

平成30年度応用水理研究部会 講演集



平成30年12月1日

ウイנק愛知

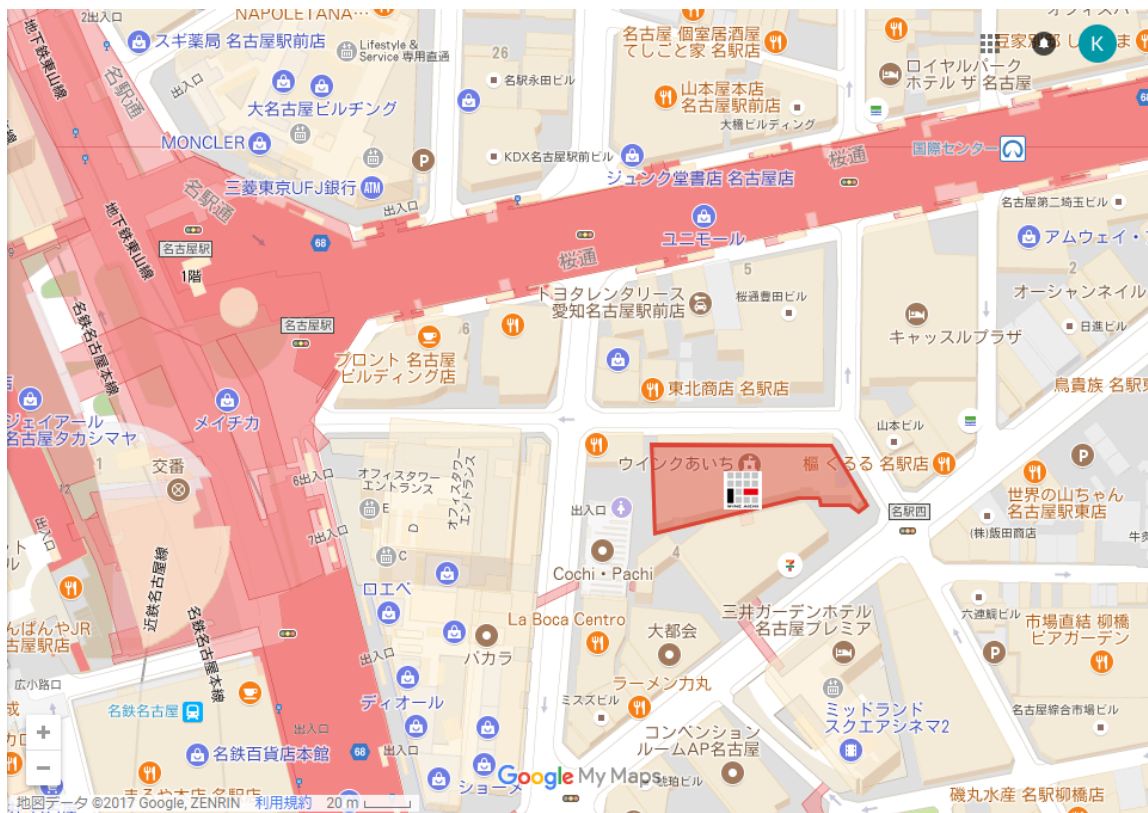
(公社) 農業農村工学会応用水理研究部会

——<<発表者の皆様へ>>——

- ・発表時間は20 分（15 分発表+5 分質疑）です.
- ・PC（Windows10, PowerPoint2016）を準備しておりますが、ご自身のPCをつないで頂くことも可能です.

——<<参加者の皆様へ>>——

会場は愛知県産業労働センター ウィンク愛知 1108会議室です. JR名古屋駅桜通口からミッドランドスクエア方面徒歩5分です.



平成30年度応用水理研究部会講演会プログラム(於:ウインク名古屋)

開始時刻	内容	講演者／座長	題 目	ページ
9:30	開会挨拶			
	第1セッション	座長:仲村渠将		
9:40	発表課題1	○木村匡臣	稲株群を模した水田模型における田面水の流れの可視化実験	1
10:00	発表課題2	○奥村 直人	農業排水地区における予備排水による冠水被害低減効果の検討	3
10:20	発表課題3	○謝文鵬	Evaluation of Calculation Algorithm for Ponding Water Temperature Applying Heat-Balance Model in Paddy	5
10:40	休息			
10:50	特別講演	○久保成隆	幹線水路系での効果的な配水のためのICTを活用したCheck Gate操作管理	14
12:00	休息			
	第2セッション	座長:福田信二		
13:00	発表課題4	○石川貴大	深層学習を用いた低平地における調整池水位の予測	15
13:20	発表課題5	○大久保 天	農業用管水路における地震時動水圧の観測	19
13:40	発表課題6	○一 恩英二	V字ノッチ傾斜隔壁魚道の隔壁形状と枚数が遡上率に与える影響について	23
14:00	発表課題7	○尾崎彰則	熱帯塩水養殖池に発生する下層高水温現象による水域内蓄熱に関する検討	31
14:20	休息			
	第3セッション	座長:木村匡臣		
14:30	発表課題8	○浅田 洋平	漏水検知に向けた漏水中管路内の圧力波形減衰モデルの構築	39
14:50	発表課題9	○宇波耕一	A discrete time dynamic programming problem for a plant growth model with controlled parameters(パラメータが制御される植物生育モデルに対する離散時間動的	46
15:10	発表課題10	○伊藤豪哉	代用電荷法を用いたHele-Shawセル内のフィンガリング現象の数値計算	48
15:30	発表課題11	○橋本 大志	地下水への塩水浸入の振動の分岐現象に関する可視化実験	53
15:50	休息			
	第4セッション	座長:竹内潤一郎		
16:00	発表課題12	○相原星哉	群集解析と生息場モデルを用いた淡水魚類の生息環境評価手法の比較検討	59
16:20	発表課題13	○福田信二	府中用水と矢川における生態水理調査概要	62
16:40	発表課題14	○近藤雅人	矢川の網羅的水理解析に向けた地形測量と生態水理調	65
17:00	発表課題15	○船越 寛	水生植物による流速低減効果に関する野外調査と室内開水路実験	67
17:20	閉会挨拶			
17:30	代表幹事会			

稲株群を模した水田模型における田面水の流れの可視化実験 Visualization of ponding water flows in an experimental paddy model with arrangement of rice bunches

○木村匡臣* 福田守成** 浅田洋平* 安瀬地一作***

○Masaomi KIMURA*, Morishige FUKUTA**, Yohei ASADA*, Issaku AZECHI***

1. はじめに 稲作水田における田面水の流れは、水田区画内の溶質や熱、浮遊物質等の移流速度を決定づける重要なファクターであり、縦横に規則的に配置された稲株の合間を縫って局所的に蛇行して流れる特徴を有する。その流れは、水深が浅くて流速が非常に小さい低レイノルズ数の平面2次元流であると考えられることから、層流の開水路流れの基礎方程式に基づいた、稲株間の流況の数値解析の試みも報告されている¹⁾。しかし、このような数値シミュレーションモデルの検証や、縦横に等間隔に配置された物体間の流れの特性をより深く理解するためには、模型装置を利用した水理実験による現象の把握が不可欠といえる。本研究では、稲株群を円柱群で模した実スケール規模の水田模型を作成し、内部を流れる水の流況を可視化することで、田面水の平面2次元流れ場の計測を試みた。

2. 実験方法 農研機構農村工学研究部門の実験棟の内部に、5 m 四方の水田を模した水理模型を作成した (Pic. 1)。模型装置の底面および壁面は透明アクリル板で構成されており、水田模型全体を高さ約 1 m の架台の上に設置することで、水の流れを底面の下部からも観察できるようにした。稲株群を模すために、外径 89 mm、高さ 10 cm の塩ビ管を 625 本、20 cm 間隔で正方配置した。幅 20 cm の水口および水尻を向かい合う壁面にそれぞれ配置することで、準実スケールの水田模型内における水の流れを再現できるようにした

(Fig. 1)。一定流量 (0.216 L/s) の水を水口より通水し、水尻に設置した高さ 5 cm の堰板を越流させて排水し、約 2 時間経過後に、Fig. 1 に示す 5 か所の円柱周りを対象に流況の計測を開始した。田面水の流れ場を可視化するため、比重が 1 よりも小さいポリエチレン粉末をトレーサーとして水面に撒布し、上部を暗幕で覆い、装置底面の下部よりブラックライトでトレーサーを照射しながらビデオカメラにより撮影を実施した。得られた動画を基に、PIV (粒子画像流速測定法) により円柱周りの流れ場のベクトル分布を計算して求めた。



Pic. 1 水田模型実験装置
Experimental paddy model

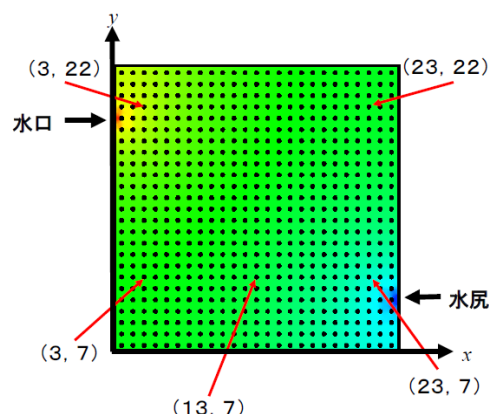


Fig. 1 実験装置の概要
Schematic view of the experimental model

*東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, **株式会社電通 DENTSU INC., ***農研機構農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO キーワード: PIV, 円柱周りの流れ, 開水路層流, 平面2次元流

3. 結果および考察 Fig. 1 における右上の円柱 (23, 22) にて, 2 度の計測により得られた流速分布の様子を Fig. 2 に示す. 円柱の周囲に適度な密度でトレーサーを均一に散布するために, 試行を多く繰り返す必要があったが, 概して円柱群の合間を縫って流れる田面水の流況を把握することができた. しかし, ほぼすべての試行において, トレーサーが円柱の壁面近傍を避けるように流れていく様子が観察された. これは, 円柱壁面と水面との間の表面張力が原因と考えられる. また, 同じ撮影箇所であっても, 試行によって大きく異なる流況が観察されることも多かった. 流れが定常に収束しにくいことや, 実験作業中の装置の振動などがその原因と推察された.

つづいて, 既往の数値シミュレーション¹⁾による計算結果との比較を行った. これは, 円柱群間の流路部分を基本メッシュサイズ 5 mm の三角形の非構造格子メッシュに分割し, 層流の 2 次元浅水流方程式を流束差分法により離散化して, 有限体積法により数値積分を行うものである. 計算により求められる流速は水深平均流速であるため, 1.5 倍することにより水面での流速に換算した. Fig. 1 における右下の円柱 (23, 7) 周囲における流速分布の計算結果と計測結果を Fig. 3 に示す.

両者を比較すると, 全体的な流向は類似しているものの, 流速が大きく異なる結果であることがわかる. Fig. 4 は, 円柱を中心とする y , x 軸上の, x , y 軸方向流速の分布を比較した結果である. 対象とする領域を通過する流量や流速分布の様式に大きな差異が見られた. 表面張力の影響によって水面における流れが遅くなり, 流速の鉛直分布における最大点が水面よりも下部に位置していることなどが推察される.

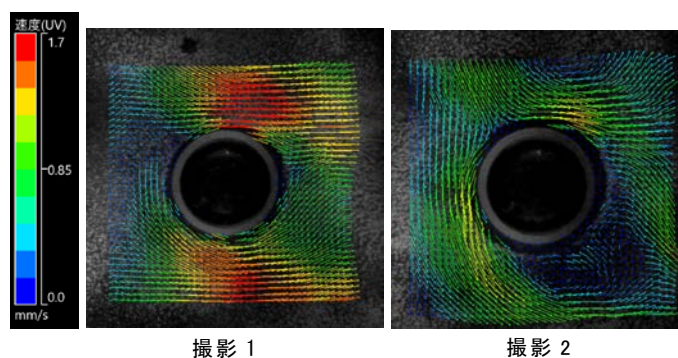


Fig. 2 計測結果 (円柱 (23, 22) 周りの流速ベクトル)
Measured results
(Velocity distribution around the cylinder (23, 22))

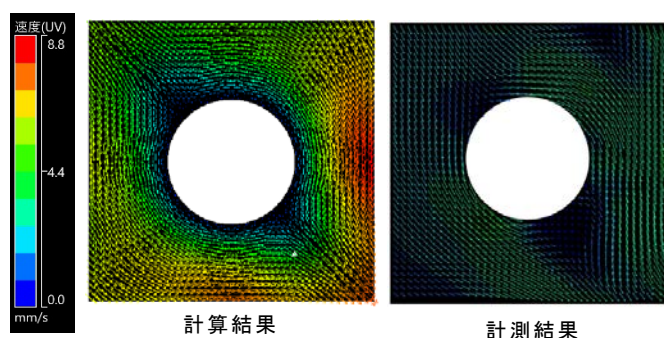


Fig. 3 計算結果および計測結果 (円柱 (23, 7) 周り)
Comparison between computational and experimental results
(Velocity distribution around the cylinder (23, 7))

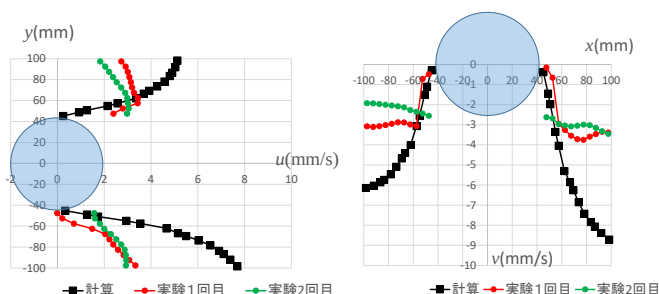


Fig. 4 y , x 軸上の流速分布 (円柱 (23, 7) 周り)
Velocity distribution along y and x axis around the cylinder (23, 7)

参考文献 1) 木村匡臣, 額額 光, 飯田俊彰, 久保成隆 (2015): 稲株を考慮した田面水の平面 2 次元流計算法, 農業農村工学会論文集 295, 47-58.

謝辞 本研究は, JSPS 科研費 16K18770 の助成を受けたものである.

農業排水地区における予備排水による冠水被害低減効果の検討

Investigation of Effect of Preliminary Drainage in Agriculture Drainage District on Reducing Flood Damage

○奥村 直人¹⁾、木村 匡臣¹⁾、安瀬地 一作²⁾、高野 陽平³⁾⁵⁾、吉川 夏樹⁴⁾

○Naoto Okumura¹⁾, Masaomi Kimura¹⁾, Issaku Azechi²⁾, Yohei Takano³⁾⁵⁾, Natsuki Yoshikawa⁴⁾

1. はじめに

低平農業地帯では、都市化により農地から宅地への転用が進行している。しかしこのような土地利用変化にも関わらず、雨水対策施設の整備や排水施設の増強などが遅れている地域も多く、そのような地区では農業用排水施設が農業用水のみならず地域全体の排水も担っている。豪雨時には洪水対策として降水量予測に応じてあらかじめ内水位を下げておく予備排水が行われているものの、その判断基準は勘と経験に拠るところが大きく、予備排水による洪水低減効果について評価することが必要である。そこで本研究では予備排水の冠水被害低減効果について数値シミュレーションを用いて明らかにすることを目的とする。

2. 研究対象地域

対象地域は新潟県新潟市中央部に広がる亀田郷地区(図 1)である。亀田郷は信濃川、阿賀野川の最末流に位置する輪中であることと全面積の三分の二が日本海の平均潮位より低いゼロメートル地帯という特徴を持つ。かつては両河川の氾濫による常習的な湛水地帯として農作業は苛烈を極めていたが、排水機場の完成により機械化農業が可能な水田を造り上げた。

現在、大半の農地および市街地からの排水は、支線および幹線排水路を経由して調整池の役割を持つ鳥屋野潟へ流入し、土地改良区管理の親松排水機場や、大雨時には国土交通省管理の鳥屋野潟排水機場も稼働して信濃川に排水される。両排水機場には複数台の排水ポンプが備わっており、それぞれ起動および停止の目安となる内水位が段階的に定められている。

3. 数値シミュレーション

対象地における降雨流出・過程を再現するため、地形適合セルを用いた内水氾濫解析モデルを採用した。本モデルは、流域全体を地形適合セルに分割し、地目別流出モデルにより水田、畑地、市街地からの流出量水収支式を用いて求め、氾濫流モデルによりセル間の氾濫水の移動量を平面 2 次元流の局所慣性方程式を離散化して求め、河川・排水路の流れには 1 次元浅水流方程式を離散化して数値解を得るものである。計算対象セルの総面積は 96.2km²、水路の総延長は 246km。空間格子幅は 200~600m である。また、本モデルに与える降水量として、降水量から土地保留量を差し引いた有効降雨を地目別に与えた。

予備排水を実施することによる効果を検証するために降雨開始時に調整池(鳥屋野潟)の管理水位を通常時の T.P.-2.50m から-3.50m へと引き下げておき、すべてのポンプの起動・停止水位を一律 1.0m 下げておいた場合(基準水位-1.0m)のシミュレーションも実施した。

また降雨波形の形状による冠水被害の違いを検証するために 100 年確率の降雨強度曲線から計画降雨(総降水量



図 1 研究対象地

¹⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

²⁾ 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門 National Institute for Rural Engineering, NARO

³⁾ (株)ナルサワコンサルタント Narusawa Consultant Co., Ltd

⁴⁾ 新潟大学自然科学系 Institute of Science and Technology, Niigata University

⁵⁾ 新潟大学自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Niigata University

キーワード：農業排水施設、ポンプ場、予備排水、排水解析、内水氾濫、気候変動、確率降雨

259.1mm)を前方、中央、後方にピークを持つものの3パターン作成し、この3パターンについてのシミュレーションも行った。

4. 結果と考察

2014年7月8～10日の降雨イベント(総降水量 125.4mm)の際の調整池の水位および親松・鳥屋野潟両排水機場からの計算結果を図2に示す。計画通りの排水機場の運転を行った場合に比べて、予備排水により調整池の水位を低く保つことができ、予備排水の効果が認められる。

土地ごとの湛水深を水田では水深 30cm 以上の状態が 24 時間継続、畑地では湛水深 5cm 以上の状態になると冠水被害地と判断し、冠水被害面積を表1に示す。基準水位を下げてても変化が小さいことがわかる。これは調整池の水位を下げた影響が調整池の近くにしか及ぼしていないことが原因の一つとして考えられる。基準水位を下げた影響がどの範囲まで表れているのか検証し、基準水位低下の影響を阻害している原因を特定する必要がある。

次に 100 年確率降雨のパターンごとの冠水被害面積を表2に示す。畑地の冠水被害面積は後方集中型、中央集中型、前方集中型の順になっている。対して水田は前方集中型、中央集中型、後方集中型の順になっている。畑地がこの順序になっている原因は降雨のピークが前にある方が降雨のピークを土地保留量として緩和するため最大湛水深が低くなるからだと考えられる。水田では継続時間で考えているため総降水量が等しい場合、最大湛水深が高い方が排水路に流出しやすくなるからだと考えられる。

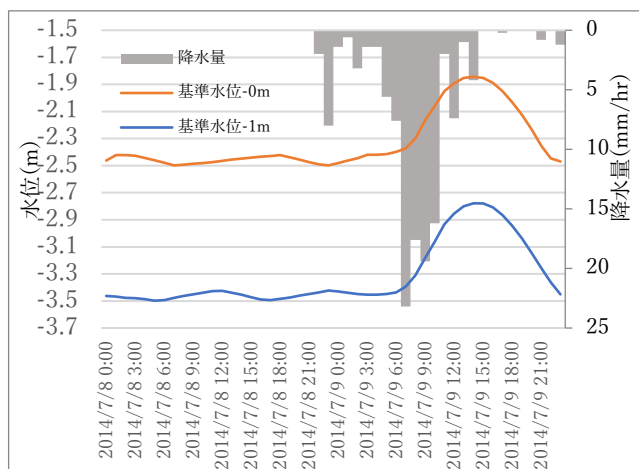


図2 ハイエトグラフ(2014/7/8～10)

表1 冠水被害面積(2014/7/8～10)

	水田 (ha)	畑地 (ha)
2014年7月8日～10日(基準水位)	0	12.9
2014年7月8日～10日(基準水位-1m)	0	12

表2 冠水被害面積(降雨波形別)

	水田 (ha)	畑地 (ha)
100年確率(前方集中型)	108	189
100年確率(中央集中型)	102	224
100年確率(後方集中型)	42.8	238

5. まとめ

本研究では、数値シミュレーションを用いて排水機場の基準水位を変更した場合について調整池の水位、冠水被害面積を求めた。その結果、基準水位を下げることで調整池の水位を下げるができるが冠水被害は緩和することが難しいことが示唆された。また複数の降雨パターンを与えてシミュレーションしたところ、水田の被害面積は前方集中型の場合がもっとも大きく、畑地の被害面積は後方集中型の場合がもっとも大きいことが示された。今後は水路形状を拡幅させた場合の冠水被害の変化、降雨パターンに応じた対応、電力消費量等の観点から検討する予定である。

謝辞 本研究は平成29年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「超過降雨に対応した農業地域の洪水被害を軽減する減災支援技術の開発」の一部として実施された。研究遂行に当たり、亀田郷土地改良区に多大なるご配慮を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献 吉川ら (2011), 土木学会論文集 B1(水工学) 67(4), I_991-I_996. 宮津ら (2012), 農業農村工学会論文集 80(6), 479-488. 木村ら (2018), 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, 47-48.

Evaluation of Calculation Algorithm for Ponding Water Temperature Applying Heat-Balance Model in Paddy Fields

XIE WENPENG, MASAOMI KIMURA, TOSHIAKI IIDA, NARITAKA KUBO

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, JAPAN

1.INTRODUCTION

Surface temperature and frequency of high temperature weather increases caused by global warming were reported in several literatures. The quality of cultivated rice grain is reduced due to high water temperature which may also lead to the value decrease of rice production. When the daily average temperature exceeds 28 degrees, the risk of high temperature damage increases extremely. From the analysis of variance and multiple regression analysis, 1 degree increase in daily minimum temperature during 10 to 30 days after heading reduced the ratio of first-class rice by 3.57%. Therefore, it is necessary to figure out the water temperature dynamics of paddy fields. Recently, researchers have used the heat-balance model to calculate the water temperature in paddy fields. However, the area where the heat-balance model can be applied was limited by coverage of meteorological monitoring. Because the water temperature calculation of this model requires precise meteorological data near paddy fields, such as air temperature, solar radiation, humidity, LAI (Leaf Area Index), etc. In this study, a heat-balance model of vegetation, water and soil temperature in paddy field was developed, which uses data from weather stations to calculate the water temperature. We proposed the calculation method of LAI, analyzed the influence of meteorological data on water temperature and corrected the meteorological data of the weather station. The aim of this study is to calculate the paddy water temperature without so dense weather monitoring systems in order to make the heat-balance model more applicable.

2.MODEL

In this chapter, the ponding water model is described. In this model assumption, there is no heat inflow and outflow by irrigation. Heat-balance on the water surface was affected by vegetation so that both heat-balance of vegetation and water body should be solved simultaneously. Therefore, 2-layer model was employed to calculate the paddy water and vegetation temperature.

2.1 Leaf surface

The basic equation for the heat balance of leaf surface is given as

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{R_{nc} - H_c - lE_c}{c_c \rho_c l_c LAI} \quad (1)$$

where, T_c is the plants community temperature. R_{nc} is the net radiation of vegetation. The H and lE are sensible heat flux and latent heat flux. The c_c is specific heat of leaves. The ρ_c is leaf density. The l_c is leaf thickness and the LAI is leaf area index.

The radiation R_{nc} can be expressed by following equation as

$$R_{nc} = (1 - f_v)\{(1 - \alpha_c)S + L_{da} + L_{uw} - L_{uc} - L_{dc}\} \quad (2)$$

where S is solar radiation. α_c is albedo of vegetation. L_{dc} and L_{da} are downward long wave

radiation of plants and atmosphere. L_{uc} and L_{uw} are upward long wave radiation of plants and water. The f_v is radiation transmittance of vegetation, it is expressed by the following equation.

$$f_v = \exp(-k \cdot LAI) \quad (3)$$

where k is extinction coefficient.

Subscription a , w , c means atmosphere, paddy water and vegetation.

