# 平成26年度応用水理研究部会講演集



平成 26 年 12 月 4 日~5 日

於 農林水産省農林水産技術会議事務局 筑波事務所本館

# (社)農業農村工学会応用水理研究部会共催(独)農研機構 農村工学研究所

## 平成 26 年度 農業農村工学会応用水理研究部会講演会 プログラム

## 平成 26 年 12 月 4 日(木) 13:30~5 日(金) 11:50 農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所本館1階第 4 会議室

## 【12月4日】

(13:30~13:35) 開会の挨拶

部会長 樽屋啓之

座長: 樽屋啓之 (農村工学研究所)

(13:35~14:05)

 小型通し回遊魚の遊泳能力について-シロウオの突進速度と遊泳限界流速-弘前大学農学生命科学部 ○泉完・東信行・丸居篤 (株)建設技術研究所東北支社 矢田谷健一

(14:05~14:35)

2. 広狭流路における複列砂礫堆の挙動特性

秋田県立大学大学院生物資源科学研究科 o柿崎杏奈 秋田県立大学生物資源科学部 永吉武志・高橋順二・神田啓臣・嶋田浩 秋田県立大学木材高度加工研究所 佐々木貴信

(14:35~14:50) <<< 休 憩 >>

座長:平松研 (岐阜大学)

 $(14:50 \sim 15:20)$ 

3. AE パラメータ解析による粗度調整パイプラインのエネルギ損失特性の検出

新潟大学農学部 0鈴木哲也・本田泰大

(独) 農研機構 農村工学研究所 中達雄・樽屋啓之・中田達

 $(15:20 \sim 15:50)$ 

 水田湛水による空間放射線量の低減効果に関する研究 東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻 ○久保成隆・飯田俊彰 東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻 溝口勝

(15:50~16:00) <<< 休 憩 >>

(16:00~17:00) 【特別講演】

5. 農業水利施設の機能保全と水理学、農業水利学の研究方向

(独)農研機構 農村工学研究所 o中達雄

(17:05~17:30) 代表幹事会

第4会議室

## 【12月5日】

座長:安瀬地一作 (農村工学研究所)

 $(9:30 \sim 9:55)$ 

6. 流れ場中の帯電コロイド粒子の凝集速度への静電相互作用の影響:実験と流体力学的軌道解析 を用いた理論解析

> 筑波大学大学院生命環境科学研究科 o杉本卓也 筑波大学生命環境系 小林幹佳

 $(9:55 \sim 10:20)$ 

7. Wise-use of shallow aquifer to control the growth of farm products (浅層地下水の賢明な利用による農産物の生育制御)

Graduate School of Agriculture, Kyoto University • Ryota Kuwano, Koichi Unami, Masayuki Fujihara

 $(10:20 \sim 10:45)$ 

8. 乾燥地の涸川に設置する取水工の水理設計

京都大学大学院農学研究科

京都大学農学部 中道理介

○金城信彦・宇波耕一・藤原正幸

(10:45~11:00)

<< 休 憩 >>

座長: 高木強治 (農村工学研究所)

(11:00~11:25)

9. Optimality of rainfed agriculture in the sense of stochastic control (確率制御の意味における天水農業の最適性)

> Graduate School of Agriculture, Kyoto University • Erfaneh Sharifi, Koichi Unami, Masayuki Fujihara School of Agriculture, College of Basic and Applied Science, University of Ghana Macarius Yangyuoru

 $(11:25 \sim 11:50)$ 

10. 内蒙古達拉特旗の地下水資源の現況と予測

岐阜大学大学院連合農学研究科 の巴達日夫・メンドバヤル 岐阜大学応用生物科学部 平松研・大西健夫 岐阜大学流域圏科学研究センター 吉山浩平

(11:50) 閉会の挨拶

部会長 樽屋啓之

# 小型通し回遊魚の遊泳能力について ーシロウオの突進速度と遊泳限界流速-

泉 完\* 東 信行\* 丸居 篤\* 矢田谷健一\*\*

\*弘前大学農学生命科学部,〒036-8561 弘前市文京町3 \*\*(株) 建設技術研究所東北支社,〒980-0014 仙台市青葉区本町 2-15-1

#### 要 旨

小型通し回遊魚の一つであるシロウオの突進速度と遊泳できる限界の流速に関する実験を野外の現地河川で実施した.その結果,体長4cm台のシロウオの遊泳速度と遊泳時間の関係を表す遊泳曲線は,遊泳区間を長くしても一般則が成立することがわかった.シロウオの突進速度は体長の20倍の速度に相当する84cm・s<sup>-1</sup>(平均値)であった.また,40 cm・s<sup>-1</sup>台の流速で最も速い値を示し,遊泳能力を発揮する選好流速があることが示唆された.シロウオが遊泳する流速環境と遊泳距離との関係を明らかにした.シロウオが遊泳できる限界流速は,80~110 cm・s<sup>-1</sup>程度までであり,突進速度に相当する流速であることがわかった.

キーワード:シロウオ,スタミナトンネル,突進速度,限界流速,フィールド測定

## 1. はじめに

魚類相の河口から上流への連続性を保持させるため河 川横断構造物には魚道が設置されている.しかし,河口に 近い下流域でのハゼ科魚類のシロウオ・ウキゴリといった 小型通し回遊魚に対する魚道設計は経験的技術に依存し ており,科学的根拠による魚道整備が必要である.このた めには,これら小型通し回遊魚の遊泳能力を解明する必要 がある.小型魚の遊泳速度については,山口・高谷(2000) によるシラウオ(Salangichhys icrodon)の遊泳速度や水田 魚道を対象にしたドジョウ(Misgurnus anguillicaudatus)・ フナ類(Carassius sp.)の遊泳速度に関する実験(加藤ら, 2005)があるものの依然として少ない.

このような中で、泉ら (2013) は小型通し回遊魚のう ちシロウオ (Leucopsarion petersi)の遊泳能力に関する実 験を行い、未知であった遊泳能力指数や遊泳運動形態を 明らかにしている.シロウオは、一生の大部分を海水域 で生息し、春の時期に河口から産卵のため遡上するハゼ 科の遡河回遊魚である(松井、1986).全長約5cmで半透 明な飴色、胴体部に丸い鰾がある.日本では函館から鹿 児島まで広く分布しており、河川の下流域で産卵するこ とが知られている.河口域で採捕され、漁獲量が多い河 川では水産上重要な魚類であるが、最近では遡上する河 川の環境の悪化から漁獲量が少なくなってきたとされ、 環境省の絶滅危惧種に指定されている.また、福岡県福 岡市を流下する室見川では、河口から約2.4kmまで遡上 すると言われている(松井、1986).

しかしながら,魚道設計上の水理指標である突進速度, 遊泳できる限界流速などの課題が残されており,さらに 解明する必要がある。本報告は,これらの課題を明らか にするためシロウオの遊泳実験を行い,実験的に検討・ 考察を加えたものである.

#### 2. 河川水を用いた遊泳実験

#### 2.1 実験日および実験装置と実験方法

本実験では泉ら(2013)の実験と同じくスタミナトン ネル(管水路)を用い,現地の自然河川水を直接通水さ せたフィールドでの計測方法を採用した.実験した河川 は,青森県外ヶ浜町内から陸奥湾に注ぐ二級河川の蟹田 川でシロウオの漁獲量が多い河川の一つである.実験場 所は河口から約550m上流の河川敷内である.実験は 2013年と2014年にかけてそれぞれ5月中旬のシロウオ 遡上時期に管内流速を変化させて合計25回行った (Table 1,2参照).実験日には天気と河川水温も測定し

t.

スタミナトンネルは、透明アクリル製の長方形パイプ で長方形断面の内寸は幅 5.0cm・高さ 3.0cm,長さ 230cm で泉ら (2013)のパイプより 150cm 長くした.パイプ断 面の高さと幅の寸法は、シロウオの遊泳に支障がない断 面である (久保田ら,2000;泉ら,2012).また、これら のパイプには供試魚を挿入するスタンドパイプがある. 実験装置は、Fig.1 に示すように余水吐と整流板のある貯 水槽(幅 35cm・高さ 30cm・長さ 30cm・長さ 55cm),パ イプ,フレキシブルホース、流速調節用コック(2ヶ) で構成されている.貯水槽とパイプは架台の上に水平に 置かれている.パイプの底面に目盛付きの白色板を取り 付け、魚を挿入するスタンドパイプは 45°傾斜している (Fig.1).また、Fig.2 は実験装置の全景を示したもので ある.



Fig.1 実験装置の概要



Fig.2 実験装置の全景

供試魚は, Fig.1 のようにスタンドパイプから挿入され, 上流部に目合い 2mm の仕切網が施された計測区間内で 遊泳できるようになっている.河川水は, Fig.1 に示すよ うに河川から直接水中ポンプで貯水槽に給水され, 余水 吐で一定水位に保持しながら, パイプ末端に接続されて いるフレキシブルホースの出口から再び下流河川へ流下 するシステムになっている.

#### 2.2 実験方法

遊泳速度の測定は、パイプ内を満流状態にして貯水槽 の水位を実験中一定とし、設定する管内流速は 20~60 cm·s<sup>-1</sup>前後を想定してコックで調節した. 遊泳実験は、 シロウオの実験(泉ら、2013)と同様、出口部をある程 度閉塞させてあらかじめ管内に流れを与えた.

その後,供試魚を1尾ずつ挿入パイプに入れ,供試魚 がその流れに定位し自発的に上流へ泳ぎはじめるのを見 計らって一気に出口部を開放した.スタンドパイプの水 位が一定になった時点で定常と判断し,その時点から開 始して,供試魚が対地速度ゼロ(力尽きて流された)と Table 1 実験日と実験条件

		計測した供試魚 (シロウオ)		管内代 表流速		水泊	左泪		
美颖月日	天 気	数	平均 体長	平均 体高	平均 体幅	V	S.D.	水温	気温
2013年		(尾)				(cn	<b>n</b> •s⁻¹)	(°(	C)
		3	4.3	0.5	0.3	28	0		
5日12日	連ら	6	4.5	0.5	0.3	37	1	10.1	11.0
5月12日	□月 4 し	8	4.3	0.5	0.4	42	4	10.1	11.9
		8	4.3	0.5	0.4	57	1		
	計	25							
		10	4.3	0.5	0.4	44	2		
5月13日	晴れ	13	4.3	0.5	0.3	53	3	11.5	11.3
		5	4.5	0.4	0.4	60	0		
	計	28							
	曇り	14	4.3	0.5	0.4	32	2		
5日14日		5	4.2	0.5	0.4	43	1	10.2	12.5
J)]14 H		1	4.4	0.5	0.5	51	0		
		1	4.4	0.4	0.3	63	0		
	計	21							
		2	4.3	0.5	0.4	32	1		
5月18日	晴れ	10	4.5	0.5	0.4	48	0	15.1	18.2
		2	3.9	0.4	0.4	63	0		
	計	14							
		2	4.3	0.5	0.4	39	0		
5月19日	曇り	14	4.2	0.4	0.4	48	1	114	13.5
5),11) H	<del>7</del>	3	4.3	0.5	0.4	51	1	11.1	15.5
		1	4.0	0.4	0.4	64	0		
	計	20							
		2	4.1	0.5	0.4	30	0		
5月20日	曇り	11	4.5	0.5	0.4	40	0	11.8	14.6
		23	4.4	0.5	0.5	57	0		
	計	36							
合 (注) R E -	計	144	4.3	0.5	0.4				

注)S.D:標準偏差

なった時を終了時点とした.

供試魚の遊泳速度の測定のために、長方形パイプの上 方と側方にデジタルビデオカメラ (SONY: HDR-CX170, HDR-CX80) をそれぞれ設置して、2 次元的に供試魚の 遊泳行動を撮影・録画した.また、供試魚の全長・体長・ 体高・体幅は遊泳の際のストレスを考慮して遊泳後にパ

Table 2 遊泳限界実験の実験日と実験条件

		計	測した	供試	魚	電磁液	<b>流速計</b>		
美颖月日	大気	数	平均 体長	平均 体高	平均 体幅	初期値	設定値	水温	気温
2013年		(尾)		(cm)		(cm	•s <sup>-1</sup> )	(۳	C)
5月19日	曇り	3	4.5	0.5	0.4	30	80-105	11.8	12.4
5月20日	曇り	16	4.3	0.5	0.3	30	80-115	12.5	15.3
	計	19	4.4	0.5	0.4				
2014年									
5月19日	晴れ	37	4.2	0.4	0.4	30-50	120-150	16.4	19.1
5月20日	晴れ後曇り	15	4.2	0.4	0.3	30-50	90-150	15.1	19.5
	計	52	4.2	0.4	0.4				
	合計	71							

イプ出口部で採捕・測定した.実験に供した個体は 1回限りの遊泳とし,実験1回ごとに流量を出口部で5 回実測した.

遊泳限界流速に関する実験は、長方形パイプ上流から 40cm の地点に二軸電磁流速計(φ:5mm,センサー部 の長さ:2.5cm, ACM250)を通水断面の中心部に取り付 け、シロウオの遊泳動態と流速計指示計をリアルタイム で録画した.実験方法は、初期流速を与えた状態で供試 魚をスタンドパイプから挿入し、その後ゴム栓でスタン ドパイプ上端を閉じて、供試魚が上流へと前進すると同 時に設定流速用に調節した出口部コックを開き、対地速 度ゼロの時点の流速値を調べた.遊泳限界を調べるため の設定流速は既往の遊泳曲線(泉ら、2013)から、80~ 150 cm・s<sup>-1</sup>とした.供試魚は前述したようにパイプ出口 部で採捕・測定し,供した個体は1回限りの遊泳とした.

電磁流速計の検出部の長さは 2.5cm であり,パイプ内の断面平均値を示さない.したがって,電磁流速計の指示値とパイプ内の断面平均流速値の関係を調べるため,20~150 cm·s<sup>-1</sup>の範囲で任意の数種類の流速において電磁流速計による測定と出口部での流量測定を行った.

## 3. 供試魚 (シロウオ)

実験に用いた供試魚は、実験場所から約 300m 下流の「梁」で採捕されたシロウオを用いた.実験に際しては 各実験で供試魚を Table 1 に示す計測個体数より多く遊 泳させたが遊泳意欲などの個体差があった.遊泳速度に 関する実験で実際に計測したシロウオは 144 尾,平均体 長 4.3cm である(Table 1).遊泳限界流速に関する実験 では 71 尾,平均体長 4.3cm である(Table 2).

#### 4. 遊泳速度の整理方法

遊泳速度の整理方法については、シロウオがパイプ内 を上流へ遊泳し、流れが定常時点の遊泳位置から尽きて 対地速度がゼロになった地点まで遊泳した距離とその間 の遊泳時間を計測した.また、この遊泳時間内に一気に 突進行動を示して遊泳する場合もあったので、このとき の遊泳距離と遊泳時間も測定した.遊泳速度はこの対地 速度にシロウオの遊泳行動観察を踏まえた後述する管内 代表流速を加えて求めた.

遊泳限界流速については、シロウオが前進できず対地 速度ゼロの時点の流速値を計測した.このときの供試魚 の遊泳域の流速を遊泳限界流速値と定義した.

#### 5. 実験結果と考察

実験時の天気は晴れまたは曇りで,河川水温は 10.1~ 16.4℃(Table 1, 2 参照)である.

