る平均は、2 つの正弦関数の周期の整数倍に亘る平均の和であるから、零である。

同じようにして、式(A3)の右辺のほぼ全ての項の平均値は零になり、唯一零にならないのは

$$\begin{aligned}
 \overline{a_3 \cos 3\omega t \cdot \cos 3\omega t} & = \overline{\frac{1}{2} a_3 \cos (6\omega t) + \frac{1}{2} a_3 \cos (0)} \\
 & = \frac{a_3}{2} \tag{A8}
 \end{aligned}$$

である。よって、式(A3)の両辺の周期 t_0 に亘る平均をとると結局

$$\overline{f(t) \cdot \cos 3\omega t} = \frac{a_3}{2} \tag{A9}$$

となり、左右辺を入れ替えて

$$a_3 = 2 \overline{f(t) \cdot \cos 3\omega t} \tag{A10}$$

となる。以上のようにして a_3 が求められた。同様の方法で全ての a_n を求めることができる。

各 b_n についても、式(A1)の両辺に $\sin n\omega t$ を掛けて両辺の t_0 に亘る平均値をとることで同様に得られる。

まとめると、周期関数 $f(t)$ (周期= t_0) は、次の形に書き表すことができる。

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n \frac{2\pi}{t_0} t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n \frac{2\pi}{t_0} t \tag{A11}$$

但し n は整数であって、

$$a_0 = \overline{f(t)} \tag{A12}$$

$$a_n = 2 \overline{f(t) \cdot \cos n \frac{2\pi}{t_0} t} \tag{A13}$$

$$b_n = 2 \overline{f(t) \cdot \sin n \frac{2\pi}{t_0} t} \tag{A14}$$

以上のようにして各 a_n および b_n の式が導出され、本文の式(1)~(4)が得られる。

付録2 分潮抽出計算の表計算ソフト上の具体的入力例

本研究の手法により分潮を抽出するための表計算ソフト上の数式等の具体的な入力方法を、Microsoft Excel 2010 (OS は Windows7) を用いた場合の例を示すことで説明する。

Fig. A1 に、ワークシート上に計算式を入力して主要4分潮の振幅と初期位相を計算した状況を示す。

①時系列観測データの入力

A 列と B 列に、ワークシート先頭行から数行以上空けて (下図では5行空けて第6行以下に)、水位の1時間ごと8856時間の時系列観測データを入力する (下図の場合、最終行は第8861行となる)。多くの自記水位計では、付属するアプリケーションソフト等

によって、下図と同じようにスプレッドシートの下方向かって時間が経過する配列の連続観測データを CSV 形式ファイルで出力できるので、その場合は Excel で開いてコピー・ペーストにより写してくればよい。なお下図の A 列は、元データとの対応が分かるようにするために観測日時を入力するもので、以下の分潮抽出計算には用いない。B 列が、本文の式(1)~(4) (付録1の式(A11)~(A14)) の $f(t)$ である。

②時刻「 t 」の連続入力

時系列観測データの先頭と同じ行の C 列に「0」を入力し、下方向かって1行につき1ずつ増やして「8855」までを入力する (下図の場合セル範囲 C6:C8861 に入力)。これが本文の式(1)~(4) (付録1の式(A11)~(A14)) の t である。

③時間平均する元のデータの入力

D 列より右列で1分潮につき2列を用いて、本文の式(3)および式(4) (式(A13)および式(A14)) で時間平均を行って a_n と b_n を計算するための元となる、各 t における $f(t)$ と三角関数の積を計算する。

下図内 D 列に入力されている M_2 分潮の a_n の元となる式は、式(3) (式(A13)) 右辺の平均記号を除いた式で $n=713$, $t_0=8856$ として得られ、具体的には Excel の関数を用いて次のように入力する：

$$\text{(下図内セル D6)} = 2 * B6 * \text{COS}(713 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

また E 列に入力されている M_2 分潮の b_n の元となる式は、式(4) (式(A14)) 右辺の平均記号を除いた式で $n=713$, $t_0=8856$ として、具体的には

$$\text{(下図内セル E6)} = 2 * B6 * \text{SIN}(713 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

のように入力する。

同様に S_2 分潮 ($n=738$), K_1 分潮 ($n=370$), O_1 分潮 ($n=343$) について、F 列から K 列まで次のように入力する。

$$\text{(下図内セル F6)} = 2 * B6 * \text{COS}(738 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

$$\text{(下図内セル G6)} = 2 * B6 * \text{SIN}(738 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

$$\text{(下図内セル H6)} = 2 * B6 * \text{COS}(370 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

$$\text{(下図内セル I6)} = 2 * B6 * \text{SIN}(370 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

$$\text{(下図内セル J6)} = 2 * B6 * \text{COS}(343 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

$$\text{(下図内セル K6)} = 2 * B6 * \text{SIN}(343 * 2 * \text{PI}() / 8856 * C6)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1				M2:主太陽半日周潮		S2:主太陽半日周潮		K1:日月合或日周潮		O1:主太陽日周潮			
2				a _{M2} =	b _{M2} =	a _{S2} =	b _{S2} =	a _{K1} =	b _{K1} =	a _{O1} =	b _{O1} =		
3				0.006	0.001	-0.001	0.002	-0.007	-0.004	-0.008	0.003	←各列第6行~第8861行の平均	
4		f(t) ↓ t ↓		83.1	83.1	-14.5	14.5	-57.6	122.4	-87.5	87.5	←下の初期位相算出のための作業セル	
5		↓観測データのコピー(2列) ↓		0.006	83.1	0.002	345.5	0.008	237.6	0.009	292.5	←各分潮の振幅/初期位相(°)	
6	2008/07/01 00:00:00	0.436	0	0.872	0.000	0.872	0.000	0.872	0.000	0.872	0.000	※初期位相:t=0における位相	
7	2008/07/01 01:00:00	0.437	1	0.785	0.424	0.757	0.437	0.844	0.227	0.848	0.211		
8	2008/07/01 02:00:00	0.436	2	0.463	0.739	0.436	0.755	0.755	0.437	0.771	0.408	←D列の入力式: =2*B8+COS(713*2*PI()/8856*C8)	
9	2008/07/01 03:00:00	0.435	3	0.046	0.869	0.000	0.870	0.814	0.616	0.648	0.580	←E列の入力式: =2*B9+SIN(713*2*PI()/8856*C9)	
10	2008/07/01 04:00:00	0.437	4	-0.382	0.786	-0.437	0.757	0.435	0.758	0.492	0.723		
11	2008/07/01 05:00:00	0.439	5	-0.719	0.505	-0.760	0.439	0.224	0.849	0.304	0.824	←F列の入力式: =2*B11+COS(738*2*PI()/8856*C11)	
12	2008/07/01 06:00:00	0.442	6	-0.879	0.094	-0.884	0.000	-0.004	0.884	0.098	0.879	←G列の入力式: =2*B12+SIN(738*2*PI()/8856*C12)	
13	2008/07/01 07:00:00	0.447	7	-0.824	-0.348	-0.774	-0.447	-0.236	0.862	-0.118	0.886		
14	2008/07/01 08:00:00	0.453	8	-0.559	-0.713	-0.453	-0.785	-0.457	0.782	-0.333	0.843	←H列の入力式: =2*B14+COS(370*2*PI()/8856*C14)	
15	2008/07/01 09:00:00	0.459	9	-0.146	-0.906	0.000	-0.918	-0.853	0.645	-0.533	0.747	←I列の入力式: =2*B15+SIN(370*2*PI()/8856*C15)	
16	2008/07/01 10:00:00	0.466	10	0.316	-0.877	0.466	-0.807	-0.810	0.460	-0.708	0.606		
17	2008/07/01 11:00:00	0.473	11	0.712	-0.623	0.819	-0.473	-0.916	0.238	-0.846	0.424	←J列の入力式: =2*B17+COS(343*2*PI()/8856*C17)	
18	2008/07/01 12:00:00	0.478	12	0.934	-0.202	0.956	0.000	-0.956	-0.008	-0.933	0.210	←K列の入力式: =2*B18+SIN(343*2*PI()/8856*C18)	
19	2008/07/01 13:00:00	0.481	13	0.921	0.278	0.833	0.481	-0.927	-0.258	-0.962	-0.021		
20	2008/07/01 14:00:00	0.479	14	0.668	0.886	0.479	0.830	-0.825	-0.487	-0.924	-0.251		
21	2008/07/01 15:00:00	0.475	15	0.250	0.917	0.000	0.950	-0.665	-0.679	-0.830	-0.463		
22	2008/07/01 16:00:00	0.471	16	-0.224	0.915	-0.471	0.816	-0.462	-0.821	-0.688	-0.644		
23	2008/07/01 17:00:00	0.465	17	-0.631	0.683	-0.805	0.465	-0.230	-0.901	-0.506	-0.780		
24	2008/07/01 18:00:00	0.459	18	-0.872	0.288	-0.918	0.000	0.012	-0.918	-0.299	-0.868		
25	2008/07/01 19:00:00	0.453	19	-0.890	-0.168	-0.785	-0.453	0.246	-0.872	-0.080	-0.902		
26	2008/07/01 20:00:00	0.451	20	-0.634	-0.576	-0.451	-0.781	0.462	-0.775	0.139	-0.891		
27	2008/07/01 21:00:00	0.446	21	-0.325	-0.831	0.000	-0.892	0.840	-0.621	0.346	-0.822		
28	2008/07/01 22:00:00	0.445	22	0.118	-0.882	0.445	-0.771	0.778	-0.433	0.532	-0.713		
29	2008/07/01 23:00:00	0.447	23	0.533	-0.717	0.774	-0.447	0.867	-0.217	0.692	-0.566		

Fig. A1 調和解析用表計算シートの例
Example of spreadsheet for harmonic analysis method used in this study

以上のように時系列データ先頭と同じ行 (C 列が「0」である行) の D 列から K 列に入力した式を, 時系列データ末尾と同じ行 (上図の場合第 8861 行) までコピーする。次でここで入力した各列 8856 セルの平均をとることにより, 本文の式(3)および式(4) (式(A13) および式(A14)) に従って各分潮の a_n と b_n が計算される。

④時間平均による各分潮の a_n と b_n の計算

観測データを入力する際に空けておいたワークシート先頭数行のうちの 1 行 (上図では第 3 行) に, 上記の 8856 セルを平均する式を入力する。具体的には, 例えばセル D3 に次のように入力する:

(上図内セル D3) =AVERAGE(D6:D8861)

E 列から K 列までも同様に入力する:

(上図内セル E3) =AVERAGE(E6:E8861)

(上図内セル F3) =AVERAGE(F6:F8861)

(上図内セル G3) =AVERAGE(G6:G8861)

(上図内セル H3) =AVERAGE(H6:H8861)

(上図内セル I3) =AVERAGE(I6:I8861)

(上図内セル J3) =AVERAGE(J6:J8861)

(上図内セル K3) =AVERAGE(K6:K8861)

これらにより M_2 分潮の a_n , M_2 分潮の b_n , S_2 分潮の a_n , ..., O_2 分潮の b_n がそれぞれ計算される。

⑤各分潮の振幅と初期位相の計算

各分潮の振幅は, 本文の式(7)により, a_n と b_n の二乗和の正の平方根として求められる。その 4 分潮についての計算式を適当なセル (上図ではセル D5/F5/H5/J5) に入力する。例えば上図の場合 M_2 分潮の振幅は, 次のように入力して求められる。他の分潮も同様である。

(上図内セル D5) =SQRT(D3^2+E3^2)

各分潮の初期位相は, 本文の式(8)と式(9)から逆正弦関数と逆余弦関数の計算により求める。これら関数は単独では $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で二価関数となるため, 2 つの計算結果を組み合わせる場合分けを用いて位相を計算する。上図の場合は途中の計算を行う作業セルを第 4 行に設けて計算するのとあわせ, 同じ作業セルで角度の単位を度に変換している。具体的には, 例えば M_2 分潮について上図の場合次のように入力してセル E5 で初期位相を求める。他の分潮も同様である。

(上図内セル D4) =DEGREES(ASIN(D3/D5))

(上図内セル E4) =DEGREES(ACOS(E3/D5))

(上図内セル E5) =IF(D4<0,360-E4,E4)

なおここで初期位相とは, 各分潮を本文の式(6)左辺の形の正弦関数の式で表したときの式中の角度 ϕ であり, $t = 0$ に対応した観測時刻 (上図の場合は 2008 年 7 月 1 日 0:00) における位相である。

以上のようにして, 上図の例ではセル D5~セル K5 の 8 セルに, 4 分潮の振幅と初期位相が計算される。一度このようなシートを作っておけば, 別の地点についても 8856 時間の水位観測データを A 列および B 列 (上図内セル範囲 A6:B8861) にコピーしてただで 4 分潮の振幅/初期位相が簡単に計算できる。

参考文献

愛知正温・塩莉恵・徳永朋祥 (2011): 地下水面の潮汐応答に関する解析解の導出と伊豆諸島新島における原位置水理特性評価, 地下水学会誌, 53(3), 249-265
 Anthony, S.S. (1996): Hydrogeology and ground-water resources of

Pingelap Island, Pingelap Atoll, State of Pohnpei, Federated States of Micronesia, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4005
 Cant, R.V. and Weech, P.S. (1986): A review of the factors affecting the development of Ghyben-Hertzberg lenses in the Bahamas, *Journal of Hydrology*, **84**, 333-343
 近森邦英・上森千秋・松田誠祐 (1972): 海岸付近帯水層の透水量係数の推定について, 農業土木学会論文集, 42, 13-20
 Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M. (2013): The Feynman Lectures on Physics, Volume I, 50-2 The Fourier series, http://www.feynmanlectures.info/docroot/I_50.html#Ch50-S2 (確認日: 2013/12/5)
 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), 22-25
 石田聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・増本隆夫・今泉眞之 (2011): 沖縄県多良間島における淡水レンズ賦存量の推定, 農業農村工学会論文集, 79(3), 7-18
 磯崎義正 (1970): 宮古島の地下水, 応用地質, 11, 12-25
 岸智・浜谷直史・長田実也・原郁男・楠本岳志 (1998): 沖縄県津堅島における集水井を利用した淡水レンズからの地下水開発, 応用地質, 39(3), 298-305
 気象庁 (2013a): 分潮一覧表 石垣, <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/harms60.php?stn=IS&year=2011&tyear=2011> (確認日: 2013/12/3)
 気象庁 (2013b): 分潮一覧表 石垣, <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/harms60.php?stn=IS&year=2011&tyear=2012> (確認日: 2013/12/3)
 気象庁 (2013c): 分潮一覧表 石垣, <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/harms60.php?stn=IS&year=2011&tyear=2013> (確認日: 2013/12/3)
 気象庁 (2013d): 分潮一覧表 石垣, <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/harms60.php?stn=IS&year=2011&tyear=2014> (確認日: 2013/12/3)
 緑資源機構 (2006): 地下ダムによる水資源開発の手引き, 476p
 森 一司・高橋朋佑・岡庭信幸・柴崎直明・大内拓哉 (2012): 2011 年東北地方太平洋沖地震による仙台平野南部地域での地下水環境変化について, 地下水学会誌, 54(1), 11-23
 長田実也・古川博恭・富田友幸・座波吉実 (1988): 沖縄・多良間島の淡水レンズ—琉球石灰岩の透水性について, 日本地質学会学術大会講演要旨, 95, 420
 仲間雄一 (2013): 多良間地区における水源開発の概要, 農村振興, 767, 32-33
 農林水産省 (2009): 農業用地下水開発の手引き, 249p
 沖縄総合事務局農林水産部 (1981): 農業用地下水調査沖縄県水理地質報告書その 1, 357
 沖縄総合事務局農林水産部 (1983): 沖縄県の水文地質図, 78
 沖縄県企画部統計課 (2013): 平成 25 年沖縄県勢要覧
 大我晴敏・古川博恭・小倉乙郎・西田民雄 (1974): 沖縄県多良間島の地下水, 日本地質学会学術大会講演要旨, 81, 368
 佐藤邦明・岩佐義男 (2002): 地下水理学, 123-125, 丸善, 東京
 白旗克志・長田実也 (2009): 淡水レンズからの水源開発を目指して—多良間島における調査—, 地盤工学会誌, 57(9), 42
 白旗克志 (2010): 地下水電気伝導度測定による淡水レンズの水収支分析, 水土の知, 78(6), 514-515

- 祖父江久徳 (2008) : 多良間地区における集水井揚水試験について,
農業農村工学会九州支部講演会, 89, 2-5
- Vacher, H.L. (1978) : Hydrogeology of Bermuda—Significance of an
across-the-island variation in permeability, *Journal of Hydrology*, **39**,
207-226
- 山田茂昭・與那原信夫・祖父江久徳 (2009) : 多良間島の第四系琉
球層群と水理地質的特徴, 日本地質学会学術大会講演要旨, 116,
83
- 山田茂昭・中谷仁・白石晋 (2012) : 淡水レンズ地域の取水に伴う
諸現象～沖縄県多良間島を例として～, 日本地下水学会 2012 年
春季講演会講演要旨, 132-137
- 山本莊毅 (1983) : 新版地下水調査法, 490p, 古今書院, 東京

受理年月日 平成 2 5 年 1 2 月 9 日

New Simple Method for Estimating Hydraulic Properties of a Freshwater-Lens Aquifer by Analysis of Tidal Groundwater Fluctuations

SHIRAHATA Katsushi*, ISHIDA Satoshi*, YOSHIMOTO Shuhei* and TSUCHIHARA Takeo*

* Water Resources Engineering, Renewable Resources Engineering Research Division

Summary

A new simple analytical method using a harmonic-analysis technique and a tidal propagation formula was applied to estimate the hydraulic properties of a freshwater-lens aquifer on Tarama Island, where the development of the freshwater lens has been expected for many years. For about one year, data on the tidal fluctuations in groundwater-levels were obtained simultaneously from several observation borehole sites on Tarama Island, and then applied to the harmonic analyses. The harmonic-analysis technique used in this study, an application of the Fourier series expansion method, is composed of fundamental calculations of trigonometric functions and time-dimension averages. The sets of harmonic constant outputs from two observation sites that differed in distances to the coastline were then used in the tidal propagation formula of an unconfined aquifer to determine the hydraulic diffusivity, an important hydraulic parameter for planning groundwater development.

The estimated hydraulic diffusivities of aquifers in northwestern, western, southern and eastern parts of the island ranged from 6 to 15m²/s, which is consistent with previously reported hydraulic parameters. The inequality relation between the estimated hydraulic diffusivities of the northwestern and eastern parts of the aquifer is also consistent with the previous study.

Key words : Freshwater lens, Unconfined aquifer, Groundwater level, Auto-recording continuous measurement, Harmonic analysis, Tide propagation, Hydraulic diffusivity

農地・農業用水等の地域資源保全のための モバイル型地理情報システムの開発

重岡 徹* 友松貴志** 庄 直樹** 山本徳司***

*農村基盤研究領域資源情報担当

**株式会社イマジックデザイン

***企画管理部長

キーワード：GIS, 地域資源保全, AR, モバイル, スtock管理

I 緒言

農地、農業用水等の地域資源は、食料の安定供給の確保や農業の多面的機能の発揮に不可欠な社会共通資本であるが、混住化、高齢化等の進行により、その維持・管理が困難になっている。こうした地域資源の保全・管理への取り組みは、農業農村施策に係わる技術者にとって喫緊の課題である。そこで、農林水産省では、かかる課題に対して、地域共同による農地・農業用水等の資源の基礎的な保全管理活動への支援を行う「農地・水保全管理支払交付金」や、施設の長寿命化を図る「農業水利施設のストックマネジメント」などの対策を推進し、持続的な地域資源の保全を目指している。

とりわけ、地域の多様な農業の展開と環境の保全に不可欠な農業用水資源の保全については、例えば農業水利システムが持つ水利用機能（配水の弾力性、保守管理性、環境性能）及び水理機能を適時・的確に保全管理するための技術開発と、営農・水域環境や施設管理機能の脆弱化等、水利用を取り巻く環境変化に対応したソフト・ハード両面からの施設の有効活用・高度化が必要である。このことについて、農林水産省では平成19年度から「農業水利ストック情報データベース」の運用を開始し、国営造成施設を中心とする基幹的農業水利施設を対象に、各事業主体や管理主体が保有していた情報の一元化を図るとともに、ストックマネジメントの各段階で得られる各種情報の集計・分析に着手している。

また、施設の周辺環境である農地や農道等の基盤、環境・景観等の情報とその変化についても、農業水利施設の保全管理において直接的な影響がある訳では無いが、農地管理、防災支援、環境配慮の観点も含め一体的な情報更新をしていくことが、様々な施策の推進に重要な課題である。特に、社会的・自然的要因による耕作放棄の状態、耕作形態は毎年のように変動するため、農地の有効利用の観点からも随時、適正に情報更新を行っていかねばならない情報の一つである。

農業水利施設をはじめとした地域資源の保全管理に当たって

は、どこにどのような施設が存在するかを把握しておかなければならない。そのため、農業水利施設の保全管理を支援するツールとしてのデータベースには、施設の名称、設置場所、諸元、供用開始年などが記録される。このデータベースに、日常点検で見つかった不具合などの内容や過去に行われた補修内容、あるいは定期的に実施する機能診断などの情報を記録することで、施設の時系列に渡る状態を把握・分析し、保守管理の将来予測を目指している。

しかし、そのためには多大な労力と費用を要する農地基盤データベースを簡易に情報更新する技術および情報閲覧する技術を開発し、情報を継続的に有効活用することが必要となる。

これらの情報更新においては、そのプロセスや手法について現在十分な検討がなされているとは言えない。また、近年の事業予算の削減傾向により、調査費や人件費等も削減される方向にあり、省力的な情報更新を目的としたシステム技術が待ち望まれている。

基盤となる地図等の更新は従来の航空測量を元としたもので必要十分であるが、現場実態の属性データの更新では、現地踏査や住民からの直接的な情報の収集が不可欠となる。そのためには、現場調査者の作業効率性の向上や住民による情報申請を簡略化する調査システムのモバイル化、およびその高度化を実現することが早急に必要である。

そこで本研究では、近年急激に高速化、広域化した通信網とAndroidやiPad、iPhone等に代表されるモバイルPCを十二分に活用し、現場で作業が可能なオンサイト地理情報システム（以下、本システム）の開発を行う。現在行われているストックマネジメントの対象および方法や、本システムが実現し導入された際に考えられるメリット、取り扱う情報の具体的な種類や数量・範囲・更新の頻度、システムに望まれる機能について、土地改良事務所等の現場での実現性や汎用性を考慮して、情報蓄積・分析のためのデータベースサーバやPCソフトウェア整備とモバイル地理情報システムアプリケーションの開発を行う。

開発に当たり、1) 情報の入力負荷を低減する位置情報取得

精度の向上方法 2) オンサイトで求められかつモバイルデバイスの特徴を利用した容易な情報入力方法 3) AR 機能等のシステム活用のための支援システム、の3つを新たな技術開発として考案している。ここに新たな技術というのは、ストックマネジメント業務自体がこれからの技術が必須であることと、現場利用におけるモバイルの性能的課題は内在するものの、すでに実用に達している技術もあることから、本研究では何よりもストックマネジメントを実施する現場を対象にした即実用型技術を意味する。

なお、本報告では、II章、III章において開発方針と技術課題について整理し、IV章では基本的なアプリケーション、V章、VI章では農地等の資源保全管理で活用する実装されたオンサイト機能について説明し、本システムの全般的な技術を明らかにする。

II 開発方針

2.1 方針の概要

農業水利施設等の地域資源の保全は、管理者による日常管理、定期的な機能診断と評価、調査結果に基づく施設分類と劣化予測、効率的な対策工法の比較検討、計画に基づく対策の実施、調査・検討の結果や対策工事に係る情報の蓄積等を、段階的・継続的に実施するものである。しかしながら、手法自体が策定されてからまた時間がたっており、現場でも平成19年からのスタートであるため、様々な方法が試行錯誤を重ねて用いられているのが現状である。

例えば、各農政局が年間に検査すべき補助対象箇所数は、農地・水保全管理支払交付金を利用した施設管理もあれば、農業法人等が管理している水利施設もあり、膨大な施設数となる。それに対して、国営施設については、土地改良技術事務所の保全技術課が保全管理技術の普及・指導を行い、施設の機能診断情報の収集、基幹的農業水利施設の課題の整理、水管理に必要な情報の提供については、土地改良調査管理事務所が行っている。どちらも限られた職員数で最大限の管理業務を担っていることから、業務の効率化が大きな課題となっており、新しいツール利用を含めた方法を提案する必要がある(Fig. 1)。

いくつかの調査管理事務所においては、すでにGISの構築事例や運用事例もみられるが、そのほとんどはスタンドアロン版のデスクトップ型GISの構築が多く、価格的な問題、システム管理の問題等により、クラウドやクライアント&サーバによるデータ共有型やオンサイト利用までには至っていない。よって、現状の方法では設計図書等を現場に持ち出して施設等の確認を行う場合はあるが、各々の施設において設計図そのものが統一性を欠いている場合もあり、さらに施設周辺の地形も変化している状況も多く、調査に多大な時間を要している。現場に紙媒体の資料を持ち込む場合は、事務所においてその複製を取り、施設ごとにまとめる事前作業が必要となる。また、天候によってはそれら資料の取り扱いが甚だしく困難になっている。各施設の経年変化を調査するためには、現場での調査位置を可能な

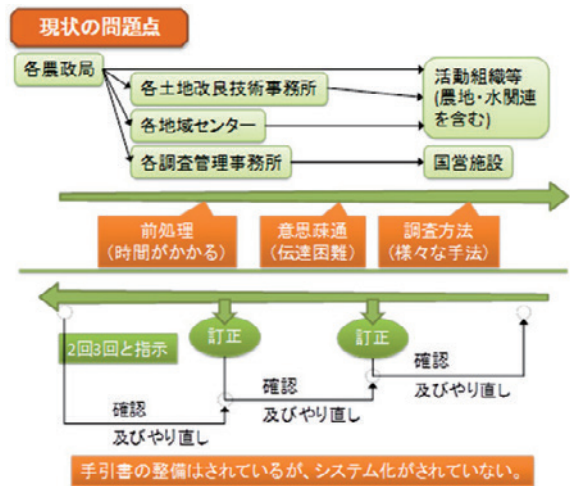


Fig. 1 現状の問題点
The present problem

限り統一する必要があるが、現状の調査方法では、例えば調査写真の撮影位置や方向等についても統一が難しい。したがって、長期間かつ広域の調査の均質性を高めるには、作業者の技術教育と増員がさらに求められるが、現状では現実性に乏しいと思われる。

さらに、主要施設の管理については、スタンドアロン版のデスクトップ型GISで十分な機能を有するが、前段で述べた、住民による管理支払交付金を利用した施設管理に当たる末端水利施設での運用においては、この方法ではとても対応しきれないと予想できる。

最終的には、幹線から末端まで一貫した管理システムとなることが求められることから、システム構築において考えるべきことは、データの共有性におけるセキュリティを維持しながら担保し、かつ、だれでもが簡単に使えるシステムとしなければならない。専門家だけが使えるということではシステムの存続は困難である。過去、様々なシステムが作成されては利用されなくなっていく過程を見直す必要がある。

前述したとおり、国営施設以外の調査を行うに当たっては、土地改良区を始め、地方自治体等の協力が必要になることが予想される。国営事業だけでも膨大な業務量であることから、益々調査の統一性や均質性を保持することが困難であることは、容易に想像ができる。本研究の成果を利用し、農地、水路、道路等の位置、面積、管理状態、施設の形状及び写真画像等の農地基盤データについて、現場での担当者等の目視やモニタリング調査による情報更新作業を省力的に実施し、データの均質性を高めることを目的としたい。

現在、農林水産省では、有用なデータベースを2つ構築済みである。一つは農業水利ストック情報データベース(ストックDB)であり、もう一つは現場業務電子化支援システム(EXP)である。これらのデータベースを有効に活用することも今後の課題といえよう。

以上のことから、本研究によるシステム開発では、国営事業

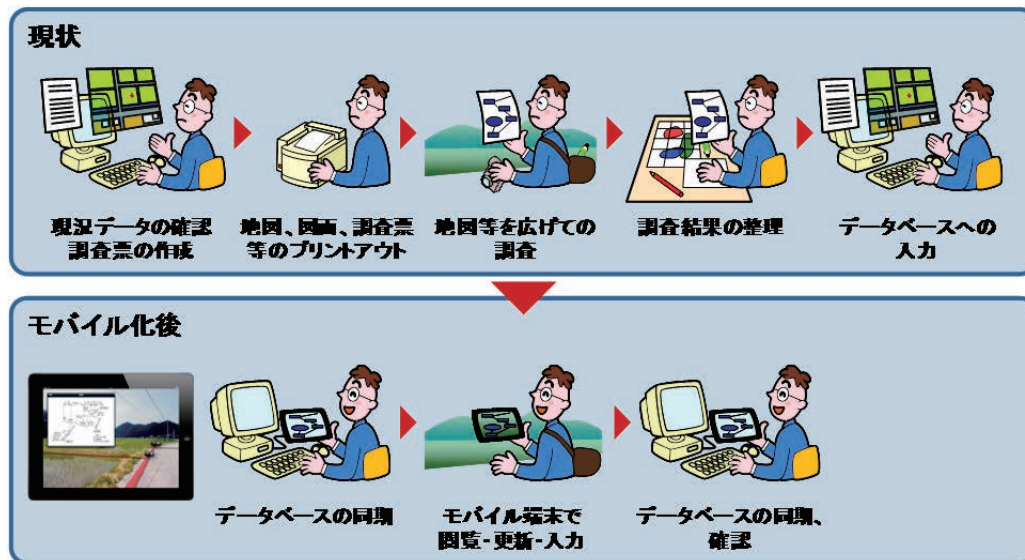


Fig. 2 モバイル GIS による改善点
The improving point by mobile GIS

のレベルの幹線水路から、末端での地域住民による農地・水保全支払交付金による農地、用排水路、農道の施設管理まで、長寿命化等を図ることを対象とし、アプリケーションにおいて活用するデータベースは VIMS (Village Information Management System) で作成し、ここでは、オンサイトでの利用に特化した技術開発を行なう。只、試験的には水路施設をその代表として取り上げる(農林水産省,2013b)。

2.2 オンサイト地理情報システムに求められる機能の検討

施設管理において、オンサイト地理情報システムに期待される役割を整理すると次のように考えられる。一つは現場におけるデータの収集・更新の省力化であり、一つは前述したデータの均質性を保つために必要なモバイル GIS である。

現場で行う作業として、写真撮影、客観的な老朽化記述、それに加えて誤りのないデータ収集が挙げられる。モバイル機器は写真が撮影できることは言うまでもないが、GPS によって撮影場所、撮影方向を自動的に合わせて記録でき、かつ AR 技術を利用すれば形状や場所の確認が可能となるため、多量の写真データを事務所で整理する場合のケアレスミス等を未然に防ぐことが可能となる(Fig. 2)。

データの統一化と均質性にもモバイル GIS は有用である。各局の必要十分なデータから、末端の土地改良区等まで、および広域の調査区域全域において、手引書等のマニュアルによって収集するデータのフォーマットを統一決定できるならば、そのフォーマットをモバイル GIS の選択的調査メニューとして実装することにより、各局等の判定会議等で用いる統計処理データにする場合も可能な限り例外データを少なくし、統一性ととも均質性も併せ持った優れた有用なデータ収集を可能にするものとする。

行政の各段階及び農地・水等の調査にも有用にするため、上記フォーマットに加えて項目を追加する機能も搭載する。これにより、地域特性や特定の自然災害に関するデータも考慮する

ことが可能となる。

最後に、円滑な普及のために、現場で使用する機器としての使いやすさ、操作感と言われる部分の考慮が必要となる。本研究では、その点においても考慮された現場で使いやすいユーザーインターフェイス体系等も重要な課題として考えた。

2.3 モバイル機器の選定

本システムは、その目的から明らかなように、近年急速に普及が進んでいるスマートフォンおよびタブレットを対象機器とする。数値や文字列はもちろん、画像などを含めて大量のデータを扱うことになるため、処理能力の高い機器を用いるが必要になる。加えて、位置情報や方位、機器の姿勢を取得する必要もあるため、機器の仕様はそれに対応したものであることも必要である。ただし、システムの普及を考慮すれば、一般に広く販売され入手が容易であることも条件とすべきである。さらに、スマートフォンとタブレットそれぞれに向けた別のアプリケーションを開発するのは非効率であるため、可能な限り共通のアプリケーションが双方で動作可能なように、それぞれの機器を選定する。

スマートフォンやタブレットについては、iOS や Android といった機器に搭載されている OS が、まず比較対象の第一に挙げられることが多い。ただ、本システムのような特定のアプリケーションが動作する環境を考えれば、双方の機能や性能の差異がほとんど無視出来るのであれば、OS による差は重要なものではない。

Fig.3 にあるスマートフォン/タブレットを導入予定または検討している企業での利用予定の OS の統計では、スマートフォン：Android 36.1% Windows 系 33.8% iOS 28.7% に対して、タブレット：iOS 36.8% Windows 系 36.6% Android 23.0% となっている(ICT 総研,2011)。

これらの調査結果を見ると、スマートフォンとタブレットの導入傾向が逆転している様子が窺える。ただし、モバイル端末

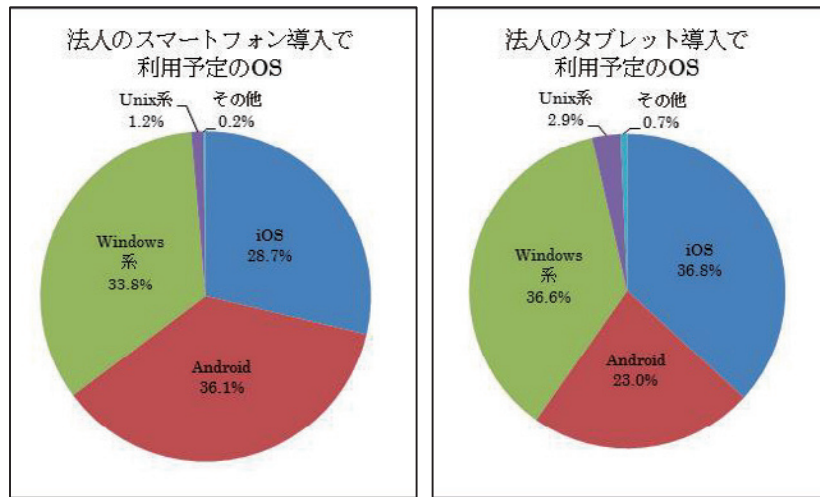


Fig. 3 利用予定の OS (インプレス R&D『Android利用動向調査報告書 2012』より)
OS in which the corporation is planning use

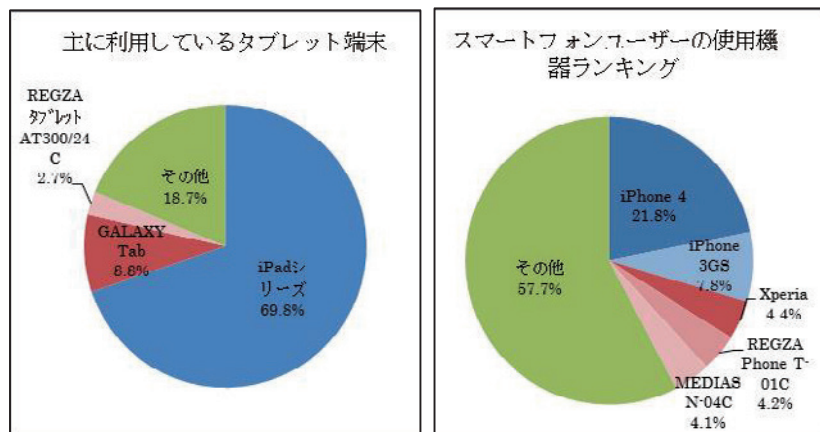


Fig. 4 使用機器ランキング (インプレス R&D『Android利用動向調査報告書 2012』より)
Ranking of a mobile phone

の市場は2010年度1,085万台、そのうちスマートフォンは850万台で、タブレットは81万台 (ICT総研調査) と両者の間には10倍以上の規模の違いがあるので、OSのシェアとしては、Androidが優勢になっている(インターネットメディア総合研究所,2012)。

シェアは別として、それぞれのOSにおけるアプリケーションの開発や配布についての現状は、iOSでは、開発ツールは無料である。ただし、実機にインストールするためには、有料の開発者プログラムに登録することが求められる。開発言語は主にObjective-Cで、開発はMacOS X上で行う。一般への配布は審査のあるAppStoreを通さなければならないので、ウイルスに感染したアプリが出回る可能性は低い。単一企業内なら自由に配布できるプログラムもある。

一方、Androidでは、開発ツールは汎用の無料のものを使用し、実機インストールなども自由に可能である。開発言語は主にJAVAで、Windows系、MacOS系、UNIX系それぞれで可能である。一般への配布は自由であるが、シェア拡大にともないウイルスの報告も増加している。

また、機器のシェアについて、特にスマートフォンでは、複

数のメーカーから数多くの機種が発売されるAndroid系機器は、シェアが分散されると考えられるが、逆にその条件がOSのシェアを押し上げているとも言える。機器の選定条件や入手の容易性を考えれば、OSでのシェアよりもこの機器のシェアをより参考にすべきだと考える(Fig.4)。

最新モデルが次々と出ているので、ここでモデルの比較はしないが、注意すべきことはAndroidではスマートフォンとタブレットでOSのバージョンが異なることである。次期バージョンの4.0以上になると、これは統一される予定であり、今後発売されるモデルではこの4.0以上を搭載するものが主流となる。しかし、Androidは、メーカー毎のカスタマイズが施されているため、あるアプリケーションが機種Aで動作しても、機種Bで問題なく動作するとは限らない。

以上のモバイル機器の普及現状を元に、対象機器を検討した結果、本システムの稼働に当たっては、iPhone 4SおよびiPad 2 (またはその後継機種。2012年3月に新機種(解像度2048×1536)が発売された。)とすることが妥当と判断した。スペックに問題ないことは基本的条件となるが、一般に広く使用されている機種であること、OSおよびハードウェアの開発に継続性

があり、バージョンアップや後継機種が出た際の対応が比較的容易であると考えられること、スマートフォンとタブレットでプログラムコードなどの共通化が図りやすいこと、ウイルス感染の可能性が小さいこと等が、判断の根拠である。

2.4 現場ニーズに対応した開発形態

本来、システム開発はニーズ調査に基づき、ニーズ、技術課題抽出、設計、実装の流れの開発形態を取り、最初の段階でニーズを抽出した上での機能設計がなされるものである。特に、データベースについては、運用管理、セキュリティの観点から、データモデルはトップダウンで作成していくべきものである。しかし、オンサイトでのモバイル調査に資するGISの開発に当たっては、これまでに現場技術者がシステム利用の経験がなく、スマートフォン等の個人的利用である程度利用形態の憶測はつくものの、作業イメージそのものが想定できないものや、機能が実装されていれば便利そうではあるが実際利用した場合の問題の所在が不明確な点が多々ある。

また、本システムはGISではあるが、野帳のデジタル化の要素も多く、データベースについてもフレキシブルな対応が迫られることがあると考えられる。そこで、実装段階で試験運用を行いながら、ニーズと技術課題が発生すれば、その都度必要なものは設計、実装を行い、β版の開発と同時に完成形を作成するように、利用者が開発工程に参加できる開発形態を取った。もちろん開発予算は一定であることから、実装段階での搭載する機能のプライオリティをつけることが必要となるが、この形態の開発によって、より現場でのニーズを具体的に引き出す方法をとることとした。