2.2 Water body

The basic equation for the heat balance of water body is given as

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{R_{nw} - H_w - LE_w - G}{\rho_w c_w h} \quad (4)$$

where the G is soil heat flux and the h is water depth.

The radiation R_{nw} can be expressed by following equation as

$$R_{nw} = f_v \{ (1 - \alpha_w)(1 - \alpha_c)S + L_{da} \} + (1 - f_v)L_{dc} - L_{uw} \quad (5)$$

2.3 Soil heat flux

In order to calculate the soil heat flux G , the vertical soil temperature distribution is estimated by following equation.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = D_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (6)$$

where T_g is soil temperature. D_g is soil thermal conductivity and z is depth from soil surface. In this study the upper boundary condition was set as water temperature and the lower boundary condition was set as 24 degree, which was annual average temperature.

Form the soil temperature distribution, G was calculated by following equation.

$$G = c_g \rho_g \int_0^D \frac{\partial T_g}{\partial t} dz \quad (7)$$

3.FIELD OBSERVATION

To calibrate and evaluate the applicability of proposed model, field experiment was conducted in the paddy field (36°22'17.2"N 139°46'23.2"E) at Tochigi City, Tochigi Prefecture, Japan. Observation period was from 19 July until 19 September 2016. The size of experimental paddy plot was 39m×103m. The observed meteorological items are solar radiation, wind direction, wind speed, humidity, air temperature and atmospheric pressure. We also measured water temperature and depth in the plot.

The solar radiation, wind direction, wind speed, humidity, air temperature and pressure were measured using the meteorological measurement devices at 1.5m above the soil surface. The water temperature and depth were measured at eight points in the paddy plot as well as near the inlet and outlet (**Fig.1**).

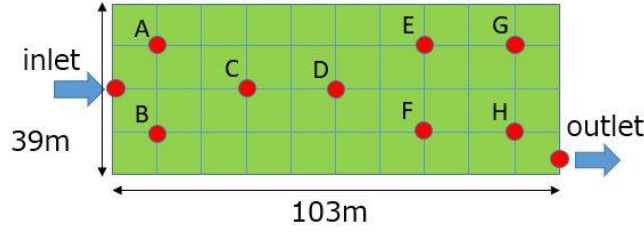


Fig.1 Experimental paddy field

In the **Fig.1**, the red dot indicates the measured point of water temperature and depth.

LAI is the important factor to shade the sunlight and to affect the heat-balance on the water and vegetation. This study used the inverse method to calculate LAI. First increase the LAI from 0 to 10 with an amplitude of 0.1. Then calculate the water temperature when the LAI increases once. Compare the RMSE of measured water temperature and calculated water temperature using the equation as follows.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{cal,i})^2}{n}} \quad (8)$$

Record LAI when daily RMSE is minimum. The results of LAI are shown in **Fig.2** where the “LINE” is an approximate line of LAI. This results of the midsummer drainage period and heavy rain days were removed in the figure.

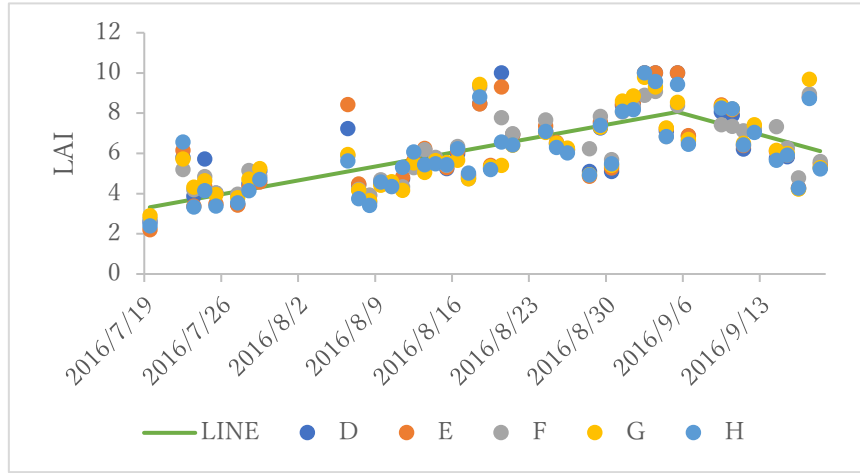


Fig.2 results of LAI

4.SENSITIVITY ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DATA

This chapter describes the relationship between various meteorological data and water temperature. Since the measurement units of meteorological data are different, the sensitivity analysis cannot be performed without any treatment. Therefore, the data is nondimensionalized by using the daily mean fluctuation range. The equation of nondimensionalization is given as

$$MFR = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\bar{m} - m_k| \quad (9)$$

where, MFR is daily mean fluctuation range. n is the total amount of data. $\bar{m}$ is the average of data.

Table.1 the daily mean fluctuation range of meteorological data

Type of meteorological data	Mean	daily mean fluctuation range (MFR)	MFR as ratio to the mean
Air temperature (°C)	25.2391	3.4389	13.6%
Atmospheric pressure (kpa)	100.4019	0.6018	0.60%
Humidity	0.8409	0.1201	14.28%
Wind speed (m/s)	1.3314	1.0921	82.03%
Solar radiation (W/m ²)	360.1430	279.7866	77.69%

Table.1 shows the mean and the daily mean fluctuation range of the various meteorological data. It also shows the daily mean fluctuation range as ratio to the mean.

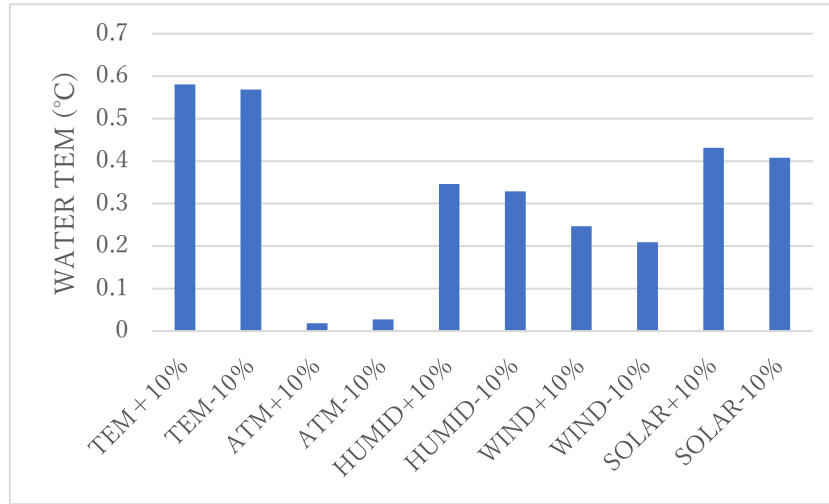


Fig.3 sensitivity analysis of meteorological data

Fig.3 shows the effect of various meteorological data changes on water temperature. The TEM+10% means RMSE of the original calculated water temperature and the calculated water temperature by using the air temperature which is added 10% of MFR of air temperature.

5. CORRECTION OF METEOROLOGICAL DATA

In this chapter, the method of correcting the meteorological data from the governmental weather station is introduced. Based on the results of the previous chapter, this study will introduce correction methods for solar radiation, temperature, wind speed, and humidity.

5.1 Solar radiation

Some researchers use the sunshine duration to calculate the daily mean solar radiation. Sunshine duration is the time when the sun shines directly on the ground. In this study, we have improved this method to use the sunshine duration to calculate the solar radiation per hour. We obtained data on sunshine duration from a weather station located in Oyama City, and the observation interval of sunshine duration was 0.1 hour. The basic equation for solar radiation per

hour is given as

$$S_{hi} = Sd \times \frac{S_{0hi} \times ra_i}{\sum_{i=1}^{i=24} S_{0hi} \times ra_i} \quad (10)$$

where, S_{hi} is the solar radiation per hour. Sd is daily average value of total solar insolation. S_{0hi} is the horizontal surface solar radiation per hour and ra_i is the ratio of solar radiation per hour of weather station and possible duration of sunshine per hour.

5.1.1 Daily-averaged value of total solar insolation

The radiation Sd can be expressed by following equation as

$$\frac{Sd}{S_{0d}} = a + b \frac{N + \Delta N}{N_0}, \quad 0 < \frac{N}{N_0} \leq 1 \quad (11)$$

$$= c, \quad \frac{N}{N_0} = 0 \quad (12)$$

and

$$\sin\left(\frac{H}{2}\right) = \left(\frac{A}{\cos\varphi \cos\delta}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$N_0 = \frac{2H}{0.2618} \quad (14)$$

$$A = \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi - \delta + r}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi - \delta - r}{2}\right) \quad (15)$$

where, S_{0d} is the daily-averaged solar radiation on the horizontal surface at the top of the atmosphere. N is the sunshine duration. N_0 is the possible duration of sunshine. a , b , c and ΔN are parameters. a : 0.244, b : 0.511, c : 0.118, ΔN : 0. φ is the latitude of paddy field. δ is the declination of Sun. H is hour angle from sunrise to south middle and r is Horizontal refraction index (=0.01rad).

The radiation S_{0d} can be expressed by following equation as

$$S_{0d} = \frac{I_{00}}{\pi} \left(\frac{d_0^2}{d}\right) (H \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin H) \quad (16)$$

where, I_{00} is the solar constant (=1365W/m²). d is the distance between the earth and the Sun and d_0 is the average distance between the Earth and the Sun.

5.1.2 Ratio of solar radiation per hour at the weather station and possible duration of sunshine per hour

The ra can be expressed by following equation as

$$ra = \frac{N_h}{N_{0h}} \quad (17)$$

where, N_h is the solar radiation per hour at the weather station and N_{0h} is the possible duration of sunshine per hour. Currently, the sunshine is defined as "Direct solar radiation is 0.12 kW/m² or more". N_{0h} is defined as when solar radiation on the horizontal surface at the top of the atmosphere is greater than 0.12 kW/m². The solar radiation on the horizontal surface at the top of the atmosphere can be expressed by following equation as

$$S_0 = I_{00} \left(\frac{d_0^2}{d} \right) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (18)$$

where, S_0 is the solar radiation on the horizontal surface at the top of the atmosphere and h is hour angle from the south middle.

5.1.3 Horizontal surface solar radiation per hour

The equation of S_{oh} is as follows.

$$S_{oh} = \int I_{00} \left(\frac{d_0^2}{d} \right) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (19)$$

5.2 Air temperature and wind speed

5.2.1 Air temperature

This study uses the IDW (Inverse distance weighting) to calculate the water temperature in the paddy field. IDW is a deterministic interpolation method based on the similarity principle. The assigned values to unknown points are calculated with a weighted average of the values available at the known points. The equation of IDW is as follows.

$$Z_0 = (\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^2}) / (\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}) \quad (20)$$

where, Z_0 is air temperature of paddy field. Z_i is the air temperature of weather station and d_i is the distance between paddy field and weather stations.

In this study, the air temperature data of three weather stations around the paddy field were selected to interpolate the air temperature in the paddy field. We used the data collected by Utsunomiya, Sano and Oyama weather station.

5.2.2 Wind speed

The wind speed is calculated using the vector IDW method. Firstly, we decompose the wind speed vector of the weather station into horizontal wind speed and vertical wind speed, and then calculate the horizontal wind speed and vertical wind speed of the paddy field by the formula (20). Finally, we synthesized the wind speed vector of the paddy field.

5.3 Humidity

Humidity is calculated by using the air temperature and air pressure, assuming that the weather station and the paddy field have the same specific humidity. The specific humidity is calculated by the following equation.

$$q = \frac{e_1}{P_1 + 0.378e_1} \quad (21)$$

where, q is the specific humidity. P_1 is the pressure of the weather station and e_1 is the vapor pressure of the weather station. The e_1 can be expressed by following equation as

$$RH_1 = \frac{e_1}{e_{SAT1}} \times 100 \quad (22)$$

and

$$e_{SAT1} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_1}{237.3+t_1}} \quad (23)$$

where, RH_1 is the humidity of the weather station. e_{SAT1} is the saturated vapor pressure of the weather station and t_1 is the air temperature of the weather station.

The humidity of the paddy field is calculated by following equation.

$$RH_2 = \frac{e_2}{e_{SAT2}} \times 100 \quad (24)$$

$$e_{SAT2} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_2}{237.3+t_2}} \quad (25)$$

$$e_2 = \frac{P_2 q}{1 - 0.378q} \quad (26)$$

Where, RH_2 is the humidity of the paddy field. e_2 is the vapor pressure of the paddy field. e_{SAT2} is the saturated vapor pressure of the paddy field. t_2 is the air temperature of the paddy field and P_2 is the pressure of the paddy field.

6. CALCULATION RESULTS

6.1 Corrected meteorological results

The result of the corrected and uncorrected meteorological data are shown in the **Table.4**.

Table.4 The result of data correction for meteorological data

		Solar radiation	Air TEM	Wind speed	humidity
RMSE for corrected and measured data		0.37 MJ/m ²	0.92°C	1.24 m/s	8.94
RMSE of uncorrected and measured data		0.38 MJ/m ²	0.96°C	1.36 m/s	9.55
Percentage of error reduction		2.6%	4.2%	8.8%	6.3%

Table.4 shows that the error was reduced by 5.5% on average by the data correction.

6.2 Water temperature calculation results

Proposed model was calibrated and verified with observed data in the experimental paddy plot. Input data are the corrected meteorological data, observed water level and estimated LAI. Output data are the water temperature. Calibration period is from 7/19 to 9/19.

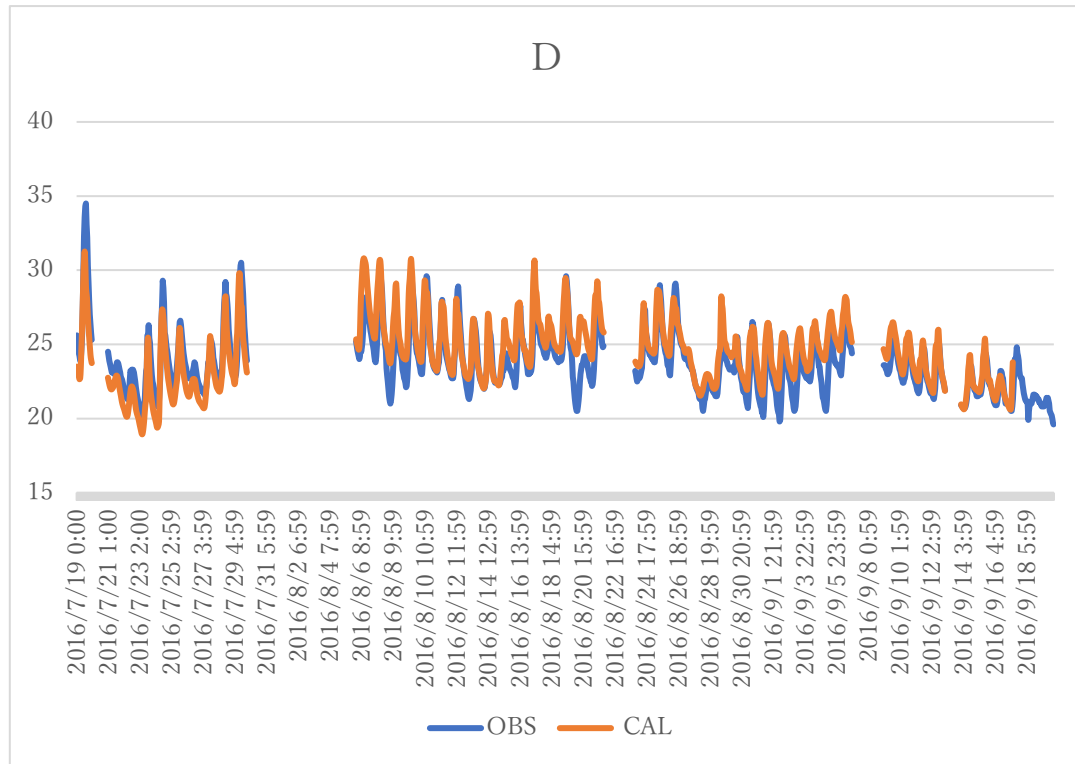


Fig.4 Water temperature calculation result at point D

The result showed good agreement in mean RMSE of 1.28 degree C for calibration period.

7.CONCLUSION

In this study, a prediction model of paddy thermal condition was developed, which can directly calculate the water temperature using data from weather stations. We perform sensitivity analysis on various meteorological data. From the results of sensitivity analysis, air temperature and solar radiation have great influence on water temperature, and atmospheric pressure has little effect on water temperature. The correction method of meteorological data and the calculation method of LAI are proposed. After the meteorological data was corrected, the RMSE with the measured data decreased by 5.5%. In order to verify and evaluate the capabilities of this model, we have tested the model with the experiment in paddy plot. The result of water temperature showed good agreement in mean RMSE of 1.28 degree C. Calculating the water temperature of the paddy field using the data from the governmental weather stations indicates that the water temperature can be calculated without so dense meteorological monitoring systems near paddy fields. Therefore, the scope of application of this model has been expanded, and the calculation cost of water temperature has been reduced.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by KAKENHI Grant Numbers 16K18770 from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS). Special thanks are due to the farmers who allowed us the observation in their paddy fields.

REFERENCES

- Tsutomu M., Kenji O. and Takeshi H. 1997. High Temperature-Induced Spikelet Sterility of Japonica Rice at Flowering in Relation to Air Temperature, Humidity and Wind Velocity Conditions. *Jpn. J. Crop Sci.* 66(3) : 449-455
- Tohru K., Naoya U., Tatuya I. and Hisashi K. 2004. Shortage of Assimilate Supply to Grain Increases the Proportion of Milky White Rice Kernels under High Temperature. *Jpn. J. (Crop Sci.)* 73 (3) : 315-322
- Koshi Yoshida, Issaku AZECHI and Hisao KURODA 2013. Application of Two Layer Heat Balance Model for Calculation of Paddy Thermal Condition. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1, Vol. 69, No.4, I_139-I_144*
- Reiji Kimura and Junsei Kondo 1998. Heat Balance Model over a Vegetated Area and Its Application to a Paddy Field. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 76, No. 6, pp. 937-953*
- 木村匡臣, 小林 聡, 飯田俊彰, 久保成隆 2015. 田面水の平面 2 次元流れ場を考慮した水田内温度環境計算モデル, 平成 27 年度農業農村工学会応用水理研究部会講演集, 67-70
- Toshichika IIZUMI, Motoki NISHIMORI, and Masayuki YOKOZAWA 2008. Combined Equations for Estimating Global Solar Radiation: Projection of Radiation Field over Japan under Global Warming Conditions by Statistical Downscaling. *J. Agric. Meteorol.* 64(1):9-23
- FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao, DING Xiao-qiang, LIN Zhong-hui 2004. Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources. *GEOGRAPHICAL RESEARCH* Vol.23, No.3
- 日本気象庁, 1998. 気象観測の手引き. 22-28
- 近藤 純正, 1994. 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支

幹線水路系での効果的な配水のための ICT を活用した Check Gate 操作管理

東京大学名誉教授

久保成隆

この研究は ICT を幹線水路の配水管理に活用して、これまで難しいとされてきた諸問題に、解決の糸口を見つけようとするのである。例えば、開水路では用水到達時間が必要で供給主導的な配水にならざるを得ないとか、開水路にあっては上流側が絶対的に優位で配水において上下流の不公平性が避けがたいとか言った問題である。既に、配水管理の現場に TM/TC が活用されて久しいが、これらの技術は管理者が現地に行く時間と手間を省くためのもので、配水管理の技術水準を質的に高めるものではないように思える。この研究では、ICT は、単に、大量の情報を迅速に伝える技術の範囲を超え、TM/TC の技術に科学的（例えば、水理学的）な知見を融合して得られる複合技術と考える。

ここでは主に、幹線開水路での需要主導型配水システムの実現可能性を検討するため、愛知用水の下流部 30km の農水専用区間をモデル区間とする。愛知用水では二期事業が行われた際に、水利用の利便性を増やす目的で、水路の嵩上げが行われ上下流水位制御ゲート（Watch man V 型）が開発・採択された。これらの改良は供給主導型の配水に余裕を持たせる効果があり、配水システムを需要主導型に変更する道筋を用意した。しかし、需要主導型配水が可能とされる AVIS ゲートなどによる下流水位一定制御（DC）方式では、反応速度が遅いことに加え、最大流量が小さいという欠点がある。そこで、これらの欠点を解消する方法として MC 方式を提案した。この方式では、DC 方式と同様に下流の情報を上流側に伝達するが、水位監視点はプール（二つの Check gate 間の水路部分）の最下流点にある。また、その情報をもとに、プール最上流点の水位を変更する。この MC 方式は反応速度が早く大流量を流すことが可能である。同様な方式は、California の Corning 水路で実用化された Hy-FLO（EL-FLO）である。相違点は、Hy-FLO（EL-FLO）ではゲート開度を直接変更するが、MC 方式では下流設定水位を変更しゲート開度は下流水位が設定値に近づくように自動的に調節される。MC 方式の有効性を、愛知用水農専区間での 1 週間の配水実測データを用いて、数値シミュレーションにより検討した。その結果、52 の分木工からの合計分水量と桜鐘ゲートから供給された流量は、時系列的にほぼ等しいという結果を得た。これにより、MC 方式は、開水路での需要主導型配水を可能とする方式に成り得るとの結論を得た。今後、幹線開水路の改修が行われる場合、九頭竜川下流用水のようにパイプライン化される場合や、開水路として利便性を高める工夫がなされる可能性がある。そこで、最後に、従来の開水路供給主導型配水システムを開水路需要主導型の配水システムに変更する場合を想定し、変更の際の基本的な考え方を示した。

深層学習を用いた低平地における調整池水位の予測

石川貴大* 木村匡臣* 木村延明** 安瀬地一作** 飯田俊彰*

*東京大学 大学院農学生命科学研究科

**農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門

1. はじめに

1.1 背景と目的

新潟県新潟市に位置する鳥屋野潟は、流域面積 99.8 平方キロメートル、潟面積 1.37 平方キロメートルの潟であり、水位平均が標高約-2.5m ほどであり、流域のほとんどが海拔ゼロメートル地帯となっている。そのため、鳥屋野潟に設置されている親松排水機場から信濃川へ常時排水されている。排水は鳥屋野潟の水位を基準に行われており、降水に関して注意報や警報が出ると基準水位が引き下げられる。この排水が不足すると流域の上流部で内水氾濫を起し、逆に過剰に排水してしまうと用水の不足やポンプを動かす電気代の無駄になってしまう。そのため、降水時の水位の変動の高精度な予測は排水を過不足なく適切に行う上で非常に有用となりえる。

同様な条件下での水位データとその水位が応答となるデータのセットが十分そろっていれば、深層学習により水位を高精度かつ簡便に予測できる可能性がある。しかし、深層学習が調整池の水位予測に用いられたケースはなく、入力データに何を選ぶのか、また何年分のデータが必要かなどを判断するための適用報告例は多くない。そのため、本研究は鳥屋野潟水位の予測に深層学習を用いることで高精度かつ簡便に行うこと主

目的としつつ、今後同じような予測を行う際にデータやアルゴリズム選択の一つの指標となることを目的とするものである。

2. 学習手法

2.1 予測値と入力値

予測値と入力値は表 1 のように設定した。

表 1 予測値と入力値

予測値	時刻 t における鳥屋野潟への流入量
入力値	時刻 $t - \Delta t_{in}$ から時刻 $t-1$ までの鳥屋野潟への流入量
	時刻 $t - \Delta t_{rain}$ から時刻 $t-1$ までの流域内降水量

よって一つの予測値に対して $(\Delta t_{in} + \Delta t_{rain})$ 個の入力値を使用する。データは 2010 年 - 2017 年までの水位、機場排水量、流域内降水量のデータの中から降雨イベントを抽出して作成した。データはすべて 1 時間単位のものである。一つの降雨イベントは以下の基準によって抽出している。

- 1)前後に 8 時間以上の無降雨期間がある。
- 2)総降水量が 13mm 以上である。

予測の対象は水位ではなく、鳥屋野潟への流入量とした。なぜなら、水位を予測するには排水量を入れなければならず、将来的に予報データなどから水位を予測する際にまだ確定していない排水量を仮定して入力