#### 5.1 管内代表流速と遊泳限界流速値の算定

シロウオはおもに底面近傍を遊泳したのでシロウオの おもな遊泳域の流速を代表流速とした.本断面形状と同 じパイプですでに各鉛直地点の流速値と断面平均流速値 との比が示されているので(泉ら,2013),実験1回ごと の実測流量をシロウオの最大横断面積分を差し引いた面 積で除した断面平均流速に底面近傍の流速値と断面平均 流速値の比を乗じて代表流速を求めた.各実験日の平均 管内代表流速は28~64 cm·s<sup>-1</sup>の範囲である(Table 1 参 照).

遊泳限界流速値については、対地速度ゼロ時の断面平 均流速値を電磁流速計指示値との関係式から求めて、上 述の方法により遊泳域の流速値を算出し、遊泳限界の流 速値とした.

#### 5.2 遊泳速度と遊泳時間, 突進速度について

遊泳速度と遊泳時間の関係については,144 尾の平均 体長は4.3cm であったので,これらの個体を体長4cm 台 と記してまとめた.また,それぞれ管内代表流速を 10cm・s<sup>-1</sup>台に区分して整理した.

**Fig.3**は, 遊泳速度と遊泳時間の関係を両対数で示した ものである.図には泉ら(2013)の実験値も示した.

遊泳速度と遊泳時間はそれぞれ 28~64 cm・s<sup>-1</sup>, 0.5~ 157s の範囲で,パイプの長さが異なる遊泳環境でも既往 結果とに差が認められない。遊泳曲線は(1)式(塚本・ 梶原, 1973)で示され,シロウオ(泉ら, 2013)につい ては a=82 cm・s<sup>-1</sup>, k=0.26 が得られているが,このよう に大きな違いがないので遊泳曲線の係数を本実験値と合 わせて最小自乗法で再整理し,追証した.

(1)

 $V: 遊泳速度 (cm \cdot s^{-1}), t: 遊泳時間 (s), a: 1s 間持$  $続できる遊泳速度 (cm \cdot s^{-1}), k: 定数 (0 < k < 1)$ 

 $Vt^{k} = a$ 

 式のaおよびk値を最小自乗法で求めると、a= 82 cm·s<sup>-1</sup>, k=0.24となり、係数k値が僅かに小さくなった(Fig.3 参照).

突進速度は、1~5秒間持続できる最大遊泳速度と定義 されている (Blaxster, 1967). ただ, 鬼束ら (2009) も



Fig.3 管内遊泳速度と遊泳時間の関係

指摘するように魚道越流部の速い流れ場を1秒以下で瞬時に遊泳する報告(泉ら,2002)もあることから,ここでは5秒以内で突進遊泳した遊泳速度を突進速度と定義した.

**Table 3**は、代表流速を 10 cm·s<sup>-1</sup>に区分して一気に突 進行動した個体の突進速度と遊泳時間を示したものであ る. **Table 3**に示すようにシロウオの平均突進速度は、体 長の 20 倍の速度に相当する 84 cm·s<sup>-1</sup>であった.また、 30~60 cm·s<sup>-1</sup> 台の流速条件別に突進速度を調べると 40 cm·s<sup>-1</sup> 台の流速で最も速い 92 cm·s<sup>-1</sup> (偏差; 20 cm·s<sup>-1</sup>) の値を示した.このことは、シロウオが一気に遊泳する 際に、遊泳能力を最大に発揮する選好流速があることを 示唆している.

#### 5.3 遊泳距離

魚道隔壁の越流部など局所的に速い流れ場の距離が 50cmであれば魚が遡上できることも報告されている(泉 ら,2002).したがって,流速場と遊泳距離との関係も魚 道設計には重要な要因の一つである.そこで,力尽きて 対地速度がゼロになるまで遊泳した中で,定常地点から 最も長く泳いだ距離と代表流速との関係を調べた(Fig.4 参照).図中のバーは標準偏差を示している.

図から遊泳距離は、各平均代表流速に対してばらつき がみられるものの、流速が 30 cm・s<sup>-1</sup>台から 60 cm・s<sup>-1</sup>台 へ増加すると、シロウオの遊泳距離は約 150cm から 20cm へと短くなっている.既往報告(泉ら、2013)ではパイ プの長さの制約のため流速の変化による遊泳距離との関 係は明確でなかったが、本実験では流速の増加とともに 遊泳距離は短くなることがわかった.また、図には突進 速度で一気に前進したときの遊泳距離も示した.

Table 3 突進速度と遊泳時間

塔内伊主	选泳	距離	空准	演使	选泳	時間
官内代衣	近你	<b>FE 内</b> 世	大些	还反	近仍	时间
流速	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差
$(cm \cdot s^{-1})$	(cm)		$(cm \cdot s^{-1})$		(s)	
35	102	57	75	14	2.4	1.0
45	91	50	92	20	1.9	1.0
55	41	59	79	13	1.5	1.5
62	17	12	81	7	1.4	0.7
平均			84	17		



Fig.4 管内遊泳速度と遊泳距離の関係

対地速度がゼロになるまで遊泳したときの距離に比較し てやや短いものの,一気に前進する遊泳距離の傾向は同 じである.突進速度が最も速い 40 cm・s<sup>-1</sup> 台の流速では 90cm の距離を一気に遊泳することがわかる.シロウオの ような小型魚を対象魚とすれば,魚道内の流速範囲のう ち少なくとも 40 cm・s<sup>-1</sup> 以下の流速領域を確保できるよ う工夫が必要であると思われる.

#### 5.4 遊泳限界流速

Fig.5 は、シロウオの遊泳限界流速について、電磁流速 計の設定値と遊泳限界流速値の関係を示したものである. 電磁流速計の設定値を 80 cm・s<sup>-1</sup>から 150 cm・s<sup>-1</sup>へと増大 させると遊泳限界流速は大きくなる傾向を示し、同一の 電磁流速計の設定値において個体差もあってばらつきが 見られる.とくに設定流速 130 cm・s<sup>-1</sup>を超えるほどばら つきが大きく、個体差の違いが顕著に表れている.130 cm・s<sup>-1</sup>から 150 cm・s<sup>-1</sup>では上限値が見られている.また、 Fig.6 は、Fig.5 のデータを電磁流速計の設定値に対する 遊泳限界流速値の平均値とその標準偏差値(図中のバー) で示したものである.

これらの図から,電磁流速計の設定値80~150 cm・s<sup>-1</sup> の平均値で遊泳限界流速値を示すと97 cm・s<sup>-1</sup>(偏差; 17 cm・s<sup>-1</sup>)となる.上述した平均突進速度もこの計測値 の範囲内に入っていることから,シロウオが泳げない限 界速は,80~110 cm・s<sup>-1</sup>程度であると推測され,突進速



Fig.5 電磁流速計の設定値と遊泳限界流速値の関係



Fig.6 電磁流速計の設定値と遊泳限界流速値の関係

度に相当する流速であることがわかった.

### 6. まとめ

シロウオの突進速度,流速の差異による遊泳距離の関係,シロウオが遊泳できる限界流速についてそれぞれ検討し,魚道設計に関する以下の知見を得ることができた.

(1) 体長 4cm 台のシロウオの遊泳速度と遊泳時間の関係を表す遊泳曲線は,遊泳区間を長くしても一般則が成立することがわかった.シロウオの突進速度は体長の 20 倍の速度に相当する 84 cm・s<sup>-1</sup>(平均値)であった.また,40 cm・s<sup>-1</sup>台の流速で最も速い値を示し,遊泳能力を発揮する選好流速があることが示唆された.

(2) 流速が 28 cm・s<sup>-1</sup>から 62 cm・s<sup>-1</sup>へ増加するとシロ ウオの遊泳距離は154cmから17cmへと短くなる傾向を 示し,流速と遊泳距離との関係を明らかにした.

(3)シロウオが前進遊泳できる限界流速は, 80~110 cm・s<sup>-1</sup>程度であり, 突進速度に相当する流速であること

#### がわかった.

謝辞:本実験を行うに際し,蟹田川漁業協同組合の越田氏,記 田氏には多大なご便宜をいただいた.各関係機関および弘前大 学農学生命科学部研究室大学院の清水秀成君はじめ学生諸氏か らは多くの協力を得た.これらの皆様に心より感謝致します. 本研究の一部は平成26年度文科省科学研究補助金基盤研究(C), 河川整備基金を受けている.

#### 引用・参考文献

- Blaxter, J.H.S and Dickson, W. (1959) : Observations on theSwimming Speeds of Fish, J. Conseil Permanent International pour Exploration de la mer (Bureau du Conseil), 24, 472-479.
- Blaxter, J.H.S (1967): Swimming Speeds of Fish, Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques

and Tactics, in Bergen, Norway, 69-100.

- 泉 完,高屋大介,工藤 明,東 信行 (2002):アイスハーバー 型魚道における魚類の隔壁遡上特性―赤石川赤石第2頭首工 魚道を事例にして―,農業土木学会論文集, No.217:55-63.
- 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明(2006):河川流下水 を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農士論集, 244, 171-178.
- 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明, 加藤 幸(2007): 自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの 突進速度に関する現地実験, 水工学論文集, 51, 1285-1290.
- 泉 完,山本泰之,矢田谷健一,神山公平(2009):河川におけ る挿入式スタミナトンネルによるヤマメ稚魚の突進速度に関 する実験,農業農村工学会論文集,262,103-109.
- 泉 完, 菊地真弘, 加藤 幸, 東 信行 (2012):河川水を用い たヤマメ稚魚の尾部の動きと遊泳速度, 農業農村工学会論文 集, 278, 99-107.
- 泉 完,大田敏貴,東信行(2013):河川水を用いた遊泳実験に よるシロウオの遊泳能力と尾部の動き,農業農村工学会論文 集,.283:41-50
- 加藤宗英,水谷正一,鈴木正貴,後藤 章(2005):小規模魚道 の設置諸元を検討するための小型魚類の遊泳能力,農土論集, 235,59-65.
- 久保田哲也,中西 章,谷口政由貴(2000):砂防施設の斜路式 魚道における渓流魚の遡上水理条件,砂防学会誌,53(2),48-56.
- 松井誠一(1986):シロウオの生態と増殖に関する研究,九州大 学農学部学芸雑誌,40,135-174.
- 鬼束幸樹,秋山壽一郎,山本晃義,渡邉拓也,脇 健樹(2009): 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究~アユ,オイ カワ,カワムツ,ギンブナを対象~,土木学会論文集 B,65(4), 296-307.
- 塚本勝巳,梶原 武(1973):魚類の遊泳速度と遊泳能力,水産 土木,10(1),31-36.

山口幹人, 高谷義幸(2000):シラウオの遊泳速度(短報), 北水 試験報, 57, 31-32.

## 広狭流路における複列砂礫堆の挙動特性

○柿崎杏奈\*, 永吉武志\*\*, 佐々木貴信\*\*\*, 高橋順二\*\*, 神田啓臣\*\*, 嶋田 浩\*\*

#### 1. はじめに

砂礫堆は、わが国の扇状地河川や中間地河川において見られる典型的な河床形態であり、 河道の流れに大きな影響を及ぼす.砂礫堆が形成された河道では、砂礫の堆積部と河床が 深く洗掘された深掘れ部が河岸沿いに現れるとともに洪水時の流れは大きく蛇行し、場合 によっては河岸侵食や河床洗掘を生じさせて堤防・護岸の損壊等の河道災害が発生する. 河道に形成される砂礫堆は、川幅や流量等の規模によって堆積部と深掘れ部の配列パター ンを変化させる特徴をもっており、横断方向の配列数の違いによって単列砂礫堆と複列砂 礫堆に大別されている.これら砂礫堆の基本的性質の1つは下流への移動性であり、直線 的な河道では、洪水時の砂礫堆の移動に伴って河床の堆積部と深掘れ部も移動する.砂礫 堆の移動は、洪水時の水衝部の変化や河道内のみお筋の変化を意味し、水生生物の生息空 間でもある瀬や淵の変化とも深く関係している。

砂礫堆の移動性に関する研究については,主に単列砂礫堆を対象とした実験(例えば木下・三輪,1974;樽屋,1992;三輪・永吉,1999; Miwa and Nagayoshi, 1999)や理論解析(例えば長谷川,1983),数値解析(例えば清水ら,1987)が数多く行われている.一方,複列砂礫堆に関する研究は,木下(1961)の先駆的な研究に始まり,その後,玉井ら

(1978),藤田ら(1987)による,より定量的な実験が進められ,Colombini *et al.*(1987), Seminara and Tubino(1989), Pornprommin and Izumi(2001)の理論的研究,清水ら(2001), 倉林・清水(2002)による数値シミュレーションが行われてきている.しかし,複列砂礫 堆を扱ったこれまでの研究は、いずれも複列砂礫堆の形成や移動等の現象に着目したもの がほとんどであり、どのような流路条件や水理条件の場合に、複列砂礫堆が移動したり、 移動が抑止されたりするかといった実態に関して言及した研究はきわめて少ない.このよ うに複列砂礫堆の実態に関する研究があまり行われなかった理由としては、実河川におけ る複列砂礫堆の移動形態が単列砂礫堆に比べて複雑であることが加担していると思われる. しかし、扇状地等を流れるような急流河川の河床には、単列砂礫堆のみならず、複列砂礫 堆が形成されている場合も多く、複列砂礫堆の移動特性に関する実態を究明することは応 用水理学上重要な課題である.

そこで本研究では、横断方向に2列の配列パターンを有する複列砂礫堆を対象とし、砂 礫堆が移動する場合とその移動が抑止される場合の条件を、扇状地等の自然河道でも見ら れるような流路幅が漸縮・漸拡変化をする広狭流路を用いて実験的に検討した.

<sup>\*</sup> 秋田県立大学大学院 生物資源科学研究科

<sup>\*\*</sup> 秋田県立大学 生物資源科学部

<sup>\*\*\*</sup> 秋田県立大学 木材高度加工研究所

#### 2. 実験概要

#### 2.1 実験流路

実験は、勾配を 1/50 に設定した流路架台上に、Fig.1 に示す流路側壁の法線が Sine-generated curve の波形で変化し、流路幅が漸縮・漸拡変化する広狭流路 (長さ 9.0m) を設置して行った. 無次元流路波長 (λ/B) と最大偏角 (ω) の組み合わせを違えた 9 種類 の実験流路を製作し、流路床には平均粒径 dm=0.8mm の砂を 40mm の高さで平坦に敷き 均した.



Fig.1 広狭流路平面図

#### 2.2 水理条件

水理諸量は,直線流路(Fig.2)における予備実験によって,明瞭な2列の複列砂礫堆が 流路全面に形成されるような Table 1 に示す組み合わせを選んだ.流路床粒子および流路 床勾配を共通の条件とし,9種類の流路に異なる3通りの流量でそれぞれ通水した.平均 流速は各条件において平均水深を計測して算出した.これらの条件は,流路幅・水深比と フルード数の2乗の積である Kinoshita 数が60付近になるように設定されており,2列の 複列砂礫堆が形成される頻度が高い水理条件(三輪,1983,1984)となっている.



Fig.2 直線流路における複列砂礫堆

実験	水路床粒子	水路床勾配	流量	平均流速	平均水深	水路幅·水深比	フルード数	無次元掃流力
条件	平均粒径 d 比重 s	Ι	Q	V	h	B/h	$V^2/gh$	hI/ (s-1) d
	mm		1/s	cm/s	cm			
Ι	0.8 2.65	1/50	0.6	23.8	0.63	63.5	0.92	0.095
П	0.8 2.65	1/50	0.7	25.7	0.68	58.0	0.99	0.103
Ш	0.8 2.65	1/50	0.8	27.4	0.73	54.1	1.05	0.111

直線実験水路の仕様:全長 9.0m, 水路幅 0.4m

Table 1 直線実験流路における水理条件

2.3 実験方法

各実験は、流路床に砂を平坦に敷き均した後、三角堰で測定・調整した所定の流量で断 続通水を繰り返した.1回の通水時間は5分間とし、断水毎に流路の約4.5m上方(地上か ら約5.6m)に設置したカメラによって、複列砂礫堆の発達状況を記録した.また、砂面 計を用いて、10分間隔で流路両測岸沿いと中央部の砂床高を計測した.通水中の観察およ び記録写真の判読、砂床高の時間的変化の解析によって複列砂礫堆の挙動を追跡し、各実 験における移動と停止の判定を行った.また、流路起点において人手による給砂を行い、 通水に伴う砂床低下の進行を防いだ.