III システムの実装と技術的課題

3.1 サーバおよびクライアントPC用ソフトウェアの本システムへの対応

本システムの使用に当たっては、GISサーバやクライアントのソフトウェアは、農研機構農村工学研究所と(株)イマジックデザインが官民連携新技術研究開発事業によって開発した平成20年の「農地基盤地理情報システム(VIMS)」(農研機構職務発明プログラム番号Q05)と平成23年の「住民参加型農村計画策定支援システム(VMF)」(同Q07)を採用し、オンサイト情報システムへのデータ配信のための追加機構を開発する(重岡ら,2011)。

具体的には、オンサイトでの使用を容易にするために、限定した範囲の切り出しおよびデータ形式への変換を実現する。また、本システムで追加される特有のデータをデータベースへ取り込み、PCで閲覧可能とする機能を追加する。

3.2 モバイル地理情報システム基本アプリケーションの開発

オンサイトで情報を閲覧および入力するためのGISソフトウェアを開発する。これは、モバイルデバイス(タブレットまたはスマートフォン)上で動作するアプリケーションである。ここで開発したシステムをiVIMSと呼ぶ。VIMSのモバイル版の意味で頭に「i」を付記した。

基本アプリケーションは、切り出され変換されたデータベースをモバイルデバイス上に取り込み、その地理情報をデバイス上に表示する。ユーザーの操作により、図形に関連した写真や属性データを検索し表示する機能を受け持つ。

これらクライアントPCおよびモバイル双方のアプリケーシ



Fig.5 ソフトウェアの構成とデータの流れ
Composition and data flow of software

ソフトウェアに関して、ユーザーニーズの調査を元にした設計に沿って、必要な機能の追加やユーザーインターフェイスの調整などに留意する(Fig.5)。

3.3 オンサイト地理情報システムの開発に当たっての技術的課題

3.3.1 位置情報の補正技術の開発

モバイル GIS システムで重要な技術要素の一つは、位置情報の取得であるが、現在のモバイルデバイスに搭載された GPS は取得の環境により精度の限界がある。そのため、モバイルデバイスには、GPS によるものだけでなく、Wi-Fi アクセスポイントや携帯電話基地局からの電波強度による位置情報の取得機能が備わっている場合がある。また近年ではそれ以外にも、デバイスのカメラに写った大型看板等のランドマークの画像解析による位置情報取得や、屋内であれば音波等を使用した位置情報取得等のアプローチも研究されている。しかしながら、農業用オンサイト情報システムが使用される農村部では、現状では GPS 以外はまず使用できない。管理地区内に Wi-Fi ネットワークを構築する方法も考えられるが、設置や維持管理のコストや手間を考慮すると現実的でない。

そこで、本システムでは、先進的な技術ではないが、データの入力や修正時に地図上の正確な位置が分かっている場合に、手で指定した位置と GPS から取得された位置の対応をデータベースの専用テーブル内に自動的に保存し、後の位置情報補正計算に使用することによる精度の向上を図る方法を導入する。補正用位置対応のレコードが増えれば増えるほど、補正の精度が上がる仕組みである。複数の位置対応をいかに補間するか、また、場所によるずれだけでなく時刻によるずれを考慮する必要があるか等のアルゴリズムを検討し、操作性も含めて実現性の高いものを機能として搭載する(Fig.6)。

3.3.2 メモ・図形描画・写真撮影機能の開発

デスクトップ PC の GIS をモバイルデバイスに移植するだけでも、ストックマネジメントの業務推進において、意味のある支援に成り得ると思われるが、オンサイトでのデータ入力、すなわち文字の入力や図形の描画操作は、実際には困難であり、時間もかかる。そのため、たとえ情報収集ツールとして意味が



Fig.7 メモ・図形描画機能
A memo and a figure drawing function

あるものでも、現場では使用しなくなる可能性が大きい。

タブレットやスマートフォンの画面はタッチパネルであるので、その特性を活かすことを考慮に入れると、オンサイトではそのタッチパネル上に「手描き」で地図や写真・図面等の画像へメモや図形を描くこととし、必要なデータ修正は残されたメモを参照してデスクトップ PC 上で行うことを想定する。画面上に「手描き」で図形を描画する事自体は特別な技術は必要ではないが、描くベースとなるのが写真や図面以外に地図でもあることを考慮すると、単純な描画と結果画像の保存だけではなく、相互の関連性(グルーピングや時系列等)や縮尺等を考慮したデータ構造を研究開発する必要がある。

一方、モバイルデバイスにカメラが付帯していれば、現場の状況を記録して位置情報を付加した上でデータベースに保存することも、ワンボタンで簡単に行える。これについても、上記と同様の関連性や記録に必要十分な画像解像度、形式、データベースへの保存方法等を検討する(Fig.7)。

3.3.3 情報の AR (Augmented Reality : 拡張現実) 化技術の開発

モバイルデバイスの多くは、カメラや GPS、磁気センサ、デバイスの姿勢を取得する加速度センサが搭載されており、データベース上のデータが位置データを保持している場合は、そのデータをカメラのリアルタイムの映像に重ねて表示することができる。この技術を AR (Augmented Reality) と称し、情報科学の分野では拡張現実と強化現実と訳されている。

こうした AR により取得される情報が十分な精度を保持すれば、現地の実際の対象物(施設など)とデータベース上の情報が関連付けられて示されることになり、現地情報との整合性の確認や、管理対象物の特定などが容易になることに加え、農業



GPS より自動的に位置情報は取得される

データを手動で地図上の正確な位置に移動させると、修正前後の座標値が DB に自動的に保存される

位置補正用の座標値のペアが増えることで、その後の補正の精度が上がる

位置補正機能を有効にすることで、GPS から取得された位置情報は自動的に補正される

Fig.6 位置情報の補正の考え方
Compensation of position information



地図や写真上に「手描き」でメモを残す。屋外では、ソフトウェアキーボードによる入力よりも、直感的に素早くコメントや図形を入力できることが望まれる。タッチパネルを装備したタブレットは、その目的にも適している。

Fig.8 ARによる土中設備の確認と図面の参照のイメージ

The check of the institution in the ground by AR(Augmented Reality)

用パイプライン等の土中に設置され見ることができない構造物や、設計段階の施設でまだ存在しないものを、実物の景色に重ねて表示して位置を特定するなど、ストックマネジメントにおいて有効な効果を発揮できると考えている。位置情報補正技術と合わせて、このAR技術が、ストックマネジメント業務において実用に資するよう実装技術を開発する(Fig.8)。

3.3.4 データベースの現場選択技術の開発

3.3.1~3.3.3までは、開発当初のニーズ調査により抽出された技術課題であるが、これ以外に、利用者参加型の開発した形態としたことによる付加的な機能がいくつかある。詳細については、V章以降で個別に触れることとするが、特徴ある技術としては、データベースの現場選択技術である。

現場では様々なことが発生する。野帳の場合、自分なりの自由な使い方があり、気がつくことをその場で書き記せば良い。しかし、GISの場合は一般的にはデータベースも固定されており、メモ機能などはあつたとしても、新たな属性項目の入力はできない。例えば、生物調査はするつもりはなかったが、偶然、見かけない植物を見つけたため、それを位置情報付きで写真に撮って関連ファイルとして登録するとともに、木の高さ、葉の長さや色、形態の特徴等の属性データを記憶しておく行動が生じた場合や、耕作放棄地の調査中であつたが、データの更新や確認をしている最中に、地番のデータそのものの違いに気づいたが、調査帳票に地番属性の入力項目が用意されていなかった場合、結局、野帳に記録せざるをえなくなる。つまり、目的毎のシステムとなっていることで、使いやすくなっている反面、現場での変化に対応しにくいのである。

もちろん、データベース構築時に、すべての属性項目をセットしておけば良いのであるが、データベースでよく見受けられるのは、膨大な量の属性テーブルを用意したが、実際にはデータはほとんど入っていないというケースである。iVIMSはデジタル野帳として機能すべきなので、あくまでも必要十分な最低限のデータベースを用意し、それ以外のデータ作成はフレキシブルであるべきであろう。

本システムでは、サーバにあるVIMS本体に他のプロジェクト等で作成した属性テーブルが既に存在していれば、iVIMSに携帯することができる。システム手帳のパーツ選択の考え方と同等である。今後、様々な現場調査が行われると、使いやすい

パーツは徐々に増加してくると考えられる。ユーザーが増えれば、便利なパーツは公開し、共有利用することも考えられる。

基本的なフォーマットとしての、農地基本台帳、水路諸元などの属性テーブルは、トップダウンで整備されていなければならないが、付随するデータベースは、オンサイトでオリジナルなものである方が使いやすい。また、現場では、様々な環境下において、誤認や戻ってからの確認が必要なこともあり、直接データベースのデータを更新することは危険な場合もある。iVIMSとVIMS本体との同期時において、データ確認後に更新というやり方をするためには、オンサイトで活用するiVIMSでは、データベースを一旦コピーして使う等の工夫も必要となる。そこで、iVIMSでは、以前のデータを残したまま、新しいデータを更新する場合に、はじめからデータベースを作り込まなくても、現場に必要な分だけの属性テーブルを追加できるデータベースの現場選択が可能な技術を搭載することとした。

この機能の搭載により、例えば、昨年度の調査における水路点検履歴のデータを現地参照中、以前のデータに誤りの可能性が出たときは、そのままコピーして再調査データの属性テーブルとして利用し、誤りのあるところだけのデータを更新しておけば、はじめからデータベースが構築されていなくても、VIMSに登録されているフォームテーブルであれば、オンサイトで、急遽データベーステーブルを追加して、セットし、昨年のデータを残したまま、今回の調査データが登録できる。

この技術は、ストックマネジメント業務の実施技術者や農地・水保全管理活動の実践者との参加型開発によって意見が出され、多数のデータベーステーブルをリレーションするためのリンクテーブルを搭載することで可能となった技術である。

IV オンサイト地理情報システムのGISアプリケーションの基本機能

4.1 VIMSとのデータベース同期ツール

4.1.1 VIMS Sync Server

開発済みのデスクトップGIS「VIMS」のデータベースと本研究で開発したモバイルGIS(iVIMS)のデータベースは、その構造は同等のものとして構築されているが、PC用はMicrosoft SQL Serverを、モバイル用はSQLiteをその管理システムとして使用しており、これらの間を橋渡しするデータベース同期ツールが必要となる。そこで、Windows上で起動し、単独で動作するアプリケーションとして、サーバ間での同期機能を持つ総合的な同期ツールとして「VIMS Sync Server」を開発し、モバイルGISの機能の一つとして組み込んだ。

VIMS Sync Serverはウィザード形式で、各段階に必要な指示を与えながら、次の工程へ進むという操作方法を採用している。VIMS Sync Serverを起動すると、まずVIMSサーバ間で同期を行うか、VIMSとiVIMSで同期を行うか選択する画面が表示される。VIMSとiVIMSの間での同期を選択して、次へボタンを押すと、転送元および転送先のデータベース選択画面となる(Fig.9)。

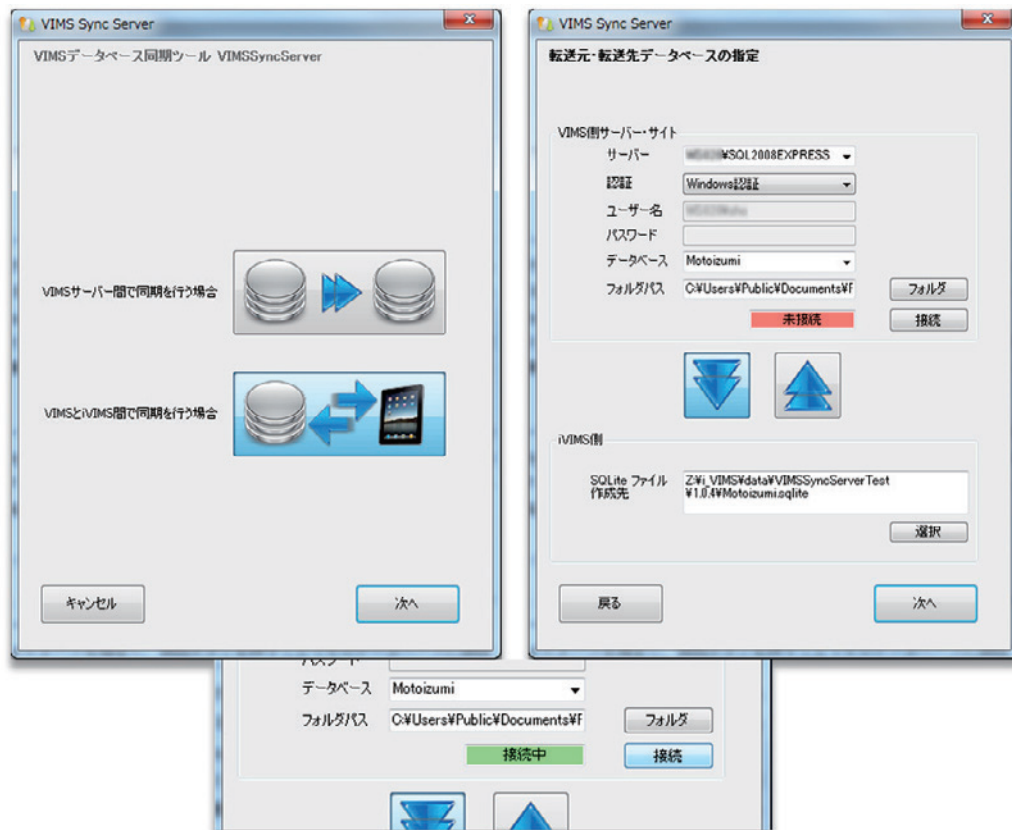


Fig.9 起動・データベース指定・SQL Server データベース接続画面
The connect screen to starting, database specification, and a SQL Server database

4.1.2 転送元・転送先データベースの指定

VIMS 側のサーバ・サイトは、認証方法が SQL Server 認証だった場合に必要なユーザー名とパスワード、同期したいサーバ内のデータベース、データベース外に保存されているデータのフォルダパスを指定し、接続ボタンを押すことでそのデータベースに接続される。iVIMS 側のデータベースはファイルベースの SQLite であるので、その SQLite ファイルを格納するフォルダを指定する。

4.1.3 VIMS から iVIMS へのデータの転送

4.1.3.1 転送プロジェクトの選択

転送プロジェクトの選択画面 (Fig.10) の上部には、先に選択されている転送元データベース名と、転送先 SQLite ファイル名が表示されている。ここでは転送対象プロジェクトを選択できる。画面下部には、転送元データベースに含まれるテーブルとそれらのレコード数の表が表示される。ただし iVIMS では使用せず、転送が不要なテーブルは除かれている。

データベース内に全てのデータが保存されているようなプロジェクトであれば、次へボタンを押すことで転送実行画面となる。ただし、地形図や航空写真など、データベース内に保存されていないラスターファイルを使用している場合は、これらのファイルの iVIMS 用変換処理が必要となるので、ラスターファイルピラミッド化処理のボタンを押して、その画面に移行する。

4.1.3.2 ラスターファイルのピラミッド化処理

ラスターファイルの変換は、元々1枚の巨大なラスターファ

イルを、Fig.11 のように解像度が半分になっていくような段階的サイズの画像を生成し、各段階の画像を一定の小さなサイズのセル画像に分割する処理である。これは Level of Detail (詳細度) の表現として有効に働く。この処理で生成される多数の

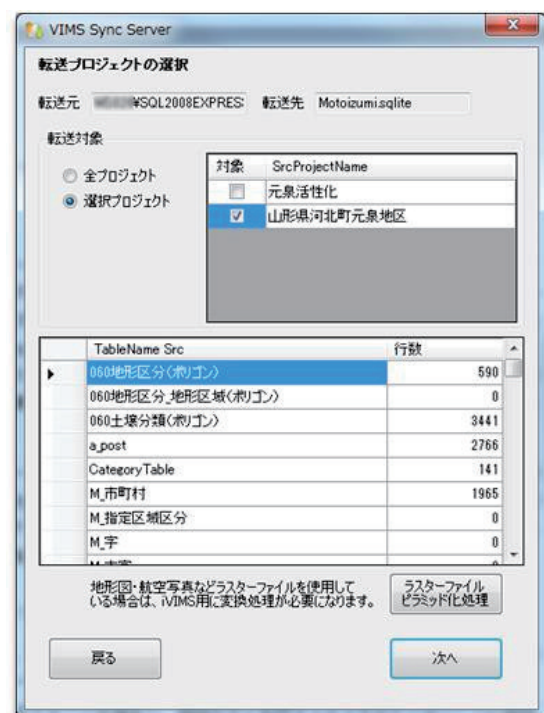


Fig.10 転送プロジェクトの選択
Selection of a transmission project

画像と、その分割や位置、サイズ等を記述したテキストファイルは、1つのラスターファイルにつき1つのフォルダにまとめられ保存される。このフォルダの出力先は、基本的には先に指定した SQLite ファイルと同じ場所で、フォルダ名は SQLite ファイル名の拡張子を除いたものとなるが、変更ボタンを押して他の場所または名前前のフォルダに出力することも可能である。

ラスターファイルの入力元は、データベース内に記述されているラスターブロック（ラスターファイル自体は VIMS のラスターブロックファイルとして存在）か、任意に TIFF や JPEG 画像等から選択することができる。分割処理のセルサイズおよび保存フォーマットはメニューから選択することができる。ただし保存フォーマットについては、地形図や航空写真などのベースに表示される不透明な画像の場合は JPEG を、オーバーレイ表示される図面などの透明な画像の場合は PNG を iVIMS では推奨する。

全てを指定したら、変換実行ボタンを押して、ラスターファ

イルの変換を実行する。変換が終了したら iVIMS に転送され、戻るボタンを押して、転送プロジェクトの選択画面に戻る (Fig.12)。

4.1.3.3 データ転送

データ転送実行ボタンを押すことで、データベースから必要なデータが抽出され、SQLite ファイルおよび関連ファイルへ保存する処理が開始される。

VIMS でデータベース内に保存されていた関連ファイルデータをそのまま SQLite データベースに保存すると SQLite ファイルが巨大化するため、関連ファイルは実体のファイルとして保存する。SQLite ファイルと同じ場所で、名称は SQLite ファイル名の拡張子を除いたフォルダの下に、関連ファイルデータベースに記述された相対パスのファイルとして保存する。

書き出されたデータファイル群は、標準的な方法としては Apple iTunes ソフトウェアを使用して iPad や iPhone にコピーすることとなるが、コピーの制約から、SQLite ファイル以外の関

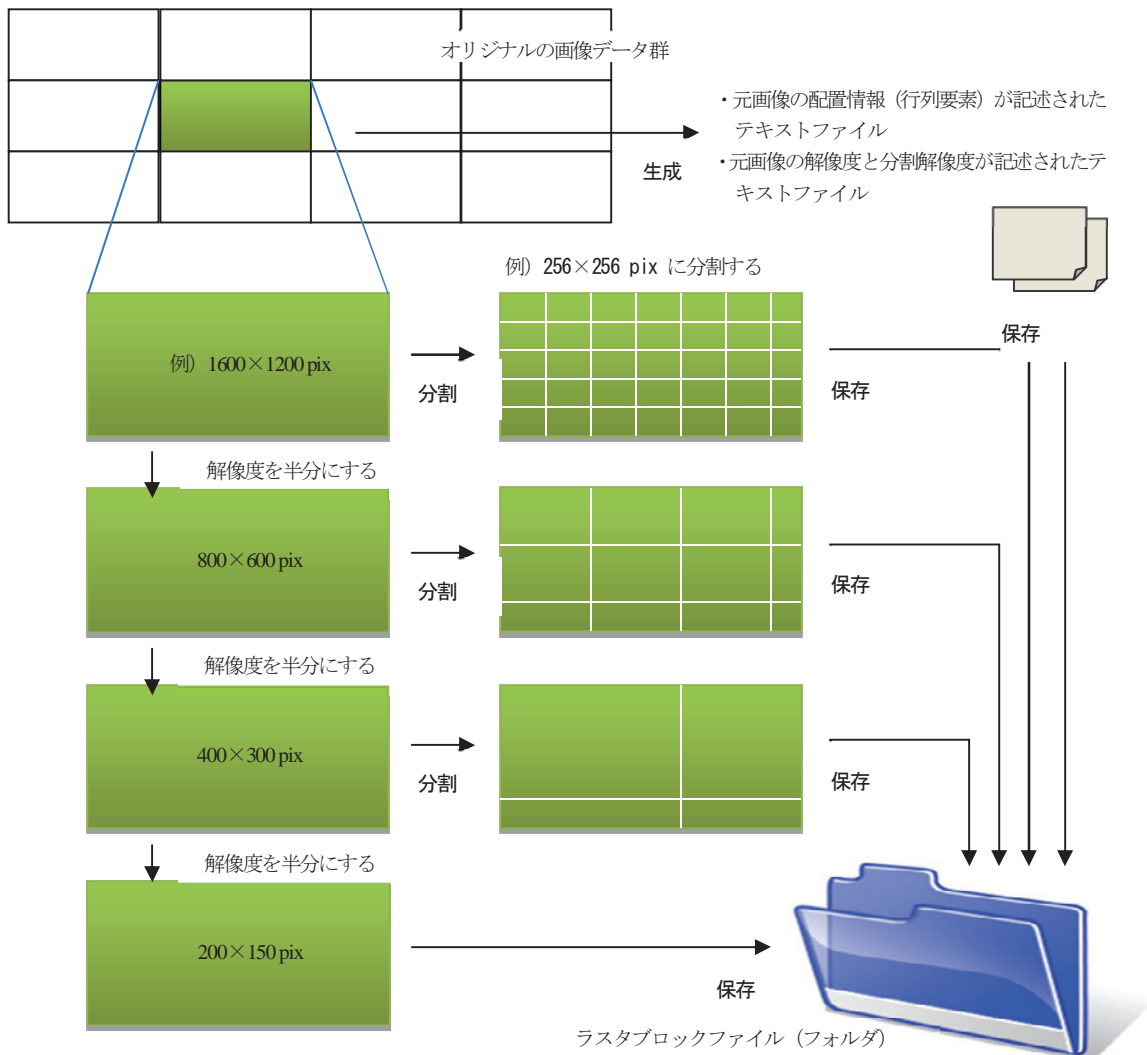


Fig. 11 ラスターブロックファイルの生成
Creation of a raster data block file



Fig. 12 ラスターファイルのピラミッド化処理
Pyramid-ized processing of raster data files

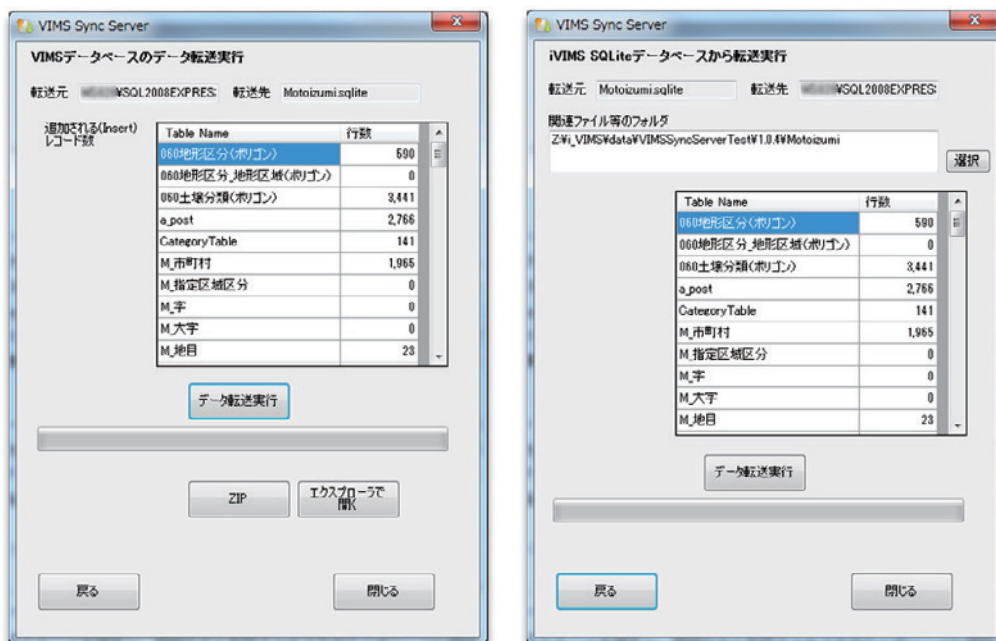


Fig. 13 VIMS・iVIMS 間の転送作業
Transmission work between VIMS and iVIMS

連ファイルおよび変換されたラスターファイルは、1つの圧縮ファイルにすることが必要である。転送処理および変換処理が終了したら、ZIP ボタンを押してフォルダの圧縮を行う。

4.1.3.4 iVIMS から VIMS への転送

iVIMS から VIMS へデータを戻すためには、iPad や iPhone からコピーしてきた SQLite ファイルと、関連ファイル等が保存されているフォルダを指定し、転送する (Fig.13)。

データ転送実行ボタンを押すことで、SQLite データベース内の履歴情報から追加、更新のあったデータを抽出して、Microsoft SQL Server データベースに転送される。この操作によって、更新されたデータをサーバに戻すことができる。

4.2 データ選択機能

4.2.1 データベースの選択

データベースのアイコンを選ぶと、アプリケーションのドキュメントフォルダに存在するデータベースのリストが表示され、このリストから使用するデータベースが選択される。

次に、データベースを選択すると、プロジェクト選択に移行する。データベースがひとつしかない場合は、このリストは表示されず、プロジェクトリストが表示される。

4.2.2 プロジェクトの選択

プロジェクトのリストには、データベース内に保存されてい

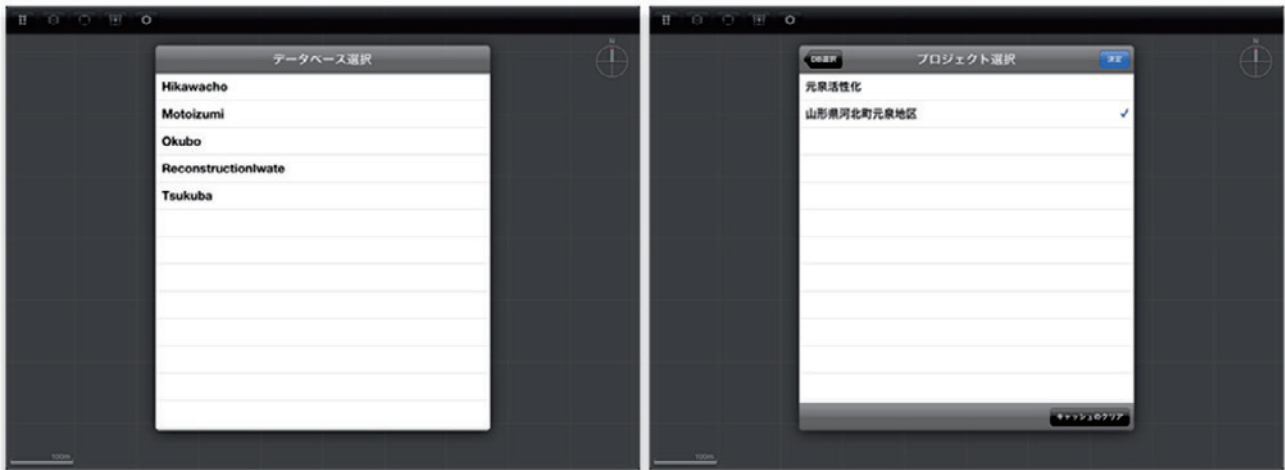


Fig. 14 プロジェクトの選択
Selection of a project

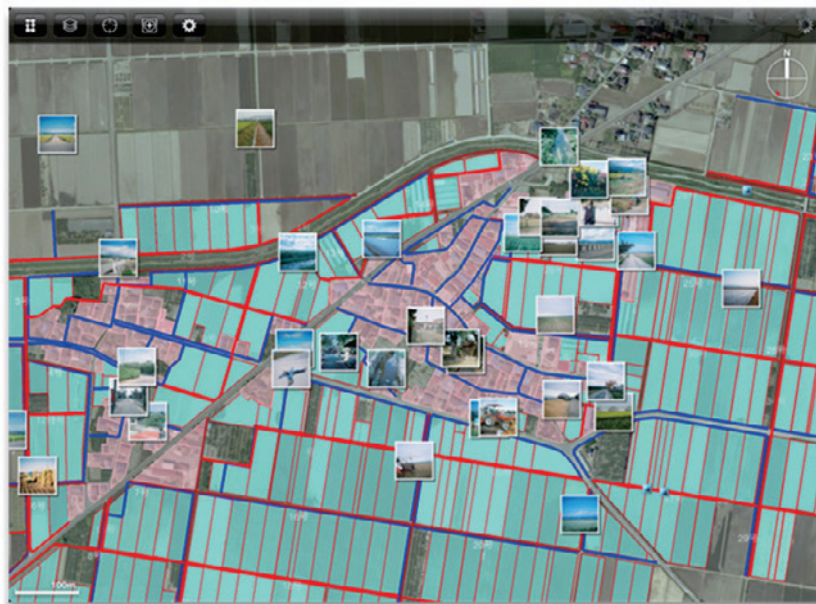


Fig. 15 データのロード画面
Display of data loading

るプロジェクトの名称と説明が表示される (Fig.14)。

説明は、設定されていない場合は表示されない。選択されたプロジェクトは右側にチェックマークが表示される。右上の決定ボタンをタップすることで、プロジェクトの選択が決定され、GIS 地図画面が表示されて、データのロードが開始される。

4.2.3 データのロード

地物などの図形データのうち、ベクターデータについてはデータベースに保存されているため、ロードには時間がかかる。そのため、一度データベースからのロードが完了すると、アプリケーションのキャッシュフォルダにネイティブのファイルを生成して、2 回目以降の起動では、生成されたキャッシュファイルとデータベース内の該当レコードのタイムスタンプを比較して、古いものではない場合にキャッシュファイルからロードすることで、ロード時間の短縮を図る。よって、初めてのロードでは時間を要するが、1 度キャッシュフォルダにファイルがあるものは円滑な表示が可能となる (Fig.15)。

データのロードが開始されると GIS 地図画面が表示され、ロードが完了したデータから順に表示される。

ロード中はツールバーにロード中を示すインジケータが表示されるが、ロード中でも GIS 地図の操作は可能である。ただし若干操作は重くなる。

4.3 GIS 地図画面

GIS 地図画面は GIS 地図部分とツールバーから構成される。ツールバーは iPad では画面の上、iPhone では画面の下に表示される (Fig.16)。

地図の左下にはスケールバーが表示される。スケールバーは、地図のスケールに合わせて特定の大きさに収まるように、表示単位は動的に決定される。また、地図の右上には方位マークが表示される。方位マーク内の赤で示される方向は、センサーから取得された北の方向である。



Fig. 16 GIS 地図画面の構成 (iPad)
Composition of a GIS map screen (iPad)



Fig. 17 地図の操作の使用例
Operation of maps



Fig. 18 オブジェクトの選択画面 (左：図形、右：画像アイコン)
Selection of an object

位置情報サービス (GPS または携帯電話網や Wi-Fi による位置情報取得) が有効であり、かつアプリケーションの設定で現在位置の表示が有効になっている場合は、GIS 地図画面上に現在の位置とデバイスが向いている方向を示すマークが表示される。

4.4 地図の操作

GIS 地図内でドラッグ操作をする (1本の指でタッチしたまま移動する) ことで、指の動きに合わせて地図を上下左右に移動させることができる。また、ピンチ操作をする (2本の指で

タッチし、その間隔を広げたり狭めたりする) ことで地図を拡大または縮小することができる。さらに、2本の指でタッチし、その間隔を一定に保ちながら回転させることで地図の回転を行うことができる。

地図の右上にある方位マークをダブルタップする (1本の指でタッチしてすぐ離すことを2回連続する。PCでのダブルクリック) と、そのときデバイスが向いている方向に地図の回転を合わせることができる。また、方位マークを上方向にスワイプする (1本の指でタッチすると同時に移動させる) と、北が上になるように地図の回転を戻すことができる。回転操作および

方位マークの操作は、当初設計には含まれていなかったが、現場での事前試験を踏まえ、実物との対応をよりわかりやすくするために必要との判断で追加した。

GIS 地図内の選択可能な地物などの図形オブジェクトをタップする（1本の指でタッチし、すぐ離す）と、そのオブジェクトが選択され、その図形を示す吹き出しが表示される。吹き出しに表示されるタイトルは、選択オブジェクトが属するカテゴリ名称だが、オブジェクトが画像アイコンオブジェクトの場合は、関連付けられているファイル名になる。

タップした位置にあるオブジェクトのうち、最も前面にあるレイヤのオブジェクトが選択される。表示された吹き出しの左側にある下向き三角形ボタンをタップすることで、下にあるレイヤのオブジェクトが順に選択される。

オブジェクトを選択し、表示された吹き出しの右側の右向き矢印ボタンをタップすると、そのオブジェクトに関連付けられている属性データのリスト、またはオブジェクトが画像アイコンの場合は、関連付けられている画像が表示される(Fig.17, Fig.18)。

4.5 ツール

ツールバーにあるボタンをタップすることで、カテゴリ分けされたそれぞれのツールを実行する。ツール画面は iPhone では GIS 地図画面全体に重なるように全画面で表示される。そのためそれぞれにキャンセル（または閉じる、戻る）ボタンがある。iPad ではツールバー上のボタンからのポップオーバービューとして表示される。iPad でキャンセルする場合は、ポップオーバービューの外側をタップすることでキャンセルされる（または閉じる、戻る）(Fig.19)。

4.6 データベース/プロジェクトの選択ツール

使用するデータベースとプロジェクトを変更する場合には、キャンセル出来ることを除き、アプリケーションの起動時に表示されるデータベースの選択およびプロジェクトの選択と操作手順は同様である(Fig.20)。

4.7 レイヤツール

レイヤの表示等の設定を行うツールを実行すると、プロジェクトに含まれるレイヤ（カテゴリ）のうち最上位の階層のリストが表示される。フォルダアイコンが示されているものはカテゴリフォルダと呼ぶ。それをタップすることでそのフォルダに含まれている下位の階層のリストが表示される。カテゴリアイコン（右端にあるブロック形状のアイコン）が示されているものはカテゴリすなわちレイヤである。レイヤ名の下に表示されている番号はレイヤのカテゴリ番号である。

リストの最も右側にある四角のボタンに、黄色くチェックマークがついているものは表示されているレイヤ、ついていないものは非表示のレイヤである。ボタンをタップすることで表示と非表示を切り替えることができる。iPad の場合は即座にマップに反映される。

鉛筆ボタンが青で示されているレイヤは、地図メモを新たに作成するときには地図メモデータが追加されるレイヤで、カメラボタンが青で示されているレイヤは、撮影写真を画像アイコンで追加するときにはアイコンデータが追加されるレイヤになる。これらはそれぞれひとつのレイヤだけが選択可能で、ON にすると既に ON だったレイヤでは OFF になる(Fig.21)。

レイヤの表示設定や地図メモレイヤおよび撮影写真レイヤの設定は、デバイスごとに保存される。



Fig. 19 ツールバーとツールパネルの使用例（左：iPad、右：iPhone）

The example of a tool bar and a tool panel

4.8 表示ツール

表示ツールを実行すると、**Fig.22** の左に示すコマンドボタンが表示される。

「プロジェクト初期位置へ」は、プロジェクトに設定されている初期の中心座標とスケール指標（保存されているカメラ高度からスケール値に換算）に地図がアニメーションで移動する。

「現在位置 (GPS) へ」は、取得された現在位置に地図がアニメーションで移動する。このボタンは位置情報サービスが有効でない場合は表示されない。位置取得サービスが有効であっても、5秒以内に位置を取得することができなかつたり、座標がデータの存在する範囲外の場合は、移動はキャンセルされる。

「選択図形へ」は、選択された図形オブジェクトがマップ画面に収まる位置・範囲に地図がアニメーションで移動する。このボタンは図形オブジェクトが選択されていない場合は表示されない。

「AR を開始」は、AR モードを開始する。AR モードについてはVI章に詳細で説明する。

4.9 データツール

データツールを実行すると、**Fig.22** の右にあるコマンドボタンが表示される。

「写真をアイコンで追加」は、写真を画像アイコンオブジェク



Fig. 20 データベースの変更 (左) とプロジェクトの変更 (右)

Change of a database and change of a project



Fig. 21 レイヤ (左: 最上位レイヤ、中: 下位階層レイヤ、右: レイヤの設定)

Composition of layers



Fig. 22 表示ツール、データツール

The tools on display, the tools on the data

トとして追加する。

「写真を選択図形に関連」は、写真を選択された図形オブジェクトに関連させる。このボタンは図形オブジェクトが選択されていない場合は表示されない。「同レイヤ写真検索」は、選択された図形オブジェクトと同じレイヤの中で、写真が関連付けられているオブジェクトを検索して、ハイライト表示する。このボタンは図形オブジェクトが選択されていない場合は表示されない。この機能は設計段階では含まれていなかったが、事前試験の結果、必要と判断され追加した機能である。「地図メモを開始」は、地図メモモードを開始する。「距離を計測」は、距離計測モードを開始する。尚、それぞれのツールについてはV章で説明する。

4.10 アプリ設定ツール

環境設定ボタンにアプリケーションのツールの設定機能を集約している(Fig.23)。

「現在位置を表示」をONにすると、位置情報サービスが有効である場合に、マップ内に現在位置とデバイスの向いている方向が表示される。また、「位置情報補正」では、位置情報の補正をしないか、自動補正をするか、手動で位置を指定するかを選択する。位置情報の自動補正はAR機能の利用において主要な課題となることから、VI章に詳しく説明する。尚、手動位置指定は、GPS機能が使えない場合でも、ユーザーがオルソ地図上での位置を確認できるならば、地物の情報確認において有効な機能となるとの判断で、当初設計には無かったが追加した。これは、GIS地図画面においてロングタッチ(長押し)すると、その位置を現在位置として任意に指定できる機能である。



Fig. 23 アプリ設定ツール
The setting tool of application

「補正参照データの管理」は、位置情報の自動補正の際に使用する補正参照データの管理モードを開始する。位置情報の補正参照データの管理モードについてはVI章で説明を行う。

「移動時の省略描画」は、ONにすると、マップの移動、ズーム、回転操作をした際に、ポリゴンの塗りつぶしを省略し、画面内で一定の大きさ(下記の最小サイズ)以下の図形は描画しないという処理によって、操作がスムーズになる。「最小サイズ」は、移動時の省略描画がONのとき、この大きさ以下の図形はマップの移動、ズーム、回転操作をした際に描画されない。これも操作をスムーズにするための機能として設けた。

「撮影写真のアルバム保存」は、これをONにすると、写真を撮影して画像アイコンを追加したり、既存図形オブジェクトに関連付けした際に、写真データをアプリケーション内に加えて、システムの写真アルバムにも保存する。

「端末識別名」は、データを追加した際に、追加したユーザーが識別できたほうが望ましいと判断して追加した機能である。デフォルトではシステムで設定されているデバイス名だが、ユーザーが任意の文字列に変更することができる。この文字列は、写真を追加した際に、データベース内にファイルオーナーとして記録される。つまり、将来的な利用において、更新データの責任所在を明らかにし、不正操作等に対するセキュリティを向上するものである。