しなければならなくなるため、流入量の予測としたほうが将来的な有用性は高まると考えたからである。流入量は以下のようにして算出した。

まず、時刻 $t-1$ から時刻 t までの鳥屋野潟の水位変動値 $h(m)$ をデータから算出する。次にデータから $t-1$ から t までの総排水量 $Q_D(m^3)$ を算出し、鳥屋野潟の潟面積 $A(km^2)$ を用いて以下の式により流入量 $Q_{in}(m^3)$ を求める。

$$Q_{in} = h \cdot A \cdot 1000000 + Q_D$$

また、鳥屋野潟への排水は親松排水機場の他に国土交通省が運営する鳥屋野潟排水機場もあり、親松排水機場の能力を上回る降水の際に稼働される。流入量算出にはこの機場からの排水量データも必要となるが、現状では鳥屋野潟排水機場データが入手できていないため明らかに鳥屋野潟排水機場が動いていると思われるものは意図的に降雨イベントから排除した。

2.2 訓練データとテストデータ

前述の条件で 265 件の降雨イベントを抽出することができた。本研究では、テストデータとして最新の 5 件を選択し、それ以外の 260 件を訓練データとした。

訓練データとは、モデルに学習させるデータセットであり、モデルは実際にこのデータから降水量とそれに対する流入量の応答の仕方の特徴を学習するためのデータセットである。テストデータとは、モデルが学習したなかには入っていなかったデータを学習が終了したモデルに入力し、出力される値と実測値とを比較して、モデルの学習がどれほど成功したかを評価するためのデータセットである。

2.3 学習条件

誤差関数には二乗誤差を使用した。モデルの構造は入力層と 2 層の隠し層、出力層の 4 層の構造とした。隠し層のノード数は 1 層目を 50 層、2 層目を 100 個とした。入力値の内、流入量は以下の式で正規化を行った。

$$Q_t^* = (Q_t - Q_{min}) / (Q_{max} - Q_{min})$$

Q_t : 時刻 t における流入量、 Q_{min} : 標本データ内流入量の最小値、 Q_{max} : 標本データ内流入量の最大値

3. 結果

今回の学習では、学習回数 20000 回。 Δt_{in} 、 Δt_{rain} はともに 5 に設定した。

3.1 学習精度評価

図 1 は学習が終了したモデルにテストデータを与え出力された値を縦軸に、その際の実測の値を横軸にプロットしたものである。プロットが線上に存在すれば、実測をよく再現したことになる。

実測流量で 40000~50000 t/h の範囲にあるものは出現度が高いため再現できている例が多い。それに対して、流入量が 60000 を超えるものなど出現度の低いデータに関しては実測とのずれが現段階では大きいことがわかる。

3.2 流入量予測

実際の運用を考え、2 時間以上先の流入量予測を行った。1 時間後の予測には、実測値を使ったが、2 時間後以降のある時刻 t での予測では、 $t-1$ 時間後までの予測量をそのまま入力に使用して予測を行っている。

図 2 はテストデータの内の 2016 年 11 月 19 日の午前 3:00 から翌 20 日の 1:00 までの降雨イベントに対して午前 6:00 から予測

開始した結果である。

4. 今後の課題

入力値について多地点の降雨情報を用いて学習を行う。また、モデルの構造について、数を増やしながら、最適なモデルの探索を続ける。

実際の運用を考えると、降水量データは予報によって予測されることが望ましい。よって、入力値に予報データを組み入れたモ

デルも今後、開発・検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究は平成29年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「超過降雨に対応した農業地域の洪水被害を軽減する減災支援技術の開発」の一部として実施された。研究遂行に当たり、亀田郷土地改良区に多大なるご配慮を頂いた。記して謝意を表す。

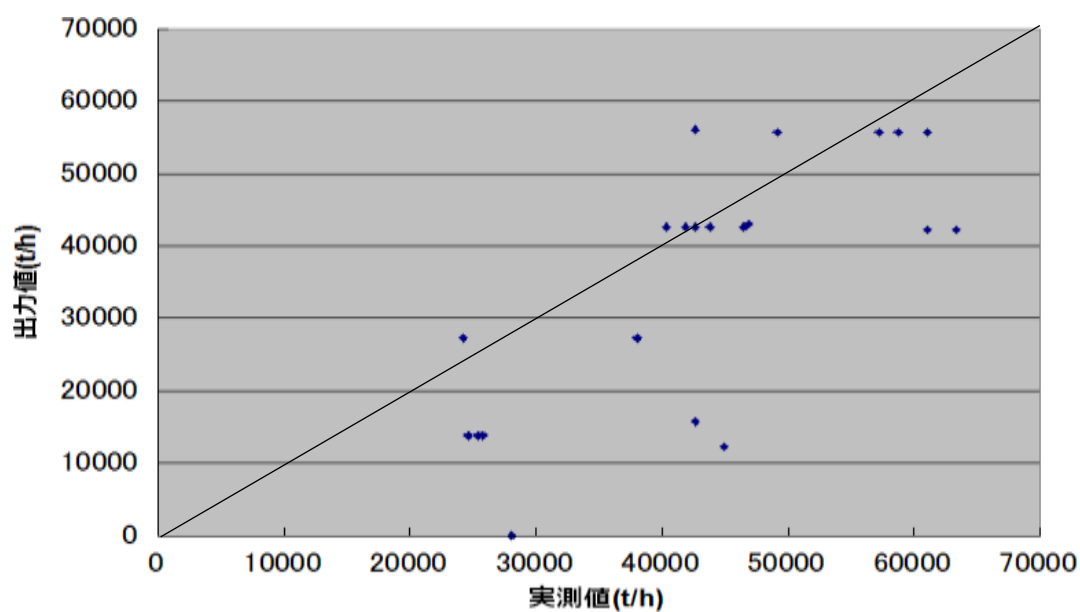


図1 学習精度の評価

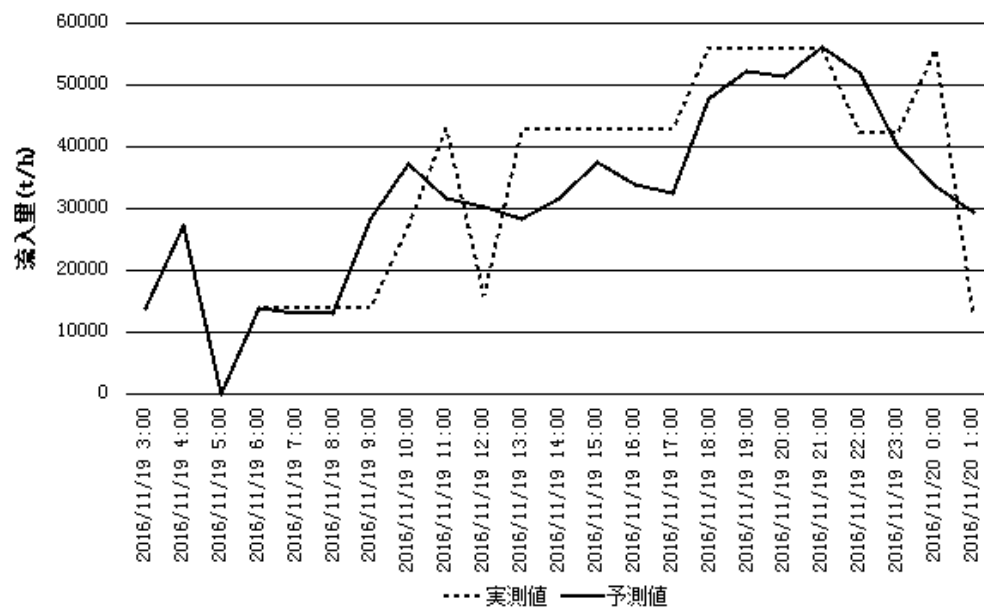


图 2 流入量予測

農業用管水路における地震時動水圧の観測

Observation of hydrodynamic pressure generated in an irrigation pipeline during earthquakes

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

○大久保天, 中村和正, 立石信次, 今泉祐治, 寺田健司, 川口清美

OHKUBO Takashi, NAKAMURA Kazumasa, TATEISHI Shinji, IMAIZUMI Yuji,

TERADA Kenji and KAWAGUCHI Kiyomi

1. はじめに

農業用管水路中に生じる非定常な圧力変化が過大になると、管路の破損や離脱を引き起こす原因となる。その非定常な圧力変化には水撃圧と地震時動水圧がある。水撃圧はバルブの開閉などに伴って生じる水圧の変化である。これはすでに農業用管水路の設計基準に記載されている。一方、地震時動水圧は地震動による管体の振動に伴って生じる水圧の変化である。その基礎的な理論は中川（1969）において示されている。しかし、農業用管水路における地震時動水圧の実態を捉えた事例は極めて少ない。その理由のひとつは、地震はまれに生じる現象であるので、そのデータの取得が困難であるためであろう。筆者らは、北海道十勝地域で供用中の農業用管水路において、地震動と水圧変化を常時観測している。2013年の観測開始から現在（2018年11月）までに取得できた地震時動水圧のデータは、震度2が15回、震度3が2回、震度4が2回である。その結果の一部は大久保ら（2018）で報告した。本稿では、これまでに観測した地震時動水圧の事例を紹介するとともに、地震動の速度と地震時動水圧の間にみられた相関関係を報告する。

2. 観測方法

2.1 観測地点の概要

本研究の観測対象は、畑地灌漑用のクロードタイプの管水路システムであり、Fig. 1に示すような管網配管である。中川（1969）によれば、地震時動水圧は管路の閉端部（行き止まりの箇所）で起こるほか、曲管部、T字管部、片落管部においても発生する。本研究では、観測対象の管水路に閉端部がないことから、主に曲管部において地震時動水圧が発生すると考えて、曲管部に近い2カ所の観測地点を選定した（Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3）。両観測地点は異なるファームポンドを水源とする管水路にある。両観測地点の管種はダク

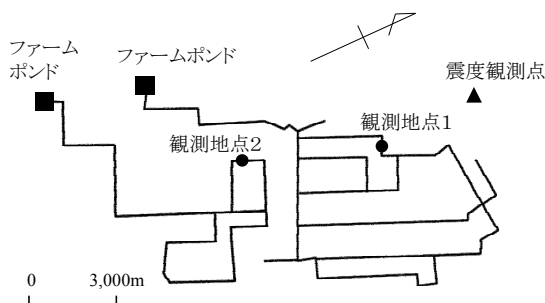


Fig. 1 観測対象の管水路の平面図と観測地点

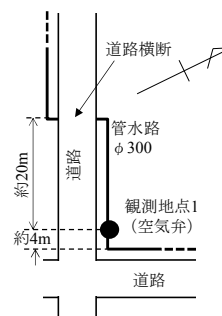


Fig. 2 観測地点1の詳細

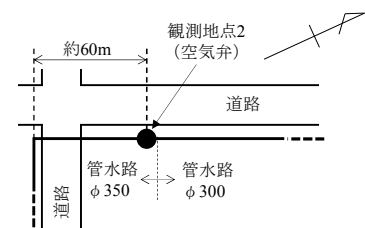


Fig. 3 観測地点2の詳細

タイル铸铁管（DCIP）である。管径と静水圧は、観測地点 1 で 300mm と約 0.9MPa、観測地点 2 で 350mm と約 0.7MPa である。

2.2 観測システム

地震時の動水圧を捉えて、その動水圧と地震動の関係を分析するためには、同時刻の地震動と管路中の水圧を継続的に観測できるシステムが必要である。水圧は空気弁本体にある分岐管の先端に圧力変換器を取り付けて観測した。また、地震動の加速度は、空気弁室底部のコンクリート基礎部に加速度計を設置して、鉛直方向と水平方向 2 成分（南北方向と東西方向）を観測した。データのサンプリング周波数を 100 Hz とし、常時、加速度と水圧をデータレコーダに収録できるように設定した。

3. 観測結果

3.1 地震時動水圧の観測事例

地震時動水圧の観測事例として、2016 年 1 月 14 日に、観測地点 1 と観測地点 2 において記録された地震動の加速度と動水圧を、それぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。観測地域における地震動の規模は震度 4 であった。両図ともに、最上段のグラフは鉛直方向の地震動の加速度、2 段目は南北水平方向の地震動の加速度、3 段目は東西水平方向の地震動の加速度、最下段は動水圧である。横軸の時間は、地震波（縦波：P 波）の到着時点を時刻 0s とした。

地震時動水圧は、水平方向の地震動（S 波）の到達に伴って発生し、鉛直方向の地震動（P 波）ではほとんど生じなかった。これは管路がほぼ水平に敷設されているので、鉛直方向の地震動では動水圧が発生するような変位を生じないためである。発生した地震時

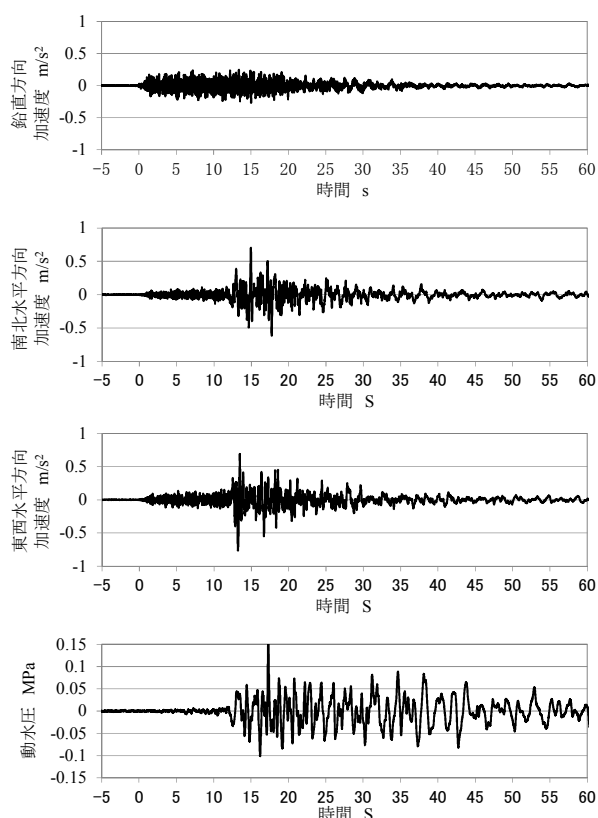


Fig. 4 地震動の加速度と動水圧（観測地点 1）
（大久保ら（2018）より作成）

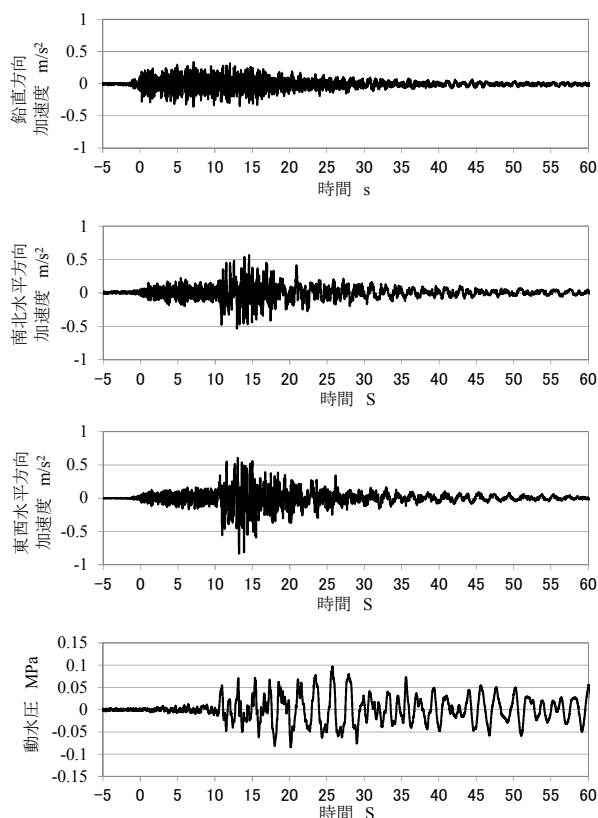


Fig. 5 地震動の加速度と動水圧（観測地点 2）

動水圧の最大値は、観測地点 1 において 0.15MPa（大久保ら，2018），観測地点 2 において 0.10MPa であった。また，いずれの観測地点においても 20 秒過ぎには主要な地震動は減衰するものの，その減衰中も動水圧の振幅は増大した。また，動水圧はその後もしばらく減衰せずに継続した。

3.2 地震時動水圧の干渉

地震波の主要な振動が過ぎた後も動水圧の振幅が増大する現象は，本観測における他の地震時のデータでもみられた。この現象は，多数の圧力波が管内を行き交う中で干渉し発生したものと推定される。観測地点 2 における動水圧の干渉の模式を **Fig. 6** に示す。観測地点 2 に最も近い曲管部（以下，「曲管部 A」）からその隣に位置する曲管部（以下，「曲管部 B」）までの距離は約 1,200m である。この間の動水圧の伝播速度は約 800m/s であると考えられる。それゆえ，曲管部 B で発生した動水圧が伝播して観測地点 2 まで到達する時間は約 1.5 秒である。このことから，地震波（S 波）が曲管部に到達してからほぼ 1.5 秒を過ぎると，観測地点 2 では，曲管部 A で発生した動水圧と曲管部 B で発生した動水圧が混在することになる。これら複数の動水圧が互いに重なり合って，水圧変化の振幅が増大したものと考えられる。

3.3 地震動と動水圧の相関関係

これまでの観測で得られた震度 2 以上の全データについて，地震動の水平速度（南北水平方向と東西水平方向の合成速度）の最大値 v と地震時動水圧の最大値 σ_{max} の関係を **Fig. 7** に示す。この両者の間には強い相関関係が認められた。その原点を通る回帰式（括弧内は相関係数 r ）は，次のとおりであった。

観測地点 1： $\sigma_{max} = 1.80 v$ ($r=0.99$) (1)

観測地点 2： $\sigma_{max} = 1.27 v$ ($r=0.97$) (2)

以上の両式が示す地震時動水圧の最大値は，地震動で発生した動水圧が干渉して増幅したものであると考えられる。そこで，干渉が起きる前に生じている動水圧を観測データから抽出して比較することで，干渉による動水圧の増幅度合を推定した。ただし，観測地

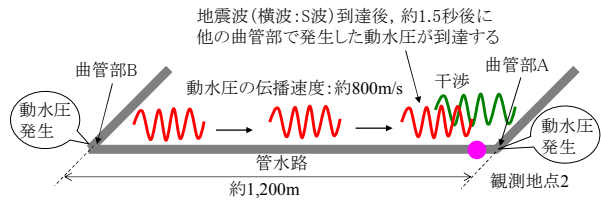


Fig. 6 地震時動水圧の干渉の模式

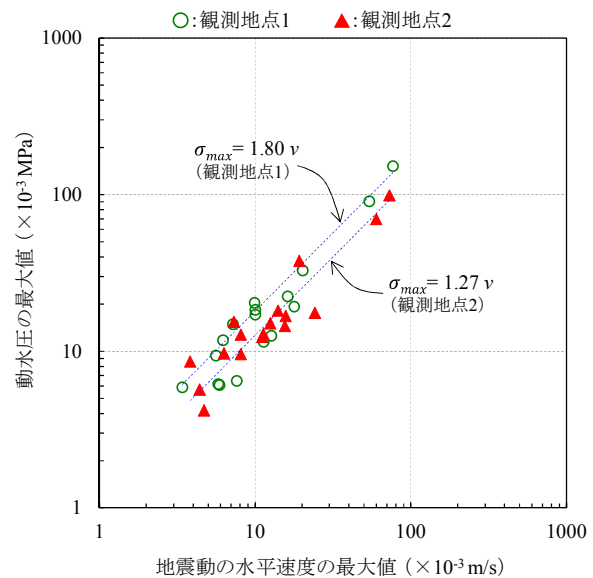


Fig. 7 地震動の水平速度の最大値と動水圧の最大値の関係

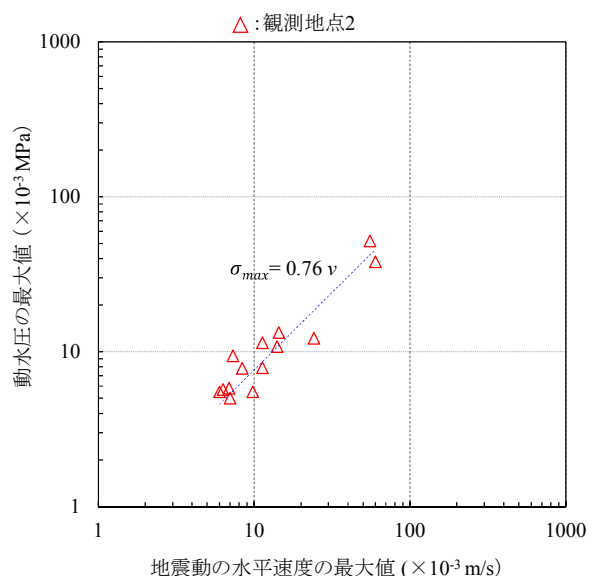


Fig. 8 地震波到達後 1.5 秒間の地震動の水平速度の最大値と動水圧の最大値の関係

点 1 の近傍には、**Fig. 2** に示すとおり、複数の曲管部があるので、単独の曲管部で発生する地震時動水圧を抽出することは困難であるため、観測地点 2 のみを分析対象とした。**3.2** で説明したとおり、**Fig. 6** に示す曲管部 B で発生した動水圧が最初に観測地点 2 に到達するまでの時間は約 1.5 秒である。そこで、観測地点 2 のデータから、地震波（S 波）到達後の 1.5 秒間における地震動の水平速度の最大値と動水圧の最大値を取り出した。その両者の関係を **Fig. 8** に示す。地震動の水平速度の最大値と動水圧の最大値の間には相関関係が認められ、その回帰式（括弧内は相関係数 r ）は次のとおりであった。

$$\sigma_{max} = 0.76 v \quad (r=0.96) \quad (3)$$

(2)式と(3)式の係数を比較すると、観測地点 2 では、隣接する曲管部などから伝播してくる複数の動水圧の重ね合わせによって生じた動水圧の最大値は、地震動のみで発生する動水圧の最大値の約 1.7 倍になることが分かった。

4. おわりに

本研究では、実際に供用している農業用管水路において地震時動水圧の実態を観測し、地震時動水圧と地震動の水平速度が比例関係にあることを示した。また、複数地点で生じた動水圧が重ね合わせを起こすことを示した。

今後は、現在の観測を継続してデータの蓄積を図るとともに、樹枝状配管の管水路やオープンタイプの管水路などでも観測を実施したいと考えている。また、それらのデータをもとに、地震時動水圧の予測モデルを構築して、地震時における動水圧と農業用管水路の挙動との関係を明らかにしたい。

引用文献

中川義徳（1969）：送配水管路における地震時動水圧についての理論的研究，水道協会雑誌，416, 26-35.
大久保天，立石信次，今泉祐治，中村和正（2018）：震度 4 の地震動により農業用管水路に発生した動水圧，農業農村工学会論文集，No.306(86-1),pp.IV_1-IV_2.

V 字ノッチ傾斜隔壁魚道の隔壁形状と枚数が遡上率に与える影響について
Influence of Designs and Numbers of Weirs for Sloped Weir Fishways with V-shaped Notches
on Fish Ascent Rate

○一恩英二* 中野光議** 田中健二* 長野峻介* 藤原洋一*

○ICHION Eiji*, NAKANO Mitsunori**, TANAKA Kenji***, CHONO Shunsuke* and FUJIHARA Yoichi*

1. はじめに

メダカ類 (*Oryzias* spp.) は水環境の悪化, 農村環境の開発, 外来魚類の捕食などの影響を強く受けて全国的に激減して, 環境省のレッドリストにおいて絶滅危惧Ⅱ類に指定された (環境省, 2012). ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*) は, 水田地帯の生息範囲の減少が指摘されており, 平成 30 年に環境省の準絶滅危惧種 (NT) に指定された (環境省, 2018). 圃場整備による用排水路の分離や排水路の深堀は水田の水尻と排水路の間や排水路と河川の間に落差を形成した (鈴木ら, 2004). その結果, 水田—水路—河川間の水域ネットワークが分断されて, 淡水魚は水田への侵入ができなくなり, 繁殖や摂食活動を行ううえで不利になると考えられる (片野ら, 2001). これらの変化から, 水田周辺の水域では, メダカ類やドジョウと同様に, フナ類 (*Carassius* spp.) の生息数も減少していると考えられる. 水田周辺魚類を保全する上で, 水域ネットワーク内の魚類の移動を保証することは不可欠の条件であり (端, 1998), 水域ネットワーク内に生じた落差による魚類の移動障害を解消するためには, 魚道の設置が必要である.