#### 3. 実験結果

本研究では、無次元流路波長( $\lambda$ /B)と最大偏( $\omega$ )の組み合わせを違えた9種類の広狭 流路それぞれについて、Table 1の3通りの水理条件での限界移動角を求め、合計27通り の実験を行った.このうち、複列砂礫堆が移動する場合と移動が抑止される場合の例とし て、 $\lambda$ /B=4の広狭流路での実験結果を挙げて、その状況を説明する.

#### 3.1 広狭流路における複列砂礫堆の移動

Fig.3 は, λ/B=4, ω=12.5°の広狭流路において,水理条件 I で通水した場合の砂床形状 変化の状況である(図中央付近の半円状の物体があるのが水路起点から 5.0m の位置).

通水開始から 10 分後には,ほぼ流路全面 に複列砂礫堆が形成され,水路起点から右 岸 3.9mと5.4mの漸拡部で明瞭な前縁部を もつ寄洲が下流へ移動する.さらに,通水 20 分後には,7.2mの流路中央部付近で上 流から移動してきた中洲が下流の中洲と重 なり合うような状況が見られるが,通水 30 分後には消滅する.通水開始後 40 分では, 中洲の先端部が流路中央部の 5.1m 付近ま で発達し,5.9mの両岸側壁沿いには寄洲が 移動している状況が見られる.その後も 5 分間隔で断続通水を繰り返すが,流路の各 所で寄洲や中洲がその形状を保持しながら 移動する状況が見られたため,「移動する場 合」と判定した.

水理条件Ⅱ並びにⅢについても,実験中 の観察と記録写真上の砂床形状変化を比較 検討した結果,Ⅰの場合と同様に「移動す る場合」と判定した.

3.2 広狭流路における複列砂礫堆の移動抑 止

Fig.4 は, λ/B = 4, ω=15.0°の広狭流路に おいて,同様に水理条件 I で通水した場合 の砂床形状変化の状況である.

通水開始から 20 分後には,右岸 4.1mと 左岸 6.9mの流路側壁沿いを高さの低い寄 洲が移動する状況が確認できる.しかし, その後の通水では,通水初期のような明瞭 な移動は見られなくなり,流路漸縮部から 狭窄部にかけての深掘れ形状はほぼ保たれ ていることがわかる.



Fig.3 複列砂礫堆が移動する例



Fig.4 複列砂礫堆の移動が抑止される例

流量が大きくなる水理条件Ⅱ並びにⅢについても同様に,砂床形が安定化したため,「移動が抑止される場合」と判定した.

#### 4. おわりに

Fig.5は,実験結果を無次元流路波長(λ/B) と最大偏角(ω)との関係で整理したものであ る.図中の(×)が3通りいずれの水理条件 においても複列砂礫堆が移動する場合,(●) がいずれの水理条件においても複列砂礫堆の 移動を抑止できる場合,(▲)が水理条件に よって結果が異なる場合を表している.

複列砂礫堆の移動は、流路の最大偏角( $\omega$ ) が大きくなるほど抑えられている.また、無 次元流路波長( $\lambda$ /B)が大きくなるほど、移 動を抑止できる最大偏角( $\omega$ )の値は小さくな る傾向が見られる.しかし、本研究で用いた 流路側壁の法線がSine-generated curveの波形 で変化し、流路幅が漸縮・漸拡変化する広狭 流路では、最大偏角( $\omega$ )が同じ値であっても、 無次元流路波長( $\lambda$ /B)が異なる流路同士で は、狭さく部の最小流路幅(b)が異なるの で、実験結果を無次元流路波長( $\lambda$ /B)と最 大偏角( $\omega$ )の組み合わせによって変化する流 路幅広狭比(b/B)との関係においても整理 した(Fig.6).

この場合の複列砂礫堆の移動は,流路幅広 狭比(b/B)が小さくなるほど抑えられる傾 向が見られる.また,広狭流路の波長が直線 流路で形成された複列砂礫堆の波長と一致す る条件( $\lambda$ /B=4)では,他の波長の流路より も移動を抑止できる流路幅広狭比(b/B)が 大きくなった.水理条件が及ぼす複列砂礫堆 の移動性への影響は流路平面形状の影響より も小さいものの,無次元流路波長( $\lambda$ /B)が 3 と 5 の広狭流路においては,低流量(水理 条件 I)で通水した場合に複列砂礫堆が移動 しやすくなる傾向が見られた.

今後は、さらに多様な実験を行い、複列砂 礫堆の挙動と水理条件との関係についても詳 細な検討を進めていきたい.



Fig.5 複列砂礫堆の移動抑止限界(1)



Fig.6 複列砂礫堆の移動抑止限界(2)

謝辞:本研究を進めるにあたり岩手大学農学部 三輪 弌 名誉教授のご研究に教えられるこ とが多かった。また,実験の遂行とデータの整理にあたっては,秋田県立大学の専攻生諸 氏にご尽力いただいた。記して心からお礼申し上げる.

#### 引用文献

Colombini, M., Seminara, G. and Tubino, M. (1987) : Finite-amplitude alternate bars, Journal of Fluid mechanics, 181, pp. 213-232.

長谷川和義(1983):蛇行流路における流れと平衡底面形状に関する研究,土木学会論文報告集,338, pp.105-114.

木下良作(1961):石狩川河道変遷調查,科学技術庁資源局資料,36.

木下良作(1972):河道平面計画試論,水工学シリーズ, 72-A-4, pp.1-19.

木下良作, 三輪 弌(1974): 砂レキ堆の位置が安定化する流路形状, 新砂防, 94, pp.12-17.

三輪 弌 (1982): 複列砂レキ堆の移動特性, 東北地域災害科学研究報告, 18, pp.90-93.

三輪 弌 (1983): 模型砂レキ堆を河川砂レキ堆に相似させるための実験則,水理講演会論文集,27, pp.733-740.

三輪 弌(1984):単列砂レキ堆と複列砂レキ堆の関係,水理講演会論文集,28, pp.775-781.

三輪 弌, 永吉武志(1999):実験蛇行水路における交互砂洲の移動抑止限界,自然災害科学,17-4, pp.361-370.

Miwa, H and Nagayoshi, T (1999) : Suppression Limit of Alternate Bar Migration through Sine-generated Meander Channels, *Japan Society for Natural Disaster Science, Journal of Natural Disaster Science*, 21-1, 1-9 Pornprommin, A. and Izumi, N. (2001): Nonlinear stability analysis of alternate and multiple bars, *proceedings of RCEM2001*, IAHR, Obihiro, Japan, pp.575-584.

Seminara, G. and Tubino, M. (1989) : Alternate bars and meandering : Free forced and mixed interactions, in River Meandering, *Water Resources Monograph*, 12: pp. 267-319.

清水康行,板倉忠興,山口 甲(1987):二次元モデルを用いた河床形態変化のシミュレーション,水理 講演会論文集,31,pp.689-694.

清水康行・倉林弘志・藤田睦博(2001): 複列・網状砂州河道における河床変動計算,水工学論文集,45, pp.739-744.

倉林弘志・清水康行(2002): 浮州の形成を考慮した網状流路における河床変動計算,水工学論文集,46, pp.743-748.

樽屋啓之(1992):杭群による交互砂州の変化に関する研究,水工学論文集, 36, pp.29-34.

## AE パラメータ解析による粗度調整パイプラインのエネルギ損失特性の検出

## Detection of Energy Loss Characteristics of Inner-Roughness Improved Pipeline by AE Parameter Analysis

新潟大学農学部 鈴木哲也,本田泰大 農村工学研究所 中達雄,樽屋啓之,中田達

### 1. はじめに

農業水利施設の水理・水利用性能に関する議論は性能規定<sup>1)</sup>に加えて、それらを評価す るためのパラメータの定量化手法の開発が不可欠である<sup>2),3)</sup>.農業用パイプランでは損失 水頭の低減に基づく効率的な送配水が不可欠であるが、既存施設では十分に考慮されてい ないのが現状である.パイプラン施設の構造的特徴は、目視により通水状況を確認できな い点にある.筆者らは、配管内の水理現象起源弾性波に着目し、AE (Acoustic Emission) 法による検出と定量評価を試みている<sup>3)</sup>.既往の研究により、漏水現象<sup>4)</sup>や水撃圧<sup>5)</sup>,混 相流<sup>6)</sup>などを対象にその特性を弾性波の観点から評価し、AE パラメータの有効性を確認し ている.

本論では, 管内面の粗度を調整したモデルパイプラインにおいて発生する水理現象起源 の弾性波を AE 法により検出し, 損失水頭と AE パラメータとの関連を考察する.

#### 2. 実験·解析方法

#### 2.1 モデルパイプライン概要

モデルパイプラインはアクリル製の円筒状の管を用いた.モデルパイプラインの概要を 図-1に示す.管の長さは全長15m,管径は100mmである.上流部に600mm×1,500mm ×1,200mmの上流流入水槽を設置し,ポンプで水槽に注水し,水頭差を用いて下流部の貯 水槽に水を流した.上流流入水槽には,管路内での流れを安定させるために堰とベルマウ ス管を設置し,流況の乱れを安定させた.流量の調整は下流側に設置したバルブを用いて 開度により調整した.検討ケースは,通水性能の改善を目指した粗度調整管(以後,対策



(顎=)
図-1 モデルパイプライン概要

管と記す)(Case 1)と円筒状の通常管(Case 2)である.実験では、パイプライン内の流 速を変えて Case 1, Case 2 のそれぞれで 10 通り、計 20 通りのモデル実験を行った.

## 2.2 水理条件の計測・評価

損失水頭の計測は、パイプラインの流入部から2m間隔にピエゾ管を設置し、マノメー タより計測した.計測点は、各ケース6点である.流量は計量堰(三角堰)の水位を計測 し、沼地・黒川・淵沢の式より流量を算出した.沼地・黒川・淵沢の式を式(1)、流量係数 *K*の算出に用いた式を式(2)に示す.

$$Q = K \cdot b \cdot h^{3/2} \tag{1}$$

$$K = 1.353 + \frac{0.004}{h} + (0.14 + \frac{0.2}{D^{0.5}})(\frac{h}{W} - 0.09^2)$$
(2)

ここで, *Q*:流量(m<sup>3</sup>/s), *K*:流量係数, *W*:水路幅(0.8 m), *D*:水路底より堰頂までの高 さ(0.3 m), *h*:越流水深(m)である.流速は,管の断面積(0.05<sup>2</sup>π m<sup>2</sup>)で流量を除した 値である.流量の制御は,上流のポンプと下流のバルブで行った.

実験で得られたデータとから流速係 数 C を求め,通常管と対策管の通水性 能評価を行った.流速係数はヘーゼ ン・ウィリアムズ公式より算出した.

V=0.849C·R<sup>0.63</sup>·I<sup>0.54</sup> (3)
 この式を流速係数Cについて変形する
 と下式となる.

$$C = \frac{V}{0.849R^{0.63}I^{0.54}} \tag{4}$$

ここで, V:管内流速 (m/s), R:径深 (m), I:動水勾配である.

#### 2.3 弾性波検出·評価

損失水頭の計測点と同一地点に AE センサを取り付け,パイプに通水時に 発生する弾性波を検出した. AE セン サは、150 kHz 共振型センサを用いた. AE 計測では閾値を 30 dB とした.

#### 3. 結果および考察

#### 3.1 モデルパイプラインの水理特性

計測によって求められた水理データ から損失水頭を計算した結果,流速係 数は通常管と比較して対策管の評価値 が高くなった.対策管は,通常管より も通水性能が高いものと考えられる. 3.2 AE パラメータを用いた対策管の エネルギ損失特性評価



図-2 累積ヒット数(10sec)と流速 V の関係



本研究では、エネルギ損失の特性を AE 法より検出された弾性波の波形情報から評価した.評価指標には、累積ヒット数と RMS(実効値電圧)を用いた.検討の結果を図-2、図-3 に示す.図-2 は流速と累積 AE ヒット数の関係を示したものであり、10 秒間で計測された AE ヒット数の累積値である.同図から、Case 2 で計測されたヒット数の累積値は、Case 1 の約 36 倍高い値を示した.図-3 は、累積 RMS と流速の関係を示したものであり、累積 RMS は 10 秒間で観測された RMS 値とヒット数の積である. Case 2 の累積 RMS は Case 1 の約 24 倍高い値を示した.

Case 1 では, AE ヒット数が少なく RMS 値が比較的低いことが確認された.これに対し, Case 2 では, AE ヒット数の増大が確認され, 累積 RMS 値も同様の傾向であった. AE 発 生挙動の観点から, Case 1 のエネルギ損失は Case 2 と比較して低いことが明らかになった.

通水時に発生する弾性波の波形情報に着目することにより,管の通水性能を評価できる 可能性が示唆された.

約 0.25 m/s の場合,累積 AE ヒット数と累積 RMS ともに明確な差は確認されなかった. これに対して,約 2.5 m/s では両ケースのパラメータ(累積 AE ヒット数,累積 RMS 値) の差が拡大していることが確認された.これらの傾向を考慮すると,対策管(Case 1)は 流速 0.5 m/s 以上の場合において,通水性能の向上効果を発揮するものと考えられる.

#### 4. おわりに

本報では,通水性能の改善を目指した新開発のパイプラインの性能を流速係数と AE パ ラメータから評価することを試みた.これらの試験結果を以下に列挙する.

- モデルパイプラインを用いた実験の結果、対策管では通常管に比べて流速係数が高かった.このことから、通常管に比べて対策管は通水性能が向上したと考えられる.
- 2) 実験において検出された弾性波の AE パラメータを用いて,解析を行った結果,対策 管は通常管に比べ累積 AE ヒット数で約 36 倍,累積 RMS で約 24 倍の差が出た.流速 係数との相関があることから, AE パラメータの通水性能の指標としての可能性が確認 された.

#### 参考文献

- 中達雄, 樽屋啓之: 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, pp. 9-16, 2008.
- 伊藤夕樹,田中良和,向井章恵,樽屋啓之,中達雄,加冶佐隆光:用水路系の信頼性低下を引き起こす主要地点分析,農業農村工学会論文集,288,pp.55-64,2013.
- 3) 鈴木哲也, 樽屋啓之, 中田達, 藤山宗, 中達雄:弾性波検出による農業用パイプラインの水理機能 診断法の開発, 農業農村工学会誌, 82(1), pp. 7-10, 2014.
- 4) 鈴木哲也:農業用パイプラインにおける漏水波特性へ及ぼす内水圧の影響に関する実証的研究,農業農村工学会論文集, Vol.78, No.6, pp.537-538, 2010.
- 5) 鈴木哲也,中達雄,樽屋啓之:モデルパイプラインに発生させた圧力波の非破壊検出に関する研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp.727-734, 2012.
- 6) 鈴木哲也,中達雄,樽屋啓之,田中良和,青木正雄:AE 法を用いたオープン型パイプラインに発 生する気液二相流の特性評価,構造工学論文集 A, Vol.56A, pp.665-670, 2010.