V 地域資源保全・管理対応のオンサイト機能

5.1 写真撮影・登録機能

5.1.1 写真撮影

iPhoneやiPadのカメラで写真を撮影し、地図にそのアイコンを追加したり、選択された既存の図形オブジェクトに関連付けるには、データツールから「写真をアイコンで追加」または「写真を選択図形に関連」を選択したのち、「カメラで写真撮影」を選択する(Fig.24)。

「カメラで写真撮影」を選択すると、カメラ撮影画面になる。カメラ撮影画面には、撮影を行うシャッターボタンと撮影をキャンセルするキャンセルボタン、フラッシュが搭載された機種であればフラッシュのON/OFF/AUTOの切り替えボタンがある。カメラのプレビュー画面をタップすると、タップされた場所にピントや露出が合うように調整される(Fig.25)。

写真をアイコンで追加する場合は、シャッターボタンをタップして写真が撮影されると、写真の位置情報の調整画面になる。最初は現在位置が示されている。

地図をドラッグすることで、写真の位置情報を調整することが可能である。ツールバー左の「取得位置」ボタンで、取得された現在位置に戻ることができる。また、位置情報の補正モードが手動指定位置になっていない場合は、「補正に使用」ボタンをONにすれば、取得された現在位置とここで写真を配置する位置の関係を、位置情報の補正のための参照データとして保存することができる(実際に保存されるのは写真が保存されるタ



Fig. 24 写真追加ツール (カメラで写真撮影) の選択
Selection of a photograph addition tool(camera)



Fig. 25 カメラ撮影画面 (左: iPad、右: iPhone)
A photography screen with a camera



Fig. 26 写真位置情報の調整の使用例
Adjustment of the position information on a photograph

イメージである)。位置情報の補正については、VI章を参照のこと。取消ボタンで写真撮影をキャンセル、保存ボタンで写真が地図にアイコンとして追加される (Fig.26)。

写真を選択図形に関連付ける場合は、シャッターボタンをタップして写真が撮影されると、撮影写真が保存され、選択図形に関連付けられる。

5.1.2 ライブラリからの写真追加

iPhone や iPad に保存されているライブラリから既存の写真を選択し、地図にそのアイコンを追加したり、選択された既存の図形オブジェクトに関連付けるには、データツールから「写真をアイコンで追加」または「写真を選択図形に関連」を選択したのち、「ライブラリから写真追加」を選択する。

「ライブラリから写真追加」を選択すると、ライブラリが一覧表示されるので、追加したい写真を選択する (Fig.27)。

写真をアイコンで追加する場合は、ライブラリから写真が選択されると、写真の位置情報の調整画面になる。選択した写真が有効な位置情報を持っている場合は、最初はその位置が示される。位置情報がないか、あっても現在閲覧しているプロジェクトのデータ範囲外の場合は、表示されている地図の中心となる。地図をドラッグすることで、写真の位置情報を調整することが可能である。ツールバー左の「取得位置」ボタンで、取得された現在位置に戻ることができる。また、位置情報の補正モードが手動指定位置になっていない場合は、「補正に使用」ボタンを ON にすれば、取得された現在位置とここで写真を配置

する位置の関係を、位置情報の補正のための参照データとして保存することができる (実際に保存されるのは写真が保存されるタイミングである)。取消ボタンで写真撮影をキャンセル、保存ボタンで写真が地図にアイコンとして追加される。

写真を選択図形に関連付ける場合は、ライブラリから写真が選択されると、アプリケーション側のデータとして選択写真が保存され、選択図形に関連付けられる。

5.1.3 写真検索

選択されている地物(図形オブジェクト)と同じレイヤの中で、写真が関連付けられているオブジェクトを検索するには、データツールから「同レイヤ写真検索」を選択する。選択すると、同じレイヤにあるオブジェクトが走査され、写真が関連付けられている地物(図形オブジェクト)がハイライト表示される。この操作は時間がかかる場合がある。

どのレイヤに写真を保存したのかは調査者が調査目的に応じて記憶しておく必要があるが、どの地物に写真を保存したかはわからなくなる場合がある。現場で撮影した写真の整理では、一般的に、写真番号と野帳や地図につけた位置との照合を行なうが、量が多くなるとたいへん困難な作業である。本システムでは、これに対して、VIMS から iVIMS へのデータ更新を正確に行なう上でも、写真の照合の効率化のために本機能を搭載した。この機能は設計段階では含まれていなかったが、事前試験の結果、必要と判断され追加した機能である。

5.2 地図メモ機能

5.2.1 地図メモの管理

地図上にメモを描画して追加したり、既存の地図メモを削除したりするには、データツールから「地図メモを開始」を選択する。選択すると地図メモの管理画面になる。ただし、レイヤツールで地図メモレイヤが設定されていない場合は地図メモの管理を行えないので、事前に設定しておく必要がある。一度設定されたプロジェクトでは、次のセッションでも設定は有効である (Fig.28)。

地図メモ管理画面のツールバー左 2 番目のスイッチで、地図メモレイヤの表示/非表示を切り替えることができる。

地図に表示されている既存の地図メモをロングタッチ (長押し) することで、その地図メモが選択され、メモを示す吹き出しが表示される。ロングタッチした位置にある地図メモのうち、最も前面にある (新しい) 地図メモが選択される。表示された吹き出しの左側にある下向き三角形ボタンをタップすることで、下にある地図メモが順に選択される。

表示された吹き出しの右側にある赤い×印のボタンをタップすることで、その地図メモを削除することができる。ただし、その地図メモが VIMS と既に同期されたものか、あるいは本アプリ内の機能でメール送信されたもの場合は、削除はできない (Fig.29)。

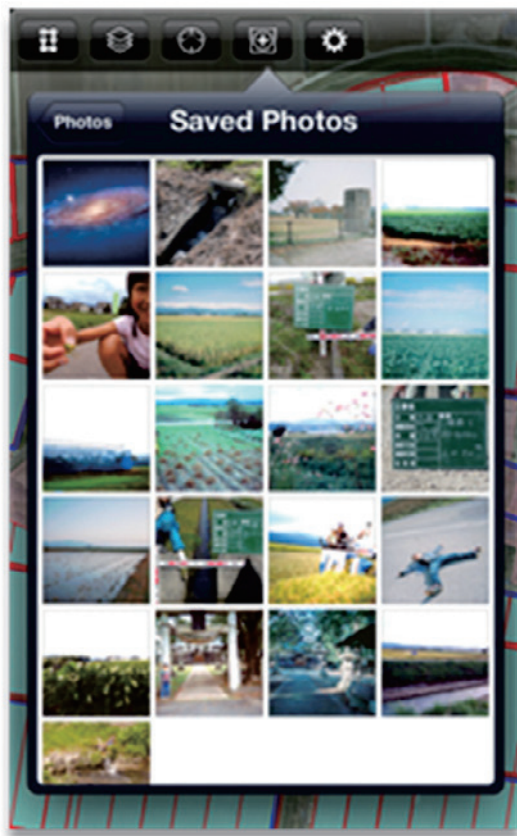


Fig. 27 ライブラリからの写真選択
Photograph selection from a library



Fig. 28 地図メモツールの選択と地図メモ管理画面
Selection of a map memo tool, and a map memo management screen



Fig. 29 地図メモレイヤの選択
Selection of a map memo layer

5.2.2 地図メモの描画

地図メモ管理画面でツールバー左の鉛筆ボタンをタップすると、新規の地図メモ描画面になる。描画は5つのツールが用意されている。iPadでは、各々のボタンをタップしてツールを切り替える。iPhoneでは、現在のツールを示すアイコンのボタンをタップして、表示されるメニューからツールを選択する。

保存ボタンによって保存されるまで描画されたものが、ひとつの地図メモとして保存される。取消ボタンは、描画されたものを破棄して管理画面に戻る(Fig.30)。

描画ツールとしては、フリーハンドで線や文字を描くためのペンツール、単純な直線を描くためのラインツール、文字をソフトウェアキーボードから入力して描くためのテキストツール、寸法線を描くためのメジャーツール、描画したものの一部を消去するための消しゴムツールを準備した。それぞれ、描画設定ボタンで、ペンの色と線幅、フォントタイプ(標準/太字)、フォントサイズ(小/中/大)、文字色等を選択できる(Fig.31)。

5.2.3 距離計測

地図上で2点間の距離を計測するには、データツールから「距離を計測」を選択する。選択すると距離計測画面になる。距離計測中は地図の移動や拡大/縮小、回転はできないので、計測したい場所が表示されるように、距離計測を選択する前に地図

を調整する必要がある。

距離計測画面では、ツールバー左で距離計測タイプを選択できる。距離タイプの場合、地図上でタッチした位置とドラッグした位置の間の寸法線と距離が表示される。半径タイプの場合、地図上でタッチした位置を中心としてドラッグした位置を半径とした円とその間の寸法線と距離が表示される。距離の単位は、1000m未満の場合は0.1mまでのメートル、1000m以上の場合は0.1kmまでのキロメートルとなる。地図メモレイヤが設定されていれば、ツールバー右の「地図メモに保存」ボタンにて、現在表示されている計測結果を地図メモとして保存することが可能である(Fig.32)。

5.2.4 地図メモ送信機能

本開発では、オンサイトでの通信環境が不十分である可能性を考慮し、元のデータベースを直接参照することをせず、ローカル環境においてコピーする手法を採っているが、特に災害時のデータ収集など、場合によってはリアルタイムに取得データが反映されることが重要になるため、本アプリケーションにメール送信機能を付加することとした。

地図メモ管理画面で、地図メモが選択されている場合、ツールバー右にメールボタンが表示され、選択された地図メモの画像をVIMSのサーバにメール送信することができる。



Fig. 30 地図メモの描画操作
Drawing operation of a map memo

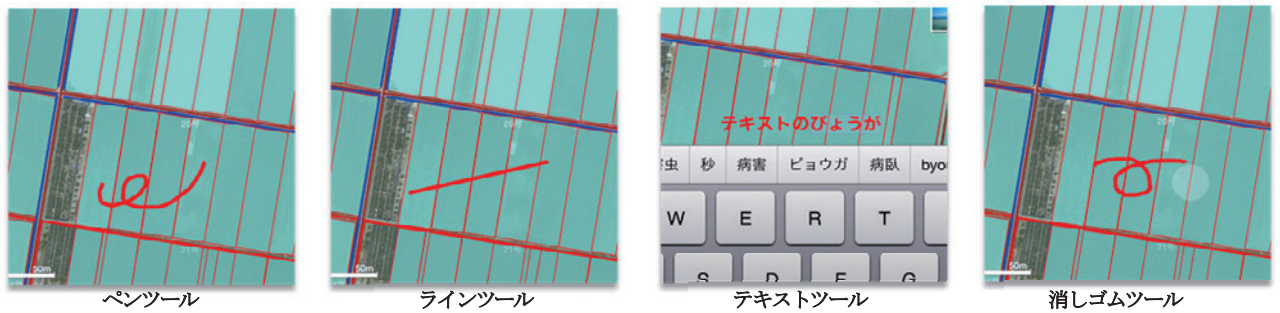


Fig. 31 描画ツール
Drawing tool

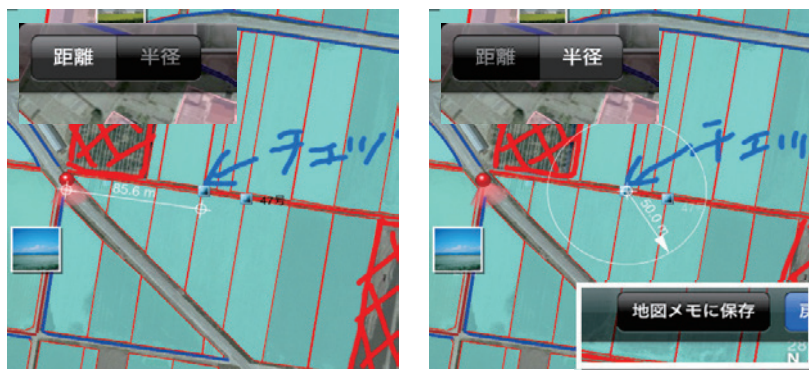


Fig. 32 距離計測の使用例 (左：距離タイプ表示、右：半径タイプ表示)
Distance measurement tool

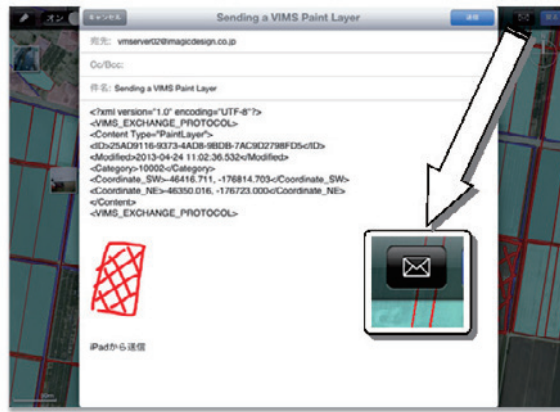


Fig. 33 地図メモのメール送信の例

E-mail transmission of a map memo

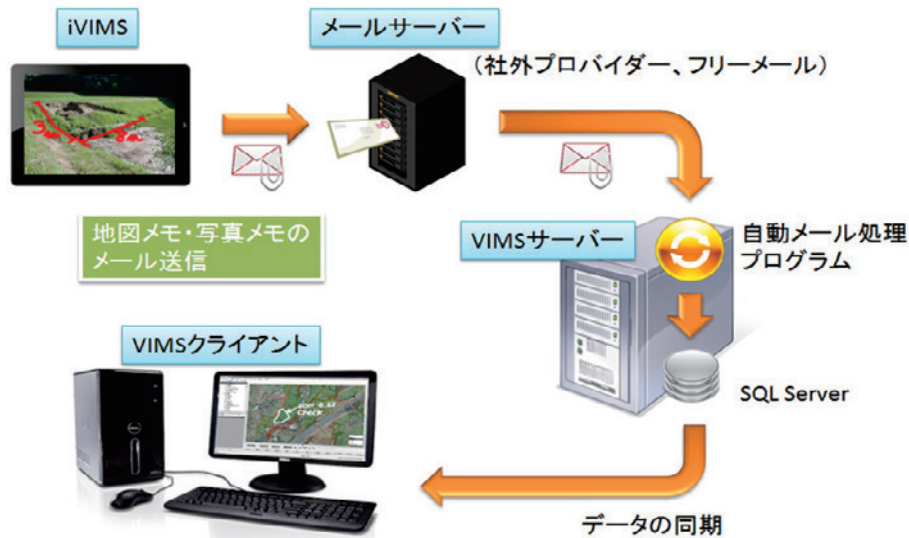


Fig. 34 地図メモのメール送信の流れ

The flow chart of E-mail transmission of a map memo

メールの本文は、受信した VIMS サーバが地図メモを自動配置できるように、地図メモの位置座標値やカテゴリ等が記述されている XML 文字列となる。通常は、メールボタンで表示されるメール送信ビューでそのまま送信ボタンを押すことで、VIMS のサーバに送信することができるが、アドレスや本文を編集して送信することも可能である。

本システムは、基本的には日常管理に対応したシステムとして開発したものである。現場での施設点検、設計図面との照合、前回写真データからの変異の状況を、現場で即座に確認する場合や、現場の技術者だけでは対応策が判断できず、専門家とのデータ共有により指示を得たい場合により有効に活用できる (Fig.33)。

しかし、日常的な管理と災害時対応は、実際には連続しているものであり、日常管理時の情報を災害時に参照することはよくあるし、また、災害時の早急に情報を共有することが望ましい場合もある。災害時には、通信状況が不安定な場合もあり、本システムで搭載している民間通信網を使う方法では十分に機能を果たさない場合も考えられるが、補助的に機能をつける意味はあると思われたので、本機能を搭載する。(Fig.34)

5.3 関連データの表示と編集

5.3.1 属性データの表示と編集

地図上で図形オブジェクトを選択し、表示された吹き出しの右側の右向き矢印ボタンをタップすると、そのオブジェクトが画像アイコンではない場合は、オブジェクトに関連付けられている属性データのリストが表示される。リストでは、関連付けられているデータが通常の属性データの場合は、テーブルアイコンとともにそのテーブル名と最終更新日時が表示され、関連ファイルの場合は、ファイル名と最終更新日時が表示される。関連ファイルが画像ファイルの場合は画像のサムネイルが、その他のファイルの場合はファイル種類別のアイコンが合わせて表示される。リストにて、通常の属性データを示すテーブルをタップすると、保存されているその属性データが表示される。上部のタイトルはテーブル名である (Fig.35)。

表示された属性データの各フィールドをタップすると、そのフィールドの編集モードになる。属性データの編集は、ソフトウェアキーボードで入力する。編集を開始すると、右上のボタンが保存ボタンに変わる。保存ボタンをタップすることで編集内容がデータベースに保存される。編集をキャンセルするには、

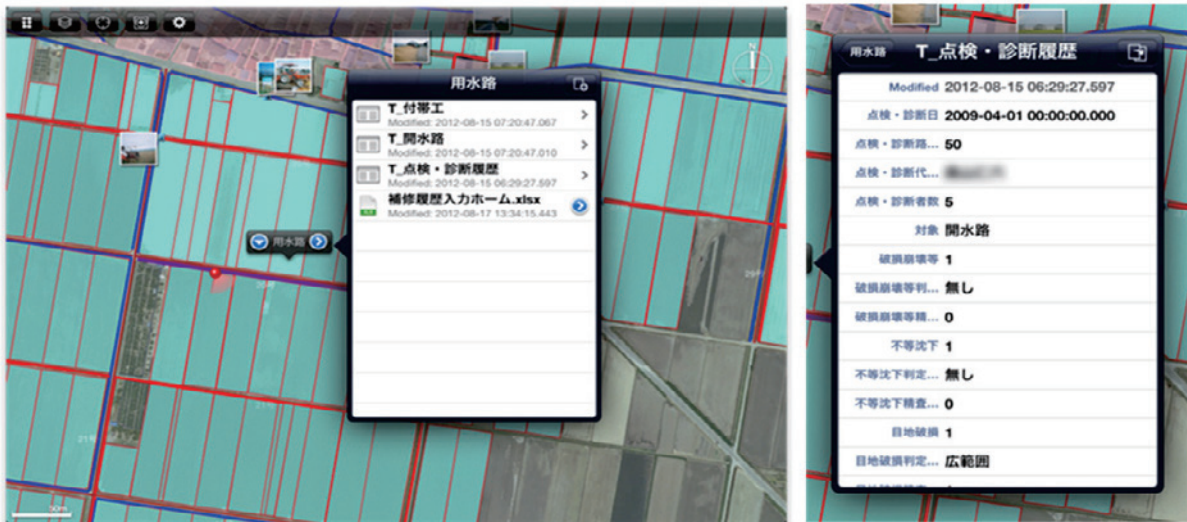


Fig. 35 関連属性データテーブル・属性データの表示
Display of a related attribute data



Fig. 36 属性データの編集 (左：iPad 一部, 右：iPhone)
Edit of attribute data

Fig.37 属性データの編集操作
Editing operation of attribute data

iPhone の場合は左上のキャンセルボタン、iPad の場合はパネル左上のテーブルリストに戻るボタンをタップするかリストパネルの外側をタップする(Fig.36、Fig.37)。

5.3.2 属性データの複製と削除

編集モードでないとき、表示されている属性データを複製することが可能である。右上の複製ボタンをタップすると、属性データが複製され表示されるので、適宜内容を編集する。保存ボタンで実際にデータベースに保存され、選択オブジェクトに関連付けられる。

その属性データが iVIMS で新たに作成されたもので、かつ VIMS と同期されていない場合は、複製ボタンの左側に削除ボタンが表示される。属性データを削除することが可能である (Fig.38)。

この機能は、例えば、以前のデータを残したまま、新しいデータを更新する場合に利用する。昨年度の調査における水路点検履歴のデータをそのままコピーして今年の調査データとして利用し、部分的にデータが更新されたところだけデータを変え

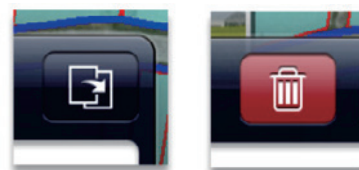


Fig. 38 属性データの複製ボタンと削除ボタン
The functions of duplicate and deletion of attribute data

ておくことができる。また、現在はデータベースには無い項目であるが、VIMS に登録されているフォームであれば、オンサイトで、急遽データベースを追加して、セットすることができる。例えば、気温や水温等の環境管理用のデータベースでの整理を去年まではしていなくても、現地データが入手できた場合に、急遽、本機能を使ってセットして、データを新たに書き込み、登録することができる。オンサイトで臨機応変の対応に追従した機能として使える。但し、調査は計画的に行うことが重要であるから、本来は VIMS 本体でセットされていることが望ましい。

5.3.3 属性データの追加

属性データのリスト表示にて、右上の属性追加ボタンをタップすることで、新たに属性データを関連付けることが可能である。表示されたテーブルのリストから関連付けるテーブルを選択し、表示された空の属性データを適宜編集して保存する。空のままの属性データは保存できない (Fig.39)。

なお、属性データの複製、削除、追加機能は設計段階では含まれていなかったが、事前試験の結果、必要と判断され追加した機能である。

5.3.4 関連画像ファイル表示と画像メモの管理

マップで画像アイコンオブジェクトを選択し、表示された吹き出しの右側の右向き矢印ボタンをタップすると、オブジェクトに関連付けられている画像が表示される。また、画像アイコン以外のオブジェクトから表示される属性データのリストにて、

関連付けられている画像ファイルの右側の右向き矢印ボタンをタップしても、その画像が表示される (Fig.40)。

5.3.5 画像ファイルの表示と操作

画像は画像上のピンチ操作で2倍まで拡大することが可能である。拡大時にはドラッグ操作で移動することが可能である。

表示画面のツールバー以外の部分をタップすると、ツールバーとファイル情報パネルを非表示にして、全画面で画像を閲覧することができる。

再度タップすれば元の表示に戻る。ツールバー右の赤いごみ箱ボタンをタップすることで、その画像を削除することが可能である。ただし、その画像が VIMS と既に同期されたものか、あるいは本アプリ内の機能でメール送信されたもの場合は、削除はできない。

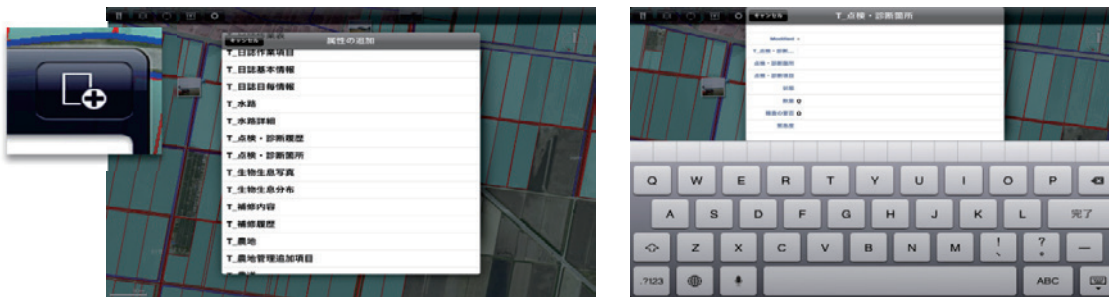


Fig. 39 追加属性データテーブルの選択とデータの編集
Selection of an additional attribute data table, and edit of data



Fig. 40 関連画像ファイルの表示
The display of a related image file



Fig. 41 画像メモの管理
Management of a picture memo

5.3.6 画像メモの管理

関連画像の表示画面は、画像メモの管理画面を兼ねている。ツールバー左2番目のスイッチで、画像メモの表示/非表示を切り替えることができる。

画像上に表示されている既存の画像メモをロングタッチ（長押し）することで、その画像メモが選択され、メモを示す吹き出しが表示される。

ロングタッチした位置にある画像メモのうち、最も前面にある（新しい）画像メモが選択される。表示された吹き出しの左側にある下向き三角形ボタンをタップすることで、下にある画像メモが順に選択される。

表示された吹き出しの右側にある赤い×印のボタンをタップすることで、その画像メモを削除することができる。画像メモは地図メモと違い、VIMS と既に同期されたものや画像がメール送信されたものの場合でも削除が可能である(Fig.41)。

5.3.7 画像メモの描画

画像ファイルの表示画面でツールバー左の鉛筆ボタンをタップすると、新規の画像メモ描画面になる。描画は4つのツールが用意されている。iPad では、各々のボタンをタップしてツールを切り替える。iPhone では、現在のツールを示すアイコンボタンをタップして表示されるメニューから選択する。

地図メモと同様に、設計ではツールはペンツールのみとしていたが、事前試験の結果、ラインツール、テキストツール、消しゴムツールを追加するとともに、それに合わせて操作方法の仕様を変更した。

保存ボタンによって保存されるまで描画されたものが、ひとつの画像メモとして保存される。取消ボタンは、描画されたものを破棄して画像ファイル表示画面に戻る。

画像メモの操作は、メジャーツールがないことを除き、地図メモと同様である。5.2.1を参照のこと。

5.3.8 関連文書ファイルの表示

画像アイコン以外のオブジェクトから表示される属性データのリストにて、関連付けられている文書ファイルの右側の右向き矢印ボタンをタップすると、その文書をプレビューすることができる。ただし、iPad や iPhone でプレビューが可能な以下の形式に限る。これらは、リスト左側に表示されているアイコンがファイル種類別のアイコンになっていることと、右側に青丸矢印のボタンがあることで判別できる。

- ・ iWork ドキュメント
- ・ Microsoft Office ドキュメント (Office 97 以降)
- ・ リッチテキストフォーマット (RTF) ドキュメント
- ・ PDF ファイル
- ・ public.text に準拠した UTI (Uniform Type Identifier) を持つテキストファイル
- ・ カンマ区切り (CSV) ファイル

ただし、特に Microsoft Office ドキュメントは、オリジナルと書式等が異なる表示になる場合がある。



Fig. 42 関連文書ファイルの表示
The display of a related document file

その他の文書ファイルは、ファイルの属性が通常の属性データとして表示される。

操作は文書ファイルの形式によって若干差異があるが、基本的にはドラッグ操作でスクロール、ピンチ操作で拡大/縮小となる。

表示画面のツールバー以外の部分をタップすると、ツールバーを非表示にして、全画面で文書を閲覧することができる。再度タップすればツールバーが表示される。

ツールバー右の送るボタンをタップすると、その文書に対して OS で用意されている操作（メール送信、プリントなど）か、この種類の文書を読み込み可能な他のアプリを指定して実行することができる (Fig.42)。

VI 現地調査の円滑化を補助する AR 技術

6.1 AR 機能の概要

バーチャル・リアリティ VR(Virtual Reality)は「仮想現実」と一般的に訳されており、簡単に言うと、コンピュータ内に構築された仮想空間を可視的にユーザーに提示するものである。それに対して、AR(Augmented Reality)は「拡張現実」と言われる機能であり、VR の進化した技術である。VR が仮想空間の可視化であったのに対して、AR では、現実空間に複合的に仮想空間を重ね、様々な情報を付加する。本システムでは、農業農村整備事業現場において利用することを想定し、農地や水路の施設位置や関係する画像や図面情報を重ね合わせる技術を開発する。しかし、この技術は農業農村整備事業現場での利用に留まらず、観光での利用が想定される文化資源の案内看板や教育面での利用としての子供たちの生物観察のための教材としての利用等も可能である(小林,2010)。

技術的には、仮想空間における視点の位置・方向・画角をモバイルデバイスのカメラ（現実世界における視点）の位置・方向・画角にぴったり合わせることで、カメラから取り込んだ現実の映像の上に仮想空間のコンピュータ映像をリアルタイムに合成する。カメラを左右に振っても仮想空間側の映像もそれに

追従して重なっていることで、あたかも現実の映像に仮想の情報が付加されて見える。合成する情報は様々なものがあり、名称や説明のような文字情報だけの場合もあれば、まだそこにはない建築物のような CG イメージの場合もある。例えば地下に埋設されている水道管は、地上からは現実には見えていなくても、モバイルデバイスをかざすと地中の水道管のラインが見える、というようなことができる。

重要な点は、現実のカメラの位置と方向をいかに正確に取得して、仮想空間の視点を制御して映像をいかに高速に表示して合成するかが違和感のない自然な拡張現実感につながる。

カメラ位置の検出を行う方法には、GPS・電子コンパス・加速度計によるものと、特別なパターンを印刷したマーカーをカメラに写しこんでカメラ位置を推定する方法があり、適用範囲や規模に応じて使い分けられる。また、描画しようとする仮想空間内のオブジェクトの量が多いとレンダリングするのに時間がかかり、フレームレート（1秒間の描画回数）が低下し滑らかさが失われてしまう。そのため、ある程度軽いモデルでないと違和感が出てしまう。

GIS のデータを使って AR を行う場合は、航空写真や地形図のようなラスター系のデータは描画が重くなることと、人の視線レベルまで下がってしまうと近すぎて画像がぼけてしまうため、ラスター系データは使わずに、ポイントやラインとポリゴンで表されるベクター系データのみとした。

PC 上で動作する VIMS では、高さのないベクター系データも標高メッシュに沿わせるように頂点に高さを与えることで 3 次元化する機能があるが、iVIMS では高さを持たないままの 2.5 次元で表示させている。

また、不必要に遠方のデータを描画することを避け、規定した範囲だけを描画するようにして描画の高速化に努めている。

GPS・電子コンパス・加速度計のセンサーの精度は重要な課題である。GPS の精度は 10m 程度、電子コンパスは周りの環境や地磁気の影響を受けやすい。これらの精度が悪いとやはり合成する映像がずれて違和感が出てしまう。しかし、センサーの精度はセンサーデバイスの問題であることから、ハードの向上に頼るしか無く、ここでは、位置補正や高さ補正などの機能を付加することで、対応した。以下、ここでは、AR 機能の操作方法について説明する。

6.2 AR 画面とその操作

6.2.1 AR 画面の構成

GIS 地図画面の表示ツールから「AR を開始」を選択すると、AR モードになり AR 画面が表示される。ただし位置情報サービスが有効になっていることが必要である。AR 画面は、AR の表示部分とツールバーから構成される。ツールバーは iPad では画面の上、iPhone では画面の下に表示される(Fig.43)。

AR の表示部分は、カメラで写されている画像の上に、その時の位置情報とデバイスの姿勢情報から計算された角度で、設定された相対高さの平面上にデータが表示される。画像アイコンオブジェクトについては、その平面から 1.5m の高さの位置に表示され、平面上の当該位置まで白の線で垂直に結ばれる。画像アイコンは近くのものほど大きく表示される(Fig.44)。

6.2.2 AR の操作

AR は、カメラで見えている範囲のデータを表示するという原理上、その操作は基本的にはデバイスの姿勢（位置と角度）に依存する。



本報告書内で使用されている AR の画像は、わかりやすさを優先し、背景にカメラ画像ではなく 1 つの静止画を代替的に表示しているものを使用したが、実際に動作している画面も全く同様のものとなる。

Fig. 43 AR 画面の構成 (左: iPad、右: iPhone)
Composition of AR(Augmented Realty) screen

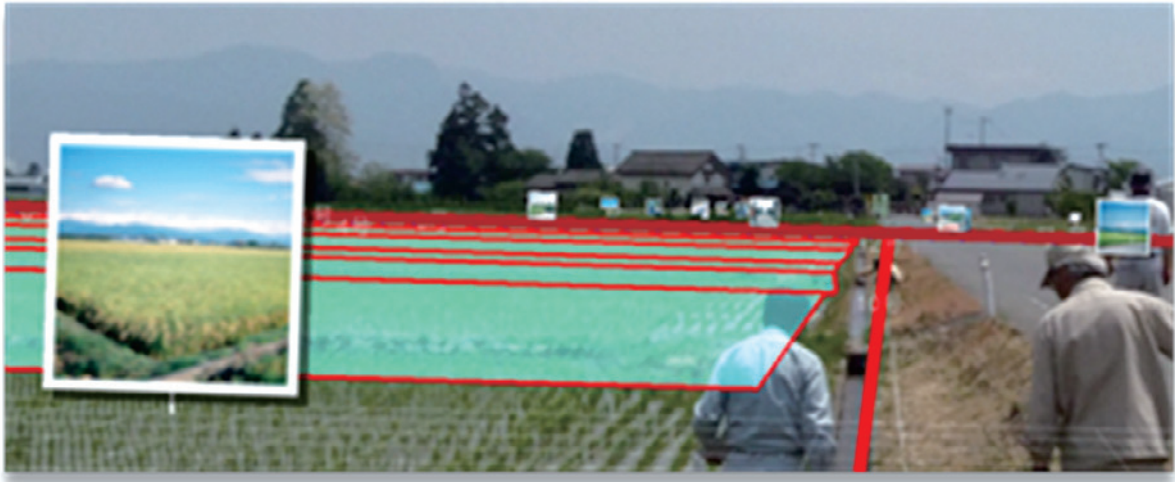


Fig. 44 画像アイコン
Picture icon

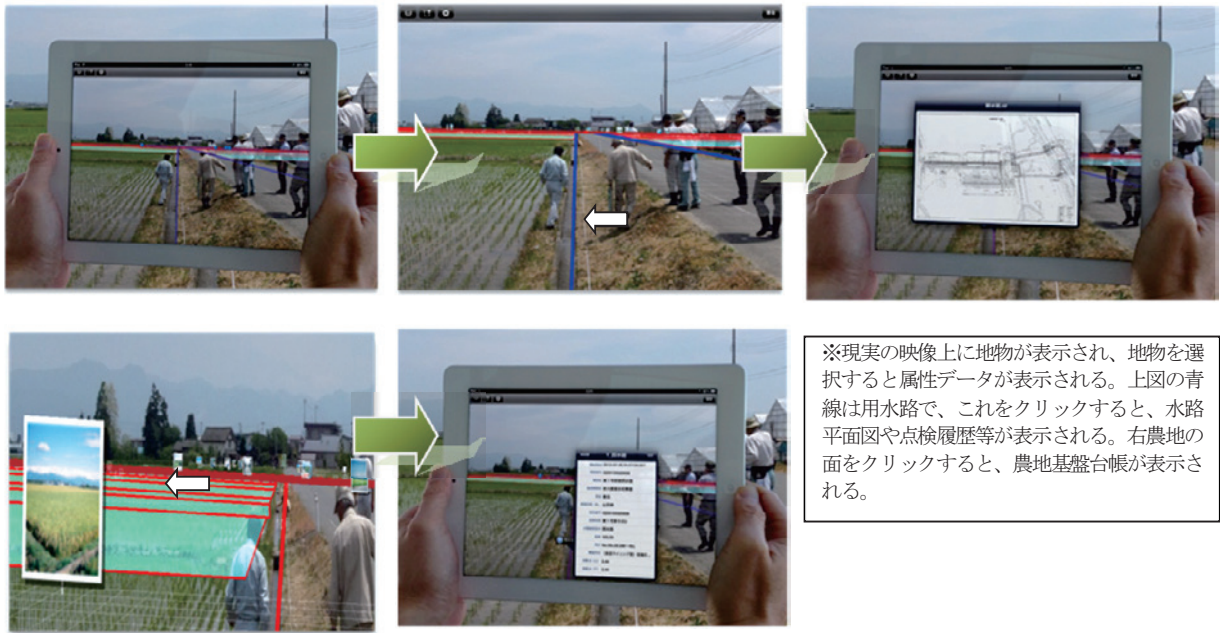


Fig. 45 AR の操作
Operation of AR(Augmented Realty) functions



オブジェクトの選択 (左: 図形、右: 画像アイコン)

Fig. 46 オブジェクトの選択の例
Selection of an object



Fig. 47 ツールバーとツールパネルの例 (左: iPad, 右: iPhone)

The example of a tool bar and a tool panel

タッチ操作によって移動したり拡大縮小したりすることはない。ただしデータが表示される相対的な高さは変更することが可能である。AR の表示部分で、2 本または 3 本の指で上下にドラッグ操作をすることで、リアルタイムに変更できる。変更操作中は画面右下に相対高さの数値が表示される。

AR 表示部分内の選択可能な地物などの図形オブジェクトをタップすると、そのオブジェクトが選択され、その図形を示す吹き出しが表示される。オブジェクトが選択されると、画面はロックされる。吹き出しに表示されるタイトルは、選択オブジェクトが属するカテゴリ名称だが、オブジェクトが画像アイコンオブジェクトの場合は、関連付けられているファイル名になる(Fig.45)。

タップした位置にあるオブジェクトのうち、最も前面にあるレイヤのオブジェクトが選択される。表示された吹き出しの左側にある下向き三角形ボタンをタップすることで、下にあるレイヤのオブジェクトが順に選択される(Fig.46)。

オブジェクトを選択し、表示された吹き出しの右側の右向き矢印ボタンをタップすると、そのオブジェクトに関連付けられている属性データのリスト、またはオブジェクトが画像アイコンの場合は、関連付けられている画像が表示される。

オブジェクトの選択による画面のロックを解除するには、データのない位置をタップするか、左右どちらかにスワイプ操作をして、オブジェクトの選択を解除する。

6.2.3 ツール

ツールバーにあるボタンをタップすることで、カテゴリ分けされたそれぞれのツールを実行する。ツール画面は iPhone では AR 画面全体に重なるように全画面で表示する。そのためそれぞれにキャンセル (または閉じる、戻る) ボタンがある。iPad ではツールバー上のボタンからのポップオーバービューとして表示される。iPad でキャンセルする場合は、ポップオーバービ

ューの外側をタップすることでキャンセルされる(Fig.47)。

6.2.3.1 レイヤツール

GIS 地図画面におけるレイヤツールと共通である。ここでの設定は、GIS 地図画面のレイヤ設定と共通であり、GIS 地図画面に戻った時にも反映される。

6.2.3.2 ロックツール

このボタンを ON にすることにより、AR 表示部分をロックしてオブジェクトの選択が容易になる。ロックを解除するには、再度ボタンをタップする(Fig.48)。



Fig. 48 ロックツール (左: OFF, 右: ON)

Lock tool

6.2.3.3 表示設定ツール

「ポリゴン距離」は、遠くの図形オブジェクトが、地平線近くに重なって表示されるため意味のないものになるためと、描画の負荷が多くなってしまいうため、指定したポリゴン距離よりも近いものだけを描画させる機能として搭載とした。「アイコン距離」は、画像アイコンオブジェクトやプレスマークオブジェクト、ラベルオブジェクトについても上記他の図形オブジェクトと同様だが、より遠いものでも表示すべき状況が想定されるため、別な距離を設定できるようになっている。このアイコン距離よりも近いものだけ描画される。「表示相対高さ」は、データを表示するカメラからの相対高さを設定する。



Fig. 49 表示設定ツール
Display setting tool



Fig. 50 方位補正操作の使用例
Operation of direction compensation

「方位補正」を ON にすると、キャリブレーションを促すダイアログが表示される。そのセッションでまだ方位のキャリブレーションが行われたことがない場合は、キャリブレーションを行わないと方位補正は有効にならない。キャリブレーションは、まず方向がわかっているデータが表示されるようにデバイスを向けてデータ固定ボタンを押し、そのデータにカメラ画像が合うようにデバイスを向けてから決定ボタンを押し。

「描画線太さ」は、通常はデータに設定されている線幅で描画されるが、AR ではカメラ画像に重なって描画され見えにくいことがあるため、ここで線幅を指定することができる。この機能は設計段階では含まれていなかったが、実証試験の結果、必要との判断で追加したものである(Fig.49、 Fig.50)。