水域ネットワークの保全と圃場整備事業を両立させるため, 遊泳能力の低い水田周辺魚類のための魚道の設置が急務となっている. これまでに, アイスハーバー型 (端, 1999), カスケード M 型 (鈴木ら, 2001), 千鳥 X 型

(鈴木ら, 2001), コルゲート管を用いた魚道 (佐藤ら, 2008) などが開発されている. また, 一恩ら (2017) は, 直線 V 字ノッチ全面傾斜隔壁の隔壁傾斜角 $\alpha=45\sim60^\circ$, ノッチ (切欠き) 角 $\beta=5\sim30^\circ$ がメダカ類, ドジョウ, フナ類に有効であることを示唆した.

本論文は, 一恩ら (2017) を基礎として実施した隔壁形状の実験と隔壁枚数の実験の結果をとりまとめたものである. 隔壁形状の実験は, 最適なノッチ角 β の範囲が魚種によって, $5\sim30^\circ$ と幅があることに着目して, ノッチ角が徐々に大きくなる 3 種類の曲線 V 字ノッチ隔壁を製作し, 遡上実験を実施したもので, 隔壁形状ごとに魚類遡上機能を評価することを目的とした.

隔壁枚数の実験は, 上流傾斜隔壁 (一恩ら, 2015) や V 字ノッチ全面傾斜隔壁 (一恩ら, 2017) の研究および本研究の隔壁形状の研究で実施された隔壁 1 枚の遡上実験の結果から, 複数枚数の隔壁から構成される魚道の遡上率を推定することを目的として実施した.

2. 研究方法

2.1 実験装置

本研究で用いた曲線 V 字ノッチ全面傾斜隔壁と曲線 V 字ノッチ上端傾斜隔壁を図 1 に示す. 隔壁天端に V 字の切り欠きを設けることで, 流れを水路中央部に集中させ, 水路側

* 石川県立大学生物資源環境学部 Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University

** 一般社団法人地域環境資源センター The Japan Association of Rural Solutions for Environmental Conservation and Resource Recycling

*** 国立研究開発法人寒地土木研究所 Civil Engineering Research Institute for Cold Region

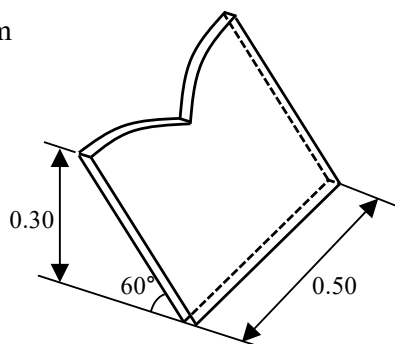
キーワード: フナ類, ドジョウ, メダカ, プールタイプ魚道, 遡上率

壁部に緩流域を設けて、魚類の休息場所を確保する設計とした。隔壁傾斜角は 60° 、天端の曲線 V 字ノッチ（切欠き深さ=5.98cm）の曲線は、 $0 \leq x \leq 25\text{cm}$ では式 (1) を、 $25 \leq x \leq 50\text{cm}$ では式 (2) を用いて作成し、隔壁高さは 0.30m になるように設定した。

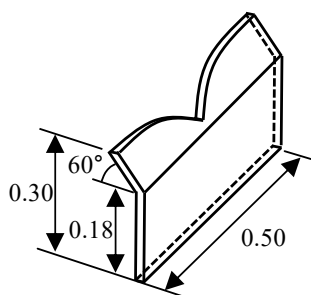
$$y = 3.83 \times 10^{-4} \times x^3 \text{ (cm)} \quad \dots(1)$$

$$y = 3.83 \times 10^{-4} \times (50 - x)^3 \text{ (cm)} \quad \dots(2)$$

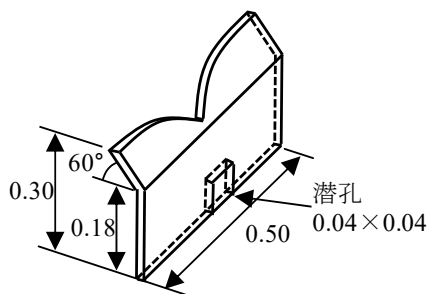
単位:m



曲線V字ノッチ全面傾斜隔壁
(タイプ1)



潜孔なし曲線V字ノッチ上端傾斜隔壁
(タイプ2)



潜孔あり曲線V字ノッチ上端傾斜隔壁
(タイプ3)

図 1: 隔壁形状実験に用いた隔壁

先端傾斜隔壁は、高さ 0.18m の鉛直隔壁に水平面からの傾斜角 60° の傾斜隔壁を取り付け、高さ 0.30m となるようにした。これらの隔壁は、すべて厚さ 24mm の合板で製作した。隔壁は、供試魚を視認しやすいように黒色の合成樹脂塗料（株式会社カンペパピオ）で塗装した。V 字ノッチの越流部において、流れの剥離と供試魚の損傷を防ぐために、半径 $r=24\text{mm}$ の丸みをつけた（図 2）。

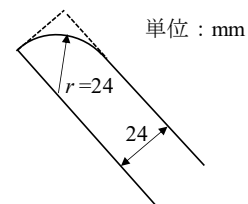


図 2: 隔壁天端越流部の曲面形状

隔壁形状実験装置の概要を図 3 に示す。隔壁は、石川県立大学水理実験棟内の幅 0.50m の実験水路に、漏水しないように水路底面および水路側壁と隔壁のすき間にはシリコンシーラント（ハピオシールプロ HG クリヤー）を充填して設置した。設置した隔壁位置の上流側 1.00m の地点には遡上魚を捕獲するための定置網を設置し、下流側 1.00m の地点には供試魚の流失を防ぐための仕切り網を設置した。

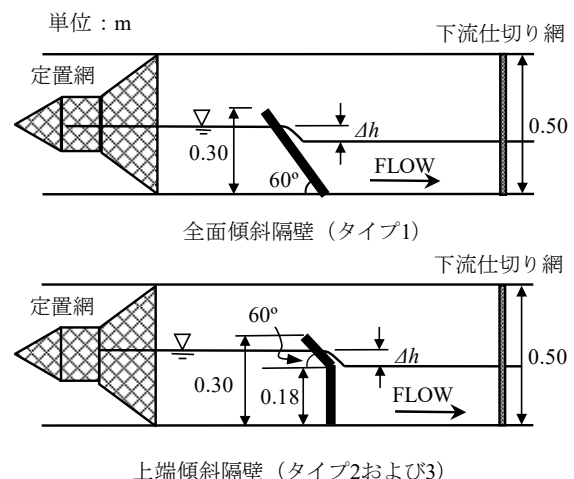


図 3: 隔壁形状実験装置の概要

隔壁枚数の実験では、図 4 に示すように曲線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 4)、潜孔あり直線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 5)、潜孔なし直線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 6) を用いた。タイプ 5 とタイプ 6 の隔壁では傾斜角 $\alpha=45^\circ$ 、ノッチ角 $\beta=30^\circ$ と設定した。

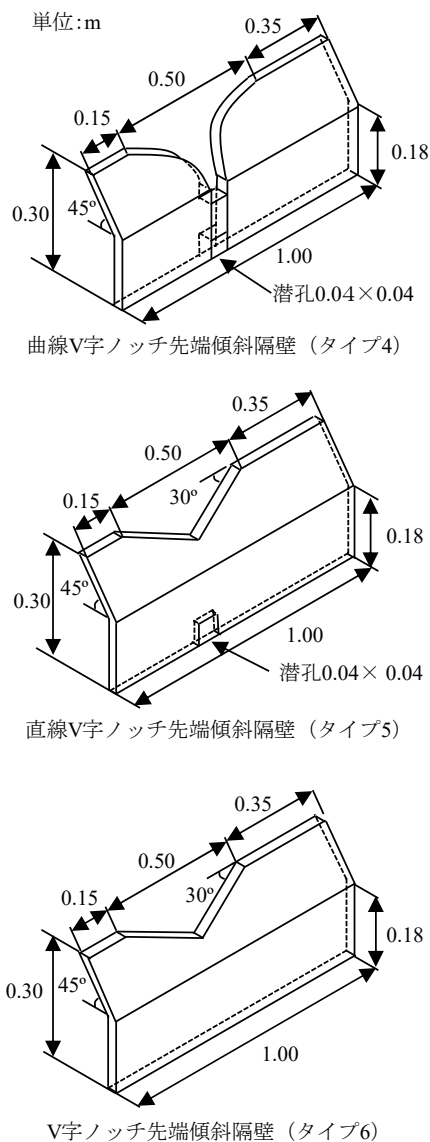


図 4: 隔壁枚数実験に用いた隔壁

これらの隔壁を 4 枚用いて魚道模型を製作し (図 5)、隔壁 1~4 枚の遡上実験を行った。隔壁は、隔壁形状実験と同様に、厚さ 24mm の合板を用いて製作した。隔壁は幅 1.0m、高さ 0.30m に、鉛直部と傾斜部の高さをそれぞれ

0.18m、0.12m とした。隔壁上下流の水位差をメダカ類の遡上が可能とされている 0.10m となるように (端, 1999)、水路下流端の水門の高さを調節した。また、魚道隔壁天端越流部において、流れの剥離と供試魚の損傷を防ぐために、隔壁形状実験と同様に $r=24\text{mm}$ の丸みをつけた (図 2)。隔壁は、供試魚が視認し易いように、黒の合成樹脂塗料で塗装した。実験装置は、石川県立大学水理実験棟内の幅 1.0m のコンクリート水路に設置した。供試魚の流出を防ぐために、設置した魚道の下り口には遡上魚を捕獲するための定置網を設置し、魚道の上り口には幅 1.0m×高さ 1.0m の合板枠の仕切り網 (目合い 1mm) を設置した。隔壁 4 枚の実験を行う場合は、図 2 中の (a) の位置に仕切り網を設置し、3 枚の場合は (b)、2 枚の場合は (c)、4 枚の場合は (d) に、仕切り網の位置を移動し、仕切り網の直上流部に供試魚を放流して遡上実験を行った。魚道隔壁および仕切り網の水路底面と水路側面の間にできる隙間には、漏水や供試魚の侵入を防ぐためにシリコンシーラント (パピオシールプロ HG クリヤー) で埋めた。

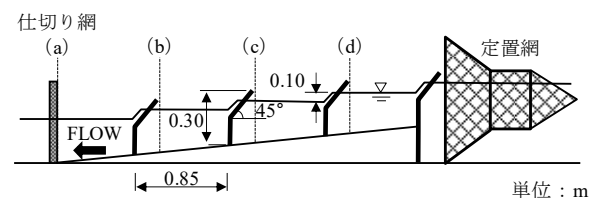


図 5: 隔壁枚数実験装置の概要

2.2 魚類遡上実験

実験に用いたメダカ類とフナ類は石川県羽咋郡志賀町の農業水路で、ドジョウは石川県能美市の農業水路で採集した。供試魚の体長は、表 1 に示す。また、供試魚は水槽で 1 日程度実験水に慣らした後に実験に用いた。

本研究で実施した実験ケースを表 2 に示す。隔壁形状実験は 9 実験、隔壁枚数実験は 10 実験を実施した。実験時間は、19:00 から翌日 16:00 までの計 21 時間とした。実験終了

時(16:00)に、実験装置の定置網で採捕されていた魚類の個体数を遡上数とし、遡上魚数／供試魚数を遡上率(%)とした。1つのタイプの隔壁実験を終了した時点で実験に用いた供試魚を採集地で放流し、次の隔壁実験のために新たに供試魚の採集を行い、隔壁タイプごとに異なる供試魚を用いた。

表 1: 供試魚の体長 (単位: mm)

魚種	最小	最大	平均
隔壁形状実験			
メダカ類	20	35	26
フナ類	33	95	51
ドジョウ	57	127	88
隔壁枚数試験			
メダカ類	20	33	26
フナ類	32	127	48
ドジョウ	56	114	79

表 2: 実験ケース

番号	実験日	隔壁	流量 (L/s)
隔壁形状実験			
1	2017/9/8	タイプ1	2.0
2	2017/9/9	タイプ1	5.3
3	2017/9/10	タイプ1	9.5
4	2017/9/26	タイプ2	2.0
5	2017/9/27	タイプ2	5.3
6	2017/9/28	タイプ2	9.5
7	2017/10/4	タイプ3	2.0
8	2017/10/5	タイプ3	5.3
9	2017/10/6	タイプ3	9.5
隔壁枚数実験			
1	2017/8/30	タイプ4 (1枚)	5.3
2	2017/8/31	タイプ4 (2枚)	5.3
3	2017/9/1	タイプ4 (3枚)	5.3
4	2017/9/2	タイプ4 (4枚)	5.3
5	2017/10/12	タイプ5 (1枚)	7.4
6	2017/10/13	タイプ5 (2枚)	7.4
7	2017/10/14	タイプ5 (4枚)	7.4
8	2017/10/18	タイプ6 (1枚)	7.4
9	2017/10/19	タイプ6 (2枚)	7.4
10	2017/10/20	タイプ6 (4枚)	7.4

実験開始時、日の出時、実験終了時に実験水路内の水温、pH、DO、EC、照度の測定を環境条件として実施した。水温、pH、DO、ECは下流仕切り網の下流側で測定した。照度は、上流水面から約 20cm 上方点に照度計を設置し、日の出時と実験終了時に測定した。また、

日の出時から実験終了時までの間は、実験棟の照明を点灯させた状態で実験を行った。環境条件の計測に用いた器具を表 3 に示す。

表 3 測定器具

測定項目	使用器具名
水温	(株)佐藤計量器製作所 デジタル温度計SK-1260 (センサー部: サーミスタセンサ SK-S102T)
pH	(株)堀場製作所 ポータブル型pHメータ D-71
溶存酸素量	(株)堀場製作所 ポータブル型溶存酸素計OM-51-2
電気伝導度	(株)堀場製作所 ポータブル型導電率計 ES-71
照度	コニカミノルタ (株) T-10

2.3 統計解析

隔壁形状実験の結果は、各種魚類の遡上率が隔壁タイプ間で異なるかどうかを明らかにするために、一元配置分散分析 (ANOVA) を用いて検定した。ANOVA で有意な差が検出された場合、ペアワイズ t 検定を用いた多重比較を行った。ANOVA と多重比較ともに、流量でデータを対応付けた。また、メダカ類はすべての実験ケースで 1 個体も遡上しなかったため、フナ類とドジョウについてのみ検定を行った。

魚類の遡上率は隔壁タイプだけではなく流量や水温、照度等の影響も受けることが知られている (一恩ら, 2017)。そこで、本研究におけるこれらの要因の相対的な重要性を把握するため、一般化線形モデル (GLM) を用いた回帰分析を行った。目的変数は遡上数と非遡上数からなる行列とし、誤差構造は二項分布を仮定した。なお、この解析もフナ類とドジョウについてのみ行った。説明変数は隔壁タイプ、流量、水温、照度とした。隔壁タイプはカテゴリカル変数、その他は連続変数として扱った。総当たり法でモデルを作成し、AIC (赤池情報量基準) に基づいてモデルを序列化した。AIC が最も低かったモデルをベストモデルとし、各モデルとベストモデルとの

AIC の差 (ΔAIC) を算出した。また, Akaike weight から各説明変数の相対的重要性(RI 値, RI は Relative Importance の略) を算出した。RI 値は該当の説明変数を含む全モデルの Akaike weight の合計値である。RI 値は, 説明変数の相対的重要性が低い場合は 0 に近い値になり, 高い場合は 1 に近い値になる。

隔壁枚数実験の結果は, 各隔壁タイプの 1 ～ 4 枚の遡上実験で得られた遡上率をその最大値(隔壁 1 枚の場合の遡上率)を 1 とする正規化指数に変換し, 隔壁タイプごとに隔壁枚数と正規化指数を散布図にプロットして, 近似式をあてはめた。累乗近似を行うために, 遡上率が 0% の場合は 0.01% に置換して分析した。

3. 結果および考察

3.1 隔壁形状実験

隔壁形状実験の結果を図 6 に示す。メダカ類はすべての実験ケースにおいて 1 個体も遡上しなかった。一恩ら(2017)によれば, 隔壁傾斜角 60° の直線 V 字ノッチ全面傾斜隔壁においてメダカ類の遡上が確認されている(10～20%)。したがって, 曲線 V 字の形状がメダカ類に適していないと推察される。

図 6 に示すように, フナ類はタイプ 1 とタイプ 2 で高い遡上率が得られたが, タイプ 3 の遡上率は低くなった。ドジョウはタイプ 1 とタイプ 3 でやや高い遡上率が確認されたが, タイプ 2 では低い遡上率となった。

実験時の平均水温は $21.6 \sim 27.3^\circ\text{C}$, 水質は DO が $7.49 \sim 8.80\text{mg/L}$, pH が $7.91 \sim 8.27$, EC が $0.247 \sim 0.269\text{mS/cm}$, 照度は $755 \sim 865\text{lux}$ であった。pH, DO については環境省(2017)の水産 3 級基準値(pH: $6.0 \sim 8.5$, DO: 5mg/L 以上)内にあり, 魚類の遡上行動への影響を与えるものではなかったと推察される。統計分析に用いた平均水温と平均照度を表 4 に示す。

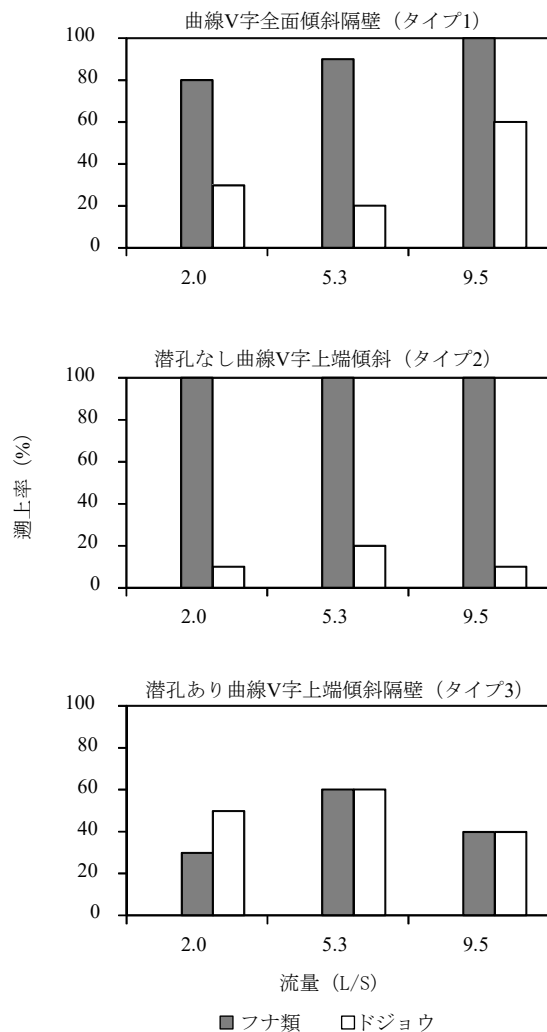


図 6: 隔壁形状実験における遡上率

フナ類の遡上率とドジョウの遡上率は隔壁タイプ間で有意に異なった(ANOVA, 両方とも $p < 0.05$, 表 5)。多重比較では有意ではなかったものの, フナ類の遡上率はタイプ 3 よりタイプ 1 が, タイプ 3 よりタイプ 2 が高い傾向が見られた(ペアワイズ t 検定, 両方とも $p = 0.07$, 表 6)。ドジョウの遡上率は, 多重比較の結果, タイプ 3 はタイプ 2 より高かったが(ペアワイズ t 検定, $p < 0.05$, 表 6), タイプ 1 とタイプ 2 の間, タイプ 1 とタイプ 3 の間で有意な差がなかった(ペアワイズ t 検定, 両方とも $p > 0.05$, 表 6)。

GLM 解析結果を表 7 に, RI 値を表 8 に示す。表 8 より, フナ類とドジョウのモデルでは, 隔壁タイプと流量の重要性が高く, 水温

と照度の重要性が低かった。これらの結果から、フナ類とドジョウでは、隔壁タイプと流量が遡上を強く規定していたと推定された。

表 4: 平均水温と平均照度

番号	水温 (°C)	照度 (lux)
1	25.6	850
2	26.6	860
3	27.3	770
4	24.4	767
5	24.8	795
6	24.0	865
7	21.6	845
8	22.2	755
9	22.6	780

表 5: 分散分析結果

目的変数	要因	自由度	変動	F値	P値
フナ類 遡上率	隔壁タイプ	2	5489	24.7	0.00127
	誤差	6	667		
ドジョウ 遡上率	隔壁タイプ	2	2067	5.471	0.0444
	誤差	6	1133		

表 6: 多重比較結果(p値)

	フナ類		ドジョウ	
	タイプ1	タイプ2	タイプ1	タイプ2
タイプ2	0.23	-	0.499	-
タイプ3	0.07	0.07	0.529	0.024

表 7: GLM解析結果

Rank	説明変数	AIC	Δ AIC	Weight
フナ類				
1	隔壁タイプ	28.2	0.00	0.270
1	流量	28.2	0.00	0.270
1	隔壁タイプ+流量	28.2	0.00	0.270
2	照度+隔壁タイプ	32.3	4.11	0.035
2	照度+流量	32.3	4.11	0.035
2	照度+隔壁タイプ+流量	32.3	4.11	0.035
3	水温+隔壁タイプ	33.2	4.99	0.022
3	水温+流量	33.2	4.99	0.022
3	水温+隔壁タイプ+流量	33.2	4.99	0.022
4	水温	33.7	5.50	0.017
5	照度+水温	38.0	9.78	0.002
ドジョウ				
1	隔壁タイプ	38.2	0.00	0.238
1	流量	38.2	0.00	0.238

1	隔壁タイプ+流量	38.2	0.00	0.238
2	説明変数なし	40.0	1.77	0.098
3	照度	40.8	2.57	0.066
4	水温	42.7	4.49	0.025
5	照度+隔壁タイプ	43.3	5.08	0.019
5	照度+流量	43.3	5.08	0.019
5	照度+隔壁タイプ+流量	43.3	5.08	0.019
6	水温+隔壁タイプ	44.4	6.14	0.011
6	水温+流量	44.4	6.14	0.011
6	水温+流量+隔壁タイプ	44.4	6.14	0.011
7	照度+水温	45.2	6.96	0.007

表 8: 相対的重要性(RI値)

説明変数	相対的重要性	
	フナ類	ドジョウ
隔壁タイプ	0.654	0.536
流量	0.654	0.536
水温	0.085	0.065
照度	0.107	0.130

3.2 隔壁枚数実験

隔壁枚数実験で得られた遡上率を図 7 に示した。メダカ類は全ての実験で遡上が見られなかったもので、図に示していない。

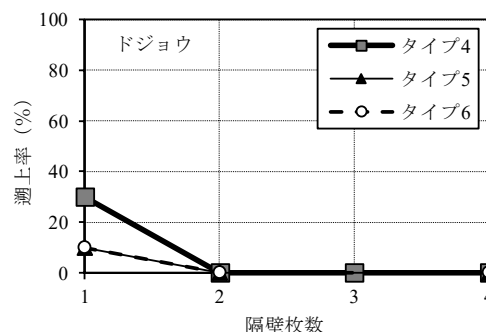
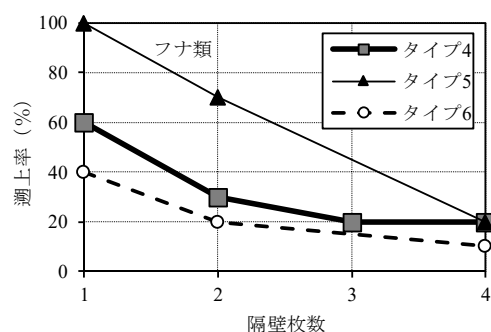


図 7: 隔壁枚数と遡上率

フナ類では隔壁枚数が増加にともなう遡上率の減少が確認できた。また、遡上率は隔

壁タイプごとに異なる結果となった。ドジョウでは隔壁 1 枚の場合の遡上率が小さく、隔壁 2 枚以上の場合に遡上する個体は見られなかった。ドジョウの遡上率は隔壁タイプごとに大きな差が見られなかった。