## 水田湛水による空間放射線量の低減効果に関する研究

久保	成隆、	飯田俊彰	(東京大学大学院農学生命科学研究科	生物・環境工学専攻)
溝口	勝		(東京大学大学院農学生命科学研究科	農学国際専攻)

#### Abstract

原発事故で放出された放射性セシウムは、土壌中の表層付近の粘土に収着され、強力なッ線を放出 する。居住域周辺の除染が本格的に行われているが、なお一層の放射線量低減に向けた努力が必要 である。そうした中で、水田湛水は費用対効果から見て、周辺環境への放射線量を低減する方法と して有効な方策の一つ考えられる。本研究では飯舘村の佐須と小宮の2地区内の水田において、こ れらの効果を検討するために圃場実験を行った。また、y線の減弱に関する理論式を数値積分する ことで低減効果を計算した。その結果、水田を 20cm~25cm の深さで湛水状態に保てば、水田から の放射線を大幅に遮断できることが判明した。また、湛水深と放射線量の関係を定量的に示すこと ができた。ただし、数値計算と圃場実験の結果には多少の違いも見られた。数値計算では、湛水深 の増加に対して線量が指数関数的に低下したが、圃場実験では湛水深の増加に対しての放射線量の 低減は直線的であった。コンプトン散乱によるビルドアップ効果などが影響していると思われるが、 詳細な理由は不明である。実用化に当たっては、これらの解明が必要と思われる。

#### 1. はじめに

東日本大震災から既に3年半が経過し、飯舘村では水田や住宅地周辺での放射能除染が本格化して、避難指示解除準備地域では解除も現実味を帯びてきている(Minyu-net(2014)。除染により放射能は減少し、また、流出や自然崩壊によっても放射能は減少している。近い将来、放射線量の低くなった地区から、順次、避難指示が解除されることになると思われる。しかし、村民が戻ってくる時こそ、空間放射線量を低減させる更なる努力が必要である。低減方法として、幾つかの方法を考えることができるが、その中で代掻きと水田湛水は、費用対効果と農地保全の観点から見て有効な方法と考えている。

セシウム (Cs) から出るガンマー線 (y線) は光と同じ電磁波であるが波動性より粒子性が卓越し 四方八方へ弾丸の様に放射される(Tazaki 2011)。特に、水田では Cs は表層近くの粘土に収着され (Shiozawa et al. 2011)、そこから放射される y線は、水田の表面が平面であるため遮蔽され難く、水 田地域では空間放射線量の主たる発生源になり得る。しかし水田を湛水状態にすれば、水田から放 射される y線量を大幅に減らすことが可能である。生活空間は水田に隣接しているとは言え、生活 空間に届く y線は水田から低い角度で放出されるものだけなので、この様な y線は水の層を斜めに つき切るため、水中移動距離が長くなりその間に光子数は大幅に減少する。

日本の水田は、そのほとんどが灌漑水田で、畑地とは異なり水田に用水を供給するための水利施 設が整備されている。このため、震災で被害を受けた施設はあるものの、少しの補修と整備でその 機能を回復させることが可能である。ただし、水田に用水を供給するだけでは湛水を実現すること は困難で、水田湛水を維持するためには代掻きや畔塗りが必要である。これらを行わないと鉛直・ 水平浸透により貯留水は急速に失われる(Lee et al. 2003)。代掻きは Cs を耕土層内に分散し、耕土自 身と飽和土壌水による遮蔽効果で線量は低減させることを期待できる。また、Csを吸着した土埃が 圃場から舞い上がるのを抑制する。その他、水田湛水は、雑草の繁茂を抑え、猪や猿などの野生動 物の侵入を防ぐ効果も期待できる。土壌中の Cs の籾への移行割合が僅かであれば、水稲栽培が可 能となり、農村の復興への大きな一歩となりうる。

ここでは、水田湛水の放射線量低減効果を数値計算と圃場実験を行うことで確認し、また、現地で実験を実施する際の問題点や課題の検討を行うこととする。

#### 2. 理論的考察



**Fig.1** Three radiation points sources at A, O and B on the plane and receiver at P

先ず、非湛水の水田の危険性を見るために、 簡単な計算を行う。今、**Fig.1**に示すように、x軸上に3つの点源 A(- $\epsilon$ , 0), O(0, 0), B( $\epsilon$ , 0)がある 場合を考える。点 P(x, y)は点 O からrの距離に ありrは $\epsilon$ に比べ十分に大きい( $r >>\epsilon$ )と仮定す る。その場合、点 P へ届く放射線量の強さと、 点 P から2点 A と B を見る場合の視角  $\alpha$  が水 平面からの角度 $\theta$ によってどの様に変化するか を検討する。

γ線は平均的には全ての方向に放射させるの で、放射線量は点源からの距離の2乗に反比例 する。このため、点 A, O, B の3点から点 P ~

放射させる線量の強さは、点Oから点Pへ放射される線量と比較した場合、

$$\left(\frac{1}{\overline{AP}^2} + \frac{1}{\overline{BP}^2}\right) \cong \frac{2}{\overline{OP}^2}$$

と、近似できるので、

$$\left(\frac{1}{\overline{AP^2}} + \frac{1}{\overline{OP^2}} + \frac{1}{\overline{BP^2}}\right) \div \frac{1}{\overline{OP^2}} \cong 3$$





と角度 $\theta$ に係らず約3倍となる。即ち、点Pに届 く放射線量は、点Pから距離rの位置にある放射 線源の数に比例し、仰角 $\theta$ には依存しない。

一方、(r >>ε)と仮定できる場合、Fig.2 に示す ように、3本の直線 AP、OP、BPは、ほぼ平行と 見なせるので、視角αに関して、以下の式が成り 立つ。

## $\sin(\alpha/2) \cong \varepsilon \sin\theta \div r$

また、
$$sin(\alpha/2) \cong \alpha/2$$
と近似できるので、

#### $\alpha \cong 2(\varepsilon/r)\sin\theta$

となる。視角は真上( $\theta=\pi/2$ )から見れば  $\alpha \cong 2(\epsilon/r)$ と最大に、真横( $\theta=0$ )から見れば  $\alpha = 0$ と最小になる。単位視角当たりの放射線量は、総量が一定なので、視角に反比例して $\theta$ が小さくなると非常に強力に(明るく)なる。

水田は人工的に地表面を水平に均平化したものであり、また、圃場が不撹乱状態である場合は、 収着した Cs は地表の極薄い層内に存在するので解析の仮定が成り立つ状況にある。即ち、不撹乱 状態で放置された水田は、低い仰角の y 線の進路に当たる道路や住居に対して、増幅された放射線 を照射する危険性を持つ。



**Fig.3** Travel length of the  $\gamma$ -ray in the medium of water or soil

合は、通過長は  $d/sin\theta$ で光子の通過量は、

次に、放射性物質が土壌や水などで被覆されている場合に環境に放射される放射線量の低減に関して検討を行う。 $\gamma$ 線は電磁波であるが光子として振る舞い、 光子が物質を通過するとき物質との相互作用によって減弱される。物質を通過する際に光子数は、物質の 厚みを dとすれば、 $e^{-\mu d}$ 倍なる。この $\mu$ は線減弱係数(linear attenuation coefficient)、 $\mu$ を密度で割った $\mu$ m は質量減弱係数(mass attenuation coefficient)と呼ばれる(Tazaki 2011)。 $\mu$ m は物質によらずほぼ一定なので、 $\mu$ は密度にほぼ比例すると言える。また、光子数が半減する厚さ  $d_{0.5}$ は半価層(half-value thickness)と呼ばれ、 <sup>137</sup>Cs の $\gamma$ 線の場合、水では 8.1cm、空気では 70m、土では 5cm 程度である(Fujiwara 2011)。

Fig.3 に示されるように、放射される仰角がθの場

$$0.5^{\frac{d}{d_{0.5}} \times \frac{1}{\sin\theta}} = \left(0.5^{\frac{d}{d_{0.5}}}\right)^{\frac{1}{\sin\theta}}$$

倍となる。この場合は被覆がない場合とは逆に、仰角 $\theta$ の値が小さいと被覆物による減弱効果が大きく、その減弱効果は低仰角による増幅効果を凌駕する。具体的には、例えば、層厚dが半価層 $d_{0.5}$ に等しい( $d=d_{0.5}$ )場合、「光子の通過割合」と「単位視角当たりの明るさ」は、 $\theta=30$ 度では 1/4 と 1/2、 $\theta=15$ 度では 1/15 と 1/4、 $\theta=10$ 度では 1/55 と 1/10、 $\theta=5$ 度では 1/3000 と 1/250 となる。

以上より、耕起により放射性物質を土壌で被覆し、代掻きによって土壌を飽和させ、さらに水田 を湛水状態に保てば、環境中に放出される光子量を大幅に減弱できることがわかる。特に、水田か ら低い仰角に位置する日常の生活空間への減弱効果は大きい。

**Fig.4** はその様子を図示したもので、(a)は縦横比が実際に近いもの、(b)は縦方向に引き伸ばした ものである。(a)図から明らかなように、水田から人や住居に向けて放射される y 線の仰角は実際に は非常に小さい。このため、y 線が土壌や水中を通過する距離は非常に長くなり減弱が期待される。



Fig.4 Gamma ray radiated from paddy field to living space

## 3. 現地での圃場実験

飯舘村の佐須地区と小宮地区の2地区において、実際に水田を湛水させることで水田周辺での放 射線量がどの程度軽減されるかを現地で圃場実験により検討した。佐須での観測は予備実験的なも ので、2012.10.13~11.10までの1ケ月弱、小宮での観測は2013.8.3~12.3までの4ヶ月である。

3.1 佐須における実験 佐須地区は避難指示解除準備区域に指定され、放射線量は比較的低い。対象水田は北緯 37°44′13″、東経 140°43′50″に位置し、南北に伸びる森林に挟まれた谷津の中



**Fig.5** Experiment paddy field in SASU section and locations of observation stations for γ-ray and water level にある。Fig. 5 は、佐須における実験水田の位置 と2ケ所の放射線量観測位置(y-ray)と1ケ所の 水位の観測位置(WL)を示している。A 地点は対 象水田の、角に位置し、B 地点は水田長辺の中央 部で水田の縁から1m外側に位置する。用水は小 灌漑水路から取水されて対象水田に供給され、余 剰水は自然渓流へ排水される。湛水される水田は 中央部の1枚だけで、他の水田へは水は供給され ない。ただし、湛水田の右側の水田へは湛水田か らの浸透水が滲み出し、一部、湛水が確認された。 y線の線量は、地上 *h*=1mの高さに設置した Geiger Müller counter で計測した。ただし、この counter では崩壊する元素の核種を区別できないので、正 確な線量強度はわからない。

<sup>134</sup>Cs と<sup>137</sup>Cs は自然崩壊のため時間の経過に伴って減少する。計測期間が1ケ月程度の場合、そ

の減少割合は、<sup>134</sup>Cs では 2.8%、<sup>137</sup>Cs では 0.2%であるが、佐須での実験では計測期間中の自然崩壊に伴う減少は考慮しないこととした。**Fig.6 (a)**は、A 地点と B 地点における計測開始後の y 線カ

ウント数の時系列で、カウント数は変動が激しいので1日毎に平均している。Fig.6 (b)はC地点に おける水位の時系列で、水位は水田の平均標高を基準としている。なお、水田表面は北側に僅かに 傾いていて、C地点の標高は平均より5cm程度が低いため、初期において水位がマイナスの値にな っている。Fig.7 (a)はA、B2地点における水位と放射線量の関係である。水位が上昇するのに対応 して、A地点では水位の1cmの上昇に対応して、放射線量が平均4.57カウント、B地点では6.79カ ウント減少している。また、Fig.7 (b)は、同じ水位時の2地点での放射線量の関係を見たもので、B 地点での減少率はA地点の1.43倍であった。

(a) Gamma ray counting number at A and B points

(b) Water level at C point



Fig. 6 Field observation results of  $\gamma$ -ray radiation and water level



Fig. 7 Relation between  $\gamma$ - ray counting and ponding depth at points A and B

対象水田における非衝突線の線量と湛水深との関係(散乱線量も考慮した実効線量ではない)は 理論的に求めることができる。即ち、水田の単位面積から単位時間に放出される y 線の数を p、対 象水田面積を S、観測地点から微小面積 ds までの水平距離を r、放射線計の高さを h、湛水深を d、 空気の半減価を do.5a 、水の半減価を do.5w とした場合、流束 I (単位時間当たりに球形の検出部分を 通過する y 線の単位面積当たりの通過数)は以下の式で求められる。

$$I = \frac{p}{4\pi} \iint_{S} \frac{(0.5)^{\sqrt{r^{2} + h^{2}} \times \left(\frac{h - d}{h d_{0.5a}} + \frac{d}{h d_{0.5w}}\right)}}{r^{2} + h^{2}} ds = \frac{p}{4\pi} \alpha$$

積分値 α は、観測位置、水田形状、湛水深のみに依存するが、放射強度 p は事故後の経過時間や所 在地に依存する量である。A 地点と B 地点での積分値 α<sub>A</sub> と α<sub>B</sub> は、Fig.8 に示すように、対象水田を 80m×25m の大きさとして、1 辺が 0.5m の正方形格子に分割し、格子内に分布する放射性物質を格 子中央に集中して存在すると仮定して数値計算により求めた。

Fig.8 Paddy field and observation points A and B for numerical calculation of uncollided *y*-ray flux.

Paddy field is divided into squares of 0.5m×0.5m, and distributing radioactive substances are assumed to be concentrating at the square center.