6.3 位置情報の補正

6.3.1 位置情報補正の仕組み

位置情報の補正を自動補正にすると、使用しているデータベースに保存されている補正参照データから現在位置における補

正値を計算して、位置情報が補正され使用される補正参照データは、座標系、位置情報サービスから取得された位置座標、補正後の位置座標、および最終更新日時から構成される。この補正参照データは、写真を撮影して画像アイコンとして追加する際に位置を修正して保存するときに追加することができる。また、後述の位置情報補正参照データの管理モードでも新たな補正参照データを追加できる。

プロジェクトが読み込まれたときに、それに関連付けられた補正参照データ全てがプログラムに読み込まれ、それらの取得位置座標群によって、プログラム内部にドローネ図が作成されメモリ上に保持される。ドローネ図とは、距離空間内に離散的に分布した点の集合に対して、それらを規則に従って辺で結んで生成される三角形が集合した図形である。各三角形の外接円の内部に他の点が含まれない三角形分割であり、平面において最小角が最大となる最適化基準を満たすものである。なお、新たに補正参照データが追加されると、このドローネ図は再生成される。現在位置における補正値は、以下のように計算される。

新規に位置座標が取得された際に、その座標値で表される点が内部に含まれる三角形をドロネー図から抽出し、その三角形の3つの頂点における補正ベクトル（取得位置座標から補正位置座標へ向かうベクトル）を三角形内で線形補間し、取得された位置座標における補正ベクトルを算出する(Fig.51)。

この結果、補正参照データに近い場所ほど、その参照データの補正値に近い値になり、プロジェクト範囲内のどの場所でも3つの参照データから補間計算される。補正参照データは推定値であり、場所により、また時間により適正なデータであるという保証はないことから、目視の補助機能として位置づける。

6.3.2 位置情報補正参照データの管理

位置情報の補正参照データの管理画面では、GIS 地図画面が薄く表示され、その上にデータベースに保存されている参照データが表示される。補正参照データは、位置情報サービスから

取得された位置を赤いマークで、補正後の位置を青いマークで、その間を矢印で結んで表示される(Fig.52)。

管理画面での参照データの追加は、位置補正が手動位置に設定されているときだけ可能である。ツールバー左の追加ボタンをタップすると、そのときの取得された位置情報と手動で指定されている位置の組が、補正参照データとして追加される(Fig.53)。

管理画面で、既存の参照データをタップすることで、その参照データを選択することができる。タップした位置にある補正データのうち、最も前面にある（新しい）補正データが選択される。表示された吹き出しには追加された日時が表示される。吹き出しの左側にある下向き三角形ボタンをタップすることで、下にある補正データが順に選択される。また、表示された吹き出しの右側にある赤い×印のボタンをタップすることで、その補正データを削除することができる。

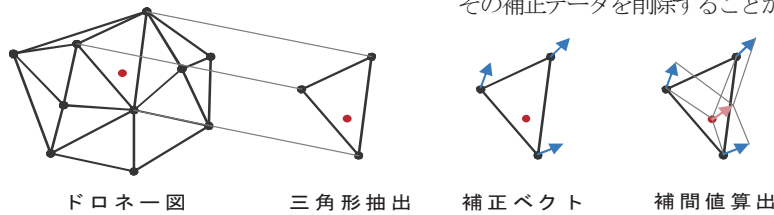


Fig. 51 位置補正アルゴリズム
Position compensation algorithm



Fig. 52 位置情報補正参照データの管理画面
The management screen of the compensation reference data of position information



Fig. 53 位置情報補正参照データの管理の例

The management of the compensation reference data of position information

Ⅶ 結 言

GIS は、地域資源管理、ストックマネジメント、災害・農地等、様々な場面での利用が想定される。これまでの GIS は、その目的ごとにアプリケーションが開発され、個別に利用されてきた。しかし、スマートフォンがそうであるように、これからは、汎用型 GIS を共通基盤として、様々なアプリケーションをプラグインで繋ぐモバイル GIS による情報共有が重要な GIS の開発要件となる。

また、アプリケーションについては、これまでのような専門家や行政だけが使うのではなく、また、農業サイドであるから農業経営や農業施設だけということではなく、地域住民が観光、教育、福祉等にも利用できるよう、行政の縦割り構造にとらわれない柔軟な設計思想を導入していく必要がある。

本報告では、I 章において、開発の背景を紐解き、平成 25 年 3 月に農林水産省農村振興局が出した「農業農村整備に関する技術開発計画」における GIS 技術の位置づけを明らかにし、近年急激に高速化広域化した通信網とモバイルデバイスを使用したソフトウェア開発研究を推し進めると共に 1) デスクトップ GIS とモバイルデバイスのデータ共有と有機的連携の方法、2) 位置情報取得精度の向上方法、3) AR (拡張現実) 機能等の新技術をシステム活用の支援技術として盛り込むことの必要性について述べた。II 章、III 章においては、本研究に用いるデスクトップ GIS 「VIMS」のモバイル GIS に連携する機能の開発要点と、モバイル GIS の要求機能の整理を記述し、デスクトップ GIS からのデータ切り取りプログラム、データをデスクトップ GIS に還元するプログラム、モバイル GIS プログラムの開発とメモ・図形描画機能、写真撮影機能、AR 機能の技術課題を述べるとともに、モバイル選定の背景を整理した。

IV 章ではデスクトップ GIS 「VIMS」との連携に関して説明をし、V 章、VI 章ではモバイル GIS のストックマネジメント対応のオンサイト機能と新機能である AR 技術の現場調査での有効性を述べると共に、事例を示しその有効性を確認すると共に操作系の説明を述べた。

本報告で開発したモバイル GIS 「iVIMS」は独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所が株式会社イマジックデザインと共同研究で開発したものである。基本的なアプリケーションはストックマネジメントに照準を合わせてはいるが、汎用型であるため、被災状況の調査や耕作放棄地の調査にも活用でき、住民の要望に対応し、地物のデータベースやレイヤ構造を自由に作ることができることから、地域が求めているシステムを簡単に作成することが可能になっている。さらに、基幹システムとなる VIMS はオルソデータや ESRI 社の Shape file にも対応しており、市販ソフトとの互換性も高いことから、他ソフトと併用することが望ましい利用方法となる。

本研究を実行する上で特に考慮したのは、どのフェーズでも「使いやすさ」が実現されるようにすることであった。本研究に

おいて開発したモバイル GIS の使用性はほぼ現状の要求に対して高い充足度を持つと考えられるが、他方の情報共有のための基礎データ構築とその連携手法に関しては尚研究を継続する必要性が認められる。専門技術者ではなく住民を利用者として想定したとき、「使いやすさ」の実現性という点ではまだ改良の余地があると考えている。一般の住民から取得できるデータは、住民のため、地域のために使われるのはもちろん、様々なシンプルな基礎データとしても有用性が考えられる。継続して使用され、継続して構築されるデータは、使いやすく経済的なシステムのみが構築できるものであり、それぞれの立場で時間軸を交え解釈するときに、ストックマネジメントや住民の地域意識、又は経済活動に有効に活用されるであろう。

「何にでも使えるものは何にも使えない」と、システム開発では良く言われるが、スマート化の中では、選択されるアプリケーションが多いので、十分に選べる時代が来ており、「使えるものがどこかにある」または「使いたいものがすぐ作れる」システムとなりつつある。農業経営に使いたいから農作業用 GIS、施設管理に使いたいから施設管理用 GIS という利用方法にこだわらず、今そこにある目的から、将来出てくるかもしれない目的もしっかりと見据えて、どのような GIS が継続的な利用に耐えうるのかを検討していく必要がある。

参考文献

- ICT 総研(2011):モバイル端末普及動向調査, ICT 総研
インターネットメディア総合研究所(2012): Android 利用動向調査報告書 2012 インターネットメディア総合研究所編, インプレス R&D
小林啓倫(2010):AR—拡張現実,マイコミ新書
農林水産省(2012):土地改良長期計画
農林水産省(2013a):農業農村整備に関する技術開発計画
農林水産省(2013b):第 2 回「攻めの農林水産業推進本部」配付資料事例 92
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/saisei/honbu/pdf/5_jirei_noushin.pdf
重岡徹・栗田英治・進藤圭二・友松貴志・山本徳司・石田憲治(2011):住民参加型地域づくり支援のためのコミュニケーション GIS の開発,農村工学研究所技報, 211, 71-95

Development of the Mobile Geographic Information System for Investigation of Farm Land and Irrigation/ Drainage Facilities

SHIGEOKA Tetsushi* , TOMOMATSU Takashi** , SYOU Naoki** and YAMAMOTO Tokuji***

Agricultural Environment Engineering Research Division, Rural Development and Planning Division*
Imagic Design Co Ltd.**

Agricultural Environment Engineering Research Division, Department of Planning and General Administration***

Summary

Today, We have the problem in order to maintain many of aging agricultural irrigation institutions in Japan. Therefore, We have to carry out the stock management project for these irrigation/ Drainage Facilities Maintenance. With a stock management projects, we have to build the database which collects and arranges the various information about each facilities intensively. This study aims at development of the investigation system which supports it easily and cheaply by building this database. Therefore, we will try the development of the on-site geographic information system which can work at the spot with full practical use of the mobile PC represented by the communications network and Android which were accelerated rapidly in recent years and broadened, iPad, iPhone, etc. The characteristic technological subjects that our study have to cope with is as follows; 1) The improvement method of acquisition accuracy of position information with reducing the input loading of information. 2) The easy information input method by on-site survey and utilizing the feature of the mobile device. 3) The system practical use methods, such as AR function.

In this report, chapter 1 explains the background and necessity for development. Chapter 2 and chapter 3 arranges about a development plan and a technological opportunity. In chapter 4, the design concept and structure of the mobile GIS engine which serves as a core of systems development are explained, and the feature of this system is clarified. Chapter 5 explains fundamental application, Chapter 6 and Chapter 7 explain the mounted on-site function which is utilized for stock management etc., and clarify general technology of this system.

The mobile system developed here makes the following possible. 1) Practical use by investigation of a disaster situation, or investigation of an abandoned cultivated land, 2) Easy making of the database and layer structure according to residents' request, 3) Easy creation of the system for which the community asks, is enabled.

Key Words: GIS(Geographic Information System), maintain local resources, AR(Augmented Reality), mobile, stock management

21世紀初頭10年間の大規模地震における農業用大ダムの入力地震動

増川晋* 黒田清一郎* 林田洋一* 田頭秀和*

*施設工学研究領域構造担当

キーワード：農業用大ダム、大規模地震、地震観測、入力地震動、地震時挙動

I 緒言

農林水産省所管（直轄事業）の国営造成の完成ダムは175ダム、建設中ダムは15ダム（農林水産省，2009）を数え、築造から20年以上が経過した長期供用ダムはすでに半数を超えている。これらに加えて県等により造成された農業用水の利用を目的とする農業用大ダムは全国に数多く点在している。

日本は、環太平洋地震帯の中に位置し、世界の中でも極めて地震の発生が多い国である。さらに、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」のように地球規模でも稀なマグニチュード9クラスの大地震が発生する国である。日本書紀に記載のある416年の大和（奈良県地域）での地震を最初とする有史以来の被害地震は430回に及んでいる（国立天文台，2013）。

21世紀に入ってからも2001年3月24日には「平成13年（2001年）芸予地震」（気象庁マグニチュード（ M_j ）6.7，最大震度6弱）が発生している（気象庁，2003a）。気象庁マグニチュード（気象庁，2001a）は以下で「 M_j 」と略記する。そして、この地震のほぼ10年後の2011年3月11日に国内観測史上最大規模の地震であった「平成23年（2011年）年東北地方太平洋沖地震」（ M_j 9.0，最大震度7）が発生した（気象庁，2011b，気象庁，2012a，気象庁，2012b）。21世紀の初頭の10年間に日本全域で13の被害地震が発生している（国立天文台，2013）。

これまでの大地震による強震動を受けた大ダムが壊滅的被害を受けた例はない。しかし、マグニチュード6クラス（マグニチュード5.5以上）を越える地震ではなんらかの被害を受けている（例えば，増川ら，1995，浅野ら，1997，増川ら，1997，増川ら，2008a，増川ら，2009，増川ら，2012）。地震時の安全性を評価するため，大ダムの受けた強震動の加速度記録と応答加速度記録を収集することは，ダムの地震時挙動の解明のため重要な課題となっている。平成24年度（2012年度）から農林水産省では，長期供用化が進んだ国営造成農業用ダムの経年的な性能低下，大規模地震の増加による地震時等の突発的な貯水機能の損失の懸念に対して，国営造成農業用ダム175ダム（建設中の15ダムを含め合計190ダム）に対する安全性評価を実施している。この評価の枠組みとして①造成時の設計・施工内容の詳細の確

認，②設計・施工により期待される性能が発揮されていること（健全性）の確認及び③動的解析による耐震性能照査によるレベル2地震動に対する安全性の定量的な確認，を三本柱とする機能診断と耐震性能照査の一体的な実施を進めている（国営造成農業用ダム安全性評価の実施について：平成24年3月30日付け農村振興局整備部長通知）。このうち③の耐震性能照査でダムの耐震性能を照査するための動的な外力として重要であるのが照査用入力地震動（入力加速度波形）である。

これまでに著者らによって2002年（増川ら，2002a）及び2005年（増川ら，2005）に農林水産省の所管しているダムの地震観測記録（基本として基礎相当の観測点で25cm/s²以上の記録）をとりまとめた。これらに引続き，本報文では，①「平成13年（2001年）芸予地震」，②「平成15年（2003年）十勝沖地震」，③「平成16年（2004年）新潟県中越地震」，④「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震」，⑤「岩手県沿岸北部の地震（2008年7月24日）」及び⑥「平成23年（2011年）年東北地方太平洋沖地震」の六つの顕著な大規模地震時の農林水産省の所管しているダムでの地震観測を収集し，入力地震動を分析した。収集した地震観測記録をとりまとめてCD-ROMに収録し巻末に添付する。

II 平成13年（2001年）芸予地震

瀬戸内海の安芸灘で2001年3月24日，15時27分に M_j 6.7（モーメントマグニチュード（ M_w ）6.8）の「平成13年（2001年）芸予地震」が発生した。モーメントマグニチュード（気象庁，2001a）は以下で「 M_w 」と略記する。広島県河内町（現：東広島市），同県大崎町（現：大崎上島町）及び広島県熊野町で最大震度6弱，西日本を中心に震度1以上を観測した。震源は，北緯34.1°，東経132.7°，深さ51km，フィリピン海プレート内部，スラブ内，で発生した正断層型の地震である。呉市などの傾斜地などでの被害が目立った。最大余震は，26日5時40分に発生した安芸灘を震源とする M_j 5.2，深さ50km，最大震度5強の地震であった（気象庁，2003a）。気象庁により「平成13年（2001年）芸予地震」，英語名称を「The Geiyo Earthquake in 2001」と命名された（気象庁，2001b）。

2.1 佐古ダム

2.1.1 ダム諸元及び特徴

佐古ダム (Fig. 1 (農林水産省中国四国農政局四国土地改良調査管理事務所, 2011)) は、農業用水の貯水のみを目的とした重力式コンクリートダム (ゲートレス) であり、国営道前道後平野農業水利事業により愛媛県東温市の一級河川重信川水系佐川川に工期短縮を目的として拡張レア工法を用いて 1997 年に本体着工し 2001 年に竣工した。和泉層群の砂岩、頁岩、凝灰岩の互層を基礎岩盤とし、堤高 31m、堤頂長 210m、堤体積 63 千 m³、受益面積は 10,318ha (うち 1,993ha は畑) に対して有効貯水量は 1,020 千 m³ であり、大根、キャベツ、レタス等、作物の品質向上と多様化が受益地区で進展している。



Fig. 1 佐古ダム
Overall view of Sako Dam

2.1.2 地震時の状況

本ダムは地震時に試験湛水中であり貯水位 EL. 134.32m (13.3m の貯水深) であった。臨時点検の結果、異常は認められなかった (友野, 2002)。震央とダム位置の関係を Fig. 2 に示す。本ダムは、重力式コンクリートダムでの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊と堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 1 に示す。Table 1 での「Maximum Acc. (cm/s²)」の欄の数値は最大加速度値 (「Acc.」は「Acceleration」を略す、以下同様) である。「Maximum Acc. Ratio」の欄の数値は、堤体等の観測点での応答加速度の最大値を、入力加速度と見なした基礎地盤や監査廊の基礎に相当する観測点での最大加速度値により除した値 (最大加速度比) である。この最大加速度比 (以下では、加速度比とする) は、各観測点の同一方向成分に対しての値である。本ダムでは、監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。以下のダムに関しても観測された最大加速度値を同様の表として掲載している。表中に堤高と観測点の標高を記載しているが、重力式コンクリートダムの場合、監査廊の観測点の位置が掘削面標高より高標高にあり、同様にフィル型式の場合、基礎相当の観測点が監査廊床面や地山に設置され、最大断面堤頂部の観測点が余盛内に設置されている場合がある。これらのため、堤頂部と基礎に相当する観測点の標高差が堤高 (H) に一致しない。なお、最大加速度値は観測記録の加速度波形を数値化し、零点補正をした。以下のダムに関しても同様に処理している。

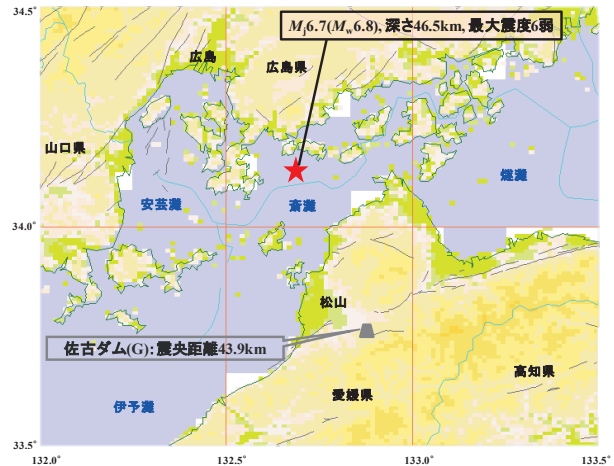


Fig. 2 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 1 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Geiyo Earthquake in 2001(2001.3.24)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 146.1 m H=31.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-441.5	-339.0	-103.4
	Maximum Acc. Ratio	4.50	1.87	1.55
Gallery EL. 119.3 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-98.1	-181.3	-66.8
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

本ダムは、震央距離 43.9km と比較的震源に近いことから地震規模 (Mj 6.7) に比較して河床部監査廊の最大加速度値が大きい。河床部監査廊ではダム軸方向の最大加速度値が上下流方向に比較して 2 倍程度と大きい、堤頂では上下流方向の最大加速度値がダム軸方向の 1.3 倍と観測方向の最大加速度値の大きさが逆となっている。堤頂の加速度比は上下流方向では 4.5、ダム軸方向では約 1.9 と上下流方向に比較して半分以下である。これから、堤体内での上下流方向への振動の増幅が卓越していると考えられる。本ダムは、堤頂長/堤高比 (L/H) が 6.77 (=210m/31m) と重力式コンクリートダムのダム型式としては L/H が大きいことから、地山拘束の影響が小さく、堤頂部での上下流方向への振動が卓越する傾向であると考えられる。

入力加速度相当である観測加速度波形、本ダムでは河床部監査廊での観測加速度波形の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 3 に示す。上下流方向は実線、ダム軸方向は破線、及び鉛直方向は短破線にて描画している。以下のダムに関しても加速度応答スペクトルの図で同様に各方向成分を描画している。図中には水平地震動 (極太実線) と鉛直地震動 (極太破線) の照査用下限加速度応答スペクトル (H20) (国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室, 2010) も描画している。ダム軸方向の加速度応答値が 0.15 秒程度までの短周期領域では上下流方向より大きく、この周期より長周期領域では両方向ともにはほぼ同程度の加速度応答値である。0.1 秒程度の周期に最大の加速度応答値があり、3 秒程度までの長周期になるに従い、加速度応答値は減少し、これ以上の長周期領域での加速度応答値は非常に小さく図では描画されていない。鉛直方向の加速度応答値が他の二方向に比較して小さい。計測震度は 4.1 で

あり、震度 4 となる。このため、本地震による地震動は本ダムが供用中に度々に経験すると考えられる地震動であり、Fig. 3 の加速度応答スペクトルからもレベル 2 地震動として考慮される供用中に稀に受ける強さの地震動には達していない。計測震度は、気象庁告示第四号の地震動の強さを表す指標として値を算出する算式を用いた（気象庁，1996a，気象庁，1996b）。算出は、以下でも入力加速度相当である観測加速度波形の三方向成分を用いた。なお、ダムの地震観測装置は強震動観測装置を基本的に設置している。このため、気象業務法により認定されていない地震観測装置によって観測された加速度波形から計測震度を求めているため、以下の提示したダムでの計測震度は気象庁から公表される計測震度とは異なり、参考値である。

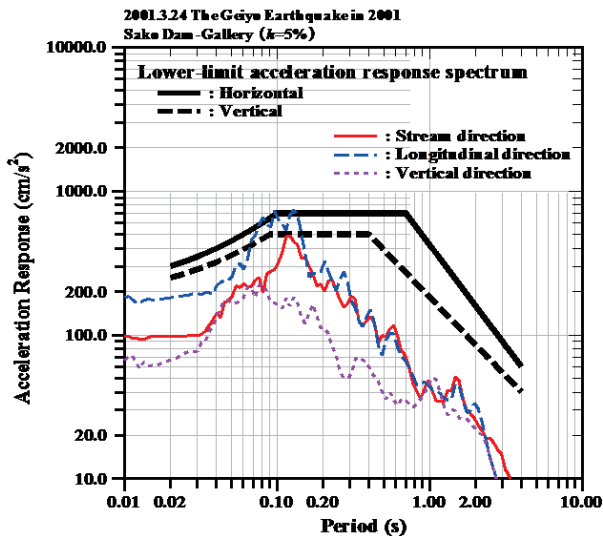


Fig. 3 加速度応答スペクトル（河床部監査廊）
Acceleration response spectrum (Gallery)

「平成 13 年（2001 年）芸予地震」後の臨時点検で本ダムに異常は認められず供用を継続している。以下に検討した他の大規模地震時でも、地震後に臨時点検を実施し、特記した被災状況が観測された幕別ダム、川西ダム、荒砥沢ダム及び栗駒ダムを含めた他のダムでも、浸透水量、間隙水圧や揚圧力の変化が観測された場合もあったが、地震後の各種の挙動観測を強化するなどの対応を実施し、安全性を確認しながら供用を継続している。

「平成 13 年（2001 年）芸予地震」の佐古ダムの地震時の状況から、短周期領域に比較的大きな加速度応答値、及び、長周期領域になるに従い応答加速度値が減少し、3 秒以上の長周期領域では加速度応答値がほとんど現れていない地震動が観測された。

Ⅲ 平成 15 年（2003 年）十勝沖地震

北海道襟裳岬南東沖 80km で 2003 年 9 月 26 日、4 時 50 分に $M_j 8.0$ ($M_w 8.3$) の「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」が発生した。北海道内の新冠町，静内町（現：新ひだか町），浦河町，鹿追町，幕別町，豊頃町，忠類村（現：幕別町），

釧路町及び厚岸町で最大震度 6 弱，遠くは関東地方にかけて震度 1 以上を観測した。震源は、北緯 41.8° ，東経 144.1° ，深さ 45km，太平洋プレート上面の逆断層型のプレート境界で発生した地震である。北海道及び本州の太平洋岸に津波が観測され，現地調査で最大約 4m の津波の痕跡が確認されている。同日 6 時 8 分に発生した最大余震でも浦河町で最大震度 6 弱を観測した（気象庁，2004a）。新潟地震（1964 年 6 月 16 日， $M_j 7.5$ ，最大震度 V）でも浮屋根式タンク原油タンクの炎上が都市型災害（総務省消防庁，2013）として注目されたが，本地震でも苫小牧市で比較的周期の長い地震の揺れ（やや長周期地震動：周期が数秒から 20 秒程度の地震動）により，可燃性物質貯留の浮屋根式タンクが破損し，火災が発生した（総務省消防庁，2004）。気象庁により「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」，英語名称を「The Tokachi-oki Earthquake in 2003」と命名された（気象庁，2003b）。

3.1 美生ダム

3.1.1 ダム諸元及び特徴

美生ダム（Fig. 4（国土交通省北海道開発局，2011））は，農業用水の貯水のみを目的として，国営かんがい排水事業芽室地区により北海道河西郡芽室町の一級河川十勝川水系美生川に 1988 年に本体着工し 1999 年に竣工した。河床部と左岸部は先白亜紀日高層群の硬質な砂岩，粘板岩を主体とした堅固な基礎岩盤であり，それに対して右岸の河岸段丘部にはフィルタイプのダム築造が相応しい第四紀光地園礫層を基礎地盤としている。このため，本ダムは左岸側溪谷部を重力式コンクリートダム（ゲートレス），右岸側段丘部を中心遮水型ロックフィルダムとした複合ダムである。コンクリートダム部とロックフィルダム部の複合部でのコンクリート構造部分に半月状の窪みを設けロックフィルダム部のコア部を抱え込ませるグループジョイント方式を採用した北海道のかんがい用ダムとして初めての複合ダムである。堤高 47.2m（コンクリートダム部），17.7m（ロックフィルダム部），堤頂長 350m，堤体積 201 千 m^3 ，である。受益面積は 12,140ha（すべて畑）に対して有効貯水量は 6,000 千 m^3 であり，とうもろこし，ながいも，ごぼう，かぼちゃなどの野菜類の作付面積が拡大し，作物の品質向上と多様化が受益地区で進展している（寺端ら，2000，国土交通省北海道開発局，2011）。



Fig. 4 美生ダム
Overall view of Bisei Dam

3.1.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を Fig. 5 に示す。本ダムは、複合ダムの構造の特殊性から、コンクリートダム部の河床部監査廊と堤頂部、及びロックフィルダム部の基礎と堤頂部の四箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 2 に示す。本ダムでは、コンクリートダム部の河床部監査廊での観測記録を入力加速度と見なしているが、さらに、ロックフィルダム部のみでの振動の増幅を評価するためロックフィルダム部の基礎に対するロックフィルダム部の堤頂部の加速度比を括弧書きにて提示している。ロックフィルダム部の基礎でコンクリート部分の河床部監査廊よりも最大加速度値が増加している。ロックフィルダム部の基礎地盤で地震動が増幅されていると考えられる。コンクリートダム部の河床部監査廊で、上下流方向とダム軸方向はほぼ同じ最大加速度値であり、ロックフィルダム部の基礎でも同様である。両ダム型式の堤頂部の各方向では、ダム型式の相違に関わらず同程度の最大加速度値を観測している。これは、ロックフィルダム堤体は重力式コンクリートダム堤体に抱えられている特殊な構造であることから重力式コンクリートダム堤体の振動がロックフィルダム堤体の振動に影響していると考えられる (増川, 2005)。

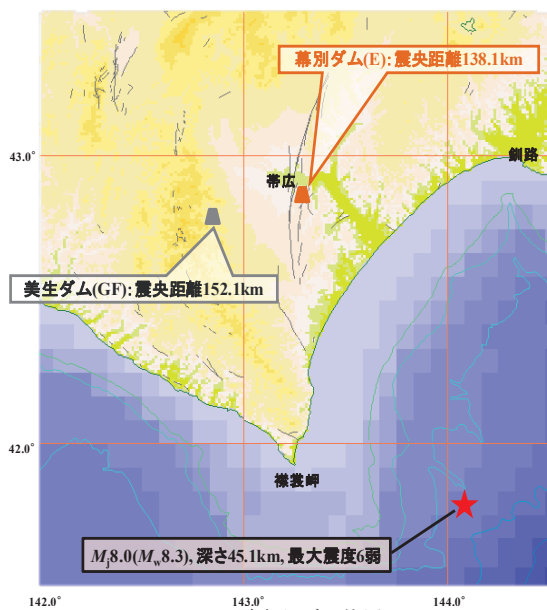


Fig. 5 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 2 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Tokachi-oki Earthquake in 2003(2003.9.26)			
		Stream	Longitudinal	Vertical	
Rockfill	Crest EL. 407.77 m H=17.7 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-167.4	112.5	-89.7
		Maximum Acc. Ratio	2.52 (1.34)	1.69 (0.97)	1.44 (1.33)
	Base EL. 394.30 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	124.8	115.9	-67.5
		Maximum Acc. Ratio	1.88 (1.00)	1.74 (1.00)	1.08 (1.00)
Gravity	Crest EL. 406.15 m H=47.2 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-153.3	104.2	-70.7
		Maximum Acc. Ratio	2.31	1.57	1.14
	Gallery EL. 363.50 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	66.4	66.5	-62.3
		Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

コンクリートダム部の河床部監査廊の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 6 に示す。三方向成分とも同様の加速度応答値である。照査用下限加速度応答スペクトルと比較し、小さい加速度応答値である。長周期領域での加速度応答値の右下がりの減少傾向が照査用下限加速度応答スペクトルよりも小さい。ロックフィルダム部の基礎での観測加速度波形を入力加速度相当とした場合の加速度応答スペクトルを Fig. 7 に示す。ロックフィルダム部の基礎の最大加速度値がコンクリートダム部の河床部監査廊よりも大きいことから、Fig. 6 のコンクリートダム部の河床部監査廊の加速度応答スペクトルよりも加速度応答値は大きくなっている。これは、ロックフィルダム部の基礎地盤の力学性が河床・左岸部のコンクリートダム部の力学性と異なり、フィルタイプダムを築造せざるを得ない右岸部の基礎地盤の力学性を反映していると考えられる。ロックフィルダム部の加速度応答スペクトル (Fig. 7) はコンクリートダム部の加速度応答スペクトル (Fig. 6) とは異なり、上下流方向とダム軸方向の加速度応答値のピークが同じ周期に卓越して現れている。コンクリートダム部の基礎岩盤とロックフィルダム部の基礎地盤の力学性の相違による加速度応答スペクトルの相違を比較するため、コンクリートダム部の河床部監査廊とロックフィルダム部の基礎の両観測点の加速度応答スペクトルを Fig. 8 に重ねて示す。太線がコンクリートダム部河床部監査廊 (基礎岩盤)、細線がロックフィルダム部基礎 (基礎地盤) の三方向成分である。以下のダムに関しても、異なる観測点の加速度応答スペクトルを一図で重ねて提示する場合には、同様に描画線の幅の相違によってそれぞれの観測点を指定して描画している。両観測点の加速度応答スペクトルの特徴的な相違は、上下流及びダム軸方向 (実線及び破線) の 0.1 秒前後と 0.3 秒前後の周期の加速度応答値が、ロックフィルダム部基礎でコンクリートダム部河床部監査廊よりも大きくなっている。鉛直方向は、両観測点で同様の加速度応答値である。計測震度は、コンクリートダム部では 3.8 であり、震度 4、ロックフィルダム部では 4.3 であり、同一の震度 4 となる。なお、本ダムも前述の佐古ダムと同様に試験湛水中 (常時満水位: FWL. 400.70m) の 1999 年 (平成 11 年) 5 月 13 日、2 時 59 分に北海道白糠郡音別町 (現: 釧路市) を震源とする Mj6.4、深さ 104km の地震 (気象庁帯広測候所: 震度 4) を経験し (震央距離約 90km)、コンクリートダム部河床部監査廊で 45.7cm/s²、コンクリートダム部堤頂部で 82.8cm/s² の本地震時の 1/2 程度の最大加速度値 (ともに上下流方向成分) を記録した。この際にも臨時点検の結果、異常を発生していないことが確認されている (寺端ら, 2000)。

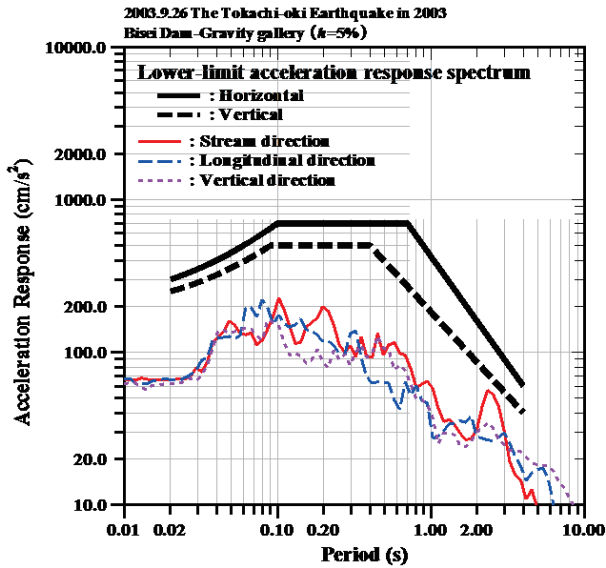


Fig. 6 加速度応答スペクトル (コンクリートダム部河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery of gravity)

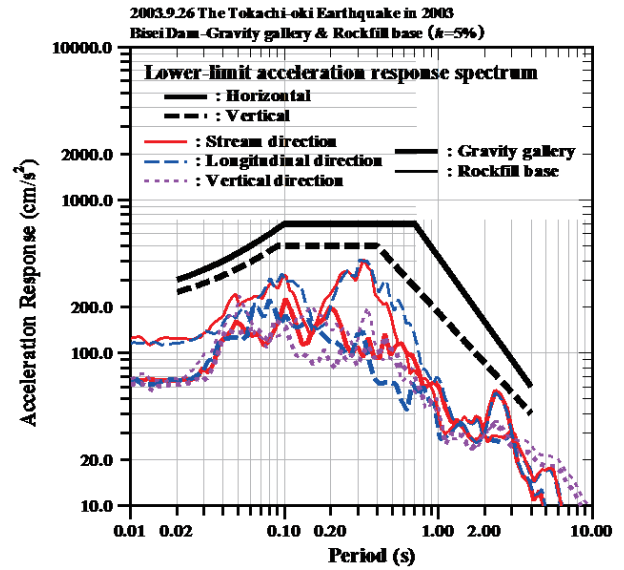


Fig. 8 加速度応答スペクトル (コンクリートダム部河床部監査廊とロックフィルダム部基礎)
Acceleration response spectrum (Gallery of gravity and base of rockfill)

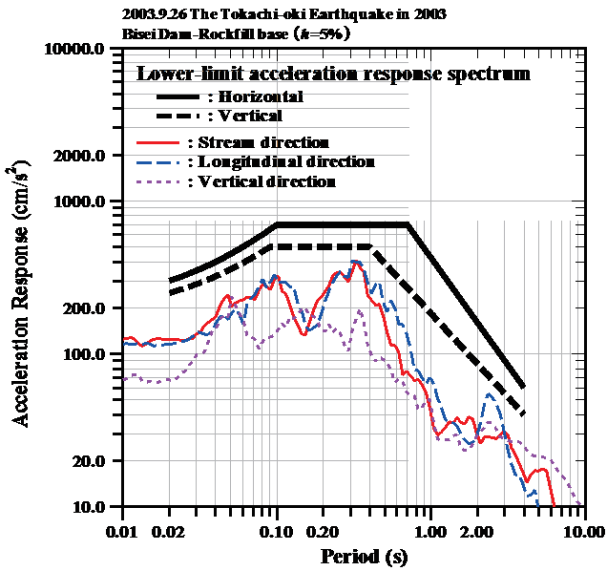


Fig. 7 加速度応答スペクトル (ロックフィルダム部基礎)
Acceleration response spectrum (Base of rockfill)

3.2 幕別ダム

3.2.1 ダム諸元及び特徴

幕別ダム (Fig. 9 (国土交通省北海道開発局, 2011)) は、農業用水の貯水のみを目的とした均一型フィルダムであり、国営かんがい排水事業幕別地区により北海道中川郡幕別町の一級河川十勝川水系猿別川支流稲土別川に 1996 年に本体着工し 2004 年に竣工した。第四紀更新世長流枝内層に分類される低固結度の砂岩層を主体とした泥岩が基礎地盤である。この砂岩層の高透水性のため浸透水抑制工法としてブランケット工法を採用し、池敷ブランケット及び上流地山ブランケットと本堤との連続性を確保するために均一型を選択している (福島ら, 1993, 横山ら, 2005)。堤高 26.9m, 堤頂長 335m, 堤体積 868 千 m³, 受益面積は 960ha (すべて畑) に対して有効貯水量は 2,000 千 m³ である。本ダムによる畑地かんがいに加えて受益地区の排水路改修により、受益地区で農業の近代化・生産性の向上など農業の安定が図られている。



Fig. 9 幕別ダム
Overall view of Makubetsu Dam

3.2.2 地震時の状況

「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」(2003 年 9 月 26 日) 時の本ダムの状況は、3 月 24 日から開始した試験湛水中であり、洪水期のため中間水位を 1.1m 下回る EL. 69.9m で貯水位を保持していた。地震後の臨時点検の結果は、ダム

周辺の地山ブランケットの保護層（現地採取の河床砂礫を材料とした 2m 厚さ）の表面に 20m から最大 80m 長さの数 10cm 程度のズレが左右岸にそれぞれ 2 箇所合計 4 箇所に観察された (Fig. 10)。被災箇所の開削調査の結果、三層からなる地山保護層の下層部上面を境界とした上部でズレが発生していた。ダム本体に被災は認められず、観測計器にも異常は観測されていない(北海道開発局帯広開発建設部, 2003, 田頭ら, 2005)。学識経験者による安全性評価を実施し被災箇所を暫定復旧した後に、慎重な挙動観測の下で試験湛水を再開し、平成 16 年 (2004 年) 10 月に試験湛水を終了した。試験湛水終了後、復旧工事を実施し平成 17 年 (2005 年) 3 月に完成し、翌 4 月から供用を開始した (国土交通省北海道開発局, 2011)。



Fig. 10 右岸地山ブランケット保護層の被災
Damage of protective layer of blanket at right abutment

震央とダム位置の関係を前述の美生ダムと同一図の Fig. 5 に示す。本ダムは、監査廊を有していないことから左岸地山の導水トンネルと最大断面堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 3 に示す。本ダムでは、左岸地山の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。入力加速度値として大きな最大加速度値が記録されているが、堤頂部の加速度比は上下流方向で約 2、他の二方向で約 1.3 とわずかな増加である。これは、入力加速度が大きくなると応答加速度が小さくなるフィルダムの応答特性の特徴が現われているか、または、本ダムの堤高 ($H=26.9\text{m}$) が高くないことから堤体内での振動の増幅が小さいとも考えられる。堤頂部のダム軸方向の最大加速度値が上下流方向の 8 割強と大きく、入力加速度の最大加速度値のダム軸方向は上下流方向より大きい (約 1.3 倍) ことが影響していると考えられる。さらに、堤頂長/堤高比 (L/H) が 12.45 ($=335\text{m}/26.9\text{m}$) と極めて大きいため地山拘束の小さいことが影響していると考えられる (増川ら, 2008c)。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 11 に示す。幅広い周期領域でほぼ平坦な加速度応答値であり、前述の美生ダムの加速度応答スペクトル (Fig. 6) に比べて長周期領域での加速度応答値の減少がない。美生ダムのロックフィルダム部の基礎と幕別ダムの左岸地山の両観測点の加速度応答スペクトルを重ねて Fig. 12 に示す。太線が美生ダムのロックフィル部の基礎、細線が幕別ダムの左岸地山の三方向成分である。以下