次に、正規化指数と遡上率の関係を図 8 に、累乗近似曲線式とその決定係数を表 9 に示す。フナ類とドジョウのそれぞれにおいて、3 つの隔壁タイプではほぼ同様な累乗近似曲線および近似式が得られた。また、フナ類の近似式の決定係数は 0.91~1.00、ドジョウにおいても 0.75~0.78 と比較的高い値を示した。

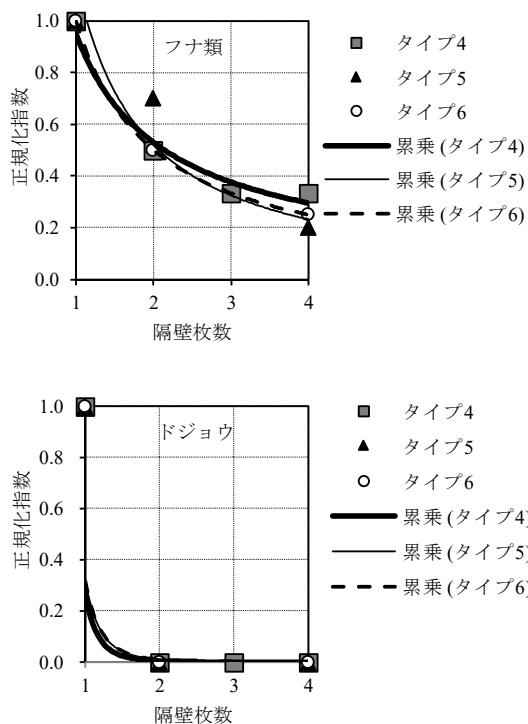


図 8: 隔壁枚数と正規化指数

表 9: 累乗近似曲線式と R^2

隔壁タイプ	累計近似曲線式	R^2
フナ類		
タイプ 4	$y = 0.95x^{-0.95}$	0.96
タイプ 5	$y = 1.16x^{-1.16}$	0.91
タイプ 6	$y = x^{-1}$	1.00
ドジョウ		
タイプ 4	$y = 0.26x^{-5.87}$	0.78
タイプ 5	$y = 0.32x^{-4.98}$	0.75
タイプ 6	$y = 0.32x^{-4.98}$	0.75

一思ら (2015) によれば、隔壁上下流の水位差が 9cm と 6cm の場合でキタノメダカの遡上率に大きな差異がみられている。本実験で用いた魚道隔壁は、一思ら (2015) の隔壁と形状は異なるが、水位差 10cm でメダカ類が遡上することは難しいと判断できる。端 (1999) によるとメダカやドジョウなどの小魚類を対象とする魚道においてプール間水位差を 10cm 程度にしておけば問題ないとしているが、メダカについては本研究の結果から慎重に検討する必要があると考えられる。廣瀬 (1995) によると、Maclean のエンドレス階段式魚道の実験において、ほとんどの魚が 1000 プール以上のぼり、中には 6600 プールのぼった事例を報告している。この事例から分かるように、本実験において、隔壁枚数が増加して遡上率が低下するのは、魚道上り口や魚道プールの水理条件や実験時間などに問題があった可能性がある。今後、隔壁枚数が増加しても遡上率が低下しないような実験条件を探索する必要がある。

4. まとめ

本研究は、V 字ノッチ傾斜隔壁の形状と隔壁枚数が魚類の遡上率に与える影響を明らかにすることを目的として行った。隔壁形状に関する実験は、曲線 V 字ノッチ全面傾斜隔壁 (タイプ 1)、潜孔なし曲線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 2)、潜孔あり曲線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 3) の 3 タイプ、流量は 3 段階、計 9 回の遡上実験を幅 0.50m の室内実験水路で上下流の水位差を 0.10m に設定して行った。隔壁枚数に関する実験は、潜孔なし曲線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 4)、潜孔あり直線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 5)、潜孔なし直線 V 字ノッチ先端傾斜隔壁 (タイプ 6) の 3 タイプの隔壁を用いて隔壁枚数を 1~4 枚に変化させて行った。供試魚はメダカ類、フナ類、ドジョウを使用した。隔壁形状の実験の結果、潜孔はフナ類の遡上

率を低下させ、ドジョウの遡上率を上昇させたことが示唆されたが、メダカ類の遡上は確認できなかった。また、全面傾斜隔壁と上端傾斜隔壁の間で、フナ類とドジョウの遡上率に有意な差が生じなかった。隔壁枚数の実験では、魚種ごとに、いずれの隔壁タイプの実験においても、隔壁枚数と遡上率の正規化指数の間で類似の近似式が得られたが、メダカ類の遡上は確認できなかった。

謝辞

本研究では、石川県立大学生物資源環境学部環境科学科学生の高橋一希、横井朝日、小林諒大、星野光司の諸氏には、実験装置の製作や実験全般において、たいへんお世話になった。また、本研究は、平成27～30年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号15K07652）の助成を受けた。ここに記して感謝する。

引用文献

- [1] 端憲二（1998）：水田灌漑システムの魚類生息への影響と今後の展望，農業土木学会誌，66(2)，pp.15-20.
- [2] 端憲二（1999）：小さな魚道による休耕田への魚類遡上試験，農業土木学会誌，67（5），pp.19-24.
- [3] 廣瀬利雄（1995）：第1編 概論，「魚道の設計」（財団法人ダム水源環境整備センター，廣瀬利雄，中村中六編），pp. 1-156.
- [4] 一恩英二，前田恭平，山本秀平，中野秀平，長野峻介，藤原洋一（2015）：上流傾斜隔壁魚道の隔壁遡上率に影響を与える要因，雨水資源システム学会誌，20（2），pp.85-92.
- [5] 一恩英二，中野光義，田中健二，長野峻介，藤原洋一（2017）水田周辺魚類のためのV字ノッチ全面傾斜隔壁魚道の開発—隔壁傾斜角とノッチ角が遡上率に与える影響—，第74回研究発表会講演要旨集農業農村工学会京都支部，pp.184-185.
- [6] 環境省（2012）：絶滅のおそれのある野生動植物種の生息域外保全 | 取り組み事例 | メダカ，

<http://www.env.go.jp/nature/yasei/ex-situ/instance10.html>（参照2017-12-11）

- [7] 環境省自然環境局野生生物課（2018）：環境省レッドリスト2018補遺資料，p.22.
- [8] 環境省（2017）：生活環境の保全に関する環境保全（河川），<http://www.env.go.jp/kijun/wt2-1-1.html>（参照2017-12-27）
- [9] 片野 修，細谷和海，井口恵一朗，青沼佳方（2001）：千曲川流域の3タイプの水田間での魚類相の比較，魚類学雑誌，48（1），pp. 19-25.
- [10] 佐藤太郎，佐藤 学，稲垣雅則，佐藤武信，安実千智，土田一也，三沢眞一（2008）：コルゲート管を用いた水田魚道の設置条件および水田の水管理とドジョウの遡上との関係，農村計画学会誌，26（4），pp. 434-441.
- [11] 鈴木正貴，水谷正一，後藤 章（2001）：水田水域における淡水魚の双方向移動を保证する小規模魚道の試作と実験，応用生態工学，4（2），pp. 163-177.
- [12] 鈴木正貴，水谷正一，後藤 章（2004）：小規模魚道による水田，農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす効果の検証，農業土木学会論文集，234，pp. 59-69.

熱帯塩水養殖池に発生する下層高水温現象による水域内蓄熱に関する検討

Study on Heat Storage in a Water body Generated by High-Water Temperature at Lower Layer in Salinity Aquaculture Pond in Tropics

○尾崎 彰則*, パニタン カイウジャンタウィ**, モントン アノンポニヤスクル***,
グエン バン ティン*, 松元 賢*, 岡安 崇史****

*OZAKI Akinori, PANITAN Kaewjantawee, MONTON Anongponyoskul,
NGUYEN Van Thinh, MATSUMOTO Masaru, OKAYASU Takashi*

1. はじめに

水産養殖池等の塩分を含む水域においては、水温成層に加え塩分成層が存在する複雑な密度成層場となることから熱塩対流の影響により、下層に高温な状態が維持される場合がある。熱塩対流とは、拡散係数が異なる二つの流体成分によって成層状態にある流体で起こる二重拡散対流の一種であり、水温成層と塩分成層が存在する場合に熱塩対流と呼ばれる⁽¹⁾。本研究で対象とする熱帯における塩水養殖池では、雨季の間断的な降雨が塩分成層、降雨後の猛烈な日射熱が水温成層の状態支配要因となり、熱塩対流が発生し水域下層が蓄熱する可能性がある。

熱塩対流による下層高水温に関わる現象については、これまでにソーラーポンドによる太陽光エネルギーの取得を目的とした研究において多く取り扱われており、塩湖あるいは人工的に塩分を調整した水域における現象に関わる研究が多く報告されている^{(2),(3),(4)}。ソーラーポンドに関わる物理現象の最も重要な知見を残している H. Weinberger⁽⁵⁾は、ソーラーポンドにおける現象の理論的解明を行い、塩分濃度勾配層の安定性について二重対流拡散理論に基づき検討し、下層が上層より暖かい場合、下層高塩分濃度の影響により塩分濃度勾配層に対流が生じないと報告している。この H. Weinberger による報告以降、ソーラーポンドの蓄熱基本原理として、水域鉛直方向に上層から、低塩分層である上層対流層 (Upper Convective Zone :UCZ)、鉛直方向に塩分濃度勾配を持つ非対流層 (Non Convective Zone: NCZ) および高塩分層である下層対流層 (Lower Convective Zone: LCZ)の存在と、LCZ における蓄熱が重要であるとされている⁽⁶⁾

以上のように、熱塩対流による下層高水温現象およびその現象による蓄熱効果は、ソーラーポンドの研究として多く取り扱われており現象理論の検証も進んでいる。しかしながら、ソーラーポンド現象と同様に、自然環境条件により塩分濃度勾配が生じる可能性がある塩水養殖池の熱塩対流に関わる現象については、既往の研究で取り扱われた事例はなく現象理解も進んでいない。塩水養殖池において下層に高水温状態が維持された場合、水産病害の発生の温床になる可能性や、底泥からの毒性物質溶出の可能性が示唆することから、水産養殖業の生産性に影響を及ぼす重要な現象であると懸念される。そこで本研究では、特に熱帯地域の塩水養殖池で発生可能性がある下層高水温現象について、その発生および発達に関わる気象条件および下層高水温に伴う水域内蓄熱量に関する検討を行うことを目的として現地観測を行った。

* 九州大学熱帯農学研究センター *Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University*

** カセサート大学クローンワン水産研究所 *Klongwan Fisheries Research Station, Kasetsart University*

*** カセサート大学水産学部 *Faculty of Fisheries Kasetsart University*

**** 九州大学大学院農学研究院 *Faculty of Agriculture, Kyushu University*

キーワード：熱塩対流，塩分成層，熱帯雨季環境

2. 現地観測概要

現地観測は、タイ・カセサート大学水産学部クーロンワン水産研究所が管理する実験用水産養殖池を実験水域とし、2017年の雨季期間（6月1日～10月31日）に、気象変動および水環境変動の連続観測を行った。実験水域は、同程度のスケールの池3か所を用い、実験開始前（5月30日）に、近隣の運河より取水した海水を用いて異なる塩分濃度条件を設定した。Fig. 1に実験水域の模式図、塩分濃度条件および各観測項目の計測位置を示す。観測対象の気象変動は、日射量、風速、風向、雨量、気温および湿度であり、10分間隔の自動計測を行った。また、水環境変動は、それぞれの池中央部における水温、塩分濃度の鉛直分布を計測した。水温の鉛直分布は、固定ポールに水底から0.2 m間隔で水温センサを配置し、10分間隔の自動計測を行った。一方、塩分濃度の鉛直分布および水深については、おおよそ一週間に5回の頻度で、正午から午後3時の間に水底から0.1 m間隔で手動計測を行った。なお、実験期間を通しての塩分調整および水位調整は、実験開始前の1回のみであり、実験開始後の水域内塩分濃度および水位は、気象条件による変化のみである。

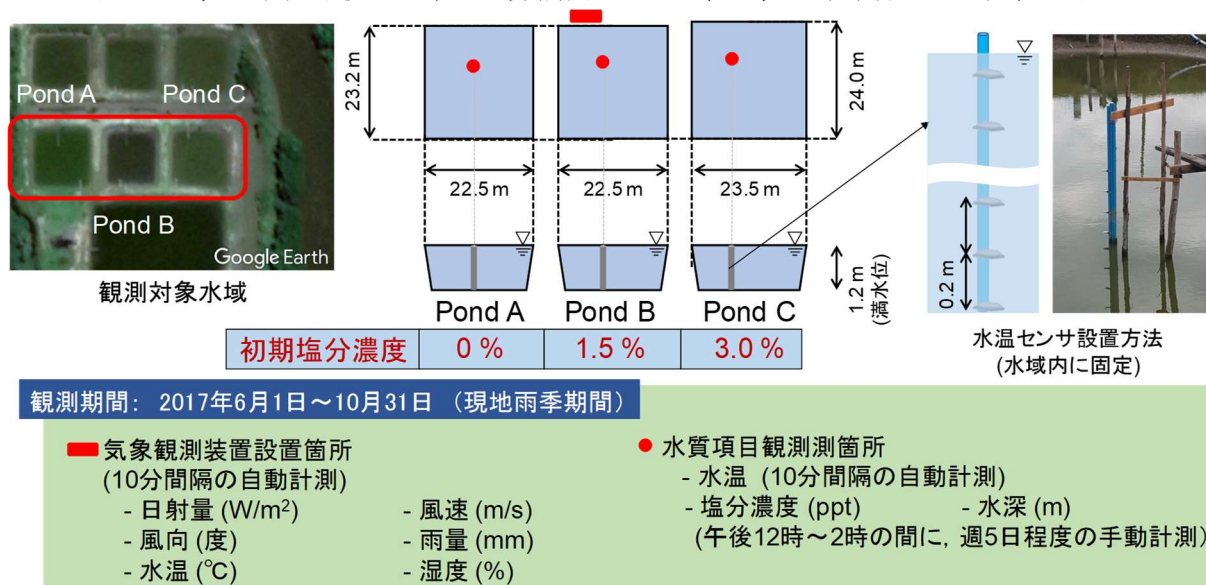


Fig. 1 実験水域模式図と観測項目

Schematic diagram of observation ponds and the measurements items

3. 現地観測結果

(1) 気象、水温鉛直分布の時系列変動

Fig. 2 および Fig. 3 に、全観測期間の気象変動および水温鉛直分布変動と水位変動を示す。気象変動に関連する値は、10分間隔で計測した値を用いて1時間平均値（日射量、風速、風向、湿度、気温）および1時間積算値（雨量）を算出し表示している。また、Fig. 4の鉛直方向は、水底からの高さを示しており、今回の観測では水温センサを水底から0.2 m間隔で固定して計測したため、水底を基準とした表示を用いる。Fig. 3より、気象変動の影響を捉えた基本的な水温変動パターンが、以下のように3つにまとめられる。

1. 降雨がなく日射量強い期間 → 黄色と緑色の縞模様（例えば、6月16日からの数日間）
日中で 35°C 程度（黄色）、夜間でも 30°C 程度（緑色）の水温状態が継続しており、比較的高い水温状態で水温日サイクル変動が発生している。
2. 降雨がなく日射量弱い期間 → 緑色と水色の縞模様（例えば、8月16日～9月1日）
日中で 30°C 程度（緑色）、夜間で 28°C 前後（水色）の水温状態が継続しており、昼夜を通して水

温差が比較的低い状態で水温日サイクル変動が発生している。

3. 降雨が継続する期間 → 水色もしくは青色（例えば、7月16日前後）

昼夜を通して27℃以下（水色・青色）の水温で推移しており、明確な水温日サイクル変動は確認できない。

上記3つの基本パターンを示す期間は、降雨や日射条件の変化により、別の変動パターンに変遷していく。また、いずれのパターンおよび水域においても、水域鉛直方向のコンター色がほぼ同一となっていることから、基本パターンの期間中は、水温成層が生じていなかったと考えられる。

一方、7月および10月のPond BおよびPond Cにおいて、水域中層から底層の水温が水面付近の水温より高い状態が継続している期間が確認できる。これらの状態が確認できる期間のPond Aの水温では同様の現象が確認できないことから、気象変動に伴う水域塩分状態の変化により、底層から中層にかけて熱塩対流による蓄熱が発生したと考えられる。本研究では、この特徴的な水温鉛直分布状態「下層高水温現象」とし、以下、この7月と10月に観測された現象について検討する。

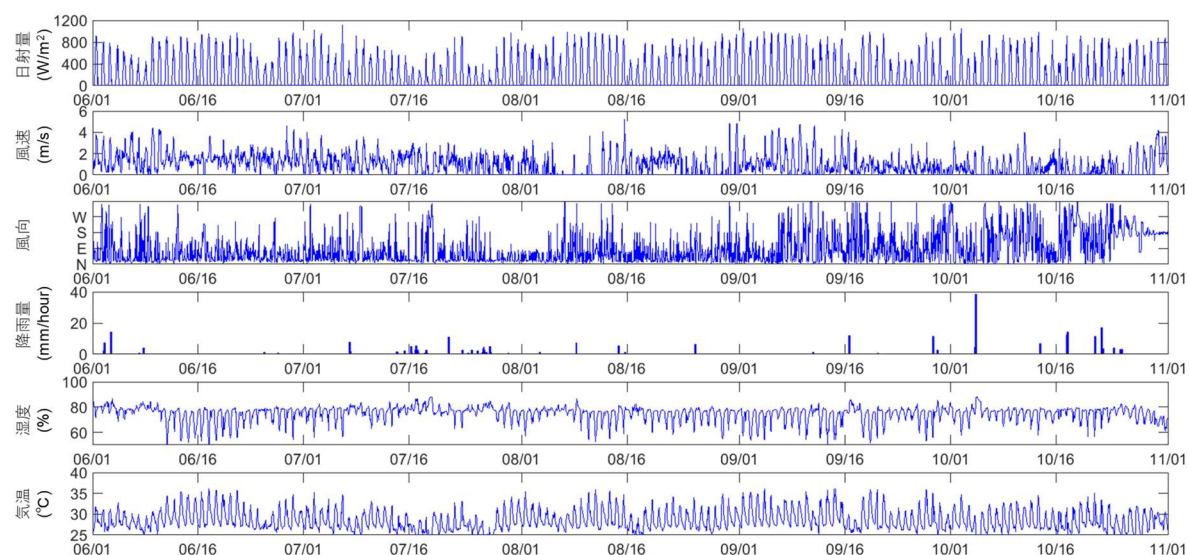


Fig. 2 全観測期間の気象変動
Variation of the weather for the entire observation period

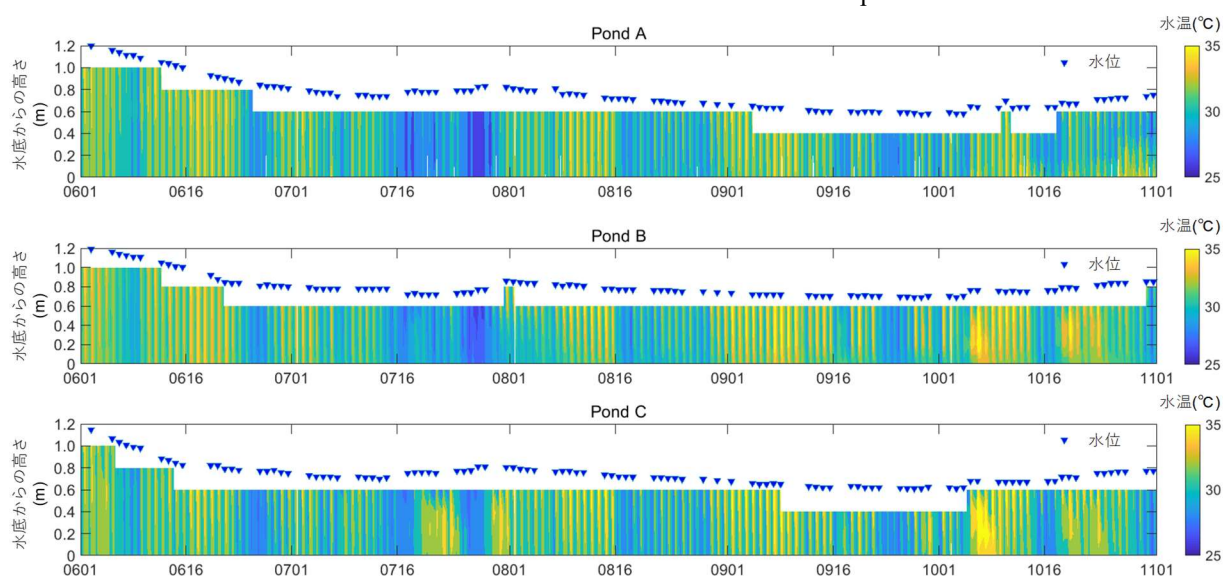


Fig. 3 全観測期間の水温鉛直分布変動
Variation of the water temperature for the entire observation period

(2) 7月の Pond C における下層高水温現象

7月の Pond B および Pond C で観測された下層高水温現象出現期間前後について、Fig. 4 に日射量、風速、降雨量および気温の時系列変動を、Fig. 5 に各水域における表層と水底から 0.2 m の高さ（以下、水底+0.2 m）の水温変動を、また、Fig. 6 に定期観測を行った水域中央部の塩分濃度の鉛直分布を示す。

Fig. 5 より、表層および水底+0.2m の水温変動が、Pond A では、日射および気温の時系列変動と同様の傾向で変動していること、また、表層および水底+0.2m の間の水温差がないことが確認できる。一方、Pond B および Pond C では、水底+0.2m の水温が日射および気温の時系列変動とは異なるパターンで変動し、水底+0.2m の水温が表層水温より高い状態があることが確認できる。この状態が本研究で扱う「下層高水温現象」であり、現象発生に伴い、特に水域中間層から下層に蓄熱が発生したと考えられる。

まず、Pond B における下層高水温現象は、7月16日から19日までおよび7月26日から28日までの短い期間であったことが確認できる。一方、Pond C における下層高水温現象は、7月16日より出現し、23日および26日の短い期間を除き、31日まで続いたことが確認できる。表層および水底+0.2m の水温差については、Pond B では最大2℃程度であるのに対し、Pond C では5℃を超える水温差が確認できる。これらの最大水温差を示す時間帯は、深夜から明け方であることから、表層では、放射冷却の影響を受けて水温が低下したことに対し、水底+0.2m では、日中の日射による蓄熱が放射冷却の影響を受けにくい状態であったことが考えられる。これらの期間の Pond A における水温が表層および水底+0.2m の間で差異がないこと、また、現象出現前後に降雨が継続して発生したことから、降雨に伴う塩分濃度状態の変化が下層高水温現象出現に影響したと考えられる。

塩分濃度状態の変化については、Fig. 6 に示す通り、塩分を含む Pond B および Pond C において、連日の降雨により7月17日以降の表層塩分濃度が低い値になっていることが確認できる。また、特に Pond C の7月19日から26日の塩分濃度鉛直分布については、上層の低塩分層、下層の高塩

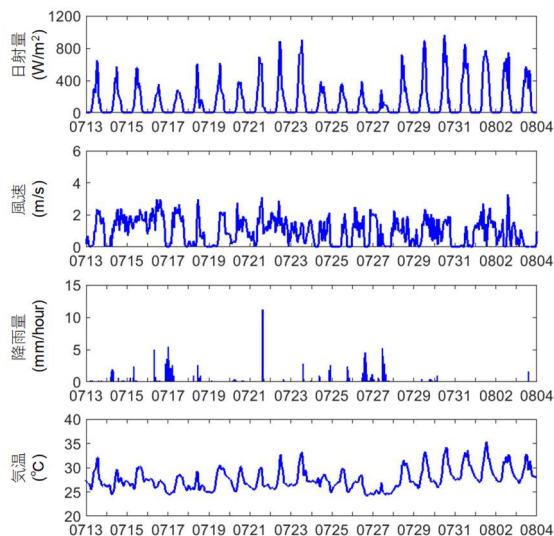


Fig. 4 7月下層高水温期間前後の気象変動
Variation of the weather before and after high-water temperature period on July