**Fig.9** に α<sub>A</sub> と α<sub>B</sub> の関係を 示す。**Fig.7** の実測値と **Fig.9** の計算値の関係を直接、比較 することはできないが、湛水 効果の現れ方に幾つかの相 違点が見られる。先ず、水位 上昇に伴う線量の減少が、 **Fig.7** では直線的減少である のに対して、**Fig.9** では指数 関数的減少である。その原因 としては、**Fig.7**の結果は **GM** 

管で計測されているので、Csからの y線ではコンプトン散乱が起こり、その散乱放射線をカウント している可能性がある。その場合、Fig.9の非衝突線の線量に散乱線が上乗せ(ビルドアップ)され、 下に凸の曲線の曲率が減って、直線的な減少になるものと考えられる。また、Fig.7 では B 地点での



線量の減少割合が A 地点の 1.4 ~1.5 倍になっているが、数値 計算による Fig.9 でも同様の値 になっている。線量計を水田の 縁に設置した場合には、理論的 には A 地点の約 2 倍になるが、 1.4~1.5 倍になる理由としては、 設置位置が水田縁から 1m 外側 の位置にあるためと考えられ る。何れにしても、湛水深を 20cm 程度に保てば、非衝突線 量を元の 2%程度にまで低減で き、湛水による放射線量低減効 果が大きいことが確認できた。

Fig. 9 Relation between integral  $\alpha$  and ponding depth at A and B

3.2 小宮における実験 小宮地区は住居制限区域に指定され、対象水田は北緯 37°37′、東経 140°46′ に位置し、周囲を森林で囲まれている。Fig.10 は小宮における地区の様子を示している。実験水田 は2枚で、湛水深は、左側水田ではF地点で、右側水田ではG地点で、水位計(Onset 製, U20)を



**Fig.10** Experiment paddy field in KOMIYA section and locations of observation stations for  $\gamma$ -ray and water level

用いて測定した。放射線量はD地点とE地点で定 置型線量ロガー((株)シリアルゲームズ製, GPSGMC-002-TUV)により観測した。D地点は2 枚の水田間の道路上であるが、左側水田の縁から 0.5m、右側水田の縁から2.5mの位置にある。E地 点は家屋の前面にあり、水田縁から0.5mの位置 にある。実験水田の周囲には水田や畑があり、更 にその外側は森林に囲まれている。南東部の水田 と畑、周囲の森林からのバックグラウンドとして の線量は、季節変動はあるもののその変化は緩や かで限定的と考えられる。

**Fig.11**は観測期間中のF地点とG地点での湛水 深の時系列である。季節変動と湛水深変化を考慮 して、観測期間を以下の4期に分けてデータを整 理する。8月期は湛水深がやや深い 8/3~8/31、9 月期は湛水深が非常に深い 9/1~9/28、10月期は

湛水がほとんどない 9/29~11/5、11月期は湛水深がやや深い 11/6~12/3とする。



Fig.11 Time series of water depth at F and G



**Fig.12** Time series of  $\gamma$ -ray radiation dose at D and E Black line: raw data

Gray line: corrected data considering decay

Fig.12 は観測期間中の D 地 点と E 地点における放射線量 の時系列である。D地点では9 月期に長期間にわたり、機器不 備によりデータ欠損が生じた。 小宮での観測は4 ケ月に及ぶ ため、放射性物質の自然崩壊に よる減少を考慮して割増し補 正を行う必要がある。補正方法 としては、<sup>134</sup>Cs と <sup>137</sup>Cs に対し て、半減期を2.06年と30.2年、 事故当時のベクレル比を1:1、 ベクレルからシーベルトへの 換算係数を 5.4 と 2.1、事故か ら観測開始時点までの経過日 数を 870 日とし、各観測日毎 の線量の減少比率を計算して 観測開始日(8月3日)の水準 に戻す方法を採用した。Fig.12 で黒い線は割増し前の線量を、 灰色の線は割増し後の線量を 示している。4 ケ月間に8%程 度、線量が低下している。



Fig.13 Radiation dose at E (in front of the house) vs. ponding depth at G (right side paddy field)

Fig.13 は、E 地点における放射線量と右側水田の湛水深(G 地点で観測)の関係を見たものであ る。Fig.13 (a)は割増し補正を行っていない場合で、Fig.13 (b)は補正を行った場合である。割増し補 正を行わない場合には、時間の経過と共に放射線量低下するので、観測初期のデータと終期のデー タには分離が見られるが、割増し補正を行うことでとデータの分離を抑えることができる。よって、 以降の解析は全て、割増し補正を行った値(8月3日の水準に戻した値)を用いて行うこととする。 湛水深増加に対しての線量の低下は直線的ではなく指数関数的に低減するが、その減り方は緩やか である。E 地点における放射線量 y (μSv/h)と水深 h (m)の回帰曲線を、指数関数を用いて近似する と、

$$y = 2.38 + 1.16 \times Exp(-8.38 \times (h + 0.05))$$
  
= 3.54 - 1.16 \times \{1 - Exp(-8.38 \times (h + 0.05))\}



を得る。この式は湛水深が、 -0.05m(不陸によってマイ ナスの水深となっている) では放射線量は3.54 (µSv/h) であるが、湛水深を十分に 大きして当該水田からの放 射線量を完全に遮断できれ ば、背景からの放射線量で ある2.38 (µSv/h)まで低下さ せられることを示す。この 回帰曲線の関係を用いて、

Fig.14 Estimated radiation dose at E using regression curve

右側水田の湛水深(G地点)からE地点の線量を推測したものと実測結果を比較したものが、Fig.14 である。実線が測定値で破線は推定値である。観測の欠損部分を推定できるが、線量が高いところ では推定値の方が過大になっている。

E 地点は左側水田とは離れているので、E での放射線量は、専ら右側水田の湛水深(G 地点)に

よる影響を受けると考えられるが、D地点での線量は、明らかに、左右2枚の水田の湛水深の影響 を受ける。Fig.15 (a)は、縦軸に D地点での線量、横軸に F地点と G地点での平均水深をとったも ので、全般的にばらつきが大きい。特に、11月には両地点での湛水深が相当に異なる時期があるた





め、集団から外れた値を多数見られる。Fig.15(b)は縦軸に D 地点での線量、横軸に左側水田の湛水 深(F 地点)をとったものである。プロットされた点は集まっているが、なお、広い幅を持って分 布している。



**Fig. 17** Numerical integral at D and E to compare radiation doses

D 地点での線量と左側水 田の湛水深(F地点)の関係 を明確化するためには、D 地点への右側水田の影響を 除く必要がある。そこで、 右側水田の湛水深のD地点 とE地点への影響度合いを 数値計算により求めること にする。右側の水田の形状 は、Fig.10 に見られるよう に歪な四角形であるが、こ

れを Fig.16 に示す長方形で近似する。D 地点を水田縁から 2.5m、E 地点は水田縁から 0.5m、離れた地点として水田からの影響を見る。



D 地点と E 地点への放射線量の 影響は、流束を表す式において、p値が一定と仮定すれば、積分値  $a_D$ と  $a_E$ の大きさに比例する。また、 湛水による線量低減効果の比率は、  $a_{D0}, \alpha_{E0}$ を湛水深がゼロの場合の積 分値 a とすれば( $\alpha_{D0} - \alpha_D$ ): ( $\alpha_{E0} - \alpha_E$ )となる。

**Fig.17** は数値積分の結果で、(a)には D 点と E 点における積分値  $\alpha_D$  と  $\alpha_E$  を、(b)には比の値  $(\alpha_{D0} - \alpha_D)/(\alpha_{E0} - \alpha_E)$ を示している。この図より、右側水田での湛水による線量軽減効果が、D地 点ではE地点のおよそ0.6倍であることが分かる。E地点での低減効果Δyは、先の回帰式より、



 $\Delta y = 1.16 \times \{1 - \exp(-8.38 \times (h + 0.05))\}$ 

量に加えれば、右側水田の湛水 深(G地点)を、-0.05mに維持 した状態で、左側水田の湛水深 (F地点)が D 地点の線量に与 える関係を見ることができる。

Fig.18 は、縦軸に推定放射線 量、横軸に左側水田の湛水深を とったもので、多少の散らばり はあるものの、Fig.15 と比べて、 湛水深と放射線量の関係がより 明確になっている。左側水田の 湛水深のみによる D 点への影響 を、指数関数を用いて回帰曲線 を求めれば、

Fig.18 Estimated radiation dose vs. ponding depth at F if ponding depth at G was kept at -0.05 m

> $y = 3.90 + 1.06 \times Exp(-7.59 \times (h + 0.04))$  $= 4.96 - 1.06 \times \{1 - \exp(-7.59 \times (h + 0.04))\}\$

を得る。この式は、左右の水田が共に湛水状態でない場合は、D地点の放射線量の強さは4.96

(µSv/h)であるが、左側水田の湛水深のみを十分に大きくすると、3.90(µSv/h)にまで線量を低下さ せることを意味する。更に、右側水田の湛水深も十分に大きくすれば、Fig.13の回帰式の関係から、 3.90-1.16×0.6 ≅ 3.20(µSv/h)にまで線量を低下させることが可能である。

Fig.13 の回帰式と Fig.18 の回帰式を比べれば、背景の線量の強さは、3.54(μSv/h)と 4.96(μSv/h)と 多少異なるものの、湛水による低減可能幅は、1.16(μSv/h)と 1.06(μSv/h)と近く、また、指数関数の 係数の値も、-8.38 と-7.59 と近いことが分かる。ただし、Fig.17 (a)の非衝突線の線量の湛水深によ る低減の場合は、指数関数の係数は-20~-30の値と相当異なる。この違いは、コンプトン散乱によ る散乱線が上乗せされるため等の理由が考えられるが、詳細は不明である。

#### 4. 結論と課題

水田湛水によって、水田表面に沈着した Cs から放出される y 線の線量を大幅に低減できること が、非衝突線の線量に関する数値計算と、現地実験によって明らかとなった。しかし、水田湛水を 実用化するには、幾つかの問題の解決が必要である。

先ず、非衝突線の数値計算の結果と現地実験の結果には、低減の減り方に大きな違いが見られた。

数値計算の場合は湛水深の増加に伴って、線量が指数関数的に急速に低下したが、現地実験の場合 はむしろ直線的に減少した。この違いは、湛水効果を定量的に見積もる際に大きな影響を与える可 能性があり、解明が必要である。

次に、今回の現地実験では、最大湛水深は 20cm~25cm であった。この最大湛水深は放射線をカ ットするのに十分な水深であるのか、また、最大湛水深を持続させるのが可能であるのか、等の問 題も解決しなければならない。この最大湛水深は数値計算結果によれば、非衝突の放射線をほぼカ ットできる湛水深であるが、散乱線を含む実効線量をカットできるかどうかは不明である。また、 通常の水田においては、湛水深を 20cm~25cm に保つことはかなり困難である。冷害防止のための 深水灌漑の場合や、雨水を貯留する必要がある場合を除き、通常の灌漑水田の畦はあまり高くない。 精々、20~30cm の高さで、しかも、畦の崩壊を防ぐため、湛水深は畦の高さの 5~6 割である。大 きな湛水深を持続できる畦を、如何に整備するかの問題が残る。

更に、湛水された水は蒸発散と浸透によって絶えず失われる。このため、湛水深を維持するためには連続的な用水補給が必要である。その際、Csが含まれない水を供給する必要があるので、水中のCs濃度のモニタリングや、用水の取水基準を検討する必要である。

水田湛水は、これまでに述べてきた様に様々なメリットがあるが、同時に、それを実行するため には解決するべき問題もまだ多く残されている。

#### Acknowlegement

本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)「復興農学」(課題番号:25517005)の補助を受けて実施したもので、この研究を遂行するに当たり、佐須地区の菅野宗夫さんと小宮地区の大久保金一さんには大変にご協力を頂いた。記して御礼を申し上げる。

#### References

- Lee S, Senge M, Ito K, Hayashi H (2003) Influence of Direct Seeding Culture in a Well-drained and Non-tilled Paddy Field on Water Requirement—Case study on water requirement of Sunami district, Gifu Prefecture—. Trans. of JSIDRE, No.224, 19~26 (in Japanese)
- Shiozawa S, Tanoi K, Nemoto K, Yoshida S, Nishida K, Hashimoto K, Nakanishi T, Nihei N, Ono Y (2011) Vertical concentration profiles of radioactive cesium and convective velocity in soil in a paddy field in Fukushima. Radioisotopes 60:323–328 (in Japanese)

Tazaki S (2011) From Becquerel to Sievert.

http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/housha/docs/BqToSv.pdf (in Japanese)

Minyu-net (2014) "difficult-to-return zone", "restricted residence area" and "zone in preparation for the lifting of the evacuation order."

http://www.minyu-net.com/osusume/daisinsai/saihen.html (in Japanese)

Fujiwara T (2011) Calculation of the space dose rate.

http://w3.kcua.ac.jp/~fujiwara/nuclear/air\_dose.html(in Japanese)















● 機能と性能(2/4)	🏥 農研機構
農業水利施設の機能規定	
目的 管理者が水源から目的地まで、所定の水量と水頭を維持して、用水を送配水することによ 離れた所に位置する圃場、分水口もしくは、使用者に必要な用水を適時供給する。(本来を	り,水源から 機能:水利用)
(1)水理機能: 用水を安全に流送, 配分, 貯留する.	
(2)水利用機能:水源から圃場または、分水口まで、適時、適量の用 水を無効放流することなく効率的、公平かつ均等に送配水する. (狭義の環境性を含む)	
(3)構造機能: (1), (2)の機能を実体化する ための水利構造物の形態 を保持する.	
(4)安全性・信頼性: 定められた期間中に一定条件 の使用環境のもと で,その機 能を正常に果たす.	
(5)広義の環境性(多面的機能等)	













応用分野	具体的課題(主要)
貯水池の水理	ゲートレス、滞砂・排砂、水質、塵芥処理など
頭首工の水理	取水管理、滞砂問題、河床の保全、河川湾曲部での固定堰の再評価 ゴム堰の評価、 渓流取水工、魚道・河川生態系など
水路工の水理	圃場(水田)との連結性、サイホン、調整ゲート、水頭の再配分、調整 池、エネルギー損失の最小化、バイパス化、パイプライン漏水、水撃 圧対策、メンテナンスフリー技術(土砂)、土水路(海外)、異常降雨に 対する排水処理、外来生物対策、水管理のITCの活用など
楊水施設の水理	ポンプの水理、省電力運転、小水力発電など



## 流れ場中の帯電コロイド粒子の凝集速度への静電相互作用の影響:

## 実験と流体力学的軌道解析を用いた理論解析

Effect of electrostatic interaction on flow-induced aggregation rates of charged colloidal particles:

experiments and theoretical calculations with hydrodynamic trajectory analysis

## 杉本 卓也\*, 小林 幹佳\*\*

#### Takuya SUGIMOTO, Motoyoshi KOBAYASHI

## 1 はじめに

濁水に含まれる粘土鉱物に代表されるコロイド粒子は,難溶性重金属といった汚染物質を吸着し,それらと ともに輸送される.輸送担体であるコロイド粒子の輸送特性は,凝集に伴う粒径の増加により大きく変化す る.従って,環境中の物質輸送モデルの高度化を図る上で,コロイド粒子の凝集過程への理解が重要である.

凝集過程は粒子間の衝突過程と相互作用により決定される.近付きあうコロイド粒子同士は互いに van der Waals (vdW) 引力や表面電荷に起因する静電斥力などの物理化学的な相互作用を及ぼし合っている.これらの物理化学的相互作用は, DLVO 理論に基づけば, vdW 引力と静電斥力の和として記述することができる.流れが無くブラウン運動によりコロイド粒子が衝突するブラウン凝集において,粒子の表面電荷が低いときには,初期凝集速度の実験値と DLVO 理論に基づく理論値が定量的に一致することが示されている<sup>1</sup>.

しかしながら,実際の環境中では流れが存在しているにも関わらず,流れ場中での凝集速度に対する表面電 荷の影響についての実験的な検討は不十分であり,既存の凝集理論との定量的な比較は行われていない.そこ で本研究では,転倒撹拌により発生させた乱流中において,モデル粒子の表面電荷を系統的に変化させて凝集 速度を測定する.得られた実験値と軌道解析に基づく理論値を比較することで,電荷の影響に対する理論の妥 当性を検討する.

## 2 理論

乱流凝集速度定数  $k_{11,T}$  は,相互作用を無視した等方性乱流中の速度定数<sup>3</sup>に捕捉効率  $\alpha_T$  を導入することで次のように表される.

$$k_{\scriptscriptstyle 11,T} = \alpha_{\scriptscriptstyle T} (2R)^3 \sqrt{\frac{8\pi\epsilon_{\scriptscriptstyle T}}{15\nu}} \tag{1}$$

ここで,  $\nu$  は動粘度,  $\epsilon_{T}$  はマイクロスケールの乱流を特徴づけるエネルギー消散率, R は粒子半径である. 式 (1)の 捕捉効率  $\alpha_{T}$ を,凝集の起こる長さスケールが乱流のマイクロスケールよりも小さいとして,近似的に軌道解析により計算した<sup>2</sup>.軌道解析は剪断流中における粒子の衝突軌道を記述する.このとき,局所的な平均速度勾配を  $G_{T} = \sqrt{4\epsilon_{T}/(15\pi\nu)}$ とした.軌道解析に使用する物理化学的相互作用の表式として,vdW 引力  $F_{vdW}$ ,静電斥力  $F_{edl}$ ともに球間の相互作用を平板間の相互作用の足し合わせとして表わす Deryaguin 近似を用いて計算した.この場合, $F_{vdW}$  は次式で表される.

$$F_{vdW}(h) = -\frac{A_{\rm H}R}{12h^2} \tag{2}$$

ここで,h は粒子の表面間距離, $A_{\rm H}$  はハマカー定数である.また,静電斥力  $F_{edl}$  を次式により計算した<sup>1</sup>.

$$F_{edl}(h) = \pi R \int_{h}^{\infty} dh' P\{\psi_m(h')\}$$
(3)

ここで, P は電気二重層の重なりによって生じる平板間の単位面積当りの斥力,  $\psi_m$  は相互作用する平板間の 中点での電位である.  $\psi_m$  はヤコビの楕円関数を用いて表わされる平板間の非線形ポアソン-ボルツマン (PB) 方程式の厳密解により計算した<sup>1</sup>.