のダムに関しても、異なるダムの加速度応答スペクトルを一図で重ねて提示する場合には、同様に描画線の幅の相違によってそれぞれのダムを指定して描画している。Fig. 12 から、0.5 秒以上の長周期領域での幕別ダムの加速度応答スペクトル (細線) が美生ダムの加速度応答スペクトル (太線) より加速度応答値はかなり大きい。これは、幕別ダムの基礎地盤は美生ダムの基礎地盤 (ロックフィルダム部) より、長周期領域の波動が増幅する応答特性を現わしていると考えられる。計測震度は 5.0 であり、震度 5 強となる。前述の美生ダムのロックフィルダムの基礎での計測震度 (4.3) より大きくなっており、幕別ダムの低固結度の基礎地盤で地震動が増幅され、最大加速度値が美生ダムより本ダムの方が大きいことが原因であると考えられる。さらに、Fig. 12 に示したように幕別ダムの方が 0.5 秒以上の加速度応答値が美生ダムの加速度応答値より大きく、体感に強く感じる周期領域 (1~2.5 秒の周期領域 (童ら, 1996)) の波動が美生ダムより大きいため計測震度の大きな差となったと考えられる。

Table 3 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Tokachi-oki Earthquake in 2003(2003.9.26)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest El. 81.78 m H=26.9 m	Maximum Acc. (cm/s^2)	251.6	-216.5	-176.9
	Maximum Acc. Ratio	1.86	1.25	1.26
Left abutment El. 59.22 m	Maximum Acc. (cm/s^2)	135.1	-173.1	-140.7
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

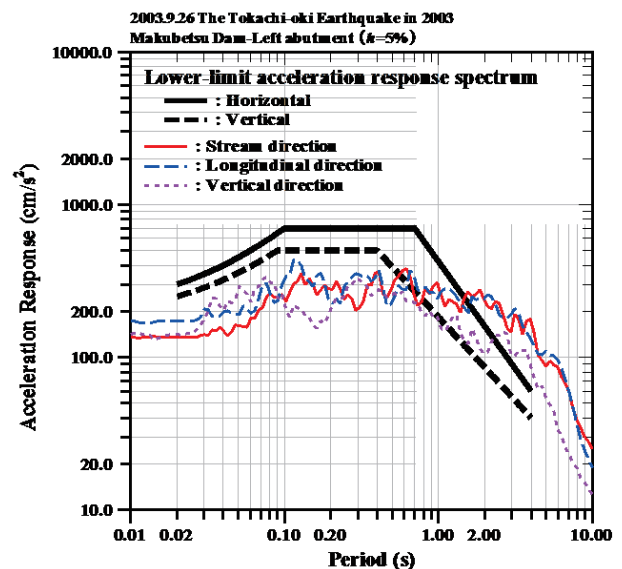


Fig. 11 加速度応答スペクトル (左岸地山)
Acceleration response spectrum (Left abutment)

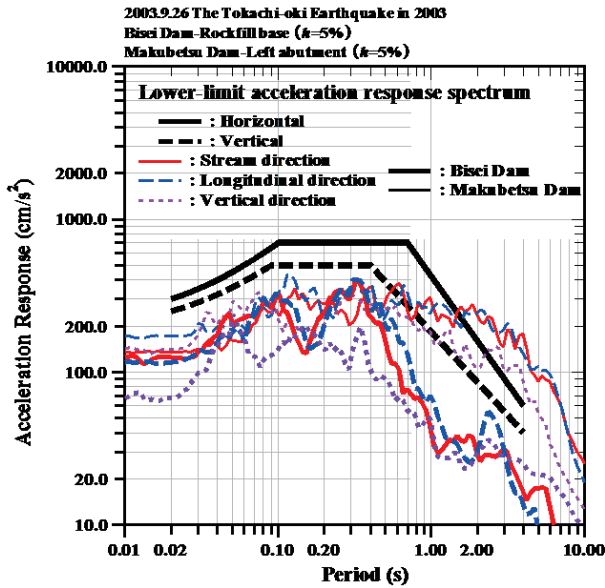


Fig. 12 加速度応答スペクトル (美生ダムのロックフィルダム部基礎と幕別ダムの左岸地山)
Acceleration response spectrum (Base of rockfill at Bisei Dam and left abutment of Makubetsu Dam)

「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」のダム型式の異なる二つのダムで観測された入力加速度相当の加速度応答スペクトルでの長周期領域になるに従い加速度応答値が減少する傾向は、照査用下限加速度応答スペクトルの長周期領域に設定されている傾き (減少) よりも小さく (Figs. 6 及び 11), プレート境界の震央距離の大きな地震動の振動数特性を反映していると考えられる。これらの特徴を示す美生ダムと幕別ダムの加速度応答スペクトルと前述の「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」での内陸で発生した震央距離の近い佐古ダムの河床部監査廊の加速度応答スペクトルと比較すると、Fig. 13 に示すように佐古ダムの河床部監査廊の加速度応答スペクトル (極太線) は、0.2 秒以上の長周期領域では、美生ダム (太線) と同程度の加速度応答値であり、幕別ダム (細線) は 0.5 秒以上の長周期領域での加速度応答値が佐古ダム及び美生ダムより大きい。さらに、佐古ダムのみ 3 秒以上の長周期領域の加速度応答値が美生ダムと幕別ダムの加速度応答値に比較して非常に小さくなっている。

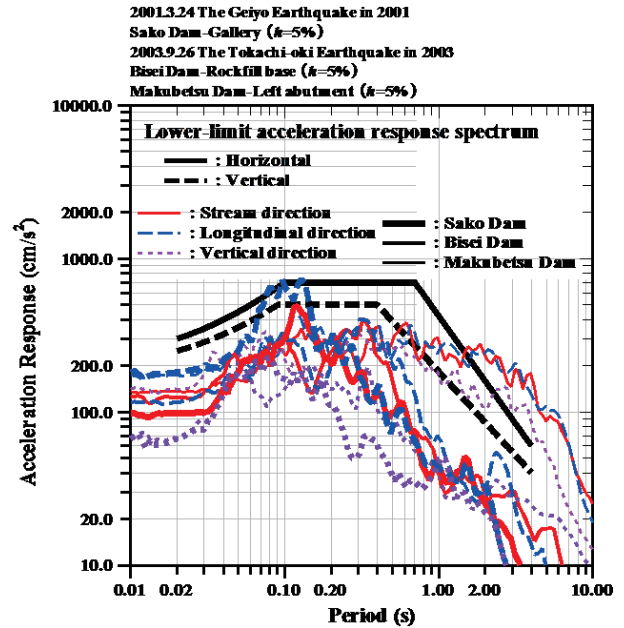


Fig. 13 加速度応答スペクトル (佐古ダムの河床部監査廊と美生ダムのロックフィルダム部基礎と幕別ダムの左岸地山)
Acceleration response spectrum (Gallery of Sako Dam, base of rockfill at Bisei Dam and left abutment of Makubetsu Dam)

「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」のダム型式の異なる二つのダムでの地震時の状況から、基礎岩盤や基礎地盤の力学性によって地震動の加速度応答が変化している。プレート境界で発生する震源が遠地の地震動では、長周期領域でも加速度応答値が大きくなる地震動が観測された。さらに、長周期領域に直下型地震を対象に設定された照査用下限加速度応答スペクトルの長周期領域での加速度応答値の減少より小さい減少傾向の加速度応答値の減少を示す地震動が観測された。

IV 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震

新潟県中越地方で 2004 年 10 月 23 日, 17 時 56 分に $M_j 6.8$ ($M_w 8.6$) の「平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震」が発生した。新潟県川口町 (現: 長岡市) で最大震度 7 を観測し、「平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震」の最大震度 VII の観測以来 9 年ぶりであり震度 7 階級を設定後での地震観測史上 2 回目、計測震度計による計測震度の震度 7 を初めて計測した。東北地方から近畿地方の広い地域にかけての震度 1 以上を観測した。震源は、北緯 37.3° , 東経 138.9° , 深さ 13km, ユーラシアプレート内部での逆断層型の活褶曲帯で発生した地震である。この活褶曲帯は、ユーラシアプレートと北米プレートが衝突する日本海東縁変動帯の陸域の新潟-神戸歪集中帯の中でも、強い褶曲を受け複雑な応力場である。このため、本震発生直後の 1 時間以内に最大震度 5 強の余震が 1 回, ついで、最大震度 6 強の余震が 2 回発生し、規模の大きな余震が多数発生した。このようにマグニチュード 6 以上の 4 つの余震が発生した活発な余震活動のため被害が拡大したと推測されている。震源域の活褶曲帯の地質・地形のため地すべり被害が際立った (気象

庁, 2005, 増川, 2006)。気象庁により「平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震」, 英語名称を「The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004」と命名された (気象庁, 2004b)。

4.1 川西ダム

4.1.1 ダム諸元及び特徴

川西ダム (Fig. 14 (新潟県十日町地域振興局農業振興部, 2013)) は, 農業用水の貯水のみを目的とした中心遮水型フィルダムであり, 県営かんがい排水事業川西地区により新潟県十日町市 (旧: 中魚沼郡川西町) の一級河川信濃川水系南沢川に 1972 年度に着工し 1980 年度に竣工した。完成後 20 年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。基礎地盤は魚沼層群の泥岩と未固結砂岩及び凝灰角礫岩の互層である (高橋, 1980)。堤高 43m, 堤頂長 170m, 堤体積 348 千 m^3 , 受益面積 460ha に対して有効貯水量は 1,118 千 m^3 である。1977 年 (昭和 52 年) に築堤が完了し, 翌年 1978 年 (昭和 53 年) には横綱北の湖関 (当時) による地固め式が行われたとの記録がある (新潟県十日町地域振興局, 2007)。



Fig. 14 川西ダム
Overall view of Kawanishi Dam

4.1.2 地震時の状況

堤体の変状は, 堤頂部の保護アスファルト舗装に幅 2~10mm, 深さが最大で約 75cm の上下流方向のクラックが 10 箇所程発生し, 右岸地山と堤体との境界部で 16cm の沈下が生じた。堤体上流斜面では左岸中位標高から法尻にかけて全体に沈下が観察された。特に, Fig. 15 (新潟県, 2006) に示すように堤体左岸側の張りブロック部の変状 (30cm 程度の陥没と段差) が顕著であった。放流水路沿いに埋設された浸透水導水管が損傷し洪水吐からの浸透水が混入し濁っていたことから, 正確な浸透水量は不明である。左岸の管理棟はコンクリート基礎にクラックが発生し大きく損傷した。その他の被災として洪水吐や取水設備など多くの付帯設備が被災した。堤頂部は, 被災箇所の舗装面から深さ 80cm までコアを掘削し, 松葉沢ダム (隣接の地震時に施工中であった県営防災ダム) のコア材料を使用して復旧した。堤体上流斜面は被災箇所の堤体材料を撤去し, 現堤体材料と購入碎石のブレンド材料を使用して復旧した (新潟県農地部, 2006)。



Fig. 15 川西ダムの上流斜面の被災状況
Damage of upstream slope

震央とダム位置の関係を Fig. 16 に示す。前述の「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」の佐古ダムの震央距離 43.9km よりも川西ダムは震央に近く (震央距離: 15.6km), 本ダムでの地震動は内陸直下型の地震動に相当すると考えられる。本ダムは, 監査廊を有していないことから, 下流法尻と左岸地山, 堤頂部中央の三箇所に地震計が設置され, 下流法尻は下流広場の表層地盤内, 左岸地山は表層岩盤内に埋設されている。観測された最大加速度値を Table 4 に示す。本ダムでは, 下流法尻の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。入力加速度は, 上下流方向が大きい三方向ともに同程度の最大加速度値を観測している。鉛直方向の地震動が水平動の大きさと同程度であるのは, 震源が浅い震央距離の小さい地震の観測記録の特徴と考えられる (増川, 2002b)。三観測点ともに同程度の最大加速度値を観測しており, 観測点位置の相違や堤体内での振動の増幅があまりない, また, 左岸地山での上下流方向と鉛直方向の二方向の最大加速度値は入力加速度の最大加速度値より減少しているが, ダム軸方向は増加している。堤頂部中央では上下流方向の最大加速度値に近いダム軸方向の最大加速度値が観測されており, 堤頂部中央ではダム軸方向へも上下流方向と同程度に振動していたと考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 17 に示す。三方向ともにほぼ照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値であり, 図らずも実際に耐震性能照査を受けたことに相当している。上下流方向には 0.4 秒程度の周期に卓越したピークが認められ, 基礎地盤の応答特性と考えられる。左岸地山の加速度応答スペクトルを Fig. 18 を示す。下流法尻の加速度応答スペクトル (Fig. 17) に比較して短周期領域の加速度応答値が減少しているが, ほぼ照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値である。下流法尻に比較して卓越したピークがない加速度応答値である。地震動の観測点位置の違いによる加速度応答スペクトルを比較するため, 下流法尻と左岸地山の両観測点の加速度応答スペクトルを Fig. 19 に重ねて示す。太線が下流法尻, 細線が左岸地山の三方向成分である。両観測点のそれぞれの三方向成分は類似した加速度応答値である。計測震度は下流法尻で 5.8 であり, 震度 6 弱, 左岸地山で 5.7 であり, 震度 6 弱となる。

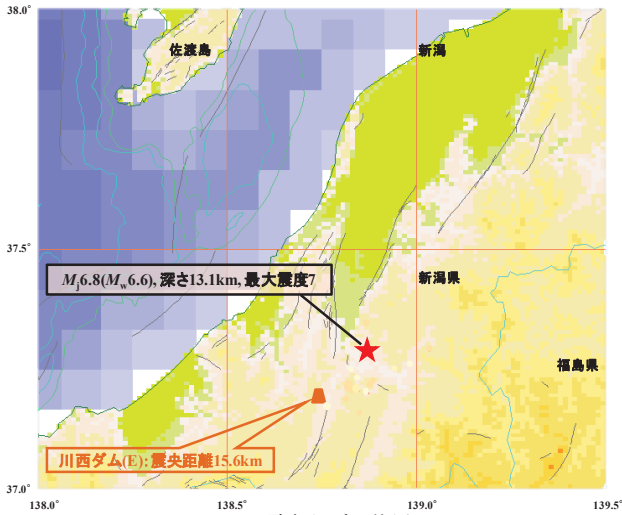


Fig. 16 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 4 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004(2004.10.23)			
		Stream	Longitudinal	Vertical	
Crest EL. 217.40 m H=43.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-582.5	517.6	429.8	
	Maximum Acc. Ratio	1.04	1.16	1.06	
Left abutment EL. 214.10 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	435.6	545.6	-254.4	
	Maximum Acc. Ratio	0.78	1.23	0.63	
Toe of downstream-slope EL. 183.30 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-558.8	-444.7	-405.6	
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00	

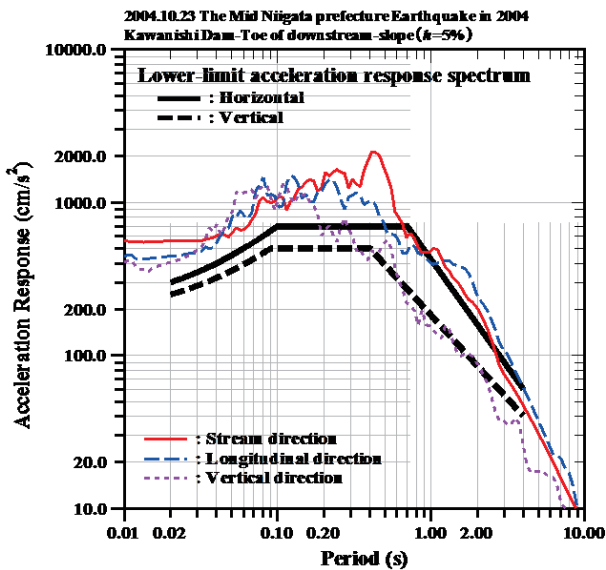


Fig. 17 加速度応答スペクトル (下流法尻)
Acceleration response spectrum (Toe of downstream-slope)

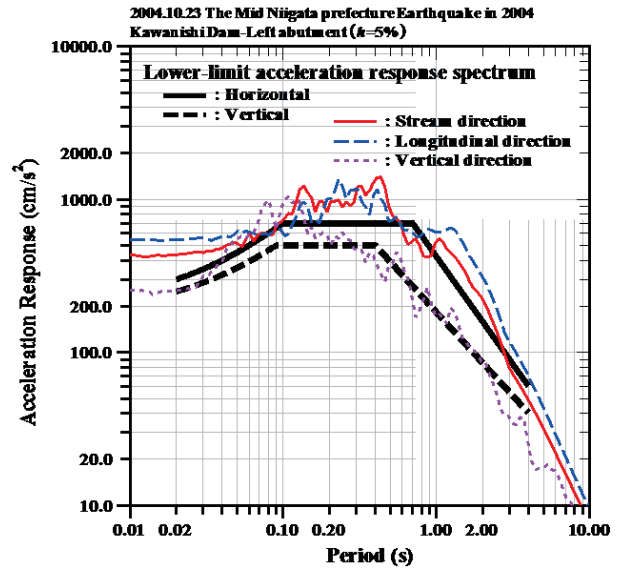


Fig. 18 加速度応答スペクトル (左岸地山)
Acceleration response spectrum (Left abutment)

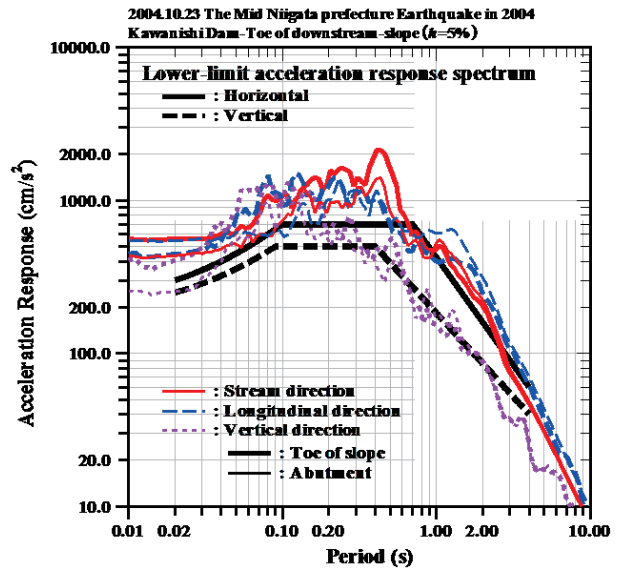


Fig. 19 加速度応答スペクトル (下流法尻と左岸地山)
Acceleration response spectrum (Toe of downstream-slope and left abutment)

川西ダムで観測された地震動は、震央が近い地震のため振動が減衰せずに加速度応答スペクトルは鉛直方向を含めた三方向ともに大きな加速度応答値であった。震央が近い前述の「平成13年(2001年)芸予地震」の佐古ダムの加速度応答スペクトルと比較するため Fig. 20 を示す。太線が佐古ダム、細線が本ダムの三方向成分である。Fig. 20 に示されるように川西ダムでは、0.2秒程度の短周期領域の加速度応答値が三方向とも同程度の大きさである。また、川西ダム(細線)では図に提示している0.01~10秒までの全周期領域に加速度応答値がある。一方、佐古ダムでは3秒以上の長周期領域の加速度応答値が川西ダムに比較して非常に小さく、佐古ダムの方が震央から離れた地震による地震動であるにもかかわらず、長周期領域の加速度応答値は小さい。これは、フィルダム型式の川西ダムの基礎地盤が重

力式コンクリートダムである佐古ダムの基礎岩盤より柔らかいため、基礎地盤で地震動の長周期領域の波動が増幅されたと考えられる。佐古ダムでは鉛直方向の加速度応答スペクトル（短破線）が他の二方向の加速度応答値に比較して小さい。佐古ダムでは震源深さが深く、震央距離も川西ダムに比較して小さいことから、川西ダムのように、震源の深さが浅く、震央距離が小さい場合には鉛直方向の地震動も大きいと考えられるが、今後さらに、地震観測記録の蓄積による分析から明らかにできると考える。

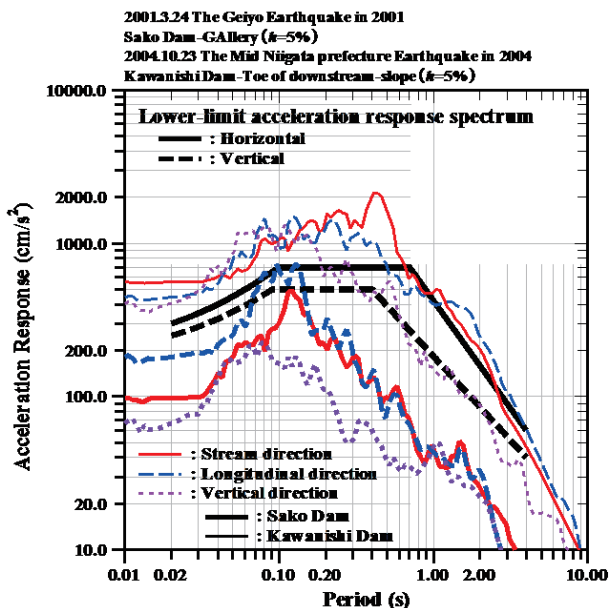


Fig. 20 加速度応答スペクトル（佐古ダムの河床部監査廊と川西ダムの下流法尻）

Acceleration response spectrum (Gallery of Sako Dam and toe of downstream slope of Kawanishi Dam)

「平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震」の川西ダムの地震時の状況から、地震時の堤頂の振動は、上下流方向のみ大きく振動せずに、ダム軸方向にも同程度の振動が観測される場合がある。さらに、短周期領域に比較的大きな加速度応答値が観測され、照査用下限加速度応答スペクトルに匹敵する地震動が観測された。このような強震動を受けても堤体は修復可能な範囲の損傷にとどまり、近代的な設計・施工に基づく農業用大ダムの耐震性能は確保されている。

V 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震

岩手県内陸南部で 2008 年 6 月 14 日、8 時 43 分に $M_j7.2$ ($M_w6.9$) の「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」が発生した。宮城県栗原市一迫及び岩手県奥州市衣川区で最大震度 6 強を観測し、関東・中部地方にかけて震度 1 以上を観測した。震源は、北緯 39.0° 、東経 140.9° 、深さ 8km、横ずれを伴う逆断層型の地殻内で発生した地震である。大規模な山体崩壊や土砂崩れ、河道閉塞などの斜面・土砂災害が発生した（気象庁、2011a）。震度 6 強を観測し

た衣川区では $1,816.5\text{cm/s}^2$ （全方向成分合成）、独立行政法人防災科学技術研究所が運用する基盤強震観測網（KiK-net）の震源断層直上の観測点（一関西：IWTH25）で $4,022\text{cm/s}^2$ （全方向成分合成）の最大加速度が記録された（独立行政法人防災科学技術研究所、2011）。気象庁により「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」、英語名称を「The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008」と命名された（気象庁、2008a）。

5.1 荒砥沢ダム（藍染湖：アイゼンコ）

5.1.1 ダム諸元及び特徴

荒砥沢ダム（Fig. 21（東北農政局迫川上流農業水利事業所、1999））は、北上川水系工事実施基本計画の改定に伴い宮城県の治水事業との共同化が図られ、農業用水の貯水と洪水調節を目的とする多目的の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムとして、国営迫川上流農業水利事業により宮城県栗原市の一級河川北上川水系二迫川に 1981 年に着工し 1998 年に竣工した。洪水期間の空容量を利用して下流の洪水調整機能を付加するため、洪水吐側溝部上流端にオリフィス形式の洪水吐を併設している。基礎岩盤は安山岩及び石英安山岩である。堤高 74.4m、堤頂長 413.7m、堤体積 3,048 千 m^3 、受益面積 3,790ha に対して有効貯水量は 13,510 千 m^3 である。



Fig. 21 荒砥沢ダム
Overall view of Aratozawa Dam

5.1.2 地震時の状況

ダム左岸上流で大規模な山体崩壊（幅約 900m、斜面長約 1,300m、面積約 98ha、滑落崖の最大落差は約 150m の国内で発生が確認された地すべりで最大規模の地すべり土塊 67,000 千 m^3 ）が発生し（林野庁東北森林管理局、2009）、貯水池内の有効貯水容量内に約 1,500 千 m^3 が流入したと推定された。この貯水池への流入土砂量は、100 年間の堆砂容量の 2 倍強に匹敵し、非洪水期の有効貯水量 13,510 千 m^3 の約 11%に相当する。堤体等での顕著な被害は生じず、貯水・構造機能は確保されていた。特徴的な被災として Fig. 22 に示すように、堤頂の沈下と揺さぶりによると考えられる二カ所の層別沈下計測点の塩化ビニル製管のマンホールからの突出しが生じた。写真後方の青線で示したほぼ常時満水位より高標高の裸地が崩壊地である（増川ら、2008a、

増川ら, 2009)。Fig. 23に洪水吐越しに貯水池と崩壊地(左上の山頂付近まで裸地となっている箇所が崩壊部最上部の滑落崖), Fig. 24に崩壊地からダムに向かって貯水池への流入土砂を示す(左奥の白っぽい長方形がダム堤体上流法面)。この被災に対して, 流入土砂全量の排土は地すべり土塊の安定性を損なう恐れがあることから, 流入土砂のうち約560千 m^3 を排土するとともに排土法面の安定対策を実施した。さらに, 不足貯水容量については水収支を再算定し, 代替貯水池を新設する災害復旧事業を平成20~22(2008~2010)年度に実施している(竹谷, 2011, 鎌田, 2012, 小澤ら, 2013)。この事業による排土作業のためダンプカー街道化した堤頂(堤頂保護アスファルトの損傷防止と工期短縮のため一方通行とし空荷車が堤長を右岸から左岸へ通行, 土砂搬出車は堤体下流法面の腹付け道路を通行)をFig. 25に示す。



Fig. 22 堤頂での変状
Damage at the dam crest of Aratozawa Dam



Fig. 23 貯水池越しの左岸上流地山の山体崩壊
Destructed area by landslide over reservoir of Aratozawa Dam



Fig. 24 貯水池に流入した崩壊土砂
Inflow of destructed area by landslide into reservoir of Aratozawa Dam



Fig. 25 流入土砂排土運搬用のダンプカー
Dump truck for excavation on the crest of Aratozawa Dam

震央とダム位置の関係をFig. 26に示す。本ダムは, 近年の堤高の高いロックフィルダムでの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊, 堤高に対して中間標高に位置する中心遮水ゾーン内のコア部と最大断面堤頂部の三箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値をTable 5に示す。本ダムでは, 河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。河床部監査廊の感震器の計測容量1,000 cm/s^2 を超える加速度が記録されている。荒砥沢ダムと同様に内陸直下型の地震動を受けた前述の「平成16年(2004年)新潟県中越地震」の川西ダムの下流法尻の最大加速度値(Table 4)に比較して2倍程度と極めて大きな地震動である。この非常に大きな地震動に対して, 堤頂部では入力加速度の1/2となる最大加速度値を観測し, 堤体内で振動が増幅されず, 逆に堤体内で振動が減衰した状況の応答加速度が観測される特徴的な地震時挙動が現われた。河床部監査廊から最大断面堤頂部に向かって水平動(上下流・ダム軸方向)の伝播は減少していながら, 鉛直動はあまり減少せずに伝播している現象は特徴的である。発生ひずみに対して非線形性の剛性と減衰を有している土質材料により造成されるフィルダム, 加えて動的特性の異なる土質材料によるゾーン構造を有するロックフィルダムの強震動時のこの特徴的な応答挙動を強震観測記録などにより解明することが重要である。入力加速度相当の加速度応答スペクトル(減衰定数は5%)をFig. 27に示す。ダム軸方向は0.5~1秒程度の周期領域で照査用下限加速度応答スペクトルより加速度応答値は小さいが, 他の二方向はともにほぼ照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値である。0.5秒以下の短周期領域では三方向とも照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値であり, 短周期領域の波動が大きな地震動である。0.1秒前後の短周期領域で, 加速度応答値は大きい, 卓越したピークはない。鉛直方向は0.04~0.08秒の短周期領域の範囲に大きな加速度応答値がある。計測震度は基部監査廊で5.7であり, 震度6弱となる。前述の川西ダムの下流法尻での5.8より小さく左岸地山での5.7と同じである。

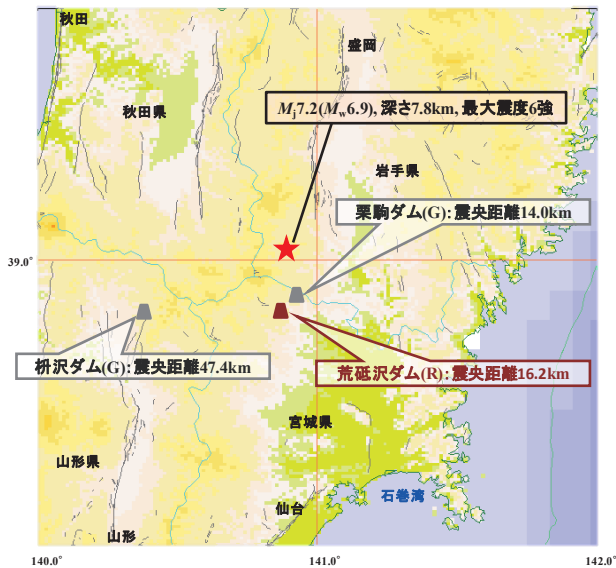


Fig. 26 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 5 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 (2008.6.14)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 279.4 m H=74.4 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-525.3	-455.4	-621.9
	Maximum Acc. Ratio	0.51	0.51	0.90
Core EL. 250.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-534.9	-477.9	-469.8
	Maximum Acc. Ratio	0.52	0.53	0.68
Foundation EL. 205.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	1023.8	-898.9	691.4
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

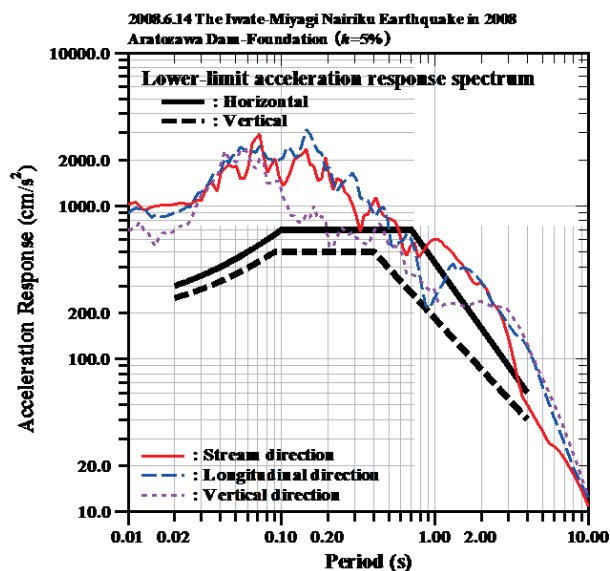


Fig. 27 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation)

「平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震」と同様に内陸直下の逆断層型によって発生した「平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震」の川西ダムの下流法尻にて観測された地震動の加速度応答スペクトルとの比較を Fig. 28 に示す。太線が川西ダム (下流法尻), 細線が本ダムの河床部監査廊の三方向成分である。提示した 0.01~10 秒の全周期領域での

加速度応答値は本ダムの方が大きく, 最大加速度値に関して荒砥沢ダムが川西ダムの 2 倍程度と極端に大きいことと相応している。0.2 秒以下の短周期領域での本ダムの加速度応答値が大きく, さらに, 0.3~2 秒程度の周期領域では川西ダムの加速度応答値が本ダムの加速度応答値より概ね大きく, 本ダムの短周期領域での加速度応答値が大きい特徴がある。このように両地震ともに震源に近い直下型の地震動であるが, 加速度応答値は異なっている。これは, 本ダムの基礎地盤は計画時に重力式コンクリートダムの築造が検討されたほど硬質な基礎地盤であること (増川, 2008b), さらに, 震源域のアスペリティによる起震断層の破壊方向, これに伴う地震動の収斂 (キラールパルス) などの震源域に近いことによる震源の破壊特性が地震動の振動数特性に影響していると考えられる (増川, 2006, 増川, 2008b)。今後さらに, 地震観測記録の蓄積による分析から明らかにできると考える。このように照査用下限加速度応答スペクトルに匹敵する地震動を受けても本ダムの貯水機能など重要な機能は損なわれておらず, 前述の川西ダムでも本ダムと同様に照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値となる地震動に対して修復可能な程度の被災あったことを踏まえても, 近代的な設計・施工に基づく農業用大ダムの耐震性能は確保されていると考えられる。

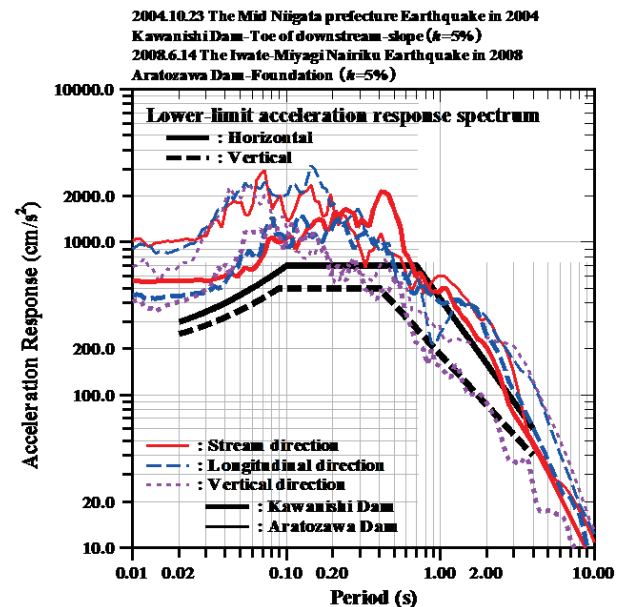


Fig. 28 加速度応答スペクトル (川西ダムの下流法尻と荒砥沢ダムの河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Toe of downstream-slope of Kawanishi Dam and foundation of Aratozawa Dam)

5.2 栗駒ダム

5.2.1 ダム諸元及び特徴

栗駒ダム (Fig. 29 (宮城県栗駒ダム管理事務所, 2013)) は, 北上川総合開発の一環として, 県営防災ため池事業が採択され, 洪水調節, 鉍毒防止, かんがい用水補給, 発電を目的とする補助多目的の重力式コンクリートダムとして築造された。宮城県栗原市の一級河川北上川水系迫川支川

三迫川に1950年に着工し1961年に竣工した。完成後20年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。基礎岩盤は玉山安山岩である。堤高57m、堤頂長182m、堤体積120千 m^3 、受益面積2,690haに対して有効貯水量は12,758千 m^3 である（宮城県栗駒ダム管理事務所，2013）。



Fig. 29 栗駒ダム
Overall view of Kurikoma Dam

5.2.2 地震時の状況

堤頂の門柱にクラックが発生したが（過去の地震による既存のクラックの拡大とも考えられる）、大きな被災は受けていない。池敷斜面の五箇所に土砂崩壊が発生し、堤体左岸近傍の上流部で発生した崩壊が最大であった。左岸の堤体下流側のフーチング部に大きな落石がありフーチングのエッジ部を破損した（石垣，2008，島本ら，2008，国土交通省国土技術政策総合研究所，2008，増川ら，2009）。

震央とダム位置の関係を前述の荒砥沢ダムと同一図のFig. 26に示す。本ダムは前述の荒砥沢ダムより震源に約2.2km近い。本ダムは、一般的な重力式コンクリートダムと異なる特徴的な地震計設置位置となっている。基部監査廊、堤頂部は左右岸地山取付け部に近い監査廊上端にそれぞれ左岸堤頂部監査廊と右岸堤頂部監査廊、下流右岸地山の四箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値をTable 6に示す。本ダムでは、基部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。同一地震による荒砥沢ダムの最大加速度値（Table 5）に比較して本ダムの最大加速度値は小さく、震央距離の大小に関係した最大加速度値が観測されていない。また、上下流方向の最大加速度値が他の二方向の1/2弱と小さい。鉛直方向の最大加速度値が大きい特徴があり、本ダムと同様に内陸直下型の地震動を受けたと考えられる前述の「平成16年（2004年）新潟県中越地震」の川西ダムの鉛直方向の最大加速度値が水平動の最大加速度値と同じ程度の大きさ（Table 4）であったのと特徴が同じである。この鉛直方向の最大加速度値が上下流・ダム軸方向より大きい、または、匹敵する大きさである特徴は、本ダムが極めて震源に近いと考えられる。「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」でも鉛直方向の地震動が大きく観測されたと同様に浅い震源による地震動の特徴（増川，2002b）であると考えられるが、今後さらに、地震観測記録の蓄積することで明らかにできると考える。左岸堤頂部監査廊のダム軸方向でほぼ重力加速度に達する最大加速度値が観測されている。左岸堤頂部監査廊の上下流方向での加速度比が約2.5と前述の内陸地震動で

ある「平成13年（2001年）芸予地震」での同一のダム型式である佐古ダムの4.5に比較して小さく、入力加速度は本ダムの方が約2.8（ $=270.6\text{cm/s}^2/98.1\text{cm/s}^2$ ）倍と大きく、フィルダムの応答特性の特徴である入力加速度が大きくなると応答加速度が小さくなる傾向と合致する。しかし、フィルダムの動的な材料非線形性をコンクリートダムも同様に有していると考えられない。さらに、同一ダムでの入力加速度と加速度比の関係ではないので、個々のダムの特徴である可能性もあり観測記録の蓄積が必要である。入力加速度相当の加速度応答スペクトル（減衰定数は5%）をFig. 30に示す。0.2秒以下の短周期領域では照査用下限加速度応答スペクトルより大きな加速度応答値であり、同一地震による前述の荒砥沢ダム（Fig. 27）と同様に短周期領域が卓越する直下型の地震動の特徴であると考えられる。また、上下流方向の最大加速度値が他の二方向に比較して小さいため、上下流方向の加速度応答値が小さい。ダム軸方向の最大加速度値が上下流方向より大きい観測結果と相応し、ダム軸方向の加速度応答値が大きくなっている。荒砥沢ダムに比較して最大加速度値が小さいことから短周期領域での加速度応答値も小さい。観測点位置の違いによる加速度応答スペクトルを比較するため、下流右岸地山の加速度応答スペクトルをFig. 31を示す、基部監査廊と下流右岸地山の両観測点の加速度応答スペクトルをFig. 32に重ねて示す。太線が基部監査廊、細線が下流右岸地山の三方向成分である。両観測点では上下流方向の短周期領域での加速度応答値に相違があるが、他の二方向は類似した加速度応答値であり、特に、長周期領域では加速度応答値は三方向ともほぼ重なっている。前述の内陸地震動である「平成13年（2001年）芸予地震」での同一のダム型式である佐古ダムの加速度応答スペクトル（Fig. 3）と比較すると、加速度応答値の大きさは異なっているが、両ダムともに0.1秒前後の周期領域に加速度応答値の最大値があり、内陸地震動及び重力式コンクリートダムの基礎岩盤の応答特性が現われていると考えられる。計測震度は基部監査廊で5.5であり、震度6弱、下流右岸地山で5.4であり、震度5強となる。下流右岸地山の最大加速度値は基部監査廊の最大加速度値より大きい、両観測点の計測震度が小数点一桁のわずかな差となっているのは、Fig. 32から基部監査廊（太実線）の大きな最大加速度値が観測されたダム軸方向の加速度応答値が0.1~0.2秒の周期領域で大きく、一方、下流右岸地山の上下流方向の加速度応答値は0.04秒付近の周期が大きいためと考えられる。