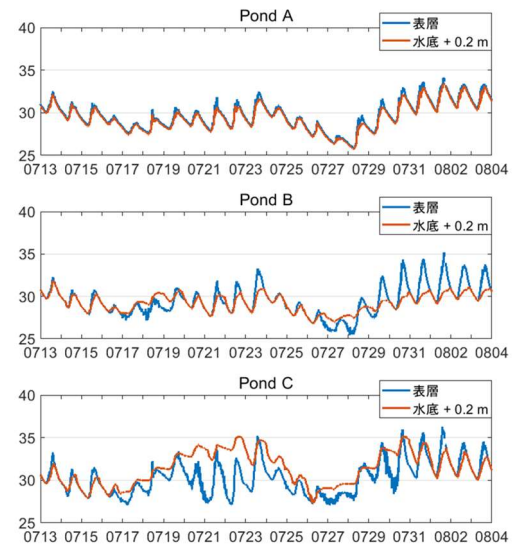


Fig. 5 7月下層高水温期間前後の水温変動
(表層・水底+0.2 m)

Variation of the water temperature before and after high-water temperature period on July
(Surface and 0.2 m above bottom)

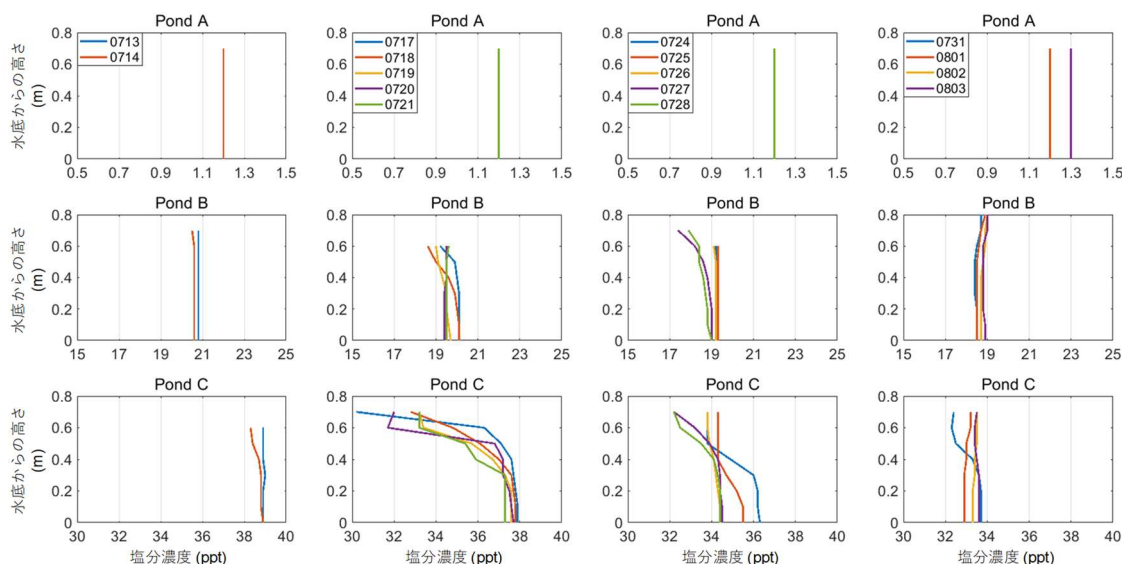


Fig. 6 7 月下旬高水温期間前後の塩分濃度鉛直分布
Density distribution for vertical direction before and after high-water temperature period on July

分層とその中間に位置する塩分濃度勾配層が明確に分離していることが確認できる．これらの塩分濃度鉛直分布の三層分離状態は，Tabor H. and Weinberger⁽³⁾がソーラーポンドによる蓄熱現象を対象として定義した，上層対流層の UCZ，下層対流層の LCZ および塩分濃度勾配を有する中間層非対流層の NCZ に相当するものと考えられ，塩水養殖池においても降雨と塩分濃度条件により，熱塩対流による蓄熱現象の発生条件が出現することを示している．この 7 月 19 日の PondC における三層分離状態は，その後の気象変動により 27 日にほぼ解消されているが，26 日から 27 日にかけて発生した降雨の影響により，31 日に再び三層分離状態が出現していることが確認できる．なお，Fig. 5 に示す表層と水底+0.2m の水温差は，UCZ および LCZ の塩分濃度差および NCZ の塩分濃度勾配の増加に伴い，水温差が高くなる傾向がわかる．8 月 1 日以降は，再び三層分離状態が解消されており，これに伴い，水底+0.2m の水温が表層水温より低い状態に戻っていることが確認できる．

(3) 10 月の Pond B および Pond C における下層高水温現象

前項と同様に，10 月に Pond B および Pond C で観測された下層高水温現象発生期間前後について，Fig. 7 に気温の時系列変動を，Fig. 8 に各水域における表層と水底+0.2 m の水温変動を，また，Fig. 9 に塩分濃度の鉛直分布をそれぞれ示す．

Fig. 8 より，Pond B および Pond C における下層高水温現象は，10 月 4 日から 8 日までの期間および 10 月 18 日から 25 日までの期間に出現したことが確認できる．なお，10 月の下層高水温現象については，7 月の PondC で出現した下層高水温とは異なり，日中の数時間のあいだ表層水温が水底+0.2 m の水温より高くなる傾向が確認された．表層および水底+0.2m の水温差については，10 月 4 日から 8 日までの期間の Pond B で最大 4℃程度，Pond C で 6℃程度，また，10 月 18 日から 25 日までの期間の Pond B で 3℃程度，Pond C で 4℃程度であった．

10 月 4 日からの下層高水温現象については，4 日午後 12 時から発生した 3 時間雨量 45.0 mm の降雨が契機となっており，この降雨の影響により，Fig. 9 に示す 10 月 5 日および 6 日に計測した鉛直方向塩分濃度が Pond B および Pond C において，下層対流層の LCZ と中層非対流層の NCZ を有

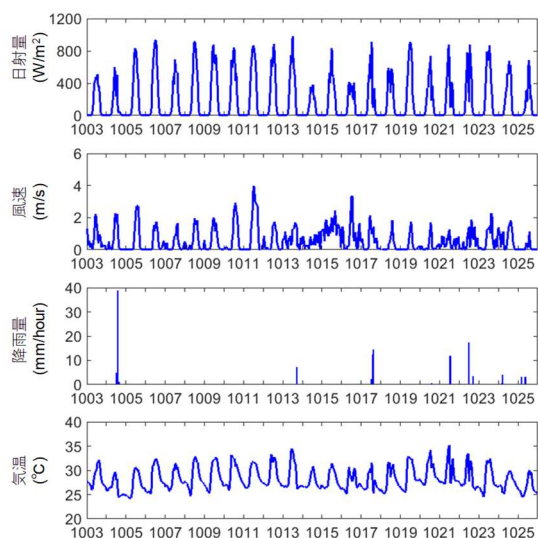


Fig. 7 10月下層高水温期間前後の気象変動
Variation of the weather before and after high-water temperature period on October

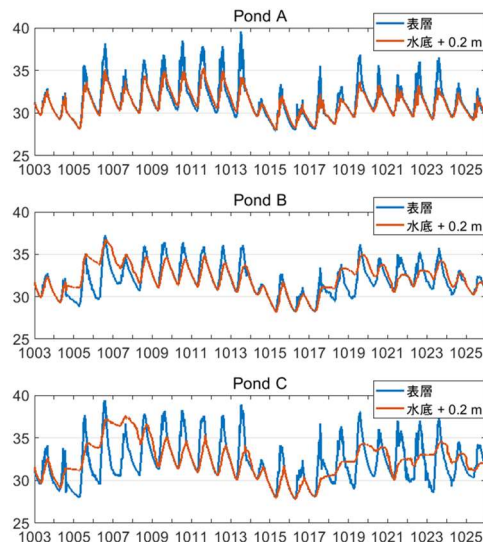


Fig. 8 10月下層高水温期間前後の水温度変動
(表層・水底+0.2 m)
Variation of the water temperature before and after high-water temperature period on October
(Surface and 0.2 m above bottom)

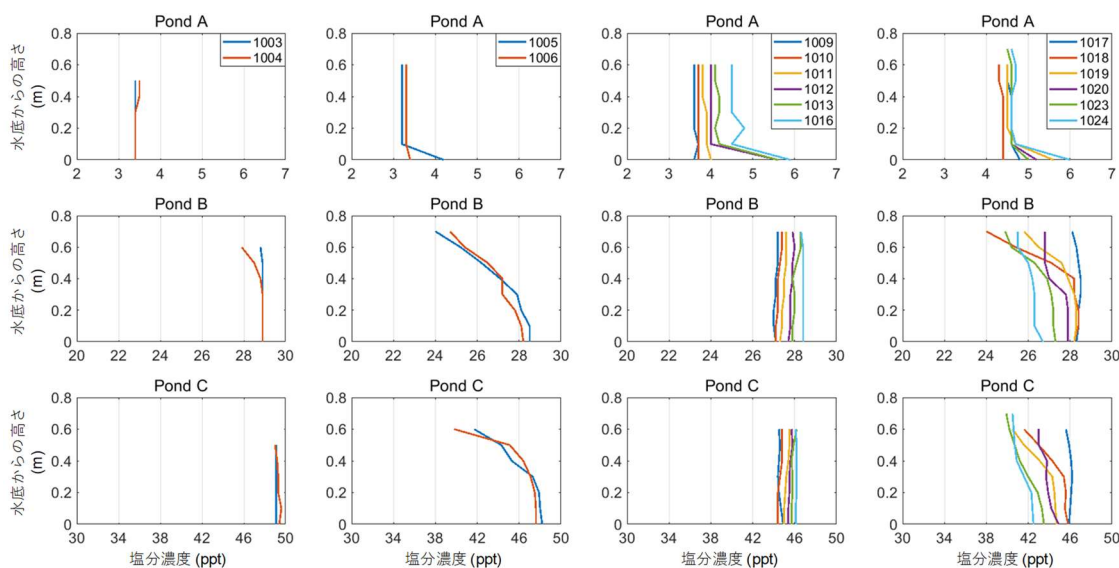


Fig. 9 10月下層高水温期間前後の塩分濃度鉛直分布
Density distribution for vertical direction before and after high-water temperature period on October

する分布となっている。しかしながら、7月の塩分濃度状態とは異なり、Pond B および Pond C ともに明確な上層対流層の UCZ は形成されておらず、このことが、日中の数時間のあいだ表層水温が水底+0.2 m の水温より高くなる傾向に関連すると推察する。塩分濃度勾配を有する NCZ は、Pond B および Pond C ともに 10 月 9 日には消滅しており、10 月 6 日の底層付近の塩分濃度に比べ、9 日の底層付近の塩分濃度が低下していることから、6 日から 9 日の期間に発生した日中の日射および夜間の放射冷却による熱対流と吹送流の効果により、塩分濃度の鉛直分布が一様化されたと考えられる。この塩分濃度の一様化に伴う NCZ の消失に伴い、下層付近の蓄熱効果も消失したと考えられる。

10月18日からの下層高水温についても同様に、17日午後12時から発生した3時間雨量29.2mmの降雨が契機となっており、Fig.9に示す10月18日以降の鉛直方向塩分濃度分布がPond BおよびPond CにおいてLCZとNCZを有する分布となっている。また、10月23日および24日には表層付近にUCZを有する分布となっている。これは、10月21日から23日に発生した降雨の影響によるものと考えられる。しかしながら、NCZの塩分濃度勾配が低い値であったことから、7月のPond Cで観測されたほどの蓄熱効果には至らなかったと考えられる。

4. 下層高水温現象による水域蓄熱量比較

Fig. 10に、7月および10月の下層高水温期間の各水域における、表層、中間層および底層の単位面積あたりの熱量（左軸）および全層水深平均の熱量（右軸）を示す。熱量 Q は、 $Q = \rho CT$ により算出した。ここで、 ρ は密度（ kg/m^3 ）、 C は比熱（ $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ）、 T は水温（ $^\circ\text{C}$ ）である。密度 ρ は、定期的に手動計測した塩分濃度および水温を用いて、M. Knudsen⁽⁷⁾によって定義された換算式により算出した。また、塩水の比熱は、Le Roy A. Bromley らの研究⁽⁸⁾によって得られた塩水比熱と水温の関係より算出した。なおFig. 10に示す熱量は、手動計測を行った時間帯が午後12時から2時の間であったことから、表層と底層+0.2mの水温差が最も高くなる深夜の時間帯の熱量比較ではないことに注意されたい。

Fig. 10より、まず7月の下層高水温期間については、7月17日よりPond BおよびPond Cの熱量が表層の熱量より中間層および底層の熱量が高くなっており、下層高水温による蓄熱が発生していることが確認できる。この状態は、Pond Bでは7月19日には解消されているのに対し、Pond Cでは、7月31日まで継続していることが確認できる。また、特にPond Cにおいて、下層高水温現象の出現以降、熱量の全層水深平均値が他の水域に比べ高い値で推移していることがわかる。

一方、10月の下層高水温期間については、10月4日から8日までおよび10月18日から25日までの二つの期間ともに、Pond Bでは表層の熱量より中間層および底層の熱量が高くなっているが、Pond Cでは表層の熱量がその他の熱量より高い値となっている。しかしながら、全層水深平均値を各水域で比較すると、特にPond Cでは高い値で推移しており、蓄熱効果が高かったと考えられる。

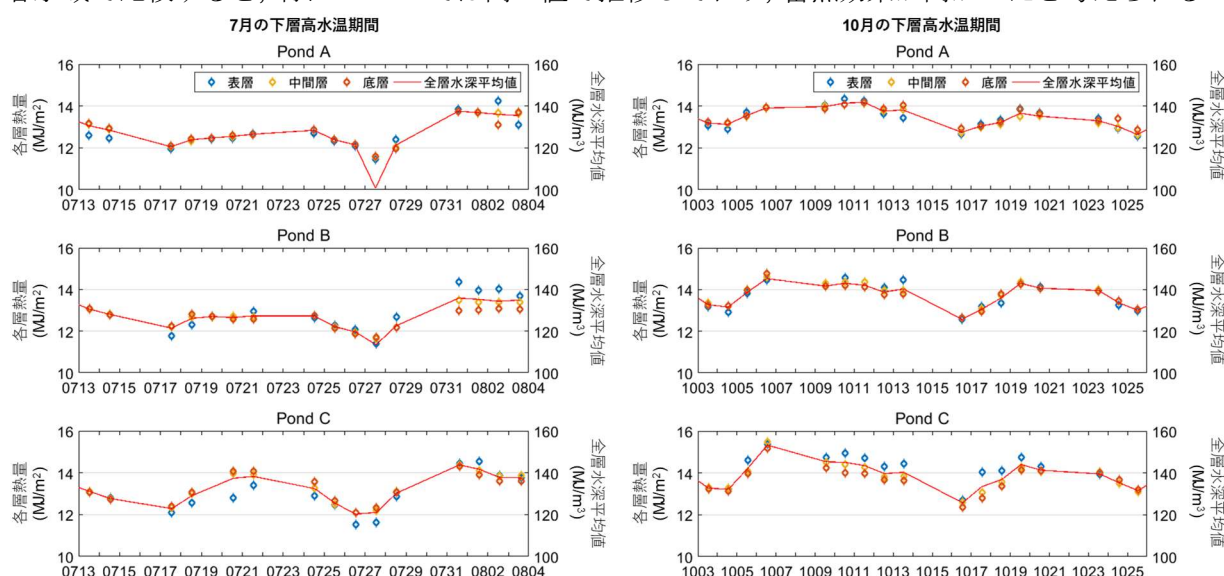


Fig. 10 7月および10月の下層高水温期間前後の熱量比較
Comparison data of heat quantity before and after high-water temperature period on July and October

5. まとめ

本研究では、熱帯塩水養殖池に発生する可能性がある熱塩対流による下層高水温現象について、初期塩分濃度が異なる実験水域において、気象変動および水環境変動の連続観測を行い、その発生および発達に関わる気象条件および下層高水温に伴う水域内蓄熱量に関する検討を行った。

本研究による連続観測により、熱帯塩水養殖池において発生する降雨の規模と状態により、ソーラーポンドの蓄熱基本原理として定義されている上層対流層の UCZ、下層対流層の LCZ および中間層非対流層の NCZ が出現することにより、ソーラーポンド現象と同様の下層高水温現象および下層蓄熱が発生することが明らかになった。また、UCZ が存在しない状態においても、蓄熱状態は不安定であるものの、一定度合いの蓄熱効果が確認された。

本研究による連続観測においては、水域塩分濃度条件が 20.5 ppt 以上および現象出現直前までの 48 時間降水量が 10.2 mm 以上の条件において、熱塩対流による下層高水温現象に伴う水域内蓄熱が確認できた。この現象出現条件については、水域の規模、気象条件等により異なると考えられることから、現象出現条件の特定については、さらな観測データの蓄積とデータの精査が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究（B）課題番号：16K1877）およびカシオ科学振興財団の助成を受けて実施したことをここに付記する。

参考文献

- (1) 柳瀬 真一郎：二重拡散対流のカオス，日本流体力学会誌「ながれ」，7 巻 1 号， pp.3-14, 1988.
- (2) Hüseyin Kurt, Fethi Halici and A.Korhan Binark, Solar pond conception -experimental and theoretical studies-, Energy Conversion and Management, Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 9, pp. 939-951, 2000.
- (3) Sura Tundee, Pradit Terdtoon, Phrut Sakulchangsattajai, Randeep Singh and Aliakbar Akbarzadeh, Heat extraction from salinity-gradient solar ponds using heat pipe heat exchangers, Solar Energy, Elsevier, Volume 84, Issue 9, pp. 1706-1716, 2010.
- (4) Enrique Busquets, Vinod Kumar, Javier Motta, Rene Chacon and Huanmin Lu, Thermal analysis and measurement of a solar pond prototype to study the non-convective zone salt gradient stability, Solar Energy, Volume 86, Issue 5, pp. 1366-1377, 2012.
- (5) H. Weinberger, The physics of the solar pond, Solar Energy, Volume 8, Issue 2, pp. 45-56, 1964.
- (6) Tabor H. and Weinberger, Non-convecting solar pond. So-lar Energy Handbook, Marcel Decker, New York, 1981.
- (7) M. Knudsen, Hydrographical Tables, G.E. Gad, Copenhagen, pp. 63, 1901
- (8) Le Roy A. Bromley, Valeria A. De Saussure, James C. Clipp, and James Sherman Wright, Heat capacities of sea water solutions at salinities of 1 to 12% and temperatures of 2.degree. to 80.degree., Journal of Chemical Engineering Data, Vol. 12, No. 2, pp. 202-206, 1967

漏水検知に向けた漏水中管路内の圧力波形減衰モデルの構築

Model Construction of “Damping of Time variation of Pressure” in Leakage Pipe for Leak Detection

○浅田洋平*、木村匡臣*、安瀬地一作**、飯田俊彰*、久保成隆*

○Asada Yohei*, Kimura Masaomi*, Azechi Issaku**, Iida Toshiaki*, and Kubo Naritaka*

1. はじめに

近年、農業用管水路の漏水破損事故は増加傾向¹⁾にあり、道路や宅地などの周辺地盤の陥没を引き起こすなど、社会に大きな損失をもたらしている。管路の既存の漏水調査方法としては、水張り試験法や相関法、音聴法といった方法が挙げられるが、多くの労力、時間を必要とし、一般的に検知精度も高くないという問題がある。以上から、農業用管水路において、漏水を簡便かつ正確に検知する新たな方法が求められている。

著者らは、通水中に管路末端弁を急閉塞することで、水撃作用による大きな圧力波を発生させ、管内の圧力波形の第1波から漏水位置と漏水量を推定する方法を提案した²⁾。しかし、推定手法の実証のために使用した模型管路は上流水槽から下流まで螺旋状の構造をしており、観測した圧力波形には管の曲がり部分に起因する高周波の圧力振動が存在した。これにより、小さな漏水では漏水変化が高周波振動と判別できず、漏水検知ができないこと明らかになった。これは分岐などより複雑な現場の管路においては圧力波形の第1波を利用した漏水検知手法を適用することは困難であることを露呈する形となった。この問題を解決するために本研究では、圧力波形の第1波で検知できない漏水に対して、より現実的な方法として水撃作用による圧力波形全体の違いから、漏水位置を推定することを検討した。先行研究では、実験管路における圧力波形と数値シミュレーションによる圧力波形との誤差が最小になるように、遺伝的アルゴリズムを用いて漏水位置や漏水量などのパラメーターを最適化して導出している³⁾場合が多いが、この方法は計算量が膨大であり、漏水を検知するまでに時間を要するため実用的ではない。また、Xiao-Jian⁽⁴⁾らは、漏水を考慮した運動方程式と連続的に数学的处理を行い、漏水中の圧力の時間変動を解として算出し、圧力波形の減衰と漏水位置との関係を明らかにすることで漏水位置の検知を試みている。しかしながら、漏水位置によっては実際の漏水位置とかけ離れた漏水位置を推定するなど、提案されている圧力波形の減衰と漏水位置との関係性には疑問が残る。そこで、本研究では、圧力波形の減衰に着目し、圧力波形の減衰の差異から漏水位置を検知することを目指し、まず第1段階として漏水中管路内の圧力波形の減衰メカニズムを解明することを目的とした。

2. 漏水中管路内の圧力波形の減衰メカニズム

水撃作用時の管内の圧力波の挙動について

全長 L (m) の直線管路において、摩擦を考慮せず、すべての地点で静水圧が P_0 (Pa) で一定であり、上流から下流に向かって流速 U (m/s) で水が流れている状態を考える。下流端のバルブを急閉塞すると水撃作用による圧力波が発生し、管内を伝播する。図-1 は水撃作用が発生してから t 秒後の管内における圧力波の伝播の様子を示している。図の縦軸 P は管内圧力(Pa)、横軸 x は管路

*東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

**農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO

の水平位置を表しており、 $x = 0$ が下流端、 $x = L$ が上流端である。また、 ΔP は水撃作用による圧力上昇量であり、 c は管内の圧力伝播速度(m/s)を示している。水撃作用が発生すると、まず、変化量 ΔP の正の波が上流に向かって進み、通過した場所の流速は 0 となる (図-1 ①)。上流端で圧力波は固定端反射をするので、変化量 $-\Delta P$ の負の波となって下流端に進み、波が通過した場所の圧力は P_0 、流速は $-U$ となる (図-1 ②)。

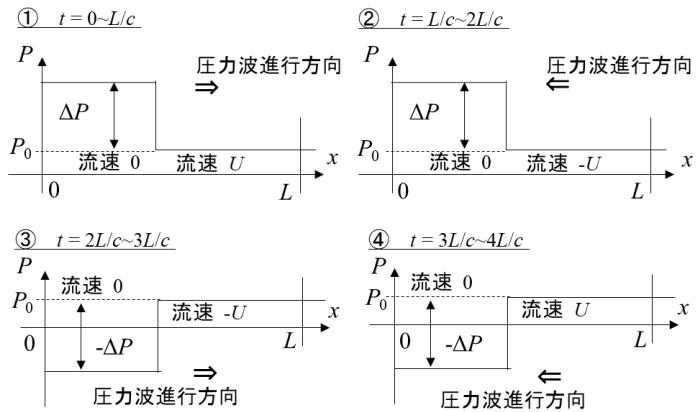


図-1 管内における圧力波の伝播の様子

下流端で圧力波は自由端反射をするので、変化量 $-\Delta P$ の負の波がそのまま上端端に向かって進み、通過した場所の圧力は $P_0 - \Delta P$ 、流速は 0 となる (図-1 ③)。最後に上流端を反射した変化量 ΔP の正の波が下流端に向かって進み、通過した場所の圧力は P_0 、流速は U となり、バルブを閉める前の状態に戻る (図-1 ④)。また、管内の圧力が上昇、下降するのに応じて管は膨張と収縮を繰り返している。以上から、圧力波は管路を 2 往復する時間を 1 周期として、伝播を繰り返していることがわかる。本章では、摩擦を考慮せず、漏水がある管路において、圧力変化量 ΔP が減衰していく仕組みについて明らかにする。漏水がある管路では、水撃作用発生直後から、漏水部から水が抜け出ることによって、管路全体エネルギーは減少するため、圧力変化量 ΔP の減衰と管路全体のエネルギーの減少には密接な関係があると考えられる。よって、本研究では、水撃作用発生直後からの管路全体のエネルギーの減少について考えることで、圧力変化量 ΔP の減衰メカニズムを解明する手法を採用する。