## 3 試料と実験方法

試料として,直径  $2R = 1.5 \ \mu m$ のカルボキシルラテックス (CL) 粒子を用いた.この CL 粒子は表面に カルボキシル基を有しており, pH の増加に伴う脱プロトン化により,表面の負電荷量を増加させる.使用

<sup>\*</sup> 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*\*</sup> 筑波大学 生命環境系 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1): 乱流凝集, 流体力学的軌道解析, ポアソン-ボルツマン方程式

した CL 粒子は Interfacial Dynamics Corporation から購入したものであり,表面のカルボキシル基密度が  $\Gamma_0 = 1.136 \text{ nm}^{-2}$ であることが分かっている.

粒子の帯電状態がモデルにより記述できることを確認するために,ZetaSizer Nano ZS (Malvern)を用い て,電気泳動移動度の測定を行なった.また,帯電挙動を記述する 1pK Gouy-Chapman (GC) モデルと電 気泳動移動度の理論式である大島の式 (1983) から理論値を計算し,実験値と比較することで,モデルによる 帯電挙動の記述の妥当性を検討した.

粒子の電荷の凝集速度への影響を調べるために,乱流凝集速度定数の測定を行なった.乱流凝集速度定数は,吸光度セルの転倒撹拌により発生させた乱流中において測定された凝集による吸光度の時間変化と T-matrix法により計算された光学因子 (Sun, 2006)から決定した.凝集速度の理論値を計算するために,エネルギー消散率  $\epsilon_{T} \in \epsilon_{T} = fgz$ により算出した<sup>2</sup>.ここで,f は落下周期,g は重力加速度,z はサンプルの落下高さである.このとき,吸光度セルの寸法(高さ 4.46 cm,幅,奥行き 1 cm)から z = 2.23 - 0.5 = 1.73 cm,転倒撹拌の回転速度から f = 2 s<sup>-1</sup> とした.実験は KCl 濃度と pH を変数として行った.このとき,pH はHCl と KOH により調整された.

## 4 結果と考察

Fig.1 に,電気泳動移動度 (EPM) と pH の関係を示す.記号は実験値,曲線は 1pK-GC モデルと大島の 式による理論値を示す.Fig.1 から, EPM の実験値と理論値が良好な一致を示していることが分かる.従っ て,使用した粒子の帯電挙動はモデルによって良好に記述できると考えられる.

Fig.2 に,乱流凝集速度定数を pH に対してプロットした.記号は実験値,曲線は軌道解析による理論値である.このとき, $A_{\rm H}$  を各塩濃度においてパラメータとして扱った.Fig.2 から,理論値が実験値と比較的良好に一致していることが分かる.しかしながら,1つの $A_{\rm H}$  で実験値を記述することは出来ず,イオン強度の増加に伴いハマカー定数を減少させる必要があった.これは van der Waals 引力の起源が分子間の静電的な双極子-双極子相互作用であるため,より高いイオン強度では溶液中のイオンの持つ電荷により,van der Waals 引力が遮蔽されたためと考えられる.



Fig.1 Electrophoretic mobility as a function of pH for different ionic strength: The symbols and lines denote experimental and theoretical values, respectively.



Fig.2 Absolute coagulation rate constant in turbulent flow as a function of pH for different ionic strength. The symbols and lines denote experimental and theoretical turbulent coagulation rate constants, respectively.

## 5 結論

帯電挙動を制御できる粒子の乱流凝集速度を表面電荷の関数として測定し,得られた実験結果の理論解析を 行った.その結果,軌道解析に基づく理論値は,実験値と定性的に一致することが示された.また,高イオン 強度下では,イオンの電荷により,van der Waals 引力が遮蔽されている可能性が示唆された.

## 参考文献

- [1] S.H. Behrens et al., Langmuir 16 (2000) 2566–2575.
- [2] Y. Adachi et al., J. Colloid Interface Sci. 165 (1994) 310-317.
- [3] P. Saffman, J.S. Turner, J. Fluid Mech. 1 (1956) 16 30.

#### 1. Introduction

Irrigation during dry seasons has become prevalent nowadays in Bangladeshi floodplains where groundwater resources are available in shallow unconfined aquifer, dramatically increasing agricultural productivity while causing groundwater depletion (Shahid and Hazarika, 2010; Rahman and Mahbub, 2012). Wise-use of that aquifer is an urgent prerequisite both for food security and for protection of water resources. Kuwano et al (2012) formulated a stochastic control problem to keep groundwater level high enough without allowing for benefits of irrigation. Optimal control strategies for storage systems considering depletion of the water resources were established for the cases of stochastic demand (Unami et al, 2013) and for the cases of stochastic occurrence of recharge (Unami et al, 2014b). Sharifi et al (2014a) and Sharifi et al (2014b) discussed tradeoff between irrigation costs and benefits from farm products, whose growth may be hindered and terminated due to water stress and drought. Unami et al (2014a) proposed stochastic control strategies to lift groundwater from a Bangladesh aquifer for production of off-season fingerlings. Here, an analogous approach as these works is applied for dry season irrigation in Bangladeshi floodplains, considering irrigation costs that highly depend on the depths of groundwater table (Zahid and Ahmed, 2006). The optimal strategies are obtained as solutions to the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation governing the supremum of a performance index as well. The finite difference method is employed to numerically solve the HJB equation, which is a parabolic partial differential equation.

#### 2. Stochastic control problem

A dry season necessitating irrigation is considered as a period [0,T] of time t, and groundwater is assumed to be fully stored in the aquifer at the initial time t = 0. Dynamics of the storage volume  $X_t$  of the aquifer at the time t is modelled by a stochastic differential equation

$$dX_t = -udt + \sigma_x (X_0 - X_t) \exp(\sqrt{u}) dB_t^x$$
(1)

where *u* is the discharge of water lifted from the aquifer,  $\sigma_x$  is a volatility coefficient,  $X_0$  is the full storage capacity of the aquifer, and  $B_t^x$  is a standard Browninan motion. This model assumes

ORyota Kuwano, Koichi Unami, Masayuki Fujihara Graduate School of Agriculture, Kyoto University

that fluctuation of the storage volume intensifies as the groundwater level declines and as the lifting discharge increases. The total value of farm products is considered as another stochastic process  $Y_t$ , whose dynamics is governed by the stochastic differential equation

$$dY_t = \alpha u (K - Y_t) Y_t dt + \sigma_y Y_t dB_t^y$$
(2)

where  $\alpha$  is the growth rate coefficient, *K* is the carrying capacity,  $\sigma_y$  is another volatility coefficient, and  $B_t^y$  is another standard Browninan motion independent of  $B_t^x$ . The lifting discharge *u* is considered as the control variable, whose decision making is based on  $X_s$  and  $Y_s$  at the current time *s*.

A spatial x - y domain  $\Omega$  of the stochastic processes  $(X_t, Y_t)$  is set as  $(0, X_0) \times (0, K)$ . For the bounded domain  $\Omega$ , the first exit time  $\hat{T}$  is defined as

$$\hat{T} = \min\left(\inf\left\{t \mid t > 0, (X_t, Y_t) \notin \Omega\right\}, T\right).$$
(3)

Then, the performance index  $J^{u}(s, x, y)$  to be maximized is set as

$$J^{u}(s,x,y) = E^{s,x,y} \left[ \int_{s}^{\hat{T}} f(t,x,y,u) \mathrm{d}t + Y_{\hat{T}} \right]$$
(4)

where  $E^{s,x,y}$  represents the expectation with respect to the probability law of the stochastic processes starting from the point (x, y) at s, and f is the profit rate function in  $(0,T) \times \Omega$ .

The control variable u is supposed to be constrained in the set  $U = [0, u_{\text{max}}]$  of admissible control. Let  $L^u$  be the partial differential operator

$$L^{u} = \frac{\partial}{\partial s} - u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\sigma_{x}^{2}}{2} (X_{0} - x)^{2} \exp(u) \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \alpha u (K - y) y \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\sigma_{y}^{2}}{2} y^{2} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}}$$
(5)

defined for each u. Then, the supremum  $\Phi$  of  $J^{u}(s,x,y)$  and the optimal control  $u^{*}$  attaining it are governed by the HJB equation

$$L^{u} \Phi + f(s, x, y, u^{*}) = \sup_{u \in U} \{L^{u} \Phi + f(s, x, y, u)\} = 0$$
(6)

with the terminal condition in  $\Omega$  at s = T

 $\Phi = y \tag{7}$ 

and the boundary conditions on  $(0,T) \times \partial \Omega$ 

$$\Phi(x_{\min}) = \Phi(x_{\max}) = y \ \Phi = y \ . \tag{8}$$

As a result of analyzing the left hand side of (6), the set  $U^*$  of candidates for  $u^*$  when f(s,x,y,u)is linear with respect to u turns to be

$$U^* = \partial U \cup \{u_{\text{ext}}\}$$
<sup>(9)</sup>

where

$$u_{\text{ext}} = \log\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} - \alpha \left(K - y\right)y\frac{\partial\Phi}{\partial y} - \frac{\partial f}{\partial u}\right) + \log 2 - \log\left(\sigma_x^2 \left(X_0 - x\right)^2 \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\right).$$
 (10)

## 3. Computation of wise-use strategies

Demonstrative computations are conducted to solve the HJB equation system in the idealized computational domain with T = 1,  $X_0 = 1.0$ , and K = 10, setting the parameter values as  $\sigma_x = 0.10$ ,  $\sigma_y = 1.0$ ,  $\alpha = 1.0$ , and  $u_{max} = 1.0$ . Three cases of different profit functions, which are in fact negative costs of pump operation, are considered as shown in Table 1. Case 0 is for the blank case of free or subsidized pumping. Case 1 represents the lifting cost proportional to the discharge. Case 2 is the realistic situation that the cost increases as the groundwater level decreases and diverges as the storage volume approaches to zero.

 Table 1
 Profit functions defining the costs of groundwater lifting

	f(s,x,y,u)
Case 0	0
Case 1	-u
Case 2	-u/x

The finite difference scheme with upwinding for the advection terms was applied for computation of the HJB equation system. Computed  $\Phi$  and  $u^*$  at the initial time s = 0for each case are shown in Figs. 1, 2, and 3. The  $\Phi$ -values are monotone increasing with respect to both x and y in all the cases. While, the optimal control differs in each case. As reasonably inferred,  $u^*$  is principally equal to  $u_{\text{max}}$  in Case 0, but it becomes equal to 0 when both x and y are small. In Case 1, the maximum y necessitating irrigation mostly decreases with respect to x, generating non-trivial rule curves. Restriction of pumping in case of groundwater depletion is well reproduced in Case 3. It is also remarked that the

optimal control  $u^*$  in the whole domain is predominantly of bang-bang type.

#### 4. Conclusions

The stochastic control theory was applied to discussing wise-use of shallow aquifer in the context of dry seasons in Bangladeshi floodplains. The computational approach well established the trade-off between the growth of farm products and the costs of lifting groundwater. The three distinct profit functions in the demonstrative computations do not have discontinuity with respect to the discharge, although it is common in the real world that the pumping cost as a function of the discharge u has a leap at u = 0. Profit functions having different irregularities shall be considered in a follow up study.

#### References

[1] Kuwano R, Alam AHMB, Unami K, Fujihara M (2012) Optimal strategies for water pumping from aquifer in Bangladeshi floodplain, shallow Proceedings of Annual Symposium, Applied Hydraulics Division, JSIDRE, 110-111. [2] Rahman M, Mahbub AQM (2012) Groundwater depletion with expansion of irrigation in Barind Tract: a case study of Tanore Upazila, Journal of Water Resource and Protection, 4(8), 567-575. [3] Shahid S, Hazarika MK (2010) Groundwater drought in northwestern Districts of Bangladesh, Water Resources Management, 24, 1989-2006. [4] Sharifi E, Unami K, Fujihara M (2014a) Formulation of a stochastic control problem to verify optimality of rainfed agriculture, Proceedings of the 22nd Annual Congress of JRCSA, 139-141. [5] Sharifi E, Unami K, Fujihara M, Yangyuoru M (2014b) Optimality of rainfed agriculture in the sense of stochastic control, Proceedings of Annual Symposium, Applied Hydraulics Division, JSIDRE, in press. [6] Unami K, Alam AHMB, Fujihara M (2014a) Stochastic control of water lifting from a Bangladeshi aquifer, Proceedings of the 22nd Annual Congress of JRCSA, 5-6. [7] Unami K, Mohawesh O, Sharifi E, Takeuchi J, Fujihara M (2014b) Stochastic modelling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells, Journal of Cleaner Production, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.100. [8] Unami Κ. Yangyuoru M, Alam AHMB, Kranjac-Berisavljevic G (2013) Stochastic control of a micro-dam irrigation scheme for dry season farming. Stochastic Environment Research and Risk Assessment, 27(1), 77-89. [9] Zahid A, Ahmed SRU (2006) Groundwater resources development in Bangladesh: contribution to irrigation for food security and constraints to sustainability. Groundwater Research and Management: Integrating Science into Management Decisions, Edited by Sharma MR, Villholth KG, Sharma KD, Groundwater Governance in Asia Series, 1, 27-46.



京都大学大学院農学研究科 ○金城信彦·宇波耕一·藤原正幸

京都大学農学部 中道理介

## 1. はじめに

乾燥地の涸川においては,短時間に集中する豪 雨時のみに出水があるが,これを取水,貯留して資 源化する技術は十分に確立されていない.そこで, 通常は渓流河川に設置される渓流取水工を,乾燥 地の涸川での洪水取水に応用することを検討する. とくに,砂漠気候下に実在する M 地区を対象に, 取水した洪水を涸川に近接した河道外の貯水池へ 導水して貯留することを想定する.

著者らは1次元浅水方程式に基づく数値計算の 結果に基づき取水工の水理諸元を設計した[1]. そ の後,実際に施工を開始したところ細部の変更を 余儀なくされた. そのため,[1]と同様の手法による 設計諸元の再決定とともに, Froude 相似則に基づ くひずみ模型を作成し水理模型実験を行ったので, その結果について報告する.

#### 2. 渓流取水工の設計

砂漠気候下にある M 地区を対象地とする. M 地区 は周囲に切り立った崖が多数存在する平野である. 崖と崖に挟まれたいくつかの U 字谷には涸川が存 在し、出水時にはその洪水が平野部に流れ込む. ある涸川の下流端において、渓流取水工により洪 水を取水し、平野部に築造した貯水池まで導水し て貯留することを考える.現地には水文データが乏 しく、洪水の痕跡や集水域の踏査から総合的に 判断して 1.1m<sup>3</sup>/s を設計洪水流量とする。

取水工はバースクリーン下方取水方式の渓流取 水工を参考に設計を行う.すなわち,洪水が掘り下 げられた集水渠へ流下することで取水が行われる. 幅1.6 m全長15.8 mの集水渠は涸川を横断するよ うに設置する.集水渠施工時の掘削量削減のため, 集水渠底は涸川両岸から中央に向かうほど標高を 低くする.集水渠により集められた水は大きな屈曲 を1つ有する全長59.4 m,幅1.6 mの導水路を通 過し20.0 m×25.0 mの貯水池に貯留される.導水 路底の勾配はおよそ1/100とする.流れを射流にす ることで,土砂の堆積による流下能力低下を避ける ためである.貯水池の最大貯留量はおよそ1,000 m<sup>3</sup>である.図1に集水渠,導水路および貯水池の 平面図を示す.灰色部分が崖上を,点線が平野に 開発された農用地を囲うフェンスを表している.