Table 6 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 (2008.6.14)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest right abutment EL. 200.0 m H=57.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	534.9	-511.1	323.5
	Maximum Acc. Ratio	1.98	1.11	0.80
Crest left abutment EL. 200.0 m H=57.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	666.1	921.9	436.7
	Maximum Acc. Ratio	2.46	2.00	1.09
Gallery EL. 157.3 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-270.6	461.3	-402.1
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00
Right abutment EL. 183.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-421.3	463.3	297.7
	Maximum Acc. Ratio	1.56	1.00	0.74

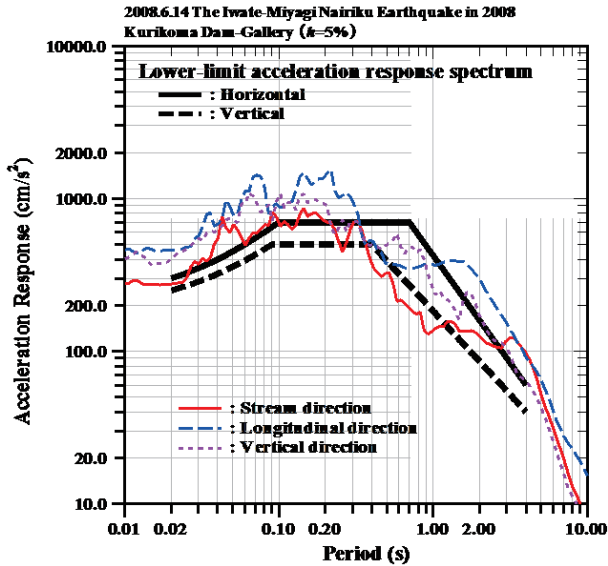


Fig. 30 加速度応答スペクトル (基部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery)

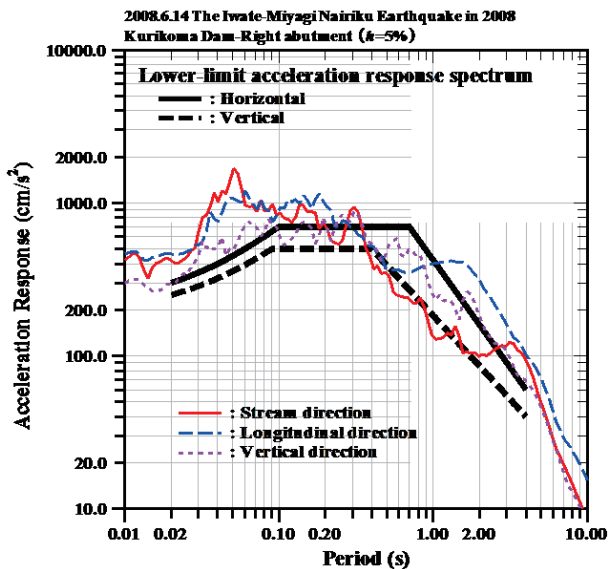


Fig. 31 加速度応答スペクトル (下流右岸地山)
Acceleration response spectrum (Right abutment)

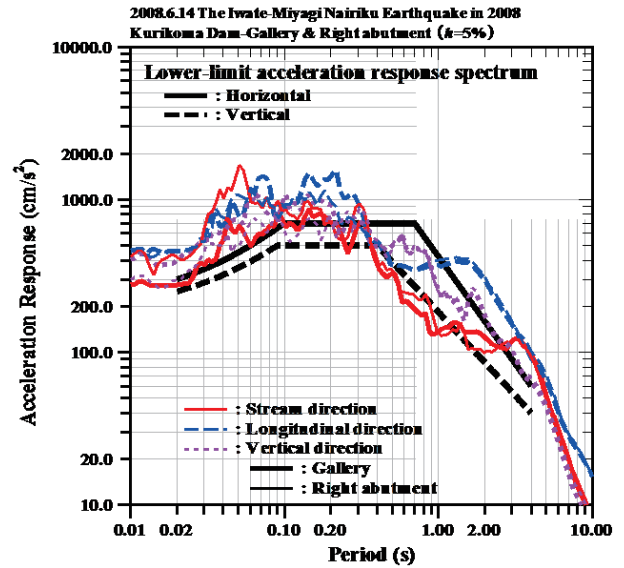


Fig. 32 加速度応答スペクトル (基部監査廊と下流右岸地山)
Acceleration response spectrum (Gallery and right abutment)

5.3 栲沢ダム

5.3.1 ダム諸元及び特徴

栲沢ダム (Fig. 33 (農林水産省東北農政局土地改良技術事務所, 2008a)) は, 昭和 26 年 (1951 年) 国土総合開発法により特定地域として山形県の東北端の本地区が最上総合開発事業に取り上げられた一環として, 昭和 27 年 (1952 年) に国営泉田川農業水利事業により山形県最上郡金山町の一級河川最上川水系栲沢川に農業用水の貯水のみを目的とした重力式コンクリートダムとして 1955 年に本体着工し 1963 年に竣工した。完成後 20 年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。安山岩類を基礎岩盤とし, 堤高 65.8m, 堤頂長 194.8m, 堤体積 156 千 m³, 受益面積は 3,489ha (うち 1,185ha は畑) に対して有効貯水量は 6,751 千 m³ であり, 現在では, 稲作を中心とした農業経営が受益地区で展開されている。



Fig. 33 栲沢ダム
Overall view of Masuzawa Dam

5.3.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の荒砥沢ダムと同一図の Fig. 26 に示す。栗駒ダム及び荒砥沢ダムに比較して本ダムの位置は震央から 30km 以上離れている。本ダムは, 重力式コンクリートダムでの一般的な地震計設置位置である河

床部監査廊と堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を **Table 7** に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。前述の栗駒ダムの最大加速度値 (**Table 6**) に比較して最大加速度値は 1/10 以下と小さいが、堤頂での加速度比は同程度となっている。前述の内陸地震動である「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」での同一のダム型式である佐古ダムの最大加速度値 (**Table 1**) と比較しても最大加速度値は小さい。さらに、両地震の規模 (本地震は $M_j7.2$, 「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」は $M_j6.7$)、震源の深さ (本地震は 7.8km, 「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」は 46.5km) や同程度の震央距離 (本ダムは 47.4km, 佐古ダムは 43.9km) と諸条件の相違を考慮しても本ダムの入力加速度の最大加速度値は小さい。前述の荒砥沢ダムと栗駒ダムの入力加速度の最大加速度値の相違のように震源との位置関係による地震動の振動数特性や震源と本ダムが火山フロントを挟んだ位置関係であることも影響し (森川ら, 2006), 地震動が減衰していると考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を **Fig. 34** に示す。照査用下限加速度応答スペクトルよりかなり小さい加速度応答値であり、三方向ともに類似した加速度応答値である。また、卓越した複数のピークがあり、基礎岩盤の応答特性を反映していると考えられる。同一地震による同一のダム型式である前述の栗駒ダムの加速度応答スペクトル (**Fig. 30**) との比較を **Fig. 35** に示す。太線が栗駒ダムの基部監査廊、細線が本ダムの河床部監査廊の三方向成分である。本ダムでの最大加速度値が極めて小さいため、加速度応答値は栗駒ダムの加速度応答値より小さい。しかし、栗駒ダムに比較して、震央距離が大きいいため、短周期領域での加速度応答値が小さく、加速度応答値が長周期領域にシフトしている。前述の内陸地震動である「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」での同一のダム型式であり、かつ同程度の震央距離である佐古ダムの加速度応答スペクトル (**Fig. 3**) と地震動の応答特性を比較するため両ダムの加速度応答スペクトルを **Fig. 36** に示す。太線が佐古ダムの河床部監査廊、細線が本ダムの河床部監査廊の三方向成分である。0.1 秒前後の短周期領域での加速度応答値が本ダムは、佐古ダムに比較して小さく、1 秒以上の長周期領域の加速度応答値が逆に佐古ダムに比較して大きく、長周期領域での加速度応答値の減少が小さい地震動である。「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」の二つのダム (美生ダム及び幕別ダム) の入力加速度相当の加速度応答スペクトル (**Fig. 12**) と長周期領域での加速度応答値の相違の比較を **Fig. 37** に示す。太線が美生ダムのコンクリートダム部の河床部監査廊、中太線が幕別ダムの左岸地山、及び細線が本ダムの河床部監査廊の三方向成分である。1 秒以上の長周期領域で本ダムは美生ダムの加速度応答値と同程度の大きさであり、美生ダムと同様に長周期領域での加速度応答値の右下がりの加速度応答値の減少傾向が照査用下限加速度応答スペクトルよりも小さい。長周期領域の波動を含む地震動の特徴が現われている。本ダムの計測震度は 3.7 であり、震度 4 となる。

Table 7 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 (2008.6.14)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 245.8 m H=65.8 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-108.4	45.3	-49.9
	Maximum Acc. Ratio	2.39	1.36	1.68
Gallery EL. 183.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	45.5	-33.3	29.7
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

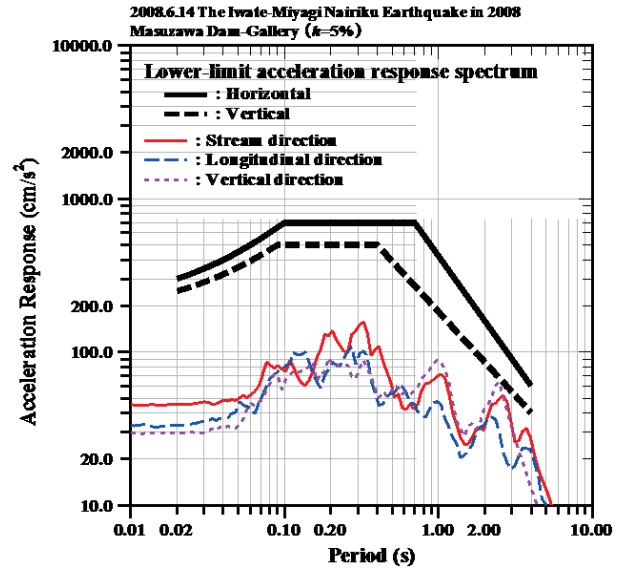


Fig. 34 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery)

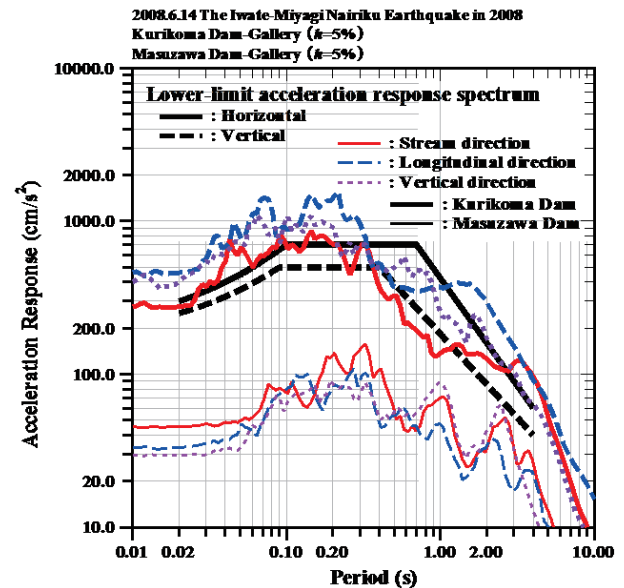


Fig. 35 加速度応答スペクトル (栗駒ダムの基部監査廊と枳沢ダムの河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery of Kurikoma Dam and Masuzawa Dam)

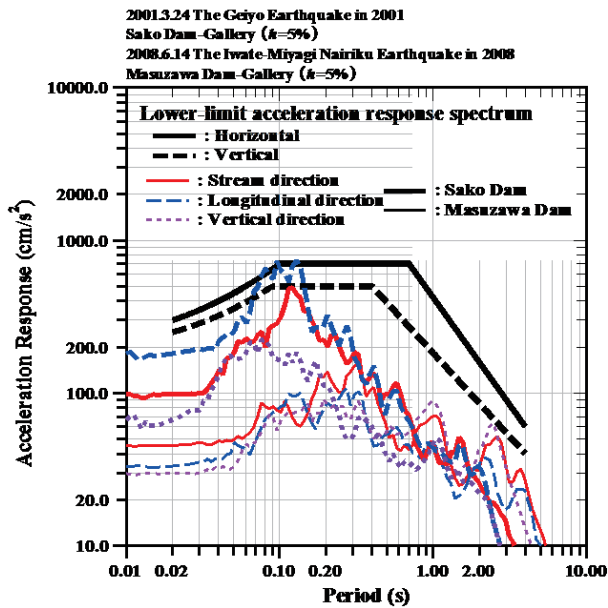


Fig. 36 加速度応答スペクトル (佐古ダムと枳沢ダムの河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery of Sako Dam and Masuzawa Dam)

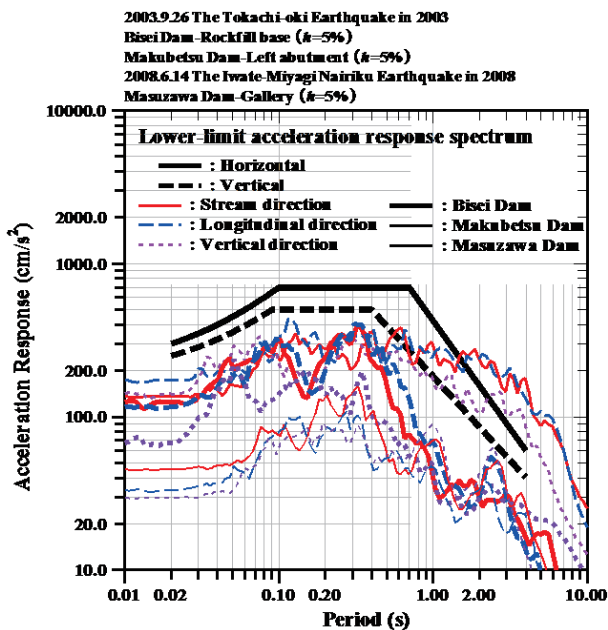


Fig. 37 加速度応答スペクトル (美生ダムのコンクリート部分河床部監査廊と幕別ダムの左岸地山と枳沢ダムの河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery of gravity at Bisei Dam, left abutment of Makubetsu Dam and gallery of Masuzawa Dam)

「平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震」の荒砥沢ダム、栗駒ダム及び枳沢ダムの地震時の状況から、地震時の堤頂の振動は、上下流方向に必ずしも大きく振動せずに、ダム軸方向や鉛直方向にも同程度、あるいはさらに大きな振動が観測される場合がある。また、内陸直下で発生する地震動では、短周期領域に比較的大きな加速度応答値が観測され、設定している照査用下限加速度応答スペクトルに匹敵する地震動が観測された。さらに、このような照査用下限加速度応答スペクトルに匹敵する地震動を受けても近

代的な設計・施工に基づく農業用大ダムでは耐震性能が確保されている。

VI 岩手県沿岸北部の地震 (2008 年 7 月 24 日)

岩手県沿岸北部で 2008 年 7 月 24 日、0 時 26 分に $M_j 6.8$ ($M_w 6.9$) の「岩手県沿岸北部の地震」が発生した。青森県の五戸町古館、八戸市南郷区、八戸市内丸、階上町道仏及び岩手県野田村野田で最大震度 6 弱を観測し、近畿地方の一部にかけて震度 1 以上を観測した。震源は、北緯 39.7° 、東経 144.6° 、深さ 108km、太平洋プレートの沈み込む方向に張力軸を持つ正断層型で太平洋プレート内部 (二重地震面の下面) のスラブ内で発生した地震である。短周期が卓越した地震動のため最大震度 6 弱に対して被害が比較的小さい特徴があった。余震活動は低調であった (気象庁, 2008b, 気象庁, 2011a)。地震後に最大震度 6 強を観測した岩手県整備の岩手県洋野町大野の震度観測点に地震後の現地調査で震度計台座と地面の間に数ミリの隙間が見られた。このため、7 月 25 日に気象庁の臨時震度計を洋野町役場大野庁舎内に設置した。両方の震度計で観測された 4 回の地震の震度データから、岩手県整備震度計は気象庁臨時震度計に比較して震度階級で 1 以上 (計測震度で平均 1.6) 大きな震度を観測していることが判明した。気象庁は防災上取り扱われる震度の品質管理の観点から気象庁が発表する震度の品質としては適切でないと判断した。この岩手県大野震度計で観測された震度は不明として取り扱い、岩手洋野町大野の震度を除き、最大震度は震度 6 強から、上記の 5 か所にて観測した震度 6 弱に変更された (気象庁, 2008c, 気象庁, 2008d)。

6.1 葛丸ダム (葛丸湖)

6.1.1 ダム諸元及び特徴

葛丸ダム (Fig. 38 (東北農政局山王海鹿妻農業水利事業所, 1999)) は、農業用水の貯水のみを目的とした中心遮水ゾーン型ロックフィルダムであり、国営山王海農業水利事業により岩手県花巻市の一級河川北上川水系葛丸川に 1978 年に本体着工し 1991 年に竣工した。完成後 20 年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。流紋岩類を基礎地盤とし、堤高 51.7m、堤頂長 220m、堤体積 678 千 m^3 、受益面積は 4,180ha (うち 160ha は畑) に対して有効貯水量は 4,650 千 m^3 である。受益地区では、これまでの恒常的な用水不足から事業完了後は用水の安定した供給によって一つの生産団地としてのもち水稻の作付面積・生産量とも全国 1 位を誇り、岩手県内一の総合果樹産地となっている。同事業にて造成した山王海ダム (詳細は 7.3.1 に後述) と本ダムを取水・導水のそれぞれのトンネルで連結し、非かんがい期に本ダム上流の葛丸川から取水し導水トンネルにて一時的に山王海ダムに貯水し、かんがい期に貯水したと同一水量を葛丸ダムへ放水する。二つのダム間で農業用水のやり取りが可能な親子ダム方式を採用している (増川, 2003)。



Fig. 38 葛丸ダム
Overall view of Kuzumaru Dam

6.1.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を Fig. 39 に示す。内陸で発生した地震であるが、本ダムは震央から離れている。本ダムは、近年の堤高の高いロックフィルダムでの一般的な地震計設置位置となっている。河床部監査廊、堤高に対して中間標高に位置する中心遮水ゾーン内のコア部と最大断面堤頂部の三箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 8 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。本地震は震源が深く、ダム位置も震央からある程度離れており直下型地震に相当しないと考えられるが、河床部監査廊の鉛直方向の最大加速度値が他の二方向の最大加速度値に比べて大きい。堤頂部での上下流方向の最大加速度値が大きく、加速度比も約7と大きくなっている。堤体内での上下流方向への振動の増幅が卓越していると考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル（減衰定数は5%）を Fig. 40 に示す。照査用下限加速度応答スペクトルと比較すると、小さい加速度応答値であるが、照査用下限加速度応答スペクトルに概ね類似した相似形の加速度応答値である。上下流方向（実線）の0.2秒付近の周期と鉛直方向（短破線）の0.45秒付近の周期に顕著なピークがある。内陸地震の前述の「平成16年（2004年）新潟県中越地震」の川西ダム及び「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震」の荒砥沢ダムの加速度応答スペクトル（Figs. 17, 27 及び 28）と比較して、小さな最大加速度値に対応し、小さな加速度応答値である。本ダムの加速度応答スペクトルは、長周期領域での加速度応答値が小さく、2秒以上の加速度応答値は非常に小さく、長周期領域での加速度応答値の減少傾向が照

査用下限加速度応答スペクトルの長周期領域での減少より大きい。このことは、本地震が前述のように短周期領域が卓越した地震動であったことが影響していると考えられる。計測震度は3.4であり、震度3となる。計測震度3.4は震度4に近い計測震度ではあるが、ダムが供用中に頻繁に経験する地震動である。



Fig. 39 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 8 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The Northern Coast of Iwate Prefecture (2008.7.24)		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 273.85 m H=51.7 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-310.4	-139.2	-96.8
	Maximum Acc. Ratio	7.21	4.76	1.93
Core EL. 248.00 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	92.2	-54.7	60.6
	Maximum Acc. Ratio	2.14	1.87	1.21
Foundation EL. 217.10 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	43.1	29.2	50.1
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

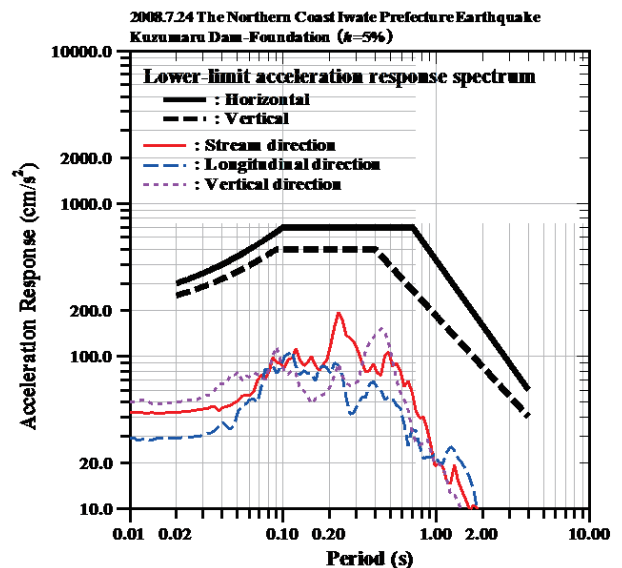


Fig. 40 加速度応答スペクトル（河床部監査廊）
Acceleration response spectrum (Foundation)

「岩手県沿岸北部の地震」の葛丸ダムの地震時の状況から、本地震動は短周期が卓越した地震動が特徴であったことから、本ダムでも長周期領域での加速度応答値の減少が大きくなり、2 秒以上の長周期領域では加速度応答値が非常に小さい地震動である。

VII 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震

太平洋三陸沖 (牡鹿半島の東南東約 130km 付近) で 2011 年 3 月 11 日、14 時 46 分に $M_j 9.0$ ($M_w 9.1$) の「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」が発生した。宮城県栗原市で最大震度 7、宮城県 13 市町村、福島県 11 市町、茨城県 8 市、栃木県 5 市町で震度 6 強、宮崎県、沖縄県以外の 45 都道府県で震度 1 以上を観測した。震源は、北緯 38.1° 、東経 142.9° 、深さ 24km、日本海溝沿いの沈み込み帯の大部分である三陸沖中部から茨城県沖までの太平洋プレートと陸のプレートの境界の広い範囲を震源域として発生した逆断層型の地震である。前震は 3 月 9 日に $M_j 7.3$ ($M_w 7.4$)、最大余震は 3 月 11 日、15 時 15 分に発生した $M_j 7.6$ の茨城県沖の地震 (最大震度 6 強: 茨城県銚田市) であり、震源域内や付近の余震・誘発地震はマグニチュード 7.0 以上が 6 回、マグニチュード 6.0 以上が 97 回に及んだ。また、本地震以降、長野県北部から新潟県中越地方、静岡県東部、秋田県内陸北部、茨城県南部及び長野県中部でも最大震度 5 強以上を観測する地震が発生するなど、余震活動域以外でも活発な地震活動が生じた。津波観測施設で東日本の太平洋沿岸を中心に非常に高い津波を福島県相馬で 9.3m 以上、宮城県石巻市鮎川で 8.6m 以上を観測し、さらに、北海道から鹿児島県にかけての太平洋沿岸や小笠原諸島で 1m 以上の津波を観測し、現地調査では 10m を超える津波の痕跡を確認した (気象庁, 2011b, 気象庁, 2012a, 気象庁, 2012b)。本地震の震源の領域は、震源として未知の規模であり、869 年貞観の三陸沖地震と 1896 年三陸沖地震級の津波地震が同時に再来したとの見解がある。地震動と津波により東京電力 (株) 福島第一原子力発電所での原子力発電建屋の水素爆発により放射性物質の管理区域外への放出が発生した。このため、放射線被ばくの防止のため警戒区域が設定され、10 万人を超える被災者が屋内退避や警戒区域外へ避難し、極めて深刻な 2 次被害が発生した。2013 年 9 月 1 日現在で、死者 18,703 人、行方不明者 2,674 人、負傷者 6,220 人、避難者数 61,355 人、全壊 126,574 棟、半壊 272,302 棟、一部破損 759,831 棟である (消防庁災害対策本部, 2013)。死者の 90% 以上が水死で、被害の多くは津波によるものである。広範囲の地震動と津波のため、このような史上未曾有の死傷・不明者と被害を生じ、政府はこの地震による震災の名称を「東日本大震災」とした。気象庁により「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」、英語名称を「The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake」と命名された (気象庁, 2011c)。

7.1 大志田ダム (菜魚湖: ナナコ)

7.1.1 ダム諸元及び特徴

大志田ダム (Fig. 41 (岩手県一戸町役場産業課農村整備係, 2013)) は、農業用水の貯水のみを目的とした重力式コンクリートダム (ゲートレス) であり、国営馬淵川沿岸農業水利事業により青森県二戸郡二戸町の一級河川馬淵川水系平糠川に拡張レア工法を用いて 1997 年に本体着工し 2004 年に竣工した。チャート類を基礎岩盤とし、堤高 63.7m、堤頂長 165m、堤体積 148 千 m^3 、受益面積は 2,191ha (うち 2,174ha は畑) に対して有効貯水量は 8,600 千 m^3 であり、受益地区で主要作物 (レタスなど) の定植・防除用水として活用され、冬作物の促成アスパラガスにも貢献している。また、リンゴの品質向上にも貢献している。



Fig. 41 大志田ダム
Overall view of Ooshida Dam

7.1.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を Fig. 42 に示す。本ダムは、本地震で検討したダムのなかで最も北に位置するダムである。この Fig. 42 には本地震での後述する他の地震観測記録を整理した 9 ダムの岩洞ダム、山王海ダム、葛丸ダム、豊沢ダム、相川ダム、岩堂沢ダム、二ツ石ダム、柘沢ダム及び千五沢ダムの位置も示す。本ダムは、重力式コンクリートダムでの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊と堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 9 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。上下流方向の加速度比は、前述の各地震での重力式コンクリートダムのうち「平成 13 年 (2001 年) 芸予地震」の佐古ダムの上下流方向の加速度比 4.5 について大きな加速度比である。本ダムは、堤頂長/堤高比 (L/H) が 2.59 ($=165m/63.7m$) と L/H が大きい佐古ダム ($L/H=6.77$) に比較して堤頂長/堤高比が小さい。堤頂長/堤高比が大きい程、地山拘束の影響が小さく、振動しやすいと考えられるが、両ダムの観測結果からは、加速度比は堤頂長/堤高比に影響されていないと考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 43 に示す。前述の「平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震」の柘沢ダムの加速度応答スペクトル (Fig. 34) に類似しているが、柘沢ダムのような卓越したピークはない。計測震度は、3.6 であり震度 4 となる。地震の規模は最大級であったが、震央距離が大きいため地震動は減衰しており、本ダムが供用中に度々に経験

すると考えられる地震動であった。

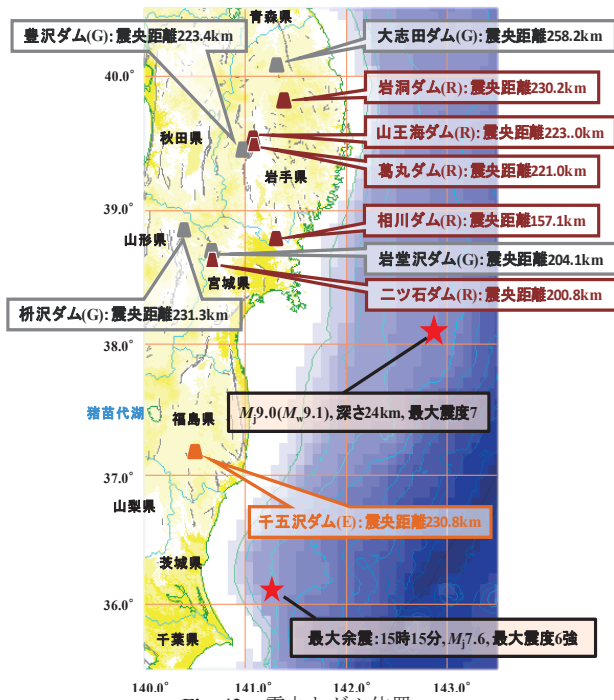


Fig. 42 震央とダム位置
Epicenter and dam position

Table 9 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 392.70 m H=63.7 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	164.9	-98.7	-46.0
	Maximum Acc. Ratio	3.26	2.34	1.20
Gallery EL. 335.70 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	50.6	42.1	-38.3
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

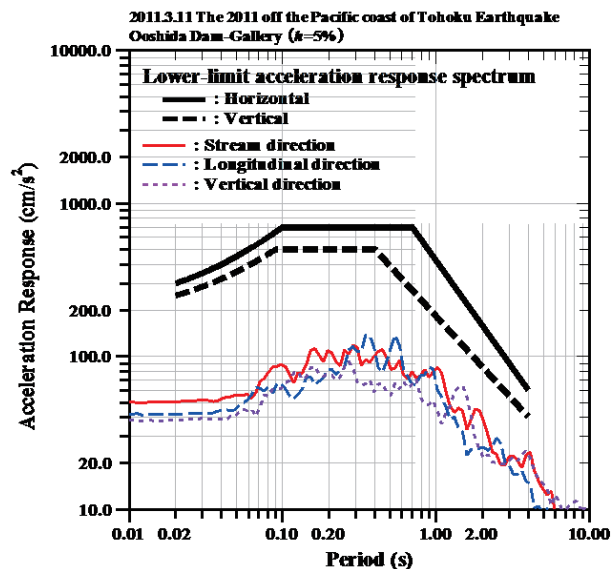


Fig. 43 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery)

7.2 岩洞ダム (岩洞湖)

7.2.1 ダム諸元及び特徴

岩洞ダム (Fig. 44 (農林水産省東北農政局土地改良技術

事務所, 2008b)) は, 国営岩手山麓開拓建設事業により岩手県盛岡市の一級河川北上水系丹藤川に農業用水と発電を目的とした傾斜遮水ゾーン型アースロックダムとして1956年に本体着工し1960年に竣工した。ダムサイトが主要都市である盛岡から遠隔の地であるためコンクリートダム築造は資材運搬費かさむことからフィルダム型式とされた。しかし, 寒冷地のため施工可能期間が限られる上に発電との共同事業のために工期短縮が優先されることから, 傾斜遮水型とされた日本で初めての大規模な土石混合型ダムである。遮水性ゾーンの盛立て工法は, 上流ゾーンはリフト高2~3mの低リフト工法, 一方, 下流ゾーンはリフト高10mの高リフト工法を採用した。完成後20年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。チャート類を基礎地盤とし, 堤高40m, 堤頂長351m, 堤体積850千m³, 受益面積は8,345ha (うち5,869haは畑) に対して有効貯水量は46,300千m³であり, 水稻, 野菜, 園芸, 畜産など多様な農業が受益地区で展開されている。農業用ダムの中でも有効貯水量が大きなダムに数えられている (Fig. 45 (中嶋, 2003))。



Fig. 44 岩洞ダム
Overall view of Ganndou Dam



Fig. 45 岩洞ダム
Overall view of Ganndou Dam

7.2.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。本ダムは, 監査廊を有していないことから, 下流法尻の基礎地盤相当, 最大断面堤頂部と右岸地山の管理棟の三箇所に地震計が設置されている。ただし, 管理棟に設置されている地震計観測記録は参考とされている。観測された最大加速度値を Table 10 に示す。本ダムでは, 下流法尻の観測点での観測記録を入力加速度と見なし

ている。下流法尻での上下流方向とダム軸方向の加速度最大値はほぼ同じであり、基礎での地震動の増幅の方向による相違はない。堤頂部では、上下流方向よりダム軸方向の最大加速度値が大きく、堤体内でのダム軸方向への振動の増幅が卓越する特徴が現われている。堤頂部では加速度比は4程度であり、前述の「岩手沿岸北部の地震」の葛丸ダムの上下流方向の加速度比の約7 (Table 8) に比較して小さい、葛丸ダムの約 40cm/s^2 に比較して本ダムは約 65cm/s^2 と入力加速度値が大きく、フィルダムでの応答特性の特徴である入力加速度が大きくなると応答加速度が小さくなる傾向となっているか、または、本ダムの堤高が葛丸ダムよりも少し低いことから堤体内での振動の増幅が小さいと考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は5%) を Fig. 46 に示す。0.2秒の周期での加速度応答値が大きく、短周期及び長周期領域で緩やかに減少する特徴的な加速度応答値である。計測震度は3.9であり、震度4となる。前述の大志田ダムと同様に、地震の規模は史上最大級であったが、震央距離が大きいため地震動は減衰しており、本ダムが供用中に度々に経験すると考えられる地震動であった。

Table 10 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 700.50 H=40.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	254.9	290.3	-104.0
	Maximum Acc. Ratio	3.91	4.41	2.77
Toe of downstream-slope EL. 671.51 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-65.2	-65.8	37.5
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

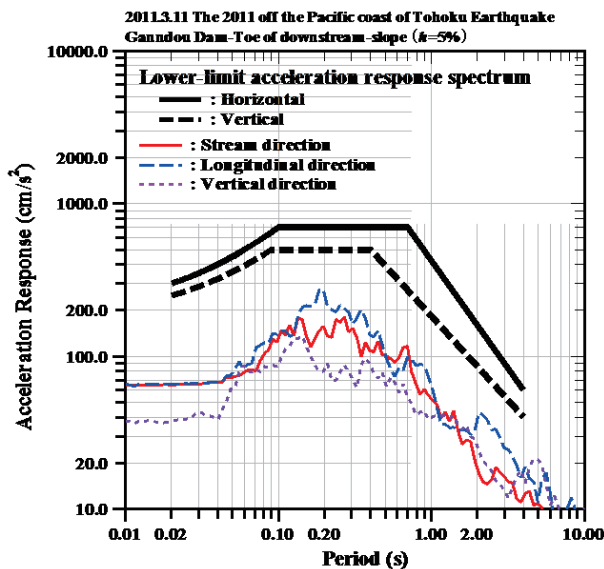


Fig. 46 加速度応答スペクトル (下流法尻)
Acceleration response spectrum (Toe of downstream-slope)

7.3 山王海ダム (平安の湖)

7.3.1 ダム諸元及び特徴

山王海ダム (Fig. 47 (都築, 2001)) は、農業用水の貯水のみを目的とした中心遮水ゾーン型ロックフィルダムであり、国営山王海 (二期) 農業水利事業により岩手県紫波郡

紫波町の一級河川北上川水系滝名川に 1990 年に本体着工し 2001 年に竣工した。安山岩を基礎地盤とし、堤高 61.5m、堤頂長 241.6m、堤体積 1,049 千 m³、受益面積は 3,890ha (畑はなし) に対して有効貯水量は 37,600 千 m³ である。本ダムは、新たな水源確保の必要性から、近代フィルダムの草分け的ダムとして完成した旧山王海ダム (堤高 37.4m、堤頂長 150m、堤体積 276 千 m³、有効貯水量 9,594 千 m³) を嵩上げし (堤高 37.4m から 61.5m の 24.1m 増)、有効貯水量を 4 倍弱に増加した。Fig. 48 に、旧山王海ダムによって利水を継続し、下流に新堤 (嵩上げ堤体) を築造している状況と、新・旧堤体のダム軸が平行していない状況が捉えられている (農林水産省東北農政局土地改良技術事務所, 2008c)。かんがい専用ダムとしては貯水容量が全国一の規模となり自流域の滝名川だけでは十分に水量を確保できないため、前述のように葛丸ダムと親子ダムとして効率的な水運用を図っている。堤体下流斜面に「平安」の文字が植樹されており、旧ダムの建設時の願いである永遠に水争いが無い平穏の願いを引き継いでいる (増川, 2003)。



Fig. 47 山王海ダム
Overall view of Sannoukai Dam



Fig. 48 旧山王海ダムと嵩上げ山王海ダム
Overall view of old Sannoukai Dam and raising Sannoukai Dam

7.3.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。近隣に葛丸ダム及び豊沢ダムが位置している。本ダムは、近年の堤高の高いロックフィルダムでの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊、堤高に対して中間標高に位置する中心遮水ゾーン内のコア部と最大断面堤頂部の三箇所に地震計が設置されている。さらに、嵩上げダムである特殊性から旧堤体の地震時挙動を把握するため旧堤体の撤去した堤頂部の撤去面にも地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 11 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。旧堤体の堤頂部の撤去面の観測点の標高はコア部の観測点の標高よりわずかに低い標高であるが、堤頂部より大きな最大加速度値であり旧堤体内での振動の増幅は大きくなっている。これは、旧堤体がアースフィルであることから嵩上げ堤体に比較して堤体が柔らかい(剛性が小さい)ためと考えられる。嵩上げ堤体内では、標高が高くなるに従い最大加速度値は大きくなっており、嵩上げ堤体内で振動が増幅されている。入力加速度相当の加速度応答スペクトル(減衰定数は5%)を Fig. 49 に示す。プレート境界で発生し、震源が離れている地震動にもかかわらず、直下型地震動に対して設定した照査用下限加速度応答スペクトルに類似した0.1~0.7秒の周期領域で平坦な加速度応答値である。加速度応答値を大きくすると照査用下限加速度応答スペクトルに一致するような照査用下限加速度応答スペクトルに相似な加速度応答値である。しかし、長周期領域での加速度応答値の右下がりの減少傾向が照査用下限加速度応答スペクトルよりも小さい。計測震度は4.0であり、震度4となる。

Table 11 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest El. 307.5 m H=61.5 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-235.4	-217.4	-144.5
	Maximum Acc. Ratio	4.12	4.01	3.23
Core El. 276.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-115.1	-96.9	-83.5
	Maximum Acc. Ratio	2.02	1.79	1.87
Foundation El. 242.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	57.1	-54.2	44.7
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00
Old crest El. 280.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-247.5	-183.8	-107.8
	Maximum Acc. Ratio	4.33	3.39	2.41

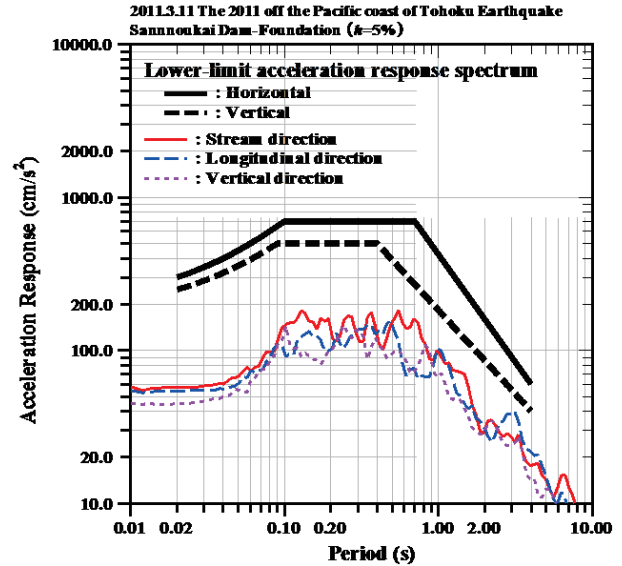


Fig. 49 加速度応答スペクトル(河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation)

7.4 葛丸ダム(葛丸湖)