摩擦なし、漏水がある場合の管路全体のエネルギーの減少について

全長 $L(\text{m})$ の直線管路において、上流端から $\alpha L(\text{m})$ ($0 < \alpha < 1$) の位置に漏水がある場合を考え、摩擦は考慮しない。漏水部の圧力が P_0 の場合、すなわち漏水部に圧力波が到達していない場合は、管全体のエネルギーは保存されるので、管全体のエネルギーは減衰しない。よって、漏水部の圧力が $P_0 + \Delta P$, $P_0 - \Delta P$ の場合におけるエネルギーの減衰を導出する。まず、漏水部の圧力が $P_0 + \Delta P$ における管路内のエネルギー収支を考える。漏水部より上流側の初期流量を Q_{up} 、漏水部より下流側の初期流量を Q_{down} 、初期漏水量を Q_{leak} 、漏水部の圧力が $P_0 + \Delta P$, $P_0 - \Delta P$ の場合の初期漏水量 Q_{leak} 、からの漏水量変化量を ΔQ_{leak} とおく。最初に圧力波が漏水部に達してから Δt 秒間の上流端から管路へのエネルギー流入 $\Delta E^u_{t=\Delta t}$ は (1) 式となる。

$$\Delta E^u_{t=\Delta t} = P_0 Q_{up} \Delta t \quad (1)$$

圧力波が通過すると、その場所における水の体積は縮み、管は膨張する。水の元の体積を $V_0 (= A_0 c \Delta t)$ (m^3)、 A_0 は管断面積 (m^2)、体積変化を ΔV_w (m^3)、水の弾性係数を E_w (Pa) とおくと、水におけるひずみ $\Delta V/V_w$ と圧力変化 ΔP の関係は (2) 式ようになる。また、管が膨張することによる体積変化を ΔV_p 、管径を D (m)、管の厚みを b (m)、管の弾性係数を E (Pa) とおくと、管におけるひずみ $\Delta V/V_p$ と圧力変化 ΔP の関係は (3) 式が成立する。

$$\Delta P = -E_w \frac{\Delta V_w}{V_0} \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{bE}{D} \frac{\Delta V_p}{V_0} \quad (3)$$

Δt 秒間の間に管に蓄えられるエネルギー $\Delta E_{t=\Delta t}^K$ は、水が縮むことにより蓄えられるエネルギーと管が膨張することにより蓄えられるエネルギーの合計なので、図2の色付けされた面積からそれぞれのエネルギーを求めると、 $\Delta E_{t=\Delta t}^K$ は、(4)式のように表すことができる。

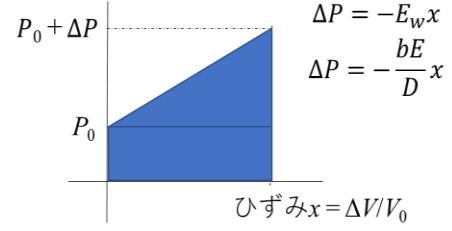


図-2 ひずみと圧力変化量の関係図

$$\Delta E_{t=\Delta t}^K = -\Delta P V_0 \left(P_0 + \frac{\Delta P}{2} \right) \left(\frac{1}{E_w} + \frac{D}{bE} \right) \quad (4)$$

Δt 秒間において、漏水部から流出するエネルギーは $\Delta E_{t=\Delta t}^{leak}$ は、

$$\Delta E_{t=\Delta t}^{leak} = - (P_0 + \Delta P) (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) \Delta t \quad (5)$$

Δt 秒間において、管路中の水が失う運動エネルギー $\Delta E_{t=\Delta t}^m$ は、

$$\Delta E_{t=\Delta t}^m = -\frac{1}{2} \rho V_0 \left(\frac{\Delta Q}{A_0} \right)^2 \quad (6)$$

ここで、水の密度を $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、水撃作用による流量変化を ΔQ とおくと、ジューコフスキーの式から(7)式、圧力伝播速度の理論式から(8)式が成立する。

$$\Delta P = -\frac{\rho c \Delta Q}{A_0} \quad (7)$$

$$\frac{1}{E_w} + \frac{D}{bE} = \frac{1}{\rho c^2} \quad (8)$$

(1)~(6)より Δt 秒間における管路全体のエネルギー変化 $\Delta E_{t=\Delta t}$ は、以下の(9)式となる。

$$\Delta E_{t=\Delta t} = P_0 Q_{up} \Delta t + P_0 \Delta Q \Delta t - \frac{1}{2} \rho V_0 \left(\frac{\Delta Q}{A_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_w} + \frac{D}{bE} \right) V_0 \Delta P^2 - (P_0 + \Delta P) (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) \Delta t \quad (9)$$

(7)、(8)式、 $V_0 = A_0 c \Delta t$ から(9)式の右辺第3項(運動エネルギー変化)と右辺第4項(弾性エネルギー変化)の和は0となり、また $\Delta Q = (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) - Q_{up}$ を(9)式に代入することで、 $\Delta E_{t=\Delta t} = -\Delta P (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) \Delta t$ となる。以上から、漏水部の圧力が $P_0 + \Delta P$ の場合では、 $-\Delta P (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) \Delta t$ だけエネルギーが減少し、同様に漏水部の圧力が $P_0 - \Delta P$ の場合についてエネルギー収支を考えると $\Delta P (Q_{leak} + \Delta Q_{leak}) \Delta t$ だけエネルギーが増加する。漏水部圧力が P の場合の漏水量 Q_{leak} はオリフィスの式を用いて(10)式のように求められる(a は漏水孔面積)。

$$Q_{leak} = a \sqrt{\frac{2}{\rho} P} \quad (10)$$

圧力波が2往復する間(=1周期)に漏水部圧力が $P_0 + \Delta P$ 、 $P_0 - \Delta P$ となる時間は、それぞれ $2aL/c$ なので1周期の間に管路が失うエネルギー $\Delta E_{t=0 \sim 4L/c}$ は(11)式のように求められる。

$$\Delta E_{t=0 \sim \frac{4L}{c}} = -\Delta P a \frac{2aL}{c} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta P}{P_0}} - \sqrt{1 - \frac{\Delta P}{P_0}} \right) \quad (11)$$

(11)式の括弧内の項を1次近似し、整理すると管路全体のエネルギー(弾性エネルギー)の減衰に関する式は(12)式のようになる。

$$\frac{\Delta \left(\frac{V_0(\Delta P)^2}{2\rho c^2} \right)_{t=0-\frac{4L}{c}}}{4L/c} = -\Delta P a \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \frac{\Delta P}{P_0} \quad (12)$$

これを解くと、圧力上昇量 ΔP の減衰に関する式は(13)式のように表すことができる。

$$\Delta P = \Delta P_0 \exp \left(- \sqrt{\frac{\rho}{2P_0}} \frac{c^2 a}{L A_0} \alpha t \right) \quad (13)$$

(13)式より、 α が大きくなるほど ΔP の減衰が大きくなることがわかり、以上から漏水部が下流側にあるほど圧力波形の減衰が大きくなることが示された。

3. 数値シミュレーションによる圧力波形の減衰メカニズムの検証

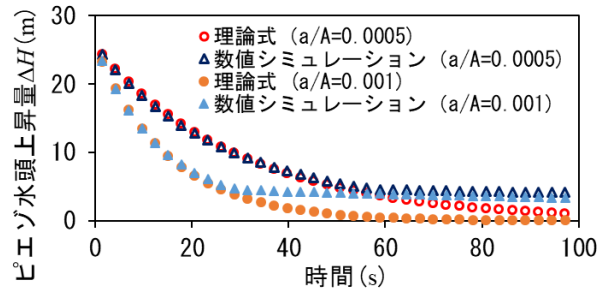
数値シミュレーションの基礎式は(14), (15)式に示す運動方程式と連続式であり、特性直線法によって計算を行った。 H はピエゾ水頭(m)を表す。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

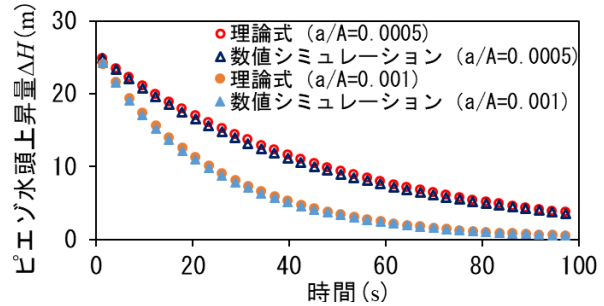
$$\frac{c^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

漏水部がある場合の数値シミュレーションでは、漏水部を内部境界条件によって表現し、(10)式によって求められる漏水量（ただし、 $P = \rho g H$ ）が流出すると考えて計算を行った。全長 900 m の直線管路を想定し、漏水部は上流端から 150 m, 450 m, 750 m の 3 パターンに設定した。また、漏水孔面積比 a/A は 0.001 と 0.0005 の 2 パターンとした。漏水部を 3 パターン、漏水孔面積比を 2 パターンの計 6 パターンについて摩擦なしで漏水がある場合の減衰メカニズムの検証を行った。静水圧水頭 P_0 が 30 m, 漏水部下流流量が $8.77 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ を初期値として、非定常計算によって水撃作用が発生してから 100 秒間の下流端の圧力波形を算出した。そして、求めた圧力波形から初期ピエゾ水頭を差し引いて絶対値をとった値を 1 周期ごとに平均してグラフにプロットすることでピエゾ水頭の上昇量 $\Delta H (= \Delta P / \rho g)$ の減衰曲線を作成した。これと(13)式によって得られる ΔH の減衰曲線が合致しているかどうかを確認することで、2.で解明した圧力波形の減衰メカニズムの検証を行った（図-3）図-3では、漏水部が 750 m 地点、150 m 地点の場合

a) 漏水部が 750m 地点の場合



b) 漏水部が 450m 地点の場合



c) 漏水部が 150m 地点の場合

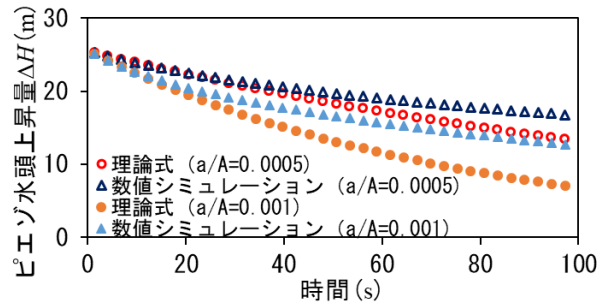


図-3 数値シミュレーションと理論式による減衰曲線（摩擦なし、漏水ありの場合）

は理論式と数値シミュレーションの減衰曲線の差が時間の経過とともに広がっているのに対して、漏水部が 450 m 地点では、概ね一致していると言える。これは本研究の減衰メカニズムが漏水によるエネルギー流出だけを考慮し、漏水部からの反射波の影響を無視していることが原因と考えられる。a)漏水部が 750 m 地点、すなわち管路の下流側にある場合はエネルギーの流出の影響が大きい。ため最初の段階では減衰曲線は一致するが、時間の経過とともに数値シミュレーションの減衰曲線の傾きが途中で非常に緩やかになる。これはある段階で時間の経過とともに大きくなった反射波によって漏水部の圧力変化 ΔP が打ち消され、以降反射波だけの影響で漏水部からのエネルギー流出が起こり、その量が非常に小さいためである。c)漏水部が 150 m 地点、すなわち管路の上流側にある場合ではエネルギー流出が小さいため、初期段階から相対的に漏水部の反射波の影響は大きく、漏水部が 750 m 地点の場合よりも早い段階で減衰曲線の差は拡大する。また、漏水孔面積比が縮小するにつれて反射波の影響は小さくなるので、a),c)どちらの場合も漏水孔面積比が 0.0005 の場合のほうが減衰曲線が合致している時間は長くなる。b)漏水部が 450 m 地点、すなわち管路の中間点にある場合は、漏水部から発生した反射波は漏水部に再び到達したときに同じ大きさで逆位相の波と衝突し打ち消しあうので、漏水部からの反射波の影響は非常に小さく、2. で示した減衰メカニズムで圧力波形の減衰を再現することができた。

4. 実験値と圧力波形の減衰メカニズムとの比較

2.では、漏水中管路内の圧力波形の減衰モデルを摩擦がない場合で導出をおこなったが、実際の圧力波形では摩擦による減衰も生じる。

実際の圧力波形の再現には 3 章で示した (14) 式の運動方程式に単位長さ当たりの摩擦損失水頭 $h_f(t)$ を加えて、(15) 式の連続式とともに数値シミュレーションを行うのが普通である。さらに摩擦項 $h_f(t)$ は以下の (16) 式のように、定常の摩擦項 h_s と非定常の摩擦項 h_u の和で表し、非定常の摩擦項は Zielke⁽⁵⁾が示した平均流速の変化率と重み関数 $W(t)$ の畳み込み積分で求めた。 λ は摩擦損失係数、 D は管径(m)、 ν は動粘性係数(m²/s)、 t^* は積分定数を示している。この非定常の摩擦項については今までに様々なモデルが提案されている⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾が、完璧なモデルというものは存在しない。

$$h_f = h_s + h_u = \frac{\lambda Q |Q|}{2gDA^2} + \frac{16\nu}{gD^2} \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t^*} W(t - t^*) dt^* \quad (16)$$

既存の研究では、このような数値モデルによる数値シミュレーションを用いて逆解析のよって漏水位置を求める方法が提案されているが、1 章で述べたとおり計算時間が膨大であり、手間がかかるのが難点である。本章では、2 章で導出した摩擦なし、漏水ありの減衰モデルを拡張して、実際の圧力波形の減衰を表現できないか検討を行った。

まず、図-4 に示す全長 900m、管径 0.0242m、管厚 0.0015m、圧力伝搬速度 1313m/s のステンレス製のパイプラインを用いて、漏水なし、漏水がある条件それぞれについて水撃作用により圧力変動を発生させ、下流端で圧力波形を計測することで、実際の圧力波形の減衰の性質を確認する。そして、その得られた知見をもとに実際の圧力波形の減衰に適用できるような減衰モデルの改良を行った。図-5 に漏水がない場合、図-6 に漏水が上流端から 750m 地

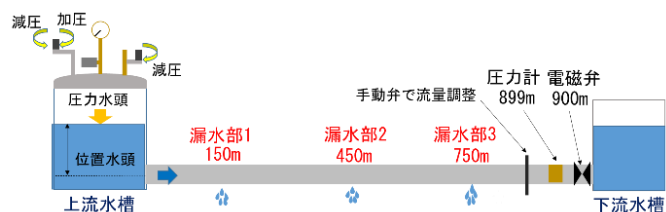


図-4 実験で使用する模型管路の模式図

点にあり，漏水孔の大きさ $aC_d/A = 0.000235$ の場合におけるピエゾ水頭の時間変動とピエゾ水頭変化量の絶対値を 1 周期ごとに平均化した値をプロットしたグラフを示す。図 5, 6 から漏水がない場合，漏水がある場合ともに，初期の段階で圧力波形は指数関数的に減衰することが明らかになった。摩擦なし，漏水ありの減衰モデルにおいても，圧力波形は指数関数的に減衰することが明らかになっているので，漏水がない場合の圧力波形に近似するような指数関数を求め，その指数である減衰パラメーター R を減衰モデルの指数関数の指数に足し合わせることで，実際の圧力波形を再現する以下の (17) 式のような理論モデルが構築できると予想される。

$$\Delta P = \Delta P_0 \exp \left(- \left(\sqrt{\frac{\rho}{2P_0}} \frac{c^2 a}{L A_0} \alpha + R \right) t \right) \quad (17)$$

図 5 から漏水がない場合の減衰パラメーター R は $R=0.114$ となり，(13) 式から求められるピエゾ水頭変化量 ΔH の絶対値の 1 周期ごとのプロットと実際の圧力波形のプロットを比較したものを図 7 に示す。実測値の圧力波形の減衰率が 0.139 に対して，改良した理論モデルの圧力波形の減衰率は 0.132 であった。改良した理論モデルの圧力波形の減衰率が実測値と同様に 0.139 となるように漏水孔の大きさ aC_d/A を調整すると， $aC_d/A=0.00033$ となりこの時の漏水位置は理論モデルから 534m となり，750m とはかけ離れている。以上のことから減衰率が 0.139 と 0.132 の差というのは，非常に大きな差であり，この理論モデルを漏水位置検知に利用する場合，漏水孔の大きさの測定精度が重要になってくる。今後は水張り試験法を利用した漏水孔の大きさの測定を前提とした，減衰モデルによる漏水位置検知の有効性についてより詳細に検討を進めていきたい。

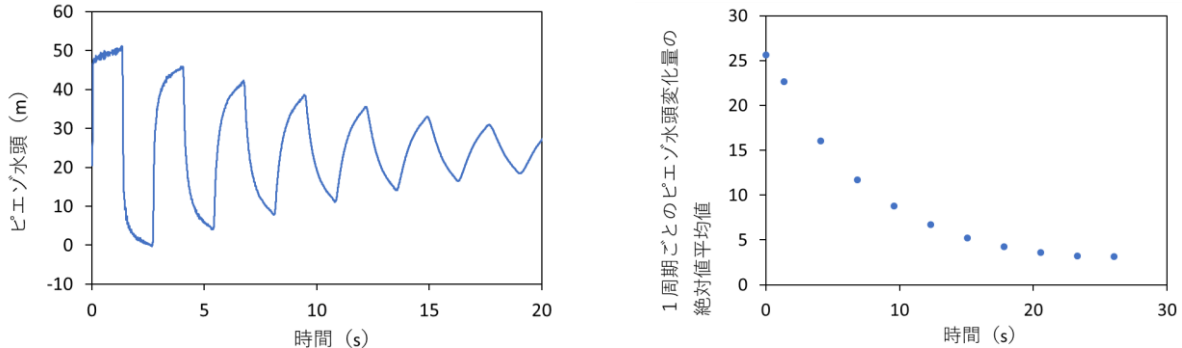


図-5 漏水なしの場合におけるピエゾ水頭変化量グラフとピエゾ水頭の絶対値の 1 周期平均値のプロットグラフ

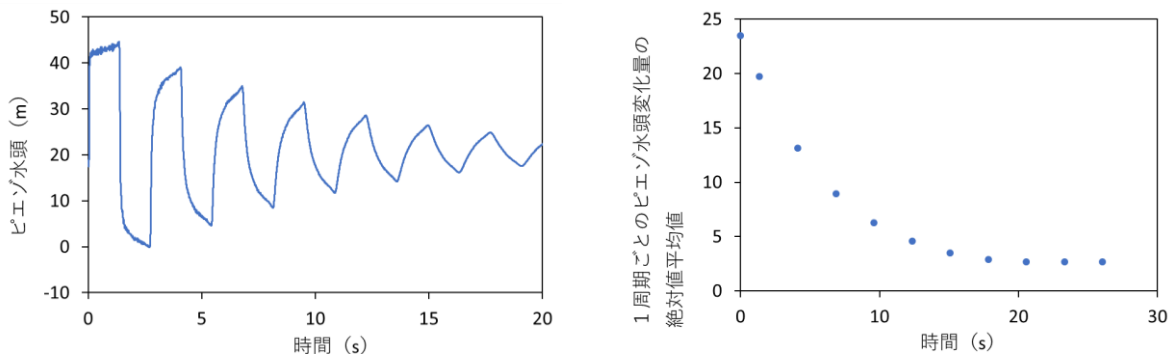


図-6 漏水ありの場合（漏水位置が上流端から 750m 地点）におけるピエゾ水頭変化量グラフとピエゾ水頭の絶対値の 1 周期平均値のプロットグラフ

5. 結論

本研究では、水撃作用中の漏水によるエネルギー流出を理論的に求めることで、摩擦なし、漏水ありの条件下での圧力波形の減衰メカニズムの解明を行った。数値シミュレーションを用いて、導出した減衰メカニズムの検証を行ったところ、水撃作用が発生してから初期の段階では、本研究の減衰メカニズムによって管路内の減衰を説明することが可能であることが明らかになった。

また、摩擦による減衰パラメーター R を導入し、理論モデルの指数関数の指数に足し合わせることで摩擦の減衰を含んだ実際の圧力波形の減衰を簡便に再現できることが明らかになった。今後、水張り試験法と本減衰モデルを組み合わせた漏水検知法について様々な条件下でその有効性について調査を行う予定である。

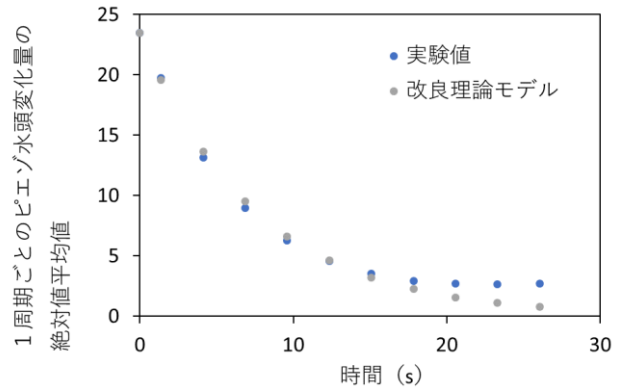


図-7 実測値と改良減衰モデルから求めた圧力波形の減衰の比較図

参考文献

- 1) 農村振興局：「農業水利施設の機能保全の手引き」ーパイプライン編ーの策定について, pp.8-9, 2009.
- 2) 浅田洋平, 木村匡臣, 安瀬地一作, 飯田俊彰, 久保成隆：漏水中の管水路における水撃圧波形を利用した漏水位置と漏水量の推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_613-I_618, 2018.
- 3) Jeffrey Truck and Pedro Lee : Inverse Transient Analysis for Classification of Wall Thickness Variations in Pipelines, Sensors 13, pp.17057-17066, 2013.
- 4) Xiao-Jian Wang, Martin F. Lambert, Angus R. Simpson, M.ASCE, James A. Liggett, and John P. Vítkovsky', "Leak Detection in Pipelines using the Damping of Fluid Transients", J. Hydraul. Eng., (2002), 128(7), pp.697-711.
- 5) Zielke, W.(1969) : Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, seriesD, Vol.91, No.4, pp.1-7.
- 6) Trikha, A.K. (1975) : An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol.97, pp.97-105.
- 7) Suzuki, K., Taketomi, T., and Sato, S. (1991) : Improving Zielke's Method of Simulating Frequency-Dependent Friction in Laminar Liquid Pipe Flow, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol.113, pp.569-573.
- 8) Mohamed S. Ghidaoui, M.ASCE, and Sameh Mansour(2002) : Efficient Treatment of the Vardy-Brown Unsteady Shear in Pipe Transients, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.1, pp.102-112.
- 9) 香川利治, 李一永, 北川能, 竹中利夫(1983) : 特性曲線法における非定常層流圧力損失の高速高精度計算法, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.49, No.447, pp.2638-2644.
- 10) Vardy, A.E., and Brown, J.M. (1995) : Transient, Turbulent, Smooth Pipe Friction, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.33, No.4, pp.435-456.

A discrete time dynamic programming problem for a plant growth model with controlled parameters

(パラメータが制御される植物生育モデルに対する離散時間動的計画問題)

○Koichi Unami¹, Yamato Fujikura¹, Meni Arai², Masayuki Fujihara¹

¹Graduate School of Agriculture, Kyoto University

²Faculty of Agriculture, Kyoto University

1. Introduction

Recent studies of ours have revealed appearance of discontinuities in value functions solving some Bellman equations for discrete time dynamic programming (DP) problems [3,4]. It has also been suggested that another discrete time DP problem can be formulated for better cultivation of a plant species irrigated with both freshwater and saline water, which significantly affect growth of the plant [1]. Here, a discrete time stochastic DP problem is presented for the plant growth model. Properties of the associated Bellman mapping are discussed, showing that it is non-expansive with respect to the uniform norm. A computational example using the model parameters estimated from measurements in the real-world indicates pathological behavior of the optimal treatment policy.