集水渠および導水路底はコンクリート舗装し,側 壁はコンクリートブロックにより作成する.導水路に 洪水吐の機能を持たせるため,左側壁の屈曲部や や上流(図2中A)からやや下流(図2中B)までの 高さを他の区間より低下させる. AB 区間の側壁高 さは,水路底標高にコンクリートブロック1個分の高 さである 15.0 cm を加えた値である. BC 区間, ED 区間の側壁標高は測定機器設置のため,水路底 標高に 52.0 cm を加えた値である. その他の区間 における側壁高さは,設計洪水流量が流入する時 に側壁から水を失わないよう,数値計算による水理 解析の結果から決定した.



図2 集水渠および導水路の平面図(拡大)

## 3. ひずみ模型実験

#### 3.1 ひずみ模型の設計

上記の設計の妥当性を確認するため、取水工全体のひずみ模型を作成し、水理実験を行う. 縮尺の関係式は2次元浅水方程式から導出する. 連続式 と運動方程式において、各項の比が原型と模型で 一定に保たれることから、x、y方向の流速u、v の縮尺 A、および A、は鉛直方向の長さhの縮尺 λ,を用いて

$$\lambda_{u} = \lambda_{v} = \lambda_{h}^{1/2} \tag{1}$$

を得る. 重力加速度gの縮尺 $\lambda_g$ は1と考えられるのでFroude数の縮尺 $\lambda_{Fr}$ は

$$\lambda_{Fr} = \frac{\lambda_v}{\sqrt{\lambda_g \lambda_h}} = 1 \tag{2}$$

が常に成り立ち, Froude 相似則が成立する.

ひずみ模型は、京都大学総合農業水利研究実験場に設置する.  $\lambda_x = \lambda_y$ は土地の制約上 1/8 とした. また、粗度係数nの縮尺 $\lambda_n$ が1とすると、

$$\lambda_n = \lambda_h^{2/3} \lambda_x^{-1/2} \tag{3}$$

よりえ,は 1/5.62 となる.

水理模型実験を実施するため、模型取水工の直 上流に土嚢を用いて貯水槽を築造した.ポンプに より海水や下流端からの排水を貯水槽へ供給し、 模型取水工集水渠へ越流させることで洪水を再現 した.ポンプは最大吐出量が540 L/min(大ポンプ), 290 L/min(中ポンプ),80 L/min(小ポンプ)の3種 類で、計7種類の流量を設定することができる.

3.2 数値計算結果と水理模型実験結果の比較 水理模型実験では、メチレンブルーを用いて流れ を目視しつつ、写真1に示す断面3から断面5ま での区間の平均流速を測定し、平均流速と水深か ら平均流量を求めた.流量が少なく平均流速の測 定が困難な場合は断面1の水深を測定し、広頂堰 の式から流量を求めた.またポイントゲージを用い て断面2から断面6の5地点の水深を測定した.



写真1 ひずみ模型および水深観測点

一方,流れを1次元開水路定常流として扱い, [2]の手法を用いて数値計算を行った.洪水吐からの越流は横流出として取り扱い,要素に対して垂直に出て行くものと仮定した.集水渠への流入流量は水理模型実験での値を用いた.3種類すべてのポンプを使って最大の流量を流したときの,数値計算による導水路での水面形と水深の実測値を図3に示す.縦軸は導水路下流端からの高さ,横軸 は集水渠と導水路の合流点からの距離を表す.図 中の実線は数値計算により得られた水位,丸が水 位の実測値,濃い灰色が水路底,薄い灰色は左側 壁を表している.洪水吐より上流では良好な結果 が得られているが,洪水吐より下流では計算値と実 測値に開きがある.これは,写真2から読み取れる ように洪水吐からの越流は側壁に対して垂直では ないため,越流流量が数値計算において過小に評 価されているためと考えられる.





写真2 洪水吐からの越流

## 4. おわりに

乾燥地の涸川に設置する取水工の水理設計を, 数値計算ならびにひずみ模型による水理模型実 験に基づいて行った.洪水吐からの越流の取り扱 いに起因して取水可能流量や水位の推定が不正 確となることが示唆されたので,越流を正しく表現 するよう数値手法を改良していく予定である.

#### 引用文献

- 金城・宇波・藤原 (2013) 乾燥地の涸川に設置する渓流取水工の水理設計.第70回農農学会京都支部大会講演要旨集,146-147.
- [2] Unami K, Alam AHMB (2012) Concurrent use of finite element and finite volume methods for shallow water flows in locally 1-D channel networks. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 69(2):255-72.

## Optimality of rainfed agriculture in the sense of stochastic control (確率制御の意味における天水農業の最適性)

OErfaneh Sharifi, Koichi Unami, Masayuki Fujihara Graduate School of Agriculture, Kyoto University Macarius Yangyuoru

School of Agriculture, College of Basic and Applied Science, University of Ghana

#### 1. Introduction

In sub-Saharan Africa (SSA), where subsistence rainfed agriculture is the mainstay of the economy agricultural water scarcity is much linked to rainfall variability (Biazin, 2012). For food and human security, there is an urgent need in SSA for establishing strategies to minimize the risk of drought induced crop failure in rainfed agriculture. Indeed in southern Ghana, farmers claiming substantial changes in volume and reliability of rainfall and intense sunshine (Ofori-Sarpong and Asante, 2004).

In this study alternation of dry and wet spells is modelled using a stochastic concept to comprehend the drought severity. Model parameters are identified using the sequences of alternating wet and dry spells at a site located in the coastal savanna agro-ecological zone of Ghana. Benefit functions and water stress coefficients for different annual crops are considered for evaluating farm products when drought occurs. The set of cost functions for potential implementation of irrigation is determined in an inverse problem approach where the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation assuming the optimality of rainfed agriculture is solved.

#### 2. Stochastic control problem

Sharifi et al. (2014) formulated the stochastic control problem, which consists of the zero-reverting Ornstein-Uhlenbeck (OU) process representing the drought severity x and a performance index including the cost function f(u) of the irrigation effort u, the benefit function g(t) of the time t, and the water stress coefficient  $\varphi(t,x)$ . The irrigation effort *u* is considered as the control variable. Soil and Irrigation Research Centre at Kpong (SIREC-Kpong), University of Ghana, which is located at the coordinates 06 07 N 00 04 E is set as the study site. The model parameters, a constant Kand the unit U for time (hour) are estimated from observed sequences of alternating wet and dry spells based on time series data of soil moisture observed during two minor rainy seasons of 2005 (first year) and 2006 (second year). The results of parameter identification for individual years as well as the case of both years combined are summarized in Table 1. Since posteriorly perceived drought severity was low in the first year and high in the second year, the set of model parameters for both years is adopted.

Table 1	Model	parameters	identified	from	ob-
	served	data series fo	or different	period	

	1st year	2nd year	Both years
K	3.058	1.642	1.955
U	303.9	253.7	260.3

#### **3. Benefit function and water stress coefficient**

To explore the suitability of different irrigation strategies including rainfed, benefits of farming under the risk of drought and water stress should be quantified in terms of crop yields and/or their economic values (Vico and Porporato, 2011). Here, the benefit function g(t) represents the virtual benefit when growth of the crop, whose growth period is [0,T], is terminated without experiencing any water stress. Knowledge of crop yields under irrigated conditions may be referred when determining g(t). Without loss of generality, g(t) is scaled so that g(T) = 1. Continuity of g(t) is assumed as well. After establishing g(t) for a particular crop, the water stress coefficient  $\varphi(t,x)$  is searched so that the maximum  $\Phi$  of the performance index is consistent with data of the actual benefit under rainfed conditions on the boundary of the s - x-domain G. It may be assumed that  $\varphi(t, x)$  is given as a power function

$$\varphi(t,x) = \varphi(x) = \left|\frac{x}{K}\right|^q \tag{1}$$

with an appropriate exponent q, satisfying  $\varphi(t,\pm K) = 1$ , and  $\varphi(t,0) = 0$ .

Growths of maize (*Zea mays*) and okra (*Abelmoschus esculentus*) were tested in the experimental farm at the study site during the period of soil moisture measurement. It is assumed that the benefit function g(t) for each crop is prescribed as a smooth monotone increasing function having the form

$$g(t) = \exp\left(\frac{-\alpha}{\tan\left(\pi t/2T\right)}\right)$$
(2)

where  $\alpha$  is a shape parameter. This benefit function g(t) satisfies g(0) = 0 and g(T) = 1. The values of the parameters *T*,  $\alpha$ , and *q* are estimated as 125 days, 10, and 0.4938 for maize, and, 60 days, 100,

and greater than 0.4938 for okra, respectively. The resulting benefit functions are depicted in Fig. 1.



Fig. 1 Benefit functions for maize and okra

#### 4. Solution of the inverse problem

Tendency for rainfed agriculture as the only practice among the majority of farmers in the coastal savanna agro-ecological zone of Ghana is rationalized through examining the set F of f(u) that optimizes rainfed agriculture. The HJB equation governs the maximized performance index  $\Phi$  as well as the control variable u attaining it. Analyzing the HJB equation, it is revealed that its advection term  $\Psi = \Psi(s, x) = -x \frac{\partial \Phi}{\partial x}$  bounds the increase rate of f(u) in relation to the effect of u on the drought severity to inversely define the set F. Therefore, the solution  $\Phi$ , as well as  $\Psi$ , to the terminal-boundary value problem of the HJB equation under the uncontrolled case for each of the two crops is computed using the finite element and finite difference methods. The resulting  $\Phi$  and  $\Psi$  for the cases of maize and okra (q = 1) are plotted in Fig. 2.

The  $\Psi$ -values are generally small in the case of maize, meaning that necessity of irrigation is less. The actual situation in the common rural areas of SSA, where maize is one of the major staple, is prevalence of high initiation costs and less effects of irrigation, and thus rainfed agriculture is compelled to be optimal. While, larger  $\Psi$ -values are attained if larger q-values are chosen for okra. This implies, though paradoxical, that rainfed agriculture is not optimal when the crop is more tolerant to water stress.



Fig. 1 Computed  $\Phi$  and  $\Psi$  over the spatio temporal domain for the cases of maize (left) and okra (right).

#### 5. Conclusions

In this study the optimality of rainfed agriculture was studied in the context of stochastic control. The model was introduced in order to represent the dynamics of the drought severity as the zero-reverting OU process. The performance index was set to formulate the optimal control problem, involving cost of irrigation, loss in value of agricultural products due to water stress, and benefit when growth of the crop is terminated at different stages. The inverse problem was to identify the set of cost functions optimizing rainfed agriculture, which was successfully defined in terms of the numerical solution to the HJB equation with vanishing optimal control. The case study in the coastal savanna agro-ecological zone of Ghana verified that rainfed agriculture is compelled to be optimal and also suggested the paradox of water stress tolerant crops needing more irrigation.

#### References

- Biazin B, Sterk G, Temesgen M, Abdulkedir A, Stroosnijder L (2012) Rainwater harvesting and management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa–a review. *Phys Chem Earth* 47-48:139-151.
- Ofori-Sarpong E, Asante F (2004) Farmer strategies of managing agrodiversity in a variable climate in PLEC demonstration sites in southern Ghana. Managing Agrodiversity the Traditional Way: Lessons from West Africa in Sustainable Use of Biodiversity and Related Natural Resources, Edited by Gyasi EA, Kranjac-Berisavljevic G, Blay ET, Oduro W, United Nations University Press, Tokyo, 25-37.
- Sharifi E, Unami K, Fujihara M (2014) Formulation of a stochastic control problem to verify optimality of rainfed agriculture. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual Congress of JRCSA*, 139-141.
- Vico G, Porporato A (2011) From rainfed agriculture to stress-avoidance irrigation: I. A generalized irrigation scheme with stochastic soil moisture. *Adv Water Resour* 34(2):263–271.

## 内蒙古達拉特旗の地下水資源の現況と予測 Current state and prediction of groundwater resources in Dalad, Inner Mongolia

巴達日夫<sup>1</sup>・メンドバヤル<sup>1</sup>・平松 研<sup>2</sup>・大西健夫<sup>2</sup>・吉山浩平<sup>3</sup> Badarif, Mendbayar Otgonbayar, Ken HIRAMATSU, Takeo Onishi, Kohei Yoshiyama

### 1 はじめに

水不足は 21 世紀の人類が直面する最も深刻な環 境問題の一つであり、2050年までに 30 億人の住む 52 カ国が慢性的な水不足になるとされている. 中華 人民共和国は国としてそれら 52 カ国に含まれないも のの、地域としては多くの乾燥地を含み、黄河流域を 含む北部平野では既に水不足に陥っていることから, 将来的に深刻な水不足が危惧されている(Brown, 2003; 近藤ら, 2001; 小林, 2012; 一ノ瀬ら, 2005; 石井, 2008; UNEP, 1992). 特に「断流現象」に代表 される黄河流域の水資源問題への対応は喫緊の課 題となっている.本研究では、黄河中流域に該当す る内蒙古自治区達拉特旗の壕慶河流域(Hao Qing River, 図 1)を研究対象地とし, 2001 年から 2006 年 までの調査結果と2013 年に行われた追加調査結果 を併せて,地下水資源とその利用状況の報告と水資 源の短期的な推移予測を行い, 当該地域をモデル ケースとする持続可能な地下水利用のための提言を 行うことを目指す.

## 2 調査地概要と研究方法

達拉特旗(旗はモンゴル民族の組織する行政単位) 内蒙古河套平原東南部にある鄂尓多斯市北端に位 置し,その北部を黄河に面している典型的な黄河流 域地区である.地区全体の地形は南高北低,西高東 低であり,海抜約1,000~1,500m,内陸性気候で,夏 は短く暑く,冬は長くて寒い.研究対象地である達拉 特旗壕慶河流域は黄河沖積平原地域に該当し, そ の北部地区は黄河から導水と地下水の両者を用い て, クブチ砂漠に接する南部地区はほぼ地下水のみ に依存した形で耕作を行っている(図 1,2). 壕慶河 は河川ではあるが, 達拉特旗を北向きに流れる雨季 限定の河川であり,黄河への土砂の流出を避けるた めに人工河川設置などの工事がなされた以降,水が 流れていることはほとんどなく、池のような状態にある. 2002 年度に本地区の地下水位変動及び不圧地 下水の賦存量などを把握・推定するために地区南部 に13 点の地下水測定地点を,2003 年度に3 点の 地下水測定地点(新規パイプ井戸 3 地点)を設置し, 2002 年9 月から2005 年12 月,2006 年9 月から 12 月の期間(一部は 2003 年 9 月から)に週 1 回 の頻度で地下水位, pH, EC を測定した. さらに, 2003 年と 2005 年に確認できる既設井戸の一斉調

1 岐阜大学大学院連合農学研究科

Department of Environmental Science, Gifu University <sup>3</sup>岐阜大学流域圏科学研究センター



査を行うとともに,2005 年 9 月 3 日~21 日には現地 へ聞き取り調査も実施した。2005 年には地区北部に 等高線に沿う配置で 14 点の地下水測定地点を設 置し,地下水位,pH,EC を月 1 回の頻度で測定し た.