7.4.1 ダム諸元及び特徴

前述の「VI 岩手県沿岸北部の地震(2008年7月24日)」の「6.1 葛丸ダム」に同じである。

7.4.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。前述のように特徴的な水運用を実施している山王海ダムに隣接しているダムである。地震計設置位置は前述の「VI 岩手県沿岸北部の地震(2008年7月24日)」の「6.1 葛丸ダム」に同じである。観測された最大加速度値を Table 12 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。本ダムの震央距離は前述の山王海ダムより震央に2km近く、入力加速度相当の最大加速度値は山王海ダム(Table 11)より本ダムが大きい。この最大加速度値の大きさの相違は、震央距離による加速度減衰よりも両ダムでの基礎地盤の応答特性の相違であると考えられる。堤体内のコア部ではダム軸方向の加速度比が上下流方向よりも大きい。堤頂部では上下流方向の加速度比が大きくなり最大加速度値も上下流方向が大きくなっている。この現象は、「岩手県沿岸北部の地震」の増幅の特性(Table 8)と異なっており、発生した地震動の振動数特性が影響していると考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル(減衰定数は5%)を Fig. 50 に示す。前述の山王海ダムの Fig. 49 と比較して、0.2秒付近の周期の加速度応答値が大きい。山王海ダムと同様に長周期領域での加速度応答値の右下がりの減少傾向が照査用下限加速度応答スペクトルよりも小さい。計測震度は4.2であり、震度4となる。

同一ダムでの異なる地震による地震動の加速度応答スペクトルの相違を比較するため、前述の「VI 岩手県沿岸北部の地震(2008年7月24日)」の「6.1 葛丸ダム」での加速度応答スペクトル(Fig. 40)と本地震での加速度応答スペクトルとを Fig. 51 に重ねて示す。太線が前述の「岩手県

沿岸北部の地震」, 細線が本地震の三方向成分である。本地震は内陸で発生した「岩手県沿岸北部の地震」と異なり, 長周期領域の加速度応答値の減少が小さい地震動である。

Table 12 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 273.85 m H=51.7 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-311.5	-262.9	-139.6
	Maximum Acc. Ratio	4.39	4.19	2.42
Core EL. 248.00 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	110.0	-109.0	82.8
	Maximum Acc. Ratio	1.55	1.74	1.43
Foundation EL. 217.10 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-71.0	-62.8	57.8
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

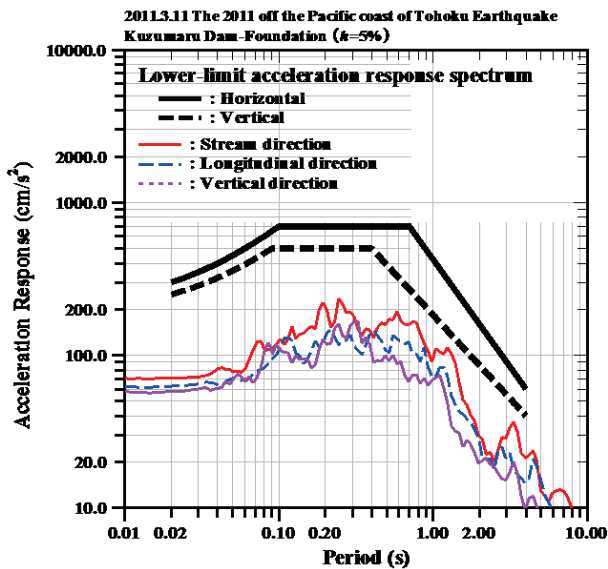


Fig. 50 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation)

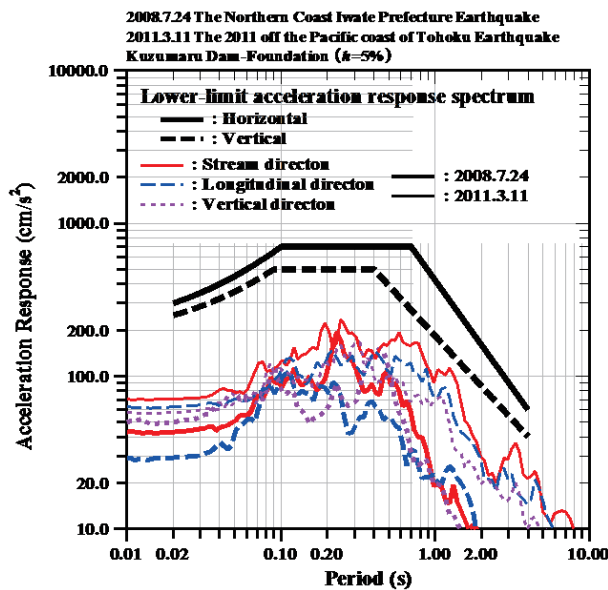


Fig. 51 「岩手県沿岸北部の地震」(河床部監査廊)と「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」の加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation) at “The Northern Coast Iwate Prefecture” and “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”

7.5 豊沢ダム (豊沢湖)

7.5.1 ダム諸元及び特徴

豊沢ダム (Fig. 52) は, 農業用水の貯水のみを目的とした重力式コンクリートダムであり, 国営豊沢川農業水利事業により岩手県花巻市の一級河川北上川水系豊沢川に 1949 年に本体着工し 1961 年に竣工した。花崗岩類を基礎岩盤とし, 堤高 59.1m, 堤頂長 150m, 堤体積 130 千 m³, 受益面積は 5,316ha (畑はなし) に対して有効貯水量は 19,856 千 m³ であり, 受益地区では安定的な用水が確保され, 水稻のほか小麦, 大豆が作付されている。完成後 20 年以上を経過しており長期供用ダムに数えられるダムである。



Fig. 52 豊沢ダム
Overall view of Toyosawa Dam

7.5.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。前述の山王海ダム及び葛丸ダムに近接したダムである。本ダムは, 重力式コンクリートダムの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊と堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 13 に示す。本ダムでは, 河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。前述の山王海ダムや葛丸ダムと震央距離はほぼ同距離 (山王海ダム: 223.0km, 葛丸ダム: 221.0km と本ダム: 223.4km) であるが, 両ダムの基礎での最大加速度値 (Tables 11 及び 12) のおよそ 45cm/s² 以上に比較して本ダムの最大加速度値は小さい。さらに, 震央距離が大きな大志田ダム (震央距離 258.2km) の最大加速度値 (Table 9) の 40 弱~50cm/s² よりも小さいことから, それぞれのダムでの最大加速度値の大きさの相違は, 震央距離による加速度減衰よりも各ダムの基礎岩盤の応答特性の相違であると考えられる。堤頂部では上下流方向が他の二方向成分の 2 倍程度の加速度比となる 3.45 であり, 前述の大志田ダムと同程度の加速度比である。入力

加速度相当の加速度応答スペクトル（減衰定数は5%）を Fig. 53 に示す。Table 13 のように河床部監査廊での 30～40cm/s² 程度の最大加速度値であることから、照査用下限加速度応答スペクトルよりかなり小さい加速度応答値である。上下流方向の短周期領域では他の二方向よりも大きな加速度応答値であるが、三方向ともに提示した 0.01～10 秒までの全周期領域ではほぼ同程度の加速度応答値である。長周期領域での加速度応答値の右下がりの減少傾向が照査用下限加速度応答スペクトルよりも小さい。計測震度は 3.4 であり、震度 3 となる。

Table 13 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 301.40 m H=59.1 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	140.7	-50.2	-45.8
	Maximum Acc. Ratio	3.45	1.67	1.45
Gallery EL. 248.50 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	40.8	-30.1	31.6
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

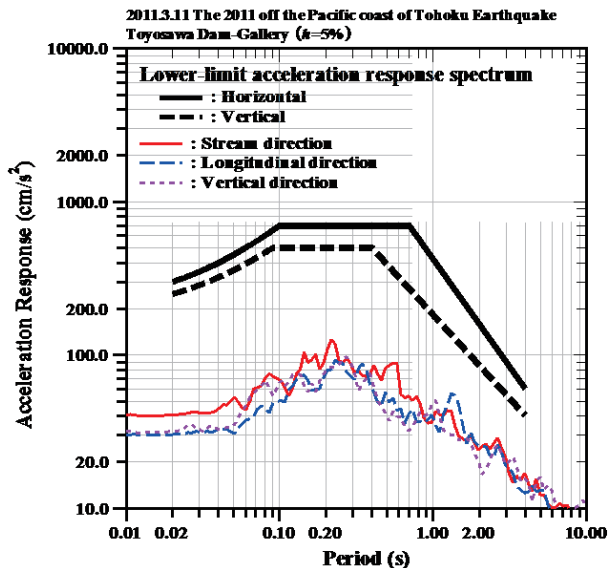


Fig. 53 加速度応答スペクトル（河床部監査廊）
Acceleration response spectrum (Gallery)

7.6 相川ダム（まさぼう湖）

7.6.1 ダム諸元及び特徴

相川ダム（Fig. 54（東北農政局藤沢開拓建設事業所，1999）は、農業用水の貯水のみを目的とした中心遮水ゾーン型ロックフィルダムであり、国営藤沢開拓建設事業により岩手県東磐井郡藤沢町の一級河川北上川水系相川に1993年に本体着工し1996年に竣工した。二疊紀堆積岩の粘板岩を基礎地盤とし、堤高40.3m、堤頂長168m、堤体積344千m³、受益面積は508ha（うち488haは畑）に対して有効貯水量は1,600千m³である。



Fig. 54 相川ダム
Overall view of Aikawa Dam

7.6.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。本ダムは、本地震で検討したダムのなかで最も震央に近いダムである。本ダムは、河床部監査廊と最大断面堤頂部の二箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 14 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。前述の岩洞ダム（Table 10）、山王海ダム（Table 11）及び葛丸ダム（Table 12）に比較して、入力加速度相当の最大加速度値は100cm/s²程度と大きく、震央に近いことを反映した観測値となっている。入力加速度相当の最大加速度値が三方向ともにほぼ同じ大きさであるが、堤頂部では上下流方向の最大加速度値が大きく、ダム軸方向と鉛直方向の二方向は同程度となっており、上下流方向の加速度比が大きく、堤体内での上下流方向への振動の増幅が卓越している。入力加速度相当の加速度応答スペクトル（減衰定数は5%）を Fig. 55 に示す。前述の岩洞ダム（Fig. 46）、山王海ダム（Fig. 49）及び葛丸ダム（Fig. 50）に比較して、最大加速度値が大きかったことから、加速度応答値は大きくなっており、最大加速度値が本ダムに次いで大きな葛丸ダムの加速度応答スペクトルの短周期領域の加速度応答値を大きくしたような加速度応答値である。入力加速度相当の最大加速度値が上下流方向とダム軸方向ともにほぼ同じであるため、提示した 0.01～10 秒の全周期領域での加速度応答値は両方向ともほぼ同じである。鉛直方向の最大加速度値が他の二方向に比較してわずかに小さいことから、提示した 0.01～10 秒の全周期領域での加速度応答値も他の二方向に比較して小さくなっている。計測震度は 4.4 であり、震度 4 となる。上記のように加速度応答値も前述の岩洞ダ

ム (Fig. 46), 山王海ダム (Fig. 49) 及び葛丸ダム (Fig. 50) に比較して大きいため, これらのダムの震度 4 (計測震度はそれぞれ 3.9, 4.0 及び 4.2) よりも計測震度が 4.4 と震度 4 としては大きくなっている。

Table 14 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 98.50 m H=40.3 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-451.9	-332.3	-334.1
	Maximum Acc. Ratio	4.32	3.27	3.52
Foundation EL. 55.50 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	104.5	101.7	94.9
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00



Fig. 56 岩堂沢ダム
Overall view of Ganndouzawa Dam

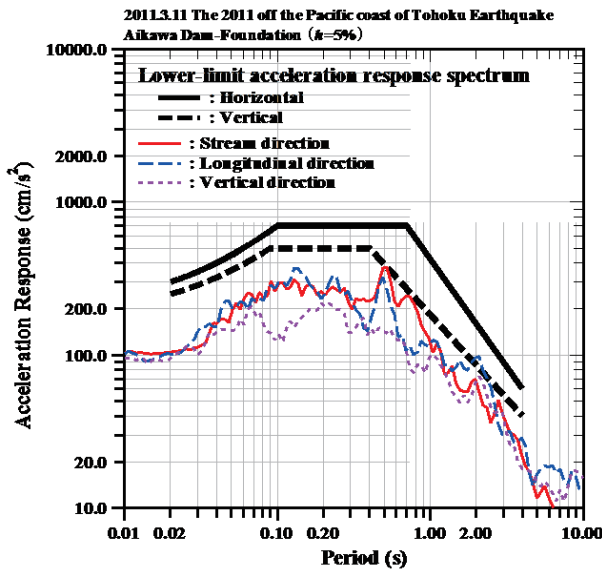


Fig. 55 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation)

7.7 岩堂沢ダム

7.7.1 ダム諸元及び特徴

岩堂沢ダム (Fig. 56 (宮城県大崎地方ダム総合事務所, 2013)) は, 農業用水の貯水のみを目的とした重力式コンクリートダム (ゲートレス) であり, 国営かんがい排水事業大崎地区により宮城県大崎市の一級河川北上川水系大谷川岩堂沢に拡張レア工法を用いて 2001 年に本体着工し 2009 年に竣工した。新第三紀系の二つ森層安山岩類を基礎岩盤とし, 堤高 68m, 堤頂長 200m, 堤体積 235 千 m³, 受益面積は 10,425ha (畑はなし) に対して有効貯水量は 1,300 千 m³ である。大崎市他 3 町に展開する大崎耕土と称される宮城県内有数の穀倉地帯への農業用水の供給を担っている。

7.7.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。後述の二ツ石ダムに近接したダムである。本ダムは, 重力式コンクリートダムでの一般的な地震計設置位置である河床部監査廊と堤頂部の二箇所に加えて右岸地山のリム (グラウト) トンネルの合計三箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 15 に示す。本ダムでは, 河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。右岸地山の最大加速度値は, 河床部監査廊の最大加速度値に比較して大きい。堤頂部の上下流方向とダム軸方向の加速度比が同程度となっており, 堤体内での振動の増幅に方向による相違が現れていない。前述の大志田ダム及び豊沢ダムに比較して震央に近い (それぞれ 258.2km 及び 223.4km, 本ダムは 204.1km), 最大加速度値 (それぞれ Tables 9 及び 13) も大きくなっている。本ダムもこれらの両ダムともに加速度比は同程度の 3~4 弱程度となっており, 30~60cm/s² 程度の入力加速度に対して重力式コンクリートダムは, 堤高や堤体積に影響されずに振動の増幅が生じていると考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 57 に示す。三方向ともに最大加速度値が同程度のため, 三方向とも類似した加速度応答値となっており, 1 秒以下の周期領域では三方向の加速度応答値がほぼ重なっており, 方向による特徴が現われていない。しかし, 1 秒以上の長周期領域では異なる加速度応答値である。0.1~0.2 秒の短周期領域の加速度応答値が大きく, 長周期領域での加速度応答値が穏やかに減少する。前述の大志田ダムの Fig. 43 や豊沢ダムの Fig. 53 の加速度応答スペクトルと比較して 0.1~0.2 秒の短周期領域で大きな加速度応答値である。地震動の観測点位置の違いによる加速度応答スペクトルを比較するため, 右岸地山のリムトンネルの加速度応答スペクトルを Fig. 58 に示す。河床部監査廊と右岸地山のリムトンネルの両観測点の加速度応答スペクトルを Fig. 59 に重ねて示す。太線が河床部監査廊, 細線が右岸地山の三方向成分である。河床部監査廊より右岸地山の最大加速度値が大きいことから, 加速度応答値も大きくなっている。右岸地山の 0.2~1 秒の加速度応答値が大きくなっており, 右岸地山の応答特性が現われていると考えられる。2 秒以上の長周期領域では両観測点の加速度応答値は重なっており, 異なる観測点

での応答特性が現われていない。計測震度は河床部監査廊で3.9であり、震度4、右岸地山のリムトンネルで4.2であり、震度4となる。右岸地山は河床部監査廊の最大加速度値より大きいことと、加速度応答値も0.2~1秒で大きいことが計測震度の差となっていると考えられる。

Table 15 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 411.0 m H=68.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	218.3	201.7	82.7
	Maximum Acc. Ratio	3.63	3.20	1.54
Gallery EL. 351.3 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-60.2	63.1	53.8
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00
Right abutment EL. 411.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-83.8	69.8	78.0
	Maximum Acc. Ratio	1.39	1.11	1.45

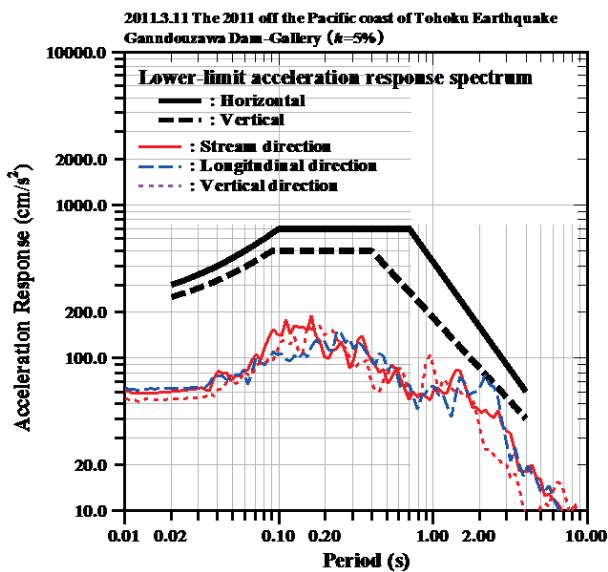


Fig. 57 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Gallery)

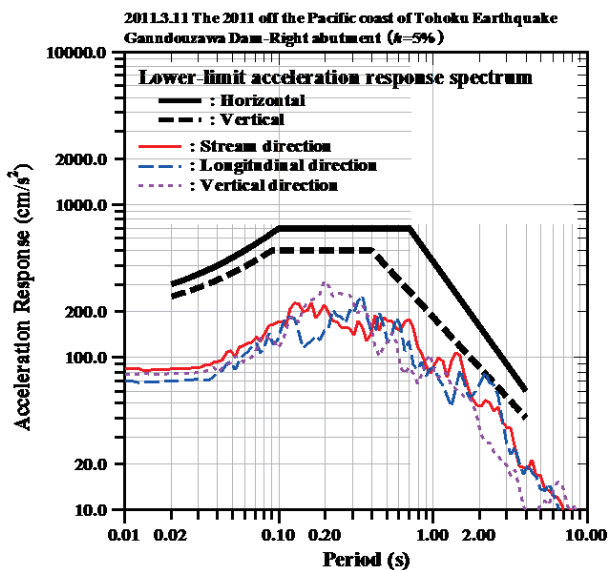


Fig. 58 加速度応答スペクトル (右岸地山リムトンネル)
Acceleration response spectrum (Right abutment)

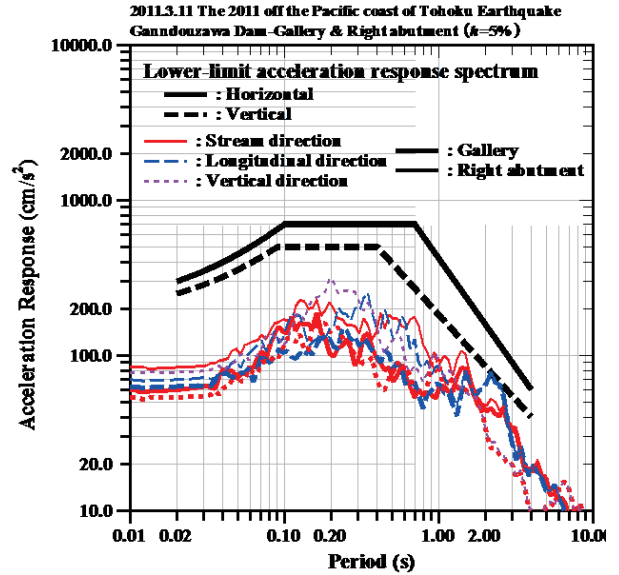


Fig. 59 加速度応答スペクトル (河床部監査廊と右岸地山リムトンネル)
Acceleration response spectrum (Gallery and right abutment)

7.8 ニツ石ダム

7.8.1 ダム諸元及び特徴

ニツ石ダム (Fig. 60 (農林水産省東北農政局土地改良技術事務所, 2008d)) は、農業用水の貯水のみを目的とした中心遮水ゾーン型ロックフィルダムであり、国営かんがい排水事業鳴瀬川地区により宮城県加美郡加美町の一級河川鳴瀬川水系ニツ石川に1997年に本体着工し2008年に竣工した。新第三紀中新世魚取沼層の凝灰岩類及び流紋岩を基礎地盤とし、堤高70.5m、堤頂長439m、堤体積2,256千m³、受益面積は9,736ha(畑はなし)に対して有効貯水量は9,700千m³である。大崎市他1市5町に展開する大崎耕土と称される宮城県内有数の穀倉地帯への農業用水の供給を担っている。コア敷幅は貯水深と同一長さを確保している。



Fig. 60 ニツ石ダム
Overall view of Futatsuishi Dam

7.8.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。前述の岩堂沢ダムに隣接し、震央距離もほぼ同じ (岩堂沢ダム 204.1km と本ダム 200.8km) である。本ダムは、近年の堤高の高いロックフィルダムでの一般的な地震計設置位置と同様に、河床部監査廊、堤高に対して中間標高に位置する中心遮水ゾーン内のコア部と最大断面堤頂部、これらに加えて左岸地山のリム (グラウト) トンネルの四箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 16 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。前述の岩堂沢ダムの右岸地山と同様に本ダムの左岸地山の最大加速度値は河床部監査廊の最大加速度値に比較して大きい。堤頂部の鉛直方向の最大加速度値はダム軸方向よりも大きく、さらに、鉛直方向の加速度比が三方向の中で最も大きく、堤頂に向かって鉛直動が増幅されている。振動の増幅は、河床部監査廊からコア部までに比較し、コア部から堤頂部の間での増幅が急激に大きくなっている。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 61 に示す。前述の岩堂沢ダム (Fig. 57) と類似した加速度応答値である。岩堂沢ダムと比して 0.1~1 秒の周期領域に卓越したピークがある。地震動の観測点位置の違いによる加速度応答スペクトルを比較するため、左岸地山のリムトンネルの加速度応答スペクトルを Fig. 62 に示す。河床部監査廊と左岸地山のリムトンネルの両観測点の加速度応答スペクトルを Fig. 63 に重ねて示す。太線が河床部監査廊、細線が左岸地山の三方向成分である。左岸地山の三方向の 2 秒以下の周期領域の加速度応答値が大きくなっており、上下流方向 (細実線) は 0.3~2 秒の周期領域にいて加速度応答値が大きくなり、ダム軸方向 (細破線) は 0.2 秒に卓越したピークがあり、鉛直方向 (細短破線) は 1~2 秒以下の周期領域全体での加速度応答値が大きくなっている。このように両観測点での加速度応答値の相違が明確である。計測震度は河床部監査廊で 4.1 であり、震度 4、左岸地山のリムトンネルで 4.7 であり、震度 5 弱となる。左岸地山は河床部監査廊の最大加速度値より 1.4~1.8 倍程度大きいことと、加速度応答値も大きくなっていることが計測震度の大きな差となっていると考えられる。

Table 16 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest El. 243.5 m H=70.5 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-165.2	-137.5	155.8
	Maximum Acc. Ratio	2.18	1.84	2.84
Core El. 200.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-97.6	87.2	58.3
	Maximum Acc. Ratio	1.29	1.17	1.06
Foundation El. 169.5 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-75.7	-74.7	-54.8
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00
Left abutment El. 243.5 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-109.3	-127.1	-96.3
	Maximum Acc. Ratio	1.44	1.70	1.76

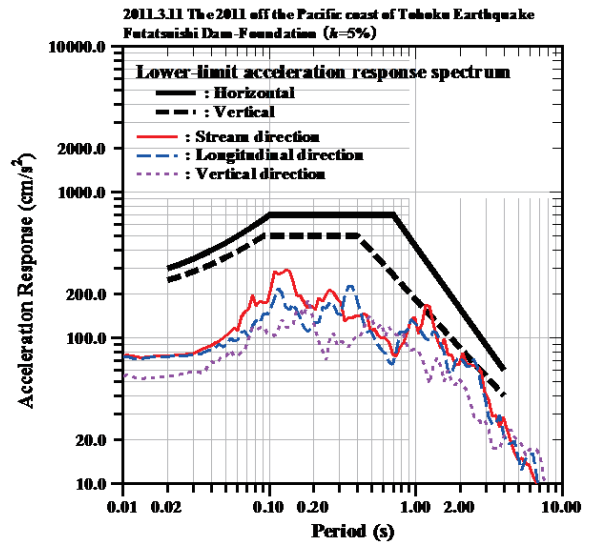


Fig. 61 加速度応答スペクトル (河床部監査廊)
Acceleration response spectrum (Foundation)

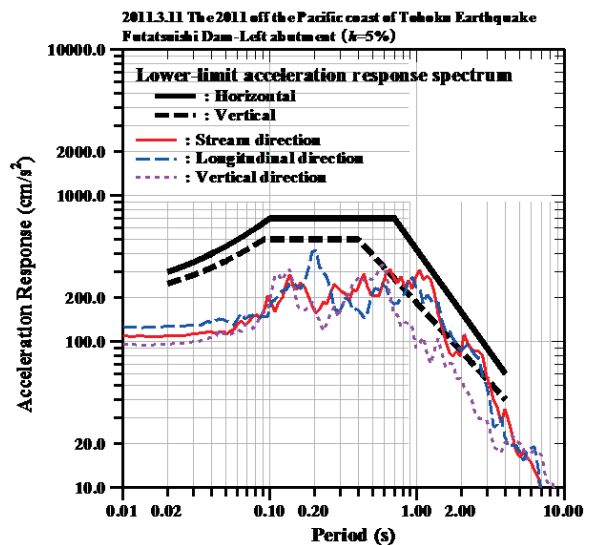


Fig. 62 加速度応答スペクトル (左岸地山リムトンネル)
Acceleration response spectrum (Left abutment)

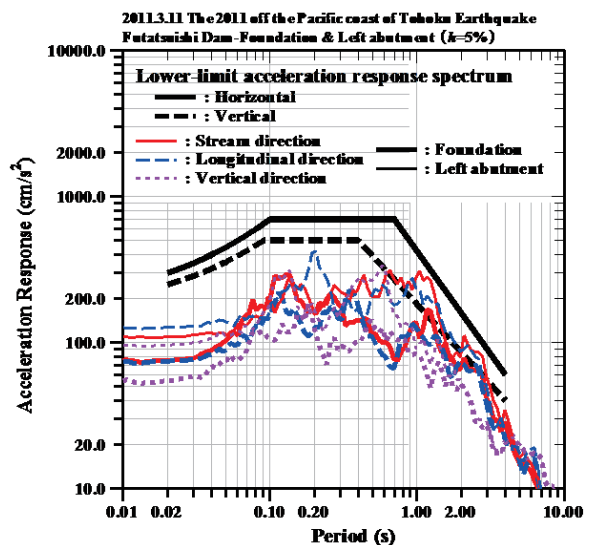


Fig. 63 加速度応答スペクトル (河床部監査廊と左岸地山リムトンネル)
Acceleration response spectrum (Foundation and Left abutment)

7.9 柘沢ダム

7.9.1 ダム諸元及び特徴

前述の「V 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の「5.3 柘沢ダム」に同じである。

7.9.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。本ダムの位置はこれまでのダムと異なり火山フロントの太平洋側ではなく日本海側に位置するダムである。地震計設置位置は前述の「V 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の「5.3 柘沢ダム」に同じである。観測された最大加速度値を Table 17 に示す。本ダムでは、河床部監査廊の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。入力加速度相当の最大加速度値が鉛直方向で大きいのが特徴的であるが、堤頂部では上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向の順に大きな最大加速度値が観測される一般的な傾向が現われている。前述の岩洞ダムと同程度の震央距離（岩洞ダムは 230.2km、本ダムは 231.3km）であるが、入力加速度相当の最大加速度値は岩洞ダムに比較して小さくなっている（Table 10）。さらに、前述の震央距離が大きな大志田ダム（258.2km）と比較しても小さい（Table 9）。前述の「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」時に本ダムで観測された入力加速度相当の最大加速度値（Table 7）より鉛直方向を除いて小さく、堤頂部での加速度比も鉛直方向が小さいが水平動に関してはほぼ同程度の増幅となっている。内陸地震とプレート境界で発生した地震とでは地震動の振動数特性が異なると考えられるが、両地震動に対して類似した応答特性が現われている。入力加速度相当の加速度応答スペクトル（減衰定数は 5%）を Fig. 64 に示す。前述の大志田ダムに類似した加速度応答スペクトル（Fig. 43）である。本ダムより震央に近い岩堂沢ダム（204.1km）に比較して、最大加速度値が 1/2 倍程度（Table 15）であるため、1 秒以下の短周期領域の加速度応答値は岩堂沢ダムの加速度応答スペクトル（Fig. 57）に比較して小さい。前述の「V 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の「5.3 柘沢ダム」での地震観測記録の加速度スペクトル（Fig. 34）と本地震での地震観測記録の入力加速度相当の加速度応答スペクトルとの比較を Fig. 65 に示す。太線が前述の「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の三方向成分、細線が本地震の三方向成分である。最大加速度値は本地震の方が小さいが、両地震の加速度応答値はほぼ重なっており、両地震でも同じように複数の卓越したピークがある。しかし、0.5 秒以下の短周期領域での「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の加速度応答値が大きい。また、0.5 秒以上の長周期領域の加速度応答値は本地震の方がやや大きい。計測震度は 3.7 であり、震度 4 となる。「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」でも計測震度 3.7 であり、上記のように加速度応答値がほぼ重なっていることに相応している。

Table 17 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 245.8 m H=65.8 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-66.1	44.7	-38.3
	Maximum Acc. Ratio	2.39	1.67	1.11
Gallery EL. 183.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	27.6	26.8	-34.5
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

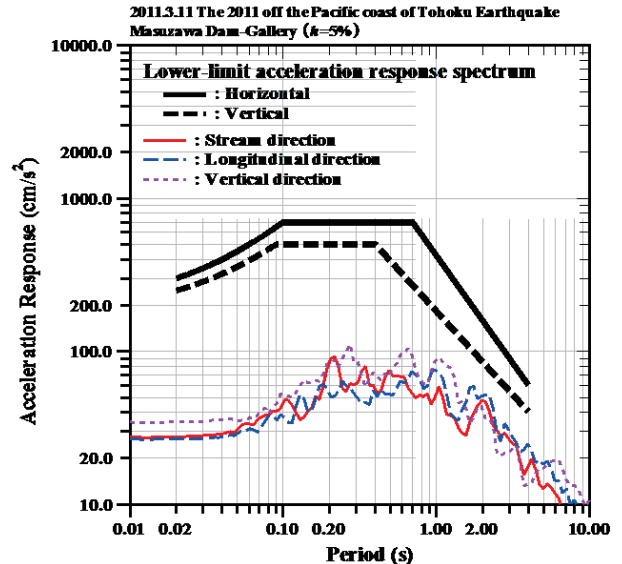


Fig. 64 加速度応答スペクトル（河床部監査廊）
Acceleration response spectrum (Gallery)

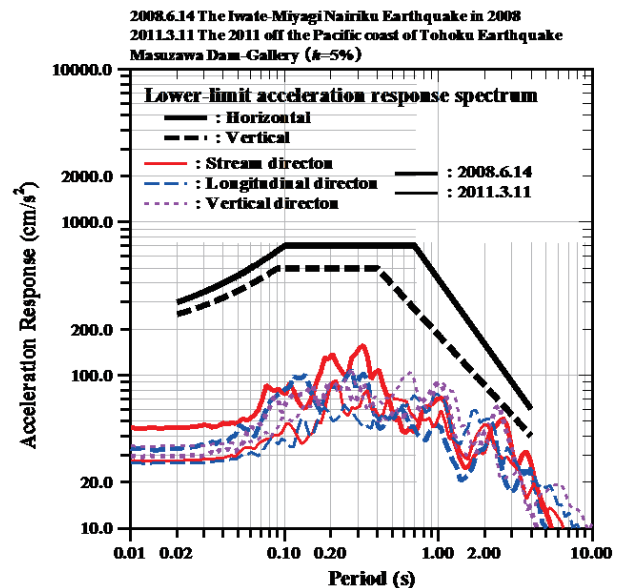


Fig. 65 「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」（河床部監査廊）と「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の加速度応答スペクトル（河床部監査廊）
Acceleration response spectrum (Gallery) at “The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008” and “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”

7.10 千五沢ダム（母畑湖）

7.10.1 ダム諸元及び特徴

千五沢ダム（Fig. 66（農林水産省東北農政局土地改良技術事務所，2008e））は、農業用水と洪水調整を目的とした中心遮水ゾーン型アースダムであり、国営母畑開拓建設事

業により福島県石川郡石川町の一級河川阿武隈川水系北須川に 1969 年に本体着工し 1975 年に竣工した。変性岩を基礎地盤とし、堤高 43m、堤頂長 176.5m、堤体積 347 千 m³、受益面積は 2,093ha（うち 1,191ha は畑）に対して有効貯水量は 11,600 千 m³ であり、受益地区できゅうり等野菜園芸や果樹の生産に活用されている。本ダムは最大洪水流量が 1,350m³/s と非常に大きく、設計洪水流量は、設計当時この地域として最も大きい 12m³/s/km² の比流量を適用しゲート付きシュート式の洪水吐を採用した。



Fig. 66 千五沢ダム
Overall view of Sennegosawa Dam

7.10.2 地震時の状況

震央とダム位置の関係を前述の「大志田ダム」で提示した Fig. 42 に示す。本ダムは、本地震で検討したダムの中で最も南側に位置するダムである。本ダムは、監査廊を有していないことから下流地山、下流法尻先の基礎地盤と最大断面堤頂部の三箇所に地震計が設置されている。観測された最大加速度値を Table 18 に示す。本ダムでは、下流地山の観測点での観測記録を入力加速度と見なしている。震央距離は比較的大きい (230.8km) が大きな最大加速度値が観測されている。同程度の震央距離である岩洞ダム (230.2km) の最大加速度値 (Table 10) と比較しても極めて大きい。堤頂部では三方向ともに同程度の最大加速度値が観測され、堤頂の鉛直方向及びダム軸方向が上下流方向と同程度に振動する特徴的な堤体内での増幅が観測されている。鉛直方向の加速度比が最も大きく、ダム軸方向、次いで上下流方向の順の大きさの加速度比である。さらに、堤頂部の加速度比は本地震での他のダムのうちで比較的小さく、入力加速度が大きくなると応答加速度が小さくなるフィルダムでの応答特性の特徴が現われていると考えられる。入力加速度相当の加速度応答スペクトル (減衰定数は 5%) を Fig. 67 に示す。本地震に対してこれまで検討したダムのなかで最も照査用下限加速度応答スペクトルに近い大きな加速度応答値であり、0.3 秒付近の周期での加速度応答値が大きい。観測点位置の違いによる地震動の加速度応答スペクトルを比較するため、下流法尻先の基礎地盤の加速度応答スペクトルを Fig. 68 に示す。上記の下流基礎地盤の加速度応答スペクトルと比較して、0.2 秒以下の短周期領域でも加速度応答値が大きくなっている。両観測点の加速度応答スペクトルを Fig. 69 に重ねて示す、太線が下流地山、細線が下流法尻先の基礎地盤の三方向成分である。後者の観測点では、上下流方向とダム軸方向の 0.6 秒以下の短周期領域での加

速度応答値が大きくなっており、鉛直方向では 0.06 秒付近の周期に卓越したピークがある。計測震度は下流地山で 4.7 であり、震度 5 弱、下流法尻先の基礎地盤で 4.9 であり、震度 5 弱となる。下流法尻先の基礎地盤は下流左岸に対して加速度比が約 1.3~2.5 であり、加速度応答値も大きくなっていることが計測震度の差となったと考えられる。下流法尻先では加速度応答値は大きくなっているが、この観測点での加速度応答スペクトルは Fig. 68 に対して Fig. 67 のように短周期領域での加速度応答値が大きくなっているため、体感に強く感じる周期領域 (1~2.5 秒の周期領域 (童ら, 1996)) の加速度応答値が大きくならず計測震度 0.2 のわずかな増加にとどまったと考えられる。

Table 18 観測記録の最大加速度
Maximum acceleration of the observation record

		The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake		
		Stream	Longitudinal	Vertical
Crest EL. 365.0 m H=43.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	-369.5	371.5	311.8
	Maximum Acc. Ratio	1.47	2.55	3.02
Toe of downstream-slope EL. 331.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	315.4	259.2	257.7
	Maximum Acc. Ratio	1.26	1.78	2.50
Down-stream abutment EL. 326.0 m	Maximum Acc. (cm/s ²)	251.2	145.6	-103.2
	Maximum Acc. Ratio	1.00	1.00	1.00

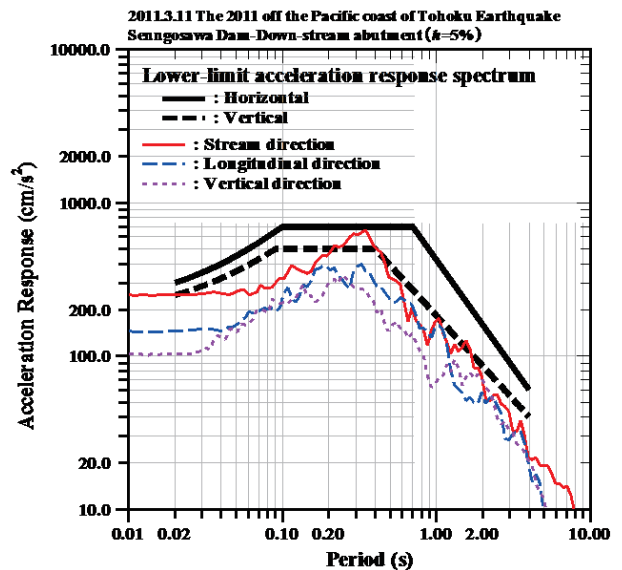


Fig. 67 加速度応答スペクトル (下流基礎地盤)
Acceleration response spectrum (Down-stream abutment)

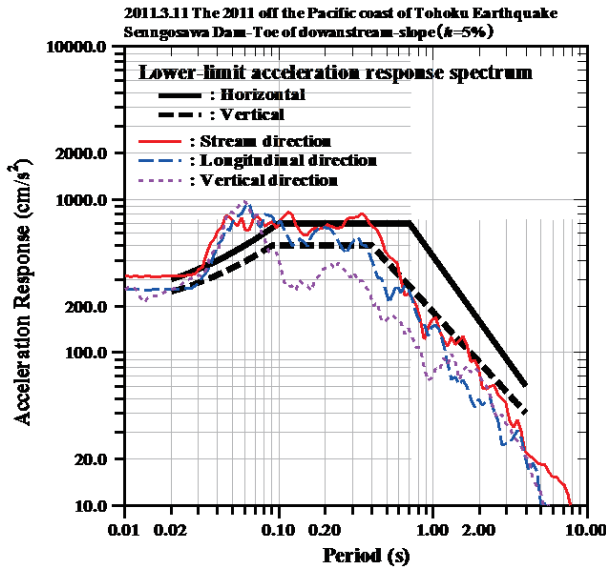


Fig. 68 加速度応答スペクトル（下流法尻先の基礎地盤）
Acceleration response spectrum (Toe of downstream-slope)