これら地下水の状況が維持されているのかを確か めるため, 2013 年度 5 月に南部 16 箇所, 北部 14 箇

Keywords: Groundwater management, Arid-semiarid area, Water resources, Irrigation and industrial waters, Forecast of groundwater amount, Crop, Inner Mongolia

United-graduate School of Agricultural Science, Gifu University <sup>2</sup> 岐阜大学応用生物科学部

River Basin Research Center Science, Gifu University



図3:南部地域(2013年度測定値のある4地点)の地下水位変動と降水量

表1:2005年から2013年のS1, S2, S12, S16地点における南 部地下水位の低下景(5,12日平均, 単位:m)

司加	也 下 八位の知	ふして	(5-12月平均,	甲位:m)		
	S1	S2	S12	S16		
2005-	3.2	5.4	1.4	0.8		
2013						
7	長2: 南部地	<b></b> 王平均坦	也下水量と年	間降水量		
(上段	は16地点の	水位デ	ータからの推	定値		
下段	は4地点の打	隹移デー	-タからの推算	<b>定値)</b>		
	年平均:	地下水量	<u>]</u> 里	年間降水量		
	(×10	$(10^{7} \text{ m}^{3})$		(mm)		
2003	7	.05		506		
2004	6	.98		427		
2005	6	.72		192		
2006	6	.35	376			
	5-12月平均	匀地下	9-12月平均	地 5-12月降	降	
	水量		下水量	水量		
	(×10 <sup>7</sup> n	n <sup>3</sup> )	$(\times 10^7 \text{ m}^3)$	(mm)		
2002	N/A		6.64	270		
2003	6.12		5.75	5.75 423		
2004	5.26	5.26		422		
2005	4.90	4.90		174		
2006	N/A		4.70	364		
2013	2.71		2.91	159*		

\*: 達拉特旗の統計データによる値

所の観測井を一斉に調査し、地下水位を計測した. その後、6月から12月にかけて月一度の頻度で地下 水位を計測した.ただし、調査事情により、5月を除き、 観測井はS1、S2、S12、S16、N1、N3、N12、N14の8 点のみの計測となった.

近年,調査対象地区がある内蒙古自治区は経済 の発展がめざましく,多くの工場が誘致され,土地利 用にも変化が見られる.本研究では,衛星画像 (2000,2002,2013年はLandsat-7/ETM,2006、2007, 2009年はLandsat-5/TM,いずれも2,3,4バンド)か らesri社ENVI5.0を用いてラスターデータを作成し, ArcGIS上でベクトル化した.その後,現地踏査の結 果,内蒙古師範大学所有の土地利用状況データ, および一部,Google Earth (2013年時点)のデータを 用いて補正を行った.また,現地踏査を通じて,農地 の利用状況,作物などについても確認した.

#### 3 調査結果

図3は2013年度に測定を行った南部地区の地

点 (S1, S2, S12, S16) における 2002 年からの (2002 年度は9月から) 地下水位の変動と南部地 区降水量を示したものである.ただし、2006年1 月から 2006 年 8 月までのデータと 2007 年 1 月か ら 2013 年 4 月までのデータは欠測である. 南部 地区の地下水位は季節的な変動が見られるため, 2013年度のデータに合わせて5月から12月の平 均水深に着目すると、地下水位は 2005 年末から 2013 年にかけて 0.8m から 5.4m 程度低下してお り(表 1),一部には引き上げ井戸の限界である-10m以下になりつつある.現地の多くの井戸は水 中に設置されたポンプを使うため大きな問題と はなっていないが,現地踏査では一部の引き上げ ポンプを使っていた井戸は放棄されていたり、く み上げが困難になっていたりする状況が確認で きた. また, 2005 年 5 月と 2013 年 5 月の S1~S16 地点の平均水位を比較したところ,平均で4.2mも の低下となっている.

前報(巴達日夫ら, 2012)では測定地点 16 箇所を つなぎ,三角形網を作成した後,南部の地下水量 を推定した(表 2 上段). なお,間隙率は S17 地 点における 2.5m 深の土壌の乾燥密度と土粒子密 度から算出した. 2013 年度は実測している 4 箇所 の5月から12月までの観測井の値を基に同様の 算出を行った(表2下段).しかし,観測井の数が 異なることから 2003 年から 2006 年までの推定値 との比較が困難となるため、ここでは、2003年か ら 2006 年についても 2013 年度と同じ 4 箇所のみ で再度,5月から12月にかけての平均地下水量と 9月から12月の平均地下水量を算出した.なお、 観測井の数が少なくなり、一つの観測データの変 動が大きく推定値に関わるため、4 箇所のみから の推定値は、5月-12月平均の場合は13箇所か らの推定値の約78%,9月-12月平均の場合は同 じく約 77%となっている. 2003 年と 2013 年のデ ータ(9月-12月平均)を比較すると,9年間で 地下水量はおおよそ 44%も減少していることが わかる.この地下水量推定値から推察を行えば, 2002 年度の段階から南部地域においては年間 4% 程度,4箇所から推定した地下水量(9月-12月 平均)でいえば,年間 2.6×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>の減少が見られ ていたことになる.この指数的減少傾向が変わら ないとすれば、きわめて単純計算ではあるが、10 年間(2023年)で南部地区の不圧帯水層の地下水 は2003年比で23%、2035年には同年比で10%を 割り込む.これに季節変動成分を加えると2003年 比で約10%の値になるは2022年後半となり、地 下水資源はほぼ枯渇することになる.

図4および図5は2003年と2005年の8月における南部地区地下水位とECをそれぞれ示したものである.地下水位については、水位低下は認められるが、空間分布の傾向としては両年に大きな差は見られない。南部地区の不圧地下水は南部ほど地下水位が高く、南にある丘陵・クブチ砂漠地域によって涵養されていることがより明確に見て取れる.同時に南部地区で用いられ、地下水に溶脱する肥料が原因と推察されるECは南部で高い値を示しており、イオンが地下水により輸送されていることが分かる.なお、この調査においては調査用の観測井戸のみではなく、現地で実際に用いられている井戸で計測を行っている.

2005 年 5 月と 2013 年 5 月の北部地区の地下水 面標高に南部地区の地下水面標高を加えた空間 分布を図6に示す.北部地区北側の地下水面標高 は年間を通じて北部地区が接する黄河の水面標 高(約 998m~1,000m)よりも低く,地下水が黄河よ り涵養されていることを示唆している.また、南 部地区は明らかに北部地区よりも地下水面が高 く, 南部のクブチ砂漠地域からの涵養が考えられ ている.加えて、北部地区の中央から南寄りの辺 りで地下水面標高は最低になっていることから, この辺りが黄河からの涵養とクブチ砂漠地域か らの涵養の境界になっていることが推定される. 地下水流は南部から中央付近で東向きの流れと なるため、地下水はその多くが領域から流出して いる.ただし,推定は領域内の観測井のみのデー タから行われているため、実際には土地利用に差 がない調査地区の西側からの流入が存在してい る可能性も否定できない. 前報(巴達日夫ら, 2012 同様に観測井で囲まれる領域への流出入量を概 算した結果,2005年5月が7.94×10<sup>2</sup>m<sup>3</sup>/日との流 出であったのに対して, 2013 年 5 月は 1.73× 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/日の流出となった. また, 領域の北部と南 部をそれぞれ黄河およびクブチ砂漠からの涵養 量であると推定した場合、それらの涵養量はそれ ぞれ 2005 年 5 月が 9.05×10<sup>1</sup>m<sup>3</sup>/日と 2.00×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/ 日,2013 年 5 月は 2.28×10<sup>2</sup>m<sup>3</sup>/日と 3.76×10<sup>2</sup>m<sup>3</sup>/ 日となり、黄河水量への影響が強くなっていると 推測される.

土地利用結果よると2006年までと2013年を比 較すると、南部においては、西側で工業鉱山用地 が大きくとられているほか、農地の拡大も顕著で あることが分かる.北部では、東側で河川近辺の 裸地が農地に変わっている.表3には2002年か ら2013年までの各種土地利用の変動を示す.特 に表示領域では、草地、水域の減少と農地及び鉱 工業用地の増加が顕著であることが分かる.2005 年5月と2013年5月時点における対象地区の不



図 6:地下水位分布及び流れ (左側:2005,右側:2013)

圧地下水推定量(2013年5月の時点で存在するス トックであり,フローを表すものではない)はそ れぞれ, 2.99×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 2.54×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>であり, おおよ そ 4.52×10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>の減少が見られる. その要因の一 つとしては農地の増大が考えられる. 2005 年と 2006年に行った聞き取り調査の結果では、井戸1 箇所当たりの農地面積が平均で 2.9ha になり,主 な作物は、トウモロコシ、アサ、スイカで、それ ぞれ全体の 67%, 15%, 14%を占めていた. 2013 年は定量的なデータを得ることができなかった が、トウモロコシの作付けが増えているとのこと であった.巴達日夫ら(2012)によれば、当該地域に おける単位面積日揚水量が 2.6mm・day-1 であるこ とから, 2006 年から 2013 年までの表示領域内お よび調査対象地区の農地面積の増加(それぞれ約 37km<sup>2</sup>と約4.4km<sup>2</sup>)により、表示領域内の揚水量 はそれぞれ、1日で 9.6×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>と 1.2×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>、灌 漑期(5月から9月)なら1.4×10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>と1.7×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> の増加となることが分かる. 2005年のデータがな いが、農地は線形増加していると仮定すると、対 象領域における8年分の揚水増加量は7.9×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> となる.この揚水量が調査対象領域の地下水減少

量の一部であるとすれば、約 17.5%に相当する. 次いで、要因の一つとして、流出量の増大が考えられる.期間中の流出量の増加は年間 3.41×105m<sup>3</sup>となり、揚水量同様に線形増加であり、8年分の 50%が流出したとすれば、その量は地下水減少量の約 3.0%に相当する.次に降水量の減少を検討する.当該地域の年間平均降水量はおおよそ325mm(1995年から2012年までの平均)であるが、期間中は年間 298mm とやや少なかった.対象地区における 8年分の降水の減少量は 2.2×107m<sup>3</sup>となり、地下水減少量の 48%に相当する. これら 3 要因を合計すると地下水減少量の 7割の説明が出来ることになる.

地下水位低下が顕著な調査地区南東部を 2006 年の土地利用図で調べると大規模な工場用地の 出現が確認できる.これらの工場は 2005 年より 操業し,大量の地下水を利用していることが分か っており,地下水減少量の残りの3割のある一定 割合に寄与するものと考えられる.なお,蒸発散 量についての実測データはないが,地下水減少量 に対する寄与は大きくないものと推察している.

表3:土地利用の変化(	上段は調査対象地区,
下段は表示領域.	単位はkm <sup>2</sup> .)

「权は敌小限域, 半匹はMII.)				
	2002	2006	2009	2013
林地	0.4	0.3	0.3	0.3
農地	66.0	63.6	63.8	68.0
草地	0.0	0.0	0.0	0.0
水域	4.2	3.8	4.6	4.9
都市・住宅	4.7	4.7	4.7	4.7
鉱工業	0.0	2.0	2.1	2.1
その他	13.6	14.5	13.4	8.9
林地	17.5	18.0	17.3	17.3
農地	292.7	298.6	331.5	335.6
草地	64.1	61.4	40.2	40.0
水域	53.5	46.7	43.4	32.7
都市・住宅	55.5	55.5	56.3	57.0
鉱工業	6.6	6.6	16.6	24.5
その他	146.8	150.0	131.5	129.6

## 4 まとめ

2001-2006 年,2013 年に内蒙古自治区達拉特旗 の壕慶河流域における地下水の現状と利用を調 査してきた.その結果,対象地域,特に南部の不 圧地下水は明確な減少傾向にあり,この傾向が変 わらなければ,2020 年代中後半には2003 年基準 の10%を切ること,すなわち不圧地下水が利用困 難になることが予想される.

不圧地下水の減少の主な要因としては、農地の 増大、工業用水の増大、降水量の減少が考えられ た.2005年5月と2013年5月のデータを基に算 出した対象地域の地下水減少量を考えた場合、農 業用水の影響が約2割、降水量の減少の影響が約 5割であり、残りのかなりの部分が工業用水の影 響であると推定した.対象地域の地下水は、黄河 沖積平原地域南部地区においては丘陵地域、クブ チ砂漠地域からの涵養、北部地区においては黄河 からの涵養が考えられているが、2013年の調査結 果から, グブチ砂漠方面からの涵養量が減少し, 黄河からの浸透が増加していることが明らかと なった. グブチ砂漠方面からの涵養量減少の要因 としては対象地域南部に建設された工場の影響 が大きいと想定され, 黄河からの浸透量増大は, 地域の地下水利用量の増大が主な理由であり, こ の地下水問題がこの地域にとどまらず, 黄河流域 全体に対しても影響を持つことが示唆される.

今後も対象地域で不圧地下水利用を維持するためには、揚水の抑制が必要であり、工業用水、農業用水のいずれに対しても行政あるいは水利組合のような組織による揚水管理が肝要であると考えられる。今回のデータは限られた期間、限られた地点のもののみであり、壕慶河流域の地下水事情の断片をとらえただけに過ぎない。地下水減少の約5割を説明する降雨についてさえ予測困難であることを鑑みても、今後の継続した観測がきわめて重要であると思われる。

#### 謝辞

本研究のデータの多くは,2001年から2006年に実施 された CREST の黄河プロジェクト「黄河流域の水利 用・管理の高持続性化」(代表楠田哲也氏)の補助により 得られたものである.ここに記して関係各位に謝意を 示す.また,2013年の現地調査を含めて,研究は天谷 孝夫(岐阜大学名誉教授)の指導の下で行われた.調査 には内蒙古農業大学及び内蒙古師範大学の協力を得た. その他,現地調査やデータ処理などを含め研究進捗に 関して,岐阜大学大学院修了生である小倉健一郎,横山 翔悟,飯田晋平各氏の貢献が大きい.ここに記して謝意 を示す.

## 引用文献

- [1] 巴達日夫・メンドバヤル・平松研・大西健夫吉・山 浩平:地下水依存農牧地帯における水資源の現況と 予測-内蒙古達拉特旗の事例-,日本雨水資源化シ ステム学会誌(投稿中).
- [2] 巴達日夫・天谷孝夫・平松研・大西健夫(2012):乾 燥地域における地下水依存農牧地帯の水資源状況-内蒙古達拉特旗の事例-日本雨水資源化システム学 会誌, 19(1), pp.11-18.
- [3] Brown, L. R. (2003): 持続不可能な水使用で食料バ ブルが世界で起こっている, Eco-Economy-Update 2003-2, http://worldwatch-japan.org/NEWS/ecoecono myupdate2003-2.html, (最終確認日: 2014/10/17).
- [4] 一ノ瀬俊明・大坪国順・王勤学・張祖陸・衣笠聡 史 (2005):黄河流域における地下水利用の現状把握 と将来予測手法の開発,『中国における環境問題の 現状』,愛知大学国際中国学研究センター,259-266.
- [5] 小林義文(2012):南水北調政策の課題と展望,神戸 女子大学文学部紀要,45,pp.47-58.
- [6] 近藤昭彦・田中 正・唐 常源・佐倉保夫・嶋田 純・芝野博文・劉 昌明・張 万軍・胡 春勝・劉 小京・陳 建耀・沈 彦俊 (2001): 中国華北平原 の水問題.水文・水資源学会誌, 10, pp.187-192.
- [7] UNEP (1992): World Atlas of Desertification, Edward Arnold, London, pp.2-5.