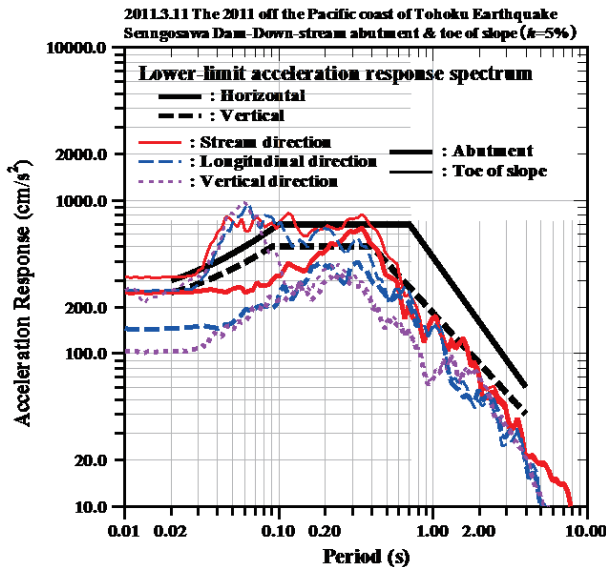


Fig. 69 加速度応答スペクトル（下流基礎地盤と下流法尻先の基礎地盤）
Acceleration response spectrum (Down-stream abutment and toe of downstream-slope)

「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」によるダムで観測された入力加速度相当の加速度応答は、概ね長周期になるに従い低減する傾向が照査用下限加速度応答スペクトルの長周期領域で設定されている減少傾向よりも小さい (Figs. 43, 46, 49, 50, 53, 55, 57, 61, 64 及び 67)。プレート境界で発生した「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」での震央距離が大きなダム型式の異なる二つのダムでも同様の傾向 (Fig. 12) である。さらに、地震時の堤頂の振動は、上下流方向に必ずしも大きく振動せずに、ダム軸方向や鉛直方向にも同程度の振動が観測される場合がある。

Ⅷ 結 言

21 世紀初頭の 10 年間（2001 年～2011 年 3 月）において発生した日本付近の主な被害地震（国立天文台，2013）の 13 地震のうち以下の六つの地震での合計 16 の農業用大ダムの強震観測記録を収集し、整理した。①「平成 13 年（2001 年）芸予地震」の佐古ダム，②「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」の美生ダム及び幕別ダムの二ダム，③「平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震」の川西ダム，④「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」の荒砥沢ダム，栗駒ダム及び柘沢ダムの三ダム，⑤「岩手県沿岸北部の地震（2008 年 7 月 24 日）」の葛丸ダム，及び⑥「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の大志田ダム，岩洞ダム，山王海ダム，葛丸ダム，豊沢ダム，相川ダム，柘沢ダム，岩堂沢ダム，二ツ石ダム及び千五沢ダムの 10 ダムである。収集した地震観測記録から、観測点毎の最大加速度値と加速度比及び入力地震動に関して加速度応答スペクトルの分析を実施した。

農業用大ダムの耐震性能照査に対して、合理的かつ実際的な入力地震動の設定のため、内陸直下型地震やプレート境界の遠地地震による種々のダム型式のダムでの地震観測記録の蓄積が必要である。さらに、ダム堤体の地震時挙動の解明に基づいた地震時安全点検の重点的な点検箇所や留意箇所などのダムの管理の合理・高度化にも地震観測記録は不可欠である。今後も農業用ダムの地震時の安全性に寄与できるように農業用大ダムの地震観測記録の収集と分析に努めたい。

謝辞：本報告をまとめるにあたって、農林水産省東北農政局整備部設計課，東北農政局管内の土地改良調査管理事務所及び農林水産省北陸農政局整備部設計課，農林水産省中国四国農政局整備部設計課，北海道開発局農業水産部農業設計課及び北海道開発局帯広開発建設部，各県の関係機関，土地改良区等から貴重な地震観測記録の貸与及び種々の資料のご提供を頂いたことを記して感謝の意を表します。また、農林水産省農村振興局整備部設計課には、本報告をとりまとめる機会を頂きましたことを記して、感謝の意を表します。ダム諸元などは農林水産省（2009）と「ダム便覧 2013」（一般財団法人日本ダム協会，2013）を参考にした。記して感謝の意を表します。震央距離の計算には、国土地理院の測量計算サイトの「No. 2 距離と方位角の計算」（国土地理院，2013），震央及びダム位置の描画に“SEIS-PC for Windows”（石川ら，1997），地震波形の加速度応答スペクトル及び三方向成分の計測震度の算出に強震記録の表示用プログラムの“ViewWave”（鹿嶋，2007），及び、加速度応答スペクトルの表示には“Ngraph for Windows”（石坂，2010）を用いた。これらの開発者にここに記して感謝致します。

参考文献

浅野勇・豊田裕道・森山英樹・増川晋（1997）：鹿児島県薩摩地方地震による農地・農業用施設の被害，農業土木学会誌，65(6)，53-57
 独立行政法人防災科学技術研究所（2011）：地震時の観測最大加速度のギネス認定，http://www.bosai.go.jp/press/pdf/20110111_01.pdf
 福島正人・館石和秋・渋谷靖（1993）：幕別ダム基礎地盤の反射法

- による地質調査, 水と土, 93, 14-20
- 北海道開発局帯広開発建設部 (2003): 平成15年十勝沖地震による帯広開発建設部管内被災概要国営かんがい排水事業 幕別ダム周辺部被災状況,
<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/bousai/pdf/jisin19.pdf>
- 一般財団法人日本ダム協会 (2013),
<http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 石垣利浩 (2008): 平成20年岩手・宮城内陸地震による宮城県内の被害の概要, 特別報告 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による農地・農業用施設の被害報告, 水と土の知(農業農村工学会誌), 76(8), 6
- 石川有三・中村浩二 (1997): SEIS-PC for Windows95, 地球惑星科学関連学会1997年大会予稿集, 78
- 石坂智 (2010): Ngraph for Science and Engineering,
<http://www2e.biglobe.ne.jp/~isizaka/>
- 岩手県一戸町役場産業課農村整備係 (2013): ○馬淵川沿岸地区農業水利事業とは,
http://www.town.ichinohe.iwate.jp/nourin/kakari/nouson_seibi/kokuei/kokuei.htm
- 鎌田知也 (2012): 事業紹介荒砥沢ダム直轄災害復旧事業の概要, ARIC 情報, 一般社団法人 農業農村整備情報総合センター
- 鹿嶋俊英 (2007): ViewWave,
http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/software_j.html
- 気象庁 (1996a): 気象庁告示第四号,
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/k19960215001/k19960215001.html
- 気象庁 監修 (1996b): 「震度」を知る一知識と活用一, (株)ぎょうせい, 東京
- 気象庁 (2001a): 気象庁マグニチュード検討委員会の検討結果について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0104/23a/mate00.pdf>
- 気象庁 (2001b): 報道発表資料 平成13年3月26日 気象庁 平成13年3月24日15時28分ころ安芸灘で発生した地震の命名について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0103/26b/mate.pdf>
- 気象庁 (2003a): 地震年報 平成13年 (CD-ROM), 財団法人 気象業務支援センター, 東京
- 気象庁 (2003b): 報道発表資料 平成15年9月26日 気象庁 平成15年9月26日04時50分頃に発生した地震の命名について,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0309/26i/meimei030926.pdf>
- 気象庁 (2004a): 地震年報 平成15年 (CD-ROM), 財団法人 気象業務支援センター, 東京
- 気象庁 (2004b): 災害時地震速報 平成16年(2004年)新潟県中越地震, 災害時自然現象報告書 2004年第7号,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200407.pdf
- 気象庁 (2005): 地震年報 平成16年 (CD-ROM), 財団法人 気象業務支援センター, 東京
- 気象庁 (2008a): 災害時地震速報 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震, 災害時自然現象報告書 2008年第1号,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200801.pdf
- 気象庁 (2008b): 災害時地震速報 平成20年7月24日の岩手県沿岸北部の地震, 災害時自然現象報告書 2008年第2号,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200802.pdf
- 気象庁 (2008c): 2008年7月24日00時26分ころの岩手県沿岸北部の地震について岩手県で震度6強, 報道発表資料 平成20年7月4日2時00分,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0807/24a/kaisetsu200807240200.pdf>
- 気象庁 (2008d): 岩手県洋野町大野の震度データについて一今年7月の岩手県沿岸北部の地震の最大震度を6強から6弱に修正一, 報道発表資料 平成20年10月29日,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0810/29a/kaisetsu200810291630.pdf>
- 気象庁 (2011a): 地震年報 2008年 (CD-ROM), 財団法人 気象業務支援センター, 東京
- 気象庁 (2011b): 災害時地震・津波速報 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震, 災害時自然現象報告書 2011年第1号,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201101/saigaiji_201101.pdf
- 気象庁 (2011c): 平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震について(第2報), 報道発表資料 平成23年3月11日16時20分, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11c/201103111620.pdf>
- 気象庁 (2012a): 地震年報 2011年 (CD-ROM), 財団法人 気象業務支援センター, 東京
- 気象庁 (2012b): 第1章 地震, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告 第1編, 気象庁技術報告, 第133号,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/CHAPTER1.pdf>
- 国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室 (2010): * 照査用下限加速度応答スペクトル, 大規模地震に対する耐震性能照査について, ダムテクランド/水資源研究室,
<http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/l2/data/3l2-data.pdf>
- 国土地理院 (2013): 距離と方位角の計算, 測量計算サイト,
<http://surveycalc.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/bl2stf.html>
- 国土交通省北海道開発局 (2011): 第4節 農業農村整備事業の技術, 北海道開発局のあゆみ60年,
<http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/archives/60-2/nougyou/01.pdf>
- 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2008): 5. ダム, 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料, 486, 112-114,
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0486pdf/ks0486.pdf>
- 国立天文台 (2013): 理科年表 平成26年, 第87冊, 175-176, 丸善, 東京
- 増川晋・浅野勇・田頭秀和・堀俊和 (1995): 緊急報告・兵庫県南部地震による農業水利施設の被害, 農業土木学会誌, 63(3), 1-5
- 増川晋・安中正実 (1997): 盛土構造物の地震後の調査と対策の事例, 小特集・震災後の対策を考える一5, 農業土木学会誌, 65(9), 29-34
- 増川晋・向後雄二・浅野勇・林田洋一 (2002a): 地震観測による複数のフィルダムの地震時挙動, 農業工学研究所報告, 第41号, 19-59, <http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010650622.pdf>
- 増川晋 (2002b): レベル2地震動を受けるフィルダムの塑性破壊の解明, プロジェクト研究成果シリーズ382 フィルダム等の進行性破壊現象の解明, 農林水産省農林水産技術会議事務局編, 382, 39-40
- 増川晋 (2003): 8.1.1 ロックフィルダムの高上げによる機能更新一山王海ダムーフィルダム, 建設材料ー地域環境の創造一,

- 202-203, 朝倉出版, 東京
- 増川晋 (2005) : 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震によるダムの地震時挙動, 平成 17 年度農業土木学会全国大会講演要旨集, 550-551,
<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/05/05005-47.pdf>
- 増川晋・中西憲雄 (2005) : 宮城県沖の地震 (2003 年 5 月 26 日) における農業用大ダムの地震時挙動, 農業工学研究所報告, 第 44 号, 105-138,
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/naro-se/nkou44-4.pdf
- 増川晋 (2006) : 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震—地震と地震動—, 特集: 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震対応, 農村工学研究所技報, 第 205 号, 5-15,
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/205-02.pdf
- 増川晋・中里裕巨 (2008a) : 荒砥沢・小田ダムおよび荒砥沢ダム上流大規模地すべり調査報告, 特別報告 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による農地・農業用施設の被害報告—4, 水士の知 (農業農村工学会誌), 76(8), 7-9
- 増川晋 (2008b) : 岩手・宮城内陸地震調査概要—荒砥沢ダムの被災状況について—, 第 64 回ダム施工技術講習会テキスト, 財団法人日本ダム協会, 81-93
- 増川晋・安中正実・林田洋一 (2008c) : 堤頂長/堤高比の異なるシリコンダム模型の振動実験, <特集>模型実験の動向, 土と基礎 (地盤工学会誌), 56(10), 16-19
- 増川晋・浅野勇・田頭秀和・林田洋一 (2009) : 農業用大ダムの被災状況と地震時挙動, 小特集 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による農地・農業用施設の被害報告—2, 水士の知 (農業農村工学会誌), 77(7), 7-10
- 増川晋・田頭秀和・黒田清一郎・林田洋一 (2012) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による国営農業用フィルダムの被害, 農業工学研究所技報, 第 213 号, 217-241,
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/213No15.pdf
- 宮城県栗駒ダム管理事務所 (2013) : 栗駒ダムの概要,
<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/91289.pdf>
- 宮城県大崎地方ダム総合事務所 (2013) : 岩沢ダム概要,
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/osdam/gddam.html>
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光 (2006) : 東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数, 日本地震工学会論文集, 6(1), 23-27
- 中嶋哲生 (2003) : 岩洞ダムの生い立ち, 株式会社アスタス, 東京
- 新潟県 (2006) : 新町新田地区のため池災害 (川西ダム), 新潟県中越地震—農地・農業用施設の復旧復興に向けて— 4 技術資料 4-3 災害復旧工事例 3,
http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/eq_act04-3.pdf
- 新潟県農地部 (2006) : 2)ダム堤体と附帯施設の復旧—新たな被災 (川西ダム) 1・2, 新潟県中越地震—農地・農業用施設の復旧記録 (技術資料編)—, 32-37,
http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/P32_37-1.pdf,
http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/P32_37-2.pdf
- 新潟県十日町地域振興局 (2007) : 川西ダムの概要,
http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Simple/P3-7tookamati.pdf
- 新潟県十日町地域振興局農業振興部 (2013) : 川西ダム, 長福寺ダム, 坪山ダム, 松葉沢ダム, 五升苗ダム, にいがた農業水利施設百選「十日町川西の河岸段丘を潤すダム群」,
https://www.pref.niigata.lg.jp/tokamachi_nogyo/1356764666517.html
- 農林水産省 (2009) : 農林水産省所管の実施中及び完成ダム一覧,
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/mizu/pdf/091222-06.pdf>
- 農林水産省中国四国農政局四国土地改良調査管理事務所 (2011) : 国営かんがい排水事業道前道後平野地区について 農業農村 (NN) しこくみち, 四国土地改良調査管理事務所だより, 8, 6,
<http://www.maff.go.jp/chushi/kj/yontyou/pdf/4-1.pdf>
- 農林水産省東北農政局土地改良技術事務所 (2008a) : 泉田川, あなたの街の農業農村整備施設,
http://www.maff.go.jp/tohoku/nouson/kokuei/totikai/shisetsu/photo_ya magata/izumitagawa.html
- 農林水産省東北農政局土地改良技術事務所 (2008b) : 岩手山麓, あなたの街の農業農村整備施設,
http://www.maff.go.jp/tohoku/nouson/kokuei/totikai/shisetsu/photo_iw ate/iwate_sanroku.html
- 農林水産省東北農政局土地改良技術事務所 (2008c) : 山王海 (二期), あなたの街の農業農村整備施設,
http://www.maff.go.jp/tohoku/nouson/kokuei/totikai/shisetsu/photo_iw ate/sannokai2.html
- 農林水産省東北農政局土地改良技術事務所 (2008d) : 鳴瀬川, あなたの街の農業農村整備施設,
http://www.maff.go.jp/tohoku/nouson/kokuei/totikai/shisetsu/photo_mi yagi/narusegawa.html
- 農林水産省東北農政局土地改良技術事務所 (2008e) : 母畑, あなたの街の農業農村整備施設,
http://www.maff.go.jp/tohoku/nouson/kokuei/totikai/shisetsu/photo_fuk ushima/bobata.html
- 林野庁東北森林管理局 (2009) : 「山地災害の記録」(平成 20 年岩手・宮城内陸地震),
http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/introduction/gaiyou_kyoku/annai/p amph/sanchi_kiroku.html
- 島本和仁・佐藤信光・大町達夫・川崎秀明・岩井慎治 (2008) : 2008 年岩手・宮城内陸地震によるダムの被害調査報告, ダム工学会, 6-7, http://www.jsde.jp/saigai/1_saigai_iwate-miyagi_report.pdf
- 消防庁災害対策本部 (2013) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) について (第 148 報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou/pdf/jishin/148.pdf>
- 総務省消防庁 (2004) : 出光興産 (株) 北海道製油所野外タンク貯蔵所火災の火災原因調査結果,
http://www.fdma.go.jp/html/new/pdf/040622_idemitsu.pdf
- 総務省消防庁 (2013) : 参考資料 1 昭和 39 年新潟地震昭和石油株式会社新潟製油所火災, 石油コンビナート等防災体制検討報告書,
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h25/2503/250328_1houdou/05_houdoushiryousanko_01-04.pdf
- 小澤興宏・宮森俊充・鎌田知也・米谷勝弘・竹谷喜代春 (2013) : 真空圧密工法 (高真空 N&H 工法) による調整造成工法, 水士の

- 知 (農業農村工学会誌), 81(12), 43-47
- 田頭秀和・宗岡寿美・辻修・土谷富士夫・矢沢正士 (2005) : 平成15年 (2003年) 十勝沖地震の農用施設被害報告, 農業土木学会誌, 73(9), 29-33
- 高橋英 (1980) : 川西ダムの工事経過と試験湛水, 水と土, 41, 11-21
- 竹谷喜代春 (2011) : 工事報告: 迫川上流・荒砥沢ダム災害復旧事業調整池造成工事, 土木學會誌, 96(11), 2-3
- 寺端弘勝・瓜生和幸・竹谷幸晴・渡辺秀博 (2000) : 美生ダムの試験湛水について, 水と土, 123, 13-21
- 童華南・山崎文雄 (1996) : 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 48(11), 548,
<http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/bitstream/2261/53004/1/sk048011009.pdf>
- 友野文典 (2002) : 佐古ダムの試験湛水について, 水と土, 131, 43-60
- 東北農政局藤沢開拓建設事業所 (1999) : 拓農創水—藤沢開拓事業誌—
- 東北農政局迫川上流農業水利事業所 (1999) : 荒砥沢ダム 技術誌
- 東北農政局山王海鹿妻農業水利事業所 (1999) : 葛丸ダム—技術誌—
- 都築慶剛 (2001) : 山王海ダムの再開発—先達の願いを21世紀に—, 水と土, 2001, グラビア
- 横山仁伸・加茂榮哉・林進・南雲人 (2005) : 幕別ダム試験湛水の浸透流況, 水と土, 143, 19-27

受理年月日 平成25年12月9日

Input Seismic Motion of Dams for Irrigation by Large-Scale Earthquakes for 10 Years of the Early 21st Century

MASUKAWA Susumu*, KURODA Seiichiro*, HAYASHIDA Yoichi* and TAGASHIRA Hidekazu*

Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Engineering Analysis*

Summary

From the seismic observation records, the authors analyzed the seismic behavior of the 16 large dams for irrigation focused on maximum acceleration, maximum acceleration ratio (dynamic acceleration amplification characteristic at dam body) and acceleration response spectrum (dynamic characteristic of the input earthquake motion to dam body) in the six earthquakes among 13 large-scale earthquakes occurred near Japan for ten years of the early 21st century, from January 2001 to March 2011. The earthquakes were (1) "The Geiyo Earthquake in 2001"(2001.3.24, M_w 6.8), (2) "The Tokachi-oki Earthquake in 2003"(2003.9.26, M_w 8.3), (3) "The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004"(2004.10.23, M_w 8.6), (4) "The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008"(2008.6.14, M_w 6.9), (5) 2008.7.24 the northern coast Iwate Prefecture earthquake (M_w 6.9), and (6) "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake"(2011.3.11, M_w 9.1). The dams were Sako Dam, Bisei Dam, Makubetsu Dam, Kawanishi Dam, Aratozawa Dam, Kurikoma Dam, Masuzawa Dam, Ooshida dam, Ganndou Dam, Sannnoukai Dam, Kuzumaru Dam, Toyosawa Dam, Aikawa Dam, Ganndouzawa Dam, Futatsuishi Dam and Senngosawa Dam.

Key words : Large dam for irrigation, Large-scale earthquake, Seismic observation, Input seismic motion, Seismic behavior

技 術 資 料

Technical Data on Subjective Time Discount Rates Measured Through a Web Survey in Japan

AIZAKI Hideo*

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

Keywords: Discount rate, web survey, magnitude effect, delay effect

I Introduction

The present technical data are obtained from the results of a web survey on subjective time discount rates of individuals in Japan. Respondents were asked to select their preferred option between two options: one offered a reward X , T years later, while the other offered a reward Y , $T + 1$ years later. Various conditions were set for the rewards (X and Y) and the delay (T) in giving the rewards. Our results suggest that the subjective time discount rates are inversely related with reward amounts. However, we cannot find clear evidence about the relationship between rates and delay conditions.

II Survey design

A web survey was conducted in February 2013 by NTTCom Online Marketing Solutions Corporation. For the survey, the 47 prefectures in Japan were divided into nine regions (**Table 1**). A total of 1,500 respondents were recruited from the survey panel members registered with the company. Recruitment for the survey was based on the condition that the sample characteristic ratios (i.e., gender ratio and age category (20s, 30s, 40s, and 50s) ratio) in each region correspond with the population characteristic ratios in each region, which were estimated as of October 1, 2011 (Ministry of Internal Affairs and Communications of Japan, 2012).

According to previous studies on subjective time discount rates (Morimoto, 2009; Ohtake and Tsutsui, 2012; Sasaki et al., 2012), the rate was captured by a question to the respondents on selecting their preferred option between two options: a reward X , T years later, or a reward Y , $T + 1$ years later (**Fig.1**). Time interval, which is the difference in value between $T + 1$ and T , is always 1 year. There were two versions of the survey: one set the reward X as JPY 10,000, while the other set the award as JPY 1 million (USD 1 \approx JPY 98 as of October 2013). Each respondent was randomly assigned either of the two versions of the survey. In both the survey versions, the respondents faced five questions, distinguished from each other by the condition of delay (T): Current, 1 year, 5 years, 10 years, and 20 years. In each of the five questions, nine values are set for Y , which is the reward offered on waiting for an additional year: X discounted at 5%, the same as X , an additional 2% on X , an additional 4% on X , an additional 6% on X , an additional 10% on X , an additional 20% on X , an additional 40% on X , and an additional of more than 40% on X . Thus, each of the five questions consists of nine pairs of options.

The subjective time discount rate for respondent i is calculated as the annual rate corresponding to his/her answers when he/she changed the response from “I will receive it T years later” to “I will receive it $T + 1$ years later.” For example, a respondent is assumed to select “I will receive it in the current period” from row numbers 1 to 3, while “I will receive it 1 year later” is selected from row numbers 4 to 9, in the question shown in Figure 1. The discount rate for the respondent is calculated at 4%. Respondents who met any of the following conditions in any of the five questions were excluded from the valid sample: (i) respondents who selected either “I receive it T years later” or “I will receive it $T + 1$ years later” for all nine pairs of options; (ii) respondents who changed their response from “I will receive it $T + 1$ years later” to “I receive it T years later” based on increase in reward Y ; and (iii) respondents with a discount rate of more than 40%.

Please select your preferred option in each line. Note that the price level is assumed to be stable across the period.

Serial No.	Amount of money received in the current period	Amount of money received 1 year later	Annual rate corresponding to the difference in the amount of money received between the two options	I will receive it in the current period	I will receive it 1 year later
1	10,000	9,500	-5%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	10,000	10,000	0%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	10,000	10,200	2%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	10,000	10,400	4%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5	10,000	10,600	6%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6	10,000	11,000	10%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7	10,000	12,000	20%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8	10,000	14,000	40%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9	10,000	More than 14,000	More than 40%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fig.1 A sample question (A case of “JPY 10,000” and “current”)

Table 1 Prefectures in each region

Region*	Prefectures
Hokkaido	Hokkaido
Tohoku	Aomori, Iwate, Miyagi, Akita, Yamagata, Fukushima
Hokuriku	Niigata, Toyama, Ishikawa, Fukui
Kanto (including Tosan**)	Ibaraki, Tochigi, Gunma, Saitama, Chiba, Tokyo, Kanagawa, Yamanashi, Nagano
Tokai	Gifu, Shizuoka, Aichi, Mie
Kinki	Shiga, Kyoto, Osaka, Hyogo, Nara, Wakayama
Chugoku	Tottori, Shimane, Okayama, Hiroshima, Yamaguchi
Shikoku	Tokushima, Kagawa, Ehime, Kochi
Kyushu (including Okinawa)	Fukuoka, Saga, Nagasaki, Kumamoto, Oita, Miyazaki, Kagoshima, Okinawa

Note: * Category of regions is almost same as the agricultural regions used in The 2010 World Census of Agriculture and Forestry in Japan. ** Tosan consists of Yamanashi and Nagano prefectures.

ANOVA was conducted to test for difference in mean value for the rate variable. R (R Core Team, 2013) was used for the analysis.

III Result

Of the total 1,500 respondents, there were 987 valid respondents: 436 in the case of JPY 10,000 and 551 in the case of JPY 1 million; 513 respondents were rejected because they met conditions (i), (ii), or (iii) mentioned above.

Table 2 shows mean subjective time discount rates in the five questions (delays) based on the initial rewards (JPY 10,000 and JPY 1 million). In case of each delay, the rate for JPY 10,000 was significantly larger than that for JPY 1 million, suggesting the magnitude effect, that is, the inverse relationship between the discount rate and the amount of reward. The difference in rate among the delay conditions was also significant. However, rate in the case of “current” was significantly lower than those in the other four delay conditions ($P < 0.05$), while there was no difference in rate among the four delay conditions. This result does not provide strong evidence about the detection of the delay effect, which shows that the rate varies according to the delay conditions.

See appendix for cross tabulations according to gender category (Table A1), age category (Table A2), and region category (Table A3), indicating trends that are similar to those indicated in Table 2.

Table 2 Subjective discount rates

Delay*	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	8.9	10.1	6.1	7.5	7.4	8.9
1 year late	10.6	12.0	7.8	9.3	9.0	10.7
5 years late	10.5	12.4	8.0	9.8	9.1	11.1
10 years late	10.0	11.7	8.0	9.9	8.9	10.8
20 years late	11.4	13.4	8.5	10.7	9.8	12.1
Average	10.3	10.1	7.7	8.1	8.8	9.1

Note: * Delay corresponds to “*T* years later” in the questions. Main effects are significant: $P < 0.001$ for the difference between JPY 10,000 and JPY 1 million; $P < 0.001$ for the difference among delay categories. Interaction effect between reward and delay is not significant.

IV Concluding remarks

The present survey suggested that the magnitude effect was detected in a web survey on subjective time discount rates, while the delay effect was not. The reason for this outcome will be investigated in further analysis. The present survey was financially supported by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan through a research project entitled “Development of technologies for mitigation and adaptation to climate change in Agriculture, Forestry and Fisheries.” I would like to thank the project members for their valuable comments on the survey design and the study results.

Appendix

Table A1 Subjective discount rates by gender category

(A) Male						
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	11.2	11.4	7.1	8.0	8.9	9.8
1 year late	13.2	13.1	9.4	10.6	11.0	11.8
5 years late	13.2	13.9	9.4	10.7	11.0	12.3
10 years late	12.2	12.7	9.1	10.7	10.5	11.7
20 years late	13.5	14.3	9.6	11.5	11.3	12.9
Average	12.7	10.9	8.9	8.7	10.5	9.9
(B) Female						
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	6.9	8.3	5.2	6.9	6.0	7.6
1 year late	8.4	10.6	6.2	7.5	7.2	9.1
5 years late	8.1	10.4	6.7	8.7	7.3	9.5
10 years late	8.0	10.3	6.9	9.0	7.4	9.6
20 years late	9.6	12.3	7.5	9.9	8.5	11.1
Average	8.2	8.8	6.5	7.4	7.3	8.1

Table A2 Subjective discount rates by age category

(A) 20's							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	7.8	9.6	5.3	6.7	6.4	8.2	
1 year late	9.0	11.5	7.0	8.4	7.9	9.9	
5 years late	8.9	11.3	7.6	9.8	8.2	10.5	
10 years late	7.8	10.4	7.1	9.3	7.4	9.8	
20 years late	8.4	11.6	7.4	10.6	7.8	11.0	
Average	8.4	8.9	6.9	7.3	7.6	8.1	

(B) 30's							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	7.8	9.5	6.1	7.9	6.9	8.7	
1 year late	9.8	12.0	7.2	9.4	8.4	10.7	
5 years late	9.7	12.5	7.6	9.7	8.6	11.1	
10 years late	9.0	11.8	7.6	9.8	8.2	10.7	
20 years late	10.3	13.3	7.8	9.8	9.0	11.5	
Average	9.3	10.0	7.3	8.4	8.2	9.2	

(C) 40's							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	10.5	11.5	5.9	7.5	7.9	9.6	
1 year late	12.0	12.7	7.2	8.5	9.2	10.7	
5 years late	12.7	14.0	7.4	9.3	9.7	11.8	
10 years late	11.8	12.5	8.0	10.3	9.7	11.4	
20 years late	12.1	12.9	8.9	11.1	10.2	12.0	
Average	11.8	11.4	7.5	8.2	9.3	9.9	

(D) 50's							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	10.0	9.7	7.2	7.7	8.3	8.7	
1 year late	12.0	11.8	9.9	10.5	10.7	11.1	
5 years late	10.8	11.0	9.6	10.6	10.1	10.8	
10 years late	11.7	11.2	9.5	10.4	10.4	10.8	
20 years late	16.1	15.0	10.2	11.6	12.7	13.4	
Average	12.1	9.4	9.3	8.4	10.5	8.9	

Table A3 Subjective discount rates by regional category

(A) Hokkaido							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	8.7	9.7	7.6	8.9	8.1	9.2	
1 year late	11.4	13.7	8.4	8.7	9.8	11.2	
5 years late	9.9	11.7	11.6	10.8	10.8	11.1	
10 years late	8.8	11.6	10.0	9.1	9.5	10.2	
20 years late	10.0	12.1	10.5	8.8	10.3	10.3	
Average	9.8	9.2	9.6	8.0	9.7	8.4	

(B) Tohoku							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	5.8	4.5	7.2	7.7	6.6	6.4	
1 year late	10.1	11.6	10.8	10.8	10.5	11.1	
5 years late	11.6	13.1	10.8	12.8	11.1	12.8	
10 years late	11.7	12.3	11.2	12.8	11.4	12.5	
20 years late	13.0	14.1	10.5	12.9	11.6	13.4	
Average	10.4	9.7	10.1	10.3	10.3	9.9	

(C) Hokuriku							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	12.2	15.6	5.7	9.0	8.7	12.6	
1 year late	11.2	14.1	6.2	8.7	8.5	11.6	
5 years late	10.6	14.4	7.4	9.3	8.8	11.8	
10 years late	7.3	10.2	9.1	13.0	8.3	11.7	
20 years late	10.3	12.4	9.9	13.4	10.1	12.8	
Average	10.3	11.2	7.7	9.6	8.9	10.3	

(D) Kanto							
Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Current	9.5	9.9	6.0	7.3	7.5	8.7	
1 year late	11.6	12.5	7.4	8.9	9.3	10.8	
5 years late	10.8	12.5	7.5	8.7	9.0	10.6	
10 years late	10.6	12.1	7.4	9.3	8.8	10.7	
20 years late	12.0	13.6	8.2	9.8	9.8	11.8	
Average	10.9	10.6	7.3	7.8	8.9	9.3	

(E) Tokai

Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	6.2	6.6	7.7	9.5	7.0	8.4
1 year late	7.3	7.7	9.6	11.6	8.6	10.2
5 years late	8.0	10.7	10.0	12.7	9.2	11.9
10 years late	7.1	8.8	9.0	11.0	8.2	10.1
20 years late	8.6	11.7	9.6	12.1	9.2	11.9
Average	7.4	7.2	9.2	9.6	8.4	8.7

(F) Kinki

Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	8.7	10.4	5.0	4.7	6.8	8.1
1 year late	9.8	11.2	6.1	6.6	7.9	9.3
5 years late	10.5	12.2	5.9	7.4	8.1	10.3
10 years late	9.8	11.9	6.5	7.5	8.1	10.0
20 years late	11.1	13.8	7.0	9.2	9.0	11.8
Average	10.0	9.7	6.1	5.6	8.0	8.1

(G) Chugoku

Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	8.3	8.6	6.5	9.0	7.2	8.8
1 year late	8.2	9.0	8.5	10.8	8.4	10.0
5 years late	9.8	12.4	8.8	11.1	9.2	11.6
10 years late	8.9	9.6	10.7	12.6	9.9	11.4
20 years late	9.5	11.3	9.1	12.6	9.3	11.9
Average	8.9	8.4	8.7	9.3	8.8	8.9

(H) Shikoku

Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	14.3	17.9	5.3	3.8	7.9	10.5
1 year late	10.0	13.8	8.7	8.0	9.1	9.7
5 years late	10.3	13.6	6.6	6.0	7.7	8.7
10 years late	16.6	17.3	6.1	6.1	9.2	11.3
20 years late	16.6	17.3	7.2	9.2	9.9	12.5
Average	13.5	15.0	6.8	5.7	8.8	9.5

(I) Kyushu

Delay	JPY 10,000		JPY 1 million		Total	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Current	10.2	12.3	5.5	7.2	7.7	10.1
1 year late	13.1	14.5	6.8	9.3	9.7	12.3
5 years late	11.6	13.6	7.3	10.2	9.2	12.0
10 years late	10.9	12.6	6.7	9.3	8.6	11.1
20 years late	13.4	14.9	8.3	11.7	10.7	13.4
Average	11.9	11.7	6.9	8.1	9.2	10.2

References

- Ministry of Internal Affairs and Communications of Japan (2012) *Current population estimates as of October 1, 2011*. <http://www.stat.go.jp/english/data/jinsui/2011np/index.htm>.
- Morimoto, S. (2009) Hyperbolic discounting and household consumption: an analysis based on a large-scale survey in Japan. *Journal of Behavioral Economics and Finance*, **2**, 49–59 (in Japanese with English abstract).
- Ohtake, F. and Tsutsui, Y. (2012) Investigation of the characteristics of risk aversion: an experimental study. *Journal of Behavioral Economics and Finance*, **5**, 26–44 (in Japanese with English abstract).
- R Core Team. (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Sasaki, S., Xie, S., Ikeda, S. and Tsutsui, Y. (2012) Time discounting: delay effect and procrastinating behavior. *Journal of Behavioral Economics and Finance*, **5**, 15–25.

Accepted on 9 Dec.2013

Web 調査による主観的時間割引率の測定結果に関する技術資料

合崎英男*

*農村基盤研究領域事業評価担当

要 旨

本技術資料は、Web 調査による主観的時間割引率の測定結果を報告する。2013 年 2 月、1500 名を対象とした Web 調査を実施した。回答者の主観的時間割引率は、「 T 年後に報酬 X 円が得られる状況」と「 $T+1$ 年後に報酬 Y 円が得られる状況」から望ましい方を選択させることで捉えた。報酬 X は 1 万円と 100 万円の 2 パターンを設定し、各回答者はどちらか一方の金額が設定された質問への回答を求められた。1 年待つことで得られる報酬 Y については、 X 円の 5% 引きから X 円の 40% 以上割増までの 9 パターンを設定した。回答者は、報酬 X が得られる状況と報酬 Y が得られる状況の 9 ペアで比較を行い、その選択が報酬 X から報酬 Y にシフトしたときの割引率を、その回答者の主観的時間割引率とした。各回答者は、期間 (T) の水準値が異なる 5 種類の質問 (今すぐ~20 年後) への回答を求められたため、回答者 1 名につき 5 種類の主観的時間割引率が得られた。有効回答者 987 名の分析の結果、主観的時間割引率は報酬額と反比例する関係が確認された一方、期間との関連も確認されたが、期間の水準間での差については一部に限定されていた。

キーワード：割引率，Web 調査，金額効果，遅延効果

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 215 号

平成 26 年 3 月 20 日 印刷
平成 26 年 3 月 20 日 発行

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

〒 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：朝日印刷株式会社

TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
No. 215
March 2014

CONTENTS

FUJIYAMA So, TARUYA Hiroyuki and NAKADA Toru Diagnosis of Hydraulic Function for Wasteway Renewal in the Canal System Shifting to Pipelines from Open Canals	1
ONIMARU Tatsuji Evaluation of the Continuity of Residents' Ability to Maintain Irrigation/Drainage Canals in Rural Communities — Evaluation with data from Yamagata Prefecture on rural community cards based on the 2010 World Census of Agriculture and Forestry —	17
NAKAMURA Masato, YAMAOKA Masaru, AIHARA Hideki , YUYAMA Yoshito, and ORITATE Fumiko Characteristics of Materials Accumulated in a Digester Tank for Methane Fermentation	31
FUJIYAMA So, TARUYA Hiroyuki and NAKADA Toru Diagnosis of Hydraulic Function in Irrigation Control Facilities during Drainage Management Periods	39
HORIKAWA Naoki, YOSHIDA Takeo ,KUDO Ryoji, MINAKAWA Hiroki and NAWA Norio Study of the Mean Areal Slope Measurement Method for Runoff Analysis Using a Digital Elevation Model	57
TANJI Hajime, KIRI Hirohide, NAKAYA Tetsuo and AZECHI Issaku Problems on Improvement of Maintenance Plan of Coastal Disaster Prevention Facilities	69
NAKAZATO Hiroomi, INOUE Keisuke, SUZUKI Hisato and TERADA Takeshi Resistivity Structure Investigation of Large-scale Landslides Using Time-domain Electromagnetic Method	81
SHODA Daisuke, KAWAMOTO Osamu, SUZUKI Hisato, YOSHISAKO Hiroshi, INOUE Keisuke and KOJIMA Hajime Failure of Small Earth Filldam due to Heavy Rain in 2013	91
TOKASHIKI Masaru, ASANO Isamu, MORI Mitsuhiro and NISHIHARA Masahiko Flexural Behavior of Small Scale Model of Reinforced Concrete Beam	103
IWATA Yukiyo, MIYAMOTO Teruhito and KAMEYAMA Kohji Effect of Biochar Application on Soil Physical Properties of Sandy Soil	113
NAWA Norio, YOSHIDA Takeo, HORIKAWA Naoki, KUDO Ryoji and MINAGAWA Hiroki Study to Build a Distributed Water Circulation Model Incorporating Suspended Solid etc. Movement	123
MORI Atsushi, MORIOKA Shinsuke, KOIZUMI Noriyuki, Bounsong Vongvichith and WATABE Keiji Food Web and Material Flow in Fish Culture Free from Human Influence —The Case of Hilly and Mountainous area in Laos —	131
SHIRAHATA Katsushi, ISHIDA Satoshi, YOSHIMOTO Shuhei and TSUCHIHARA Takeo New Simple Method for Estimating Hydraulic Properties of a Freshwater-Lens Aquifer by Analysis of Tidal Groundwater Fluctuations	141
SHIGEOKA Tetsushi ,TOMOMATSU Takashi, SYOU Naoki and YAMAMOTO Tokuji Development of the Mobile Geographic Information System for Investigation of Farm Land and Irrigation/ Drainage Facilities	155
MASUKAWA Susumu, KURODA Seiichiro, HAYASHIDA Yoichi and TAGASHIRA Hidekazu Input Seismic Motion of Dams for Irrigation by Large-Scale Earthquakes for 10 Years of the Early 21st Century	185
[technical data] AIZAKI Hideo Technical Data on Subjective Time Discount Rates Measured Through a Web Survey in Japan	219