2. Formulation of a discrete time DP problem

We consider a choice of treatment k as the control variable u_t at the time stage t , to cultivate a plant whose growth dynamics is modeled as

$$X_{t+1} = \alpha_k + r_k X_t \quad (1)$$

where X_t is the growth level at the time stage t , α_k is the discrete time arithmetic growth rate under the treatment k , and r_k is the discrete time geometric growth rate under the treatment k . However, the plant under the treatment k may die before the next time stage $t+1$ with a probability $P_{0,k}$. In that case, another seedling with the growth level of $x_{\min}$ is planted at the time stage $t+1$. Thus, the transition probability from a growth level to another is represented as

$$P(X_{t+1} = \xi | X_t = x, u_t = k) = \begin{cases} P_{1,k} & \text{if } \xi = \alpha_k + r_k x \\ P_{0,k} & \text{if } \xi = x_{\min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

where $P_{1,k} = 1 - P_{0,k}$. Let K and U be the set of growth levels x to be considered and the set of options of treatment k to be chosen on the base of full information on X_t , respectively. A map from K to U is referred to as a treatment policy π . To evaluate the speed of growth to achieve a target growth

level $x_{\max}$, the performance index under a treatment policy π is defined as

$$\Phi^\pi = \Phi^\pi(s, x) = E[\tau - s] \quad (3)$$

where s is the current time, E represents the expectation, and τ is the first exit time of X_t from K , which is now considered as $K = [x_{\min}, x_{\max}]$. The optimal treatment policy π^* achieves the infimum $\Phi(s, x)$ of $\Phi^\pi(s, x)$ as

$$\Phi(s, x) = \Phi^{\pi^*}(s, x) \leq \Phi^\pi(s, x) \quad (4)$$

for any treatment policy π . This $\Phi^s = \Phi(s, x)$ is referred to as the value function defined on K . According to the DP principle [2], the Bellman equation governs $\Phi(s, x)$ as

$$\Phi(s, x) = \min_{k \in U} \left\{ P_{0,k} (1 + \Phi(s+1, x_{\min})) + P_{1,k} H(\Phi^{s+1}, x, k) \right\} \quad (5)$$

where $H(\Phi^t, x, k)$ is the Hamiltonian defined as

$$H(\Phi^t, x, k) = \begin{cases} \frac{x_{\max} - x}{\xi - x} & \text{if } \xi \geq x_{\max} \\ 1 + \Phi(t, \xi) & \text{if } \xi < x_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

with $\xi = \alpha_k + r_k x$. The mapping $\Phi^t = \Phi(\Phi^{t+1})$ prescribed by the Bellman equation (5) is referred to as the Bellman mapping.

3. Properties of the Bellman mapping

It is shown that the Lipschitz constant of the Bellman mapping does not exceed unity with respect to the uniform norm. Let two sequences $\{v_i^t\}$ for $i \in \{0, 1\}$ satisfy $v_i^t = \Phi(v_i^{t+1})$. For each x , $j \in \{0, 1\}$ and $k_j^t \in U$ are chosen so that

$$v_j^t(x) = P_{0,k_j^t} (1 + v_j^{t+1}(x_{\min})) + P_{1,k_j^t} H(v_j^{t+1}, x, k_j^t) \leq v_\mu^t(x) \quad (7)$$

where $\mu = \text{mod}(j+1, 2)$ and let

$$w_\mu^t(x) = P_{0,k_j^t} (1 + v_\mu^{t+1}(x_{\min})) + P_{1,k_j^t} H(v_\mu^{t+1}, x, k_j^t) \quad (8)$$

This leads to the evaluation

$$\begin{aligned}
& |v_0^t(x) - v_1^t(x)| \\
&= v_\mu^t(x) - v_j^t(x) \leq w_\mu^t(x) - v_j^t(x) \\
&\leq P_{0,k_j} (v_\mu^{t+1}(x_{\min}) - v_j^{t+1}(x_{\min})) \\
&+ \begin{cases} 0 & \text{if } \xi \geq x_{\max} \\ P_{1,k_j} (v_\mu^{t+1}(\xi) - v_j^{t+1}(\xi)) & \text{if } \xi < x_{\max} \end{cases}
\end{aligned} \tag{9}$$

with $\xi = \alpha_k + r_k x$, and then

$$\begin{aligned}
& \|v_0^t(x) - v_1^t(x)\|_\infty \\
&\leq P_{0,k_j} |v_0^{t+1}(x_{\min}) - v_1^{t+1}(x_{\min})| \\
&+ P_{1,k_j} |v_0^{t+1}(\xi) - v_1^{t+1}(\xi)| \\
&\leq C \|v_0^{t+1}(x) - v_1^{t+1}(x)\|_\infty
\end{aligned} \tag{10}$$

where $\|v\|_\infty = \sup_{x \in K} |v(x)|$, and C is a coefficient of

$0 < C \leq 1$. It may be conjectured that the value function $\Phi(t, x)$ is bounded, non-increasing with respect to x , and converging to a steady state, which is the fixed point of the mapping φ .

4. A computational example

In the previous study [1], the growth of the irrigated plant was measured every month in terms of tree heights (cm), and then the model parameters of (1) have been estimated as $(\alpha_0, r_0) = (8.091, 0.99935)$ for freshwater irrigation ($k = 0$) and $(\alpha_1, r_1) = (0.6176, 1.0228)$ for saline water irrigation ($k = 1$). The Bellman equation (5) is computed under the conditions of $x_{\min} = 40$, $x_{\max} = 200$, $P_{0,0} = 0.1$, and $P_{0,1} = 0.0$, dividing $\bar{K}$ into 16,000 sub-intervals of equal length. The value functions, which are linearly interpolated from nodal values, eventually converge to a steady

state as shown in Figure 1. The computed steady value function is non-increasing with respect to x , suggesting finite number of discontinuities appear in the exact one. The optimal treatment policy π^* is not a type having a single threshold of switching the two options of treatment.

5. Conclusions

The results of the computational example support the conjectures implying the pathology as well. Analysis using the uniform norm is not enough to approach this kind of DP problems.

Acknowledgements

This research is funded by grants-in-aid for scientific research No.26257415, No.16KT0018, and No.16K15007 from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References

- [1] 新井芽丹・宇波耕一・藤原正幸 (2018) 塩性乾燥地域における灌漑ナツメヤシ成長の一般化加法モデル, 日本雨水資源化システム学会第 26 回研究発表会講演要旨集, 14.
- [2] Bellman R (1967) *Introduction to the Mathematical Theory of Controlled Processes: Non-linear Processes*, Academic Press.
- [3] 藤倉大和・宇波耕一・藤原正幸・岡本久 (2018) 豪雨による溜池決壊を想定した決定論的動的計画問題, 日本雨水資源化システム学会第 26 回研究発表会講演要旨集, 1-4.
- [4] Unami K, Mohawesh O, Fadhil RM (2018) Deterministic dynamic programming for operation of micro irrigation scheme, *Abstract Proceedings, ESAC-2018*, 53.

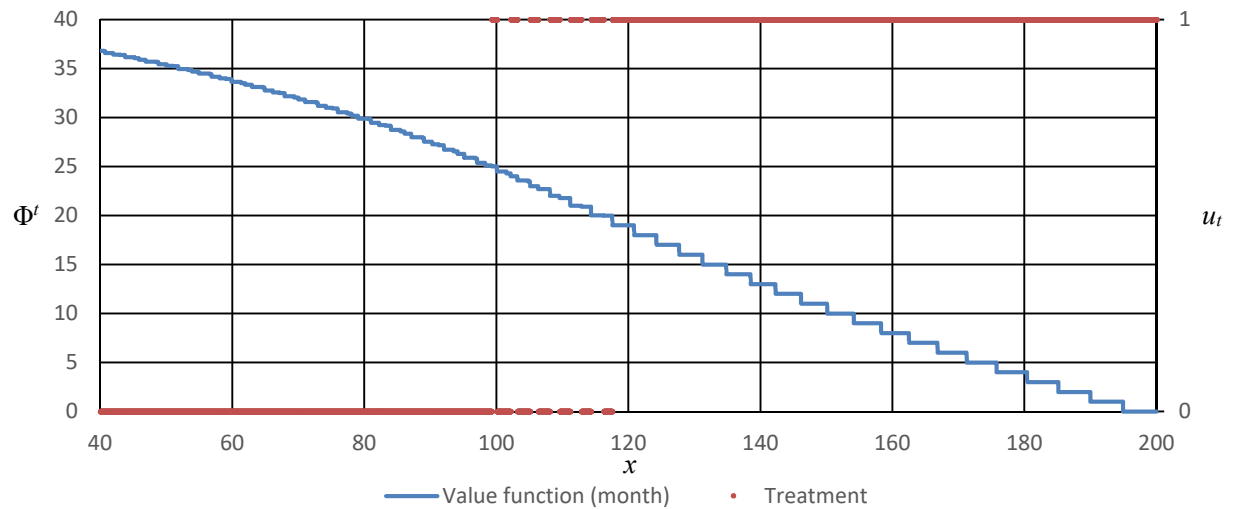


Figure 1: Computed value function and optimal treatment policy in a steady state

代用電荷法を用いた Hele-Shaw セル内のフィンガリング現象の数値計算

京都大学大学院農学研究科 ○伊藤 豪哉・竹内 潤一郎・藤原 正幸

1 はじめに

多孔質媒体において高粘性流体が非混合性の低粘性流体に置換される際、流体力学的な不安定性により、二つの流体間の境界が指状の形をとることがある。この現象はフィンガリング現象と呼ばれており、シェール層におけるオイルの回収や NAPL(Non-Aqueous Phase Liquid)による地下水汚染など、多岐にわたる事象に関係している。例えば、自噴が不可能となった岩盤中の石油を水で押し出す際、水が一様に石油を押し出すのではなく、フィンガリング現象により何本かの指状の水路となって石油の層に広がり、採油効果を低減させることがある。このような例からもわかるように、フィンガリング現象の発生機構を解明することは重要である。

Hele-Shaw 流とは、非常に狭い間隔をあけて水平に置かれた 2 枚の平板の間を流れる非圧縮性の粘性流体の流れであり、この装置を Hele-Shaw セルという(図 1)。Hele-Shaw 流と多孔質媒体中の流れの支配方程式は非常に似ており、Hele-Shaw 流はフィンガリング現象の機構を調べるための最も単純化された実験モデルと数理モデルを提供するものとして注目されている。

移動境界問題の数値解析には、一般に差分法や有限要素法、境界要素法などが用いられる。しかし、Sakakibara and Yazaki (2015)によって、流入や流出がなく円に収束する Hele-Shaw 流の数値計算には代用電荷法(Charge Simulation Method)が適していることが示された[1]。

本研究では、Hele-Shaw セル内に粘性流体を流入もしくは流出させることによって生じるフィンガリング現象を代用電荷法を用いて計算し、境界の形状が複雑になるフィンガリング現象への代用電荷法の適用性を検討する。また、流出入量と表面張力係数の値をパラメータとする数値実験を行い、それらとフィンガリング現象との関係を調べる。

2 数理モデル

2.1 Hele-Shaw 流

ソース/シンク項のない Hele-Shaw セル内の流体は、以下の方程式に支配される：

$$\begin{cases} \Delta p = 0 & \text{in } \Omega(t), t > 0 \\ p = \sigma k & \text{on } \Gamma(t), t > 0 \\ V_n = -\frac{b^2}{12\mu} \nabla p \cdot \mathbf{N} & \text{on } \Gamma(t), t > 0 \\ \Omega(0) = \Omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\Omega(t) \in \mathbb{R}^2$ は流体の領域、 $\Gamma(t)$ は $\Omega(t)$ の境界、 t は時間、 p は圧力、 σ は表面張力係数、 k は曲率、 V_n は点 $\mathbf{x}$ における法線速度、 b は平板間の間隙、 μ は粘性係数、 $\mathbf{N} = \mathbf{N}(\mathbf{x})$ ($\mathbf{x} \in \Gamma(t)$) は点 $\mathbf{x}$ における領域の外向きを正とする単位法線ベクトル、 Ω_0 は初期領域である。

本研究では、流体の流入や流出を考慮するために、図 1 のように領域 $\Omega(t)$ 内にソース点を設けた[2]。ソース点はディラックのデルタ関数を用いて表される。単位時間あたりに吸引する流体の面積量を q とすると、(1)式は次のように書き換えられる：

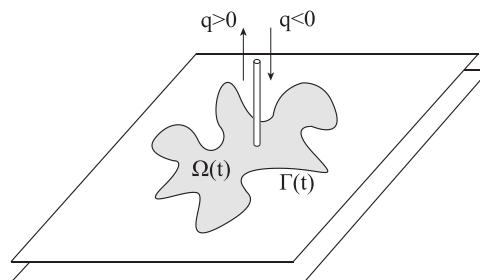


図 1 Hele-Shaw 流

$$\begin{cases} \Delta p = q\delta(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}) & \text{in } \Omega(t), t > 0 \\ p = \sigma k & \text{on } \Gamma(t), t > 0 \\ V_n = -\frac{b^2}{12\mu} \nabla p \cdot \mathbf{N} & \text{on } \Gamma(t), t > 0 \\ \Omega(0) = \Omega_0 \end{cases}. \quad (2)$$

ここで, $\mathbf{x} = (x, y)^T \in \mathbb{R}^2$ は位置ベクトル, $\boldsymbol{\xi} = (\xi, \eta)^T \in \mathbb{R}^2$ はソース点の位置ベクトルである. このとき, 領域 $\Omega(t)$ の面積を $A(t)$ とすると, 次式の体積保存則が成り立つ:

$$A(t) = A(0) - \int_0^t q dt. \quad (3)$$

2.2 移動境界問題

境界の時間発展方程式は, 次の式で表される:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = V_n \mathbf{N} + V_s \mathbf{T}. \quad (4)$$

ここで, V_s は点 $\mathbf{x}$ における接線速度, $\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{x})$ ($\mathbf{x} \in \Gamma(t)$) は反時計回り方向を正とする点 $\mathbf{x}$ における単位接線ベクトルである.

3 数値計算手法

境界曲線 $\Gamma(t)$ を n 個の要素に離散化すると, (4)式は次のように表される:

$$\frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial t} = V_{n,i} \mathbf{N}_i + V_{s,i} \mathbf{T}_i \quad (i = 0, 1, \dots, n-1). \quad (5)$$

(5)式の解法には, 4 段 4 次のルンゲ・クッタ法を用いる.

3.1 $\{\mathbf{N}_i\}_{i=0}^{n-1}, \{\mathbf{T}_i\}_{i=0}^{n-1}, \{k_i\}_{i=0}^{n-1}$ の計算

誤差による数値振動をできるだけ抑えるために, $\mathbf{T}_i, \mathbf{N}_i, k_i$ は 4 次のラグランジュ補間を用いて次のように計算する[3]:

$$\mathbf{T}_i = \left(\frac{-s_{x,i}}{\sqrt{(s_{x,i})^2 + (s_{y,i})^2}}, \frac{-s_{y,i}}{\sqrt{(s_{x,i})^2 + (s_{y,i})^2}} \right)^T, \quad \mathbf{N}_i = -\mathbf{T}_i^\perp, \quad k_i = \frac{s_{x,i}s_{yy,i} - s_{y,i}s_{xx,i}}{((s_{x,i})^2 + (s_{y,i})^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (6)$$

ここで, $s = s(x, y)$ は界面であり, その微分は点 (x_3, y_3) を中心とする隣接 4 点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$ を用いて以下の式で与えられる:

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{\partial s(x_3, y_3)}{\partial x} = \frac{1}{6}(x_1 - 8x_2 + 8x_4 - x_5), \\ s_y &= \frac{\partial s(x_3, y_3)}{\partial y} = \frac{1}{6}(y_1 - 8y_2 + 8y_4 - y_5), \\ s_{xx} &= \frac{\partial^2 s(x_3, y_3)}{\partial x^2} = \frac{1}{3}(-x_1 + 16x_2 - 30x_3 + 16x_4 - x_5), \\ s_{yy} &= \frac{\partial^2 s(x_3, y_3)}{\partial y^2} = \frac{1}{3}(-y_1 + 16y_2 - 30y_3 + 16y_4 - y_5). \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 $\{V_{n,i}\}_{i=0}^{n-1}$ の計算

法線速度は, (2)式を代用電荷法で解いて求める[4]. 代用電荷法とは, 境界法, 選点法, そしてグリーン関数の重ね合わせ法の 3 つの条件を備えた近似解法である[5]. 代用電荷法では, まず境界上に n 個の拘束点 $\{\mathbf{x}_i\}_{i=0}^{n-1}$ をとる. そして, 領域の外側に拘束点と同数の電荷点 $\{\mathbf{y}_i\}_{i=0}^{n-1}$ をとる. 電荷点 $\{\mathbf{y}_i\}_{i=0}^{n-1}$ はそれぞれ電荷 $\{Q_i\}_{i=0}^{n-1}$ を持つ. これらを用いると, (2)式は次のように書き換えられる.

$$p(\mathbf{x}_i) \approx \tilde{p}(\mathbf{x}_i) = Q_0 + \sum_{j=0}^{n-1} Q_{j+1} E_j^1(\mathbf{x}_i) + q E^2(\mathbf{x}_i), \quad (8)$$

$$E_j^1(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x} - \mathbf{y}_i) - E(\mathbf{x} - \mathbf{z}_j), \quad E^2(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}) - E(\mathbf{x} - \mathbf{z})$$

ここで、 $\tilde{p}(\mathbf{x})$ は $p(\mathbf{x})$ の近似解、 $\{\mathbf{z}_j\}_{j=0}^{n-1}$ と $\mathbf{z}$ は領域から十分離れた位置にあるダミー一点である。 $E(\mathbf{x})$ は Poisson 方程式の基本解であり、2次元 Poisson 方程式の場合は、

$$E(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2\pi} \ln \|\mathbf{x}\| \quad (9)$$

で表される。また、電荷点 $\{\mathbf{y}_i\}_{i=0}^{n-1}$ は $\mathbf{y}_i = \mathbf{x}_i^* + d\mathbf{n}_i$ とする。 d は電荷点と拘束点の間隔を調節するパラメータで、 $\mathbf{x}_i^* = (\mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{x}_i)/2$ は各要素の中点である。

ここで、 v_i を i 番目の要素の法線速度、 $\mathbf{n}_i$ を i 番目の要素の単位法線ベクトル、 r_i を i 番目の要素の要素長と定義すると、 $\sum_{i=0}^{n-1} E_j^1(\mathbf{x}_i)$ の法線微分 $H_j(\mathbf{x})$ は、

$$H_j = -\sum_{i=0}^{n-1} \nabla E_j(\mathbf{x}_i^*) \cdot \mathbf{n}_i r_i \quad (10)$$

となる。領域の面積 A の時間発展方程式は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \sum_{i=0}^{n-1} v_i r_i = \sum_{j=0}^{n-1} Q_{j+1} H_j - \sum_{i=0}^{n-1} q \nabla E^2(\mathbf{x}_i^*) \cdot \mathbf{n}_i r_i \quad (11)$$

と書くことができ、(3)式を t に関して微分した式に代入すると、

$$\sum_{j=0}^{n-1} Q_{j+1} H_j - \sum_{i=0}^{n-1} q \nabla E^2(\mathbf{x}_i^*) \cdot \mathbf{n}_i r_i = -q \quad (12)$$

が導かれる。この問題では体積保存則を満たすように(12)式を拘束条件として課す。

最終的に、(8)式と(12)式を満たす電荷 $\{Q_i\}_{i=0}^{n-1}$ を求め、(8)式の微分に代入して近似解を得る。

3.3 $\{V_{s,i}\}_{i=0}^{n-1}$ の計算

接線速度については、各節点の $P(\mathbf{x})$ から差分法などで近似して求めるのが一般的である。ところが、差分法で接線速度を計算して移動境界問題を解く際、計算が進むにつれて節点の密度に偏りが生じ、誤差が増加していくことがある。そこで Ševčovič and Yazaki (2013)は、節点の配置が一様になるように接線速度を調節する漸近的一様配置法を提案した[6]。漸近的一様配置法では、以下の方程式系を解く：

$$V_{s,i} = \frac{\Psi_i}{c_i} + \frac{c_1}{c_i} V_{s,0}, \quad \Psi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_i, \quad (13)$$

$$\varphi_i = -V_{n,i} s_i - V_{n,i-1} s_{i-1} + \frac{1}{n} \frac{\partial L}{\partial t} + \left(\frac{L}{n} - r_i \right) \omega(n).$$

ここで、 $c_i = \cos((v_{i+1} + v_i)/2)$, $s_i = \sin((v_{i+1} - v_i)/2)$, v_i は i 番目の要素の接線角度、 L は領域の周長、 $\omega(n)$ は緩和関数である。 $V_{s,0}$ は次式から得られる：

$$V_{s,0} = \frac{B-C}{D}, \quad C = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i}{c_i} \Psi_i, \quad D = c_0 \sum_{i=0}^{n-1} \frac{b_i}{c_i}. \quad (14)$$

ここで、 $\{b_i\}_{i=0}^{n-1}$ と B には2種類の求め方があり、それぞれの方法から求まる D の値(D_1 , D_2 とする)を比較してどちらの値を用いるかを次のように決定する：

$$\begin{aligned} \text{case1} \quad b_i &= s_i \frac{r_{i+1} - r_i}{2}, \quad B = -\sum_{i=0}^{n-1} V_{n,i} \frac{r_{i+1} - 2r_i + r_{i-1}}{4} & \text{if } |D_1| > |D_2|, \\ \text{case2} \quad b_i &= \frac{r_i - r_{i+1}}{2}, \quad B = 0 & \text{if } |D_1| \leq |D_2|. \end{aligned} \quad (15)$$

4 数値実験

解析領域は、半径 $R=4.5$ (cm) の円、平板間の間隙 b は 0.1 (cm) とする。本研究では、界面に初期形状を $r = R + a \cos(m\theta)$ で与え、その成長過程を追跡する。ここで、 r は原点からの距離、 a は擾乱振幅、 m はモード次数、 θ は極座標の角度とする。ここでは、 $a=0.1$ 、 $m=8$ を与えた。

各パラメータは、表 1 のように設定した。 q と σ については、6 つの条件で計算した(表 2)。

表 1 パラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
n	300	d	$n^{-1/2}$
$\mathbf{z}$	$(1000, 0)^T$	$\omega(n)$	$10n$
$\mathbf{z}_j$	$1000\mathbf{y}_j$	μ	0.08 (Pa · s)
ξ	$(0, 0)^T$	Δt	0.0001 (s)

表 2 数値実験条件

Case	q	σ
Case 1	100	0.2
Case 2	100	1.0
Case 3	100	0.01
Case 4	50	0.2
Case 5	200	0.2
Case 6	-100	0.2

5 結果および考察

各条件で計算して得られた界面の成長過程を図 2 に、各条件での面積 A の時間成長過程を図 3 に示す。図 2 では、計算を続けられる最大時刻 $T_{\max}$ (s) まで計算しており、 $T_{\max}/7$ (s) 毎に界面を点線で出力し、 $T_{\max}$ (s) のときの界面を実線で出力している。また、周長 L の時間成長過程を図 4 に示す。

図 2 より、 $q > 0$ として高粘性流体を吸い出した場合 (Case 1~5)，Case 2 を除いて外側の低粘性流体 (空気) が高粘性流体を押しつけて領域内に侵入してくるフィンガリング現象が確認できる。Case 2 については、フィンガリングしようとする力よりも表面張力により元に戻ろうとする力のほうが大きく、フィンガリングが生じずに円に収束したと考えられる。一方で、 $q < 0$ として高粘性流体を注入した場合 (Case 6) は、境界の形状が円に近づきながら安定に広がっている。

面積については、図 3 で面積が 1 次関数的に変化していることや、その時間変化量が q と一致していたことから、体積保存則を満たしていると言える。

図 4 の周長の時間発展をみると、Case 1, 3~5 では初めは表面張力の影響で周長が短くなるが、界面がソース点に近づくにつれて吸引力が強くなり、フィンガリングの成長速度が大きくなることで、指数関数的に増加している。また、 q の値が大きいほど、そして、 σ の値が小さいほどフィンガリングの成長速度が大きくなることが確認できる。

6 まとめ

本研究では、流出入がある場合の Hele-Shaw セル内におけるフィンガリング現象への代用電荷法の適用を試みた。その結果、適用の可能性を示すことができた。

今後は、定量的な精度評価とともに高粘性流体の中に低粘性流体を注入することで生じるフィンガリング現象や、多孔質媒体中におけるフィンガリング現象への適用性についても検討する。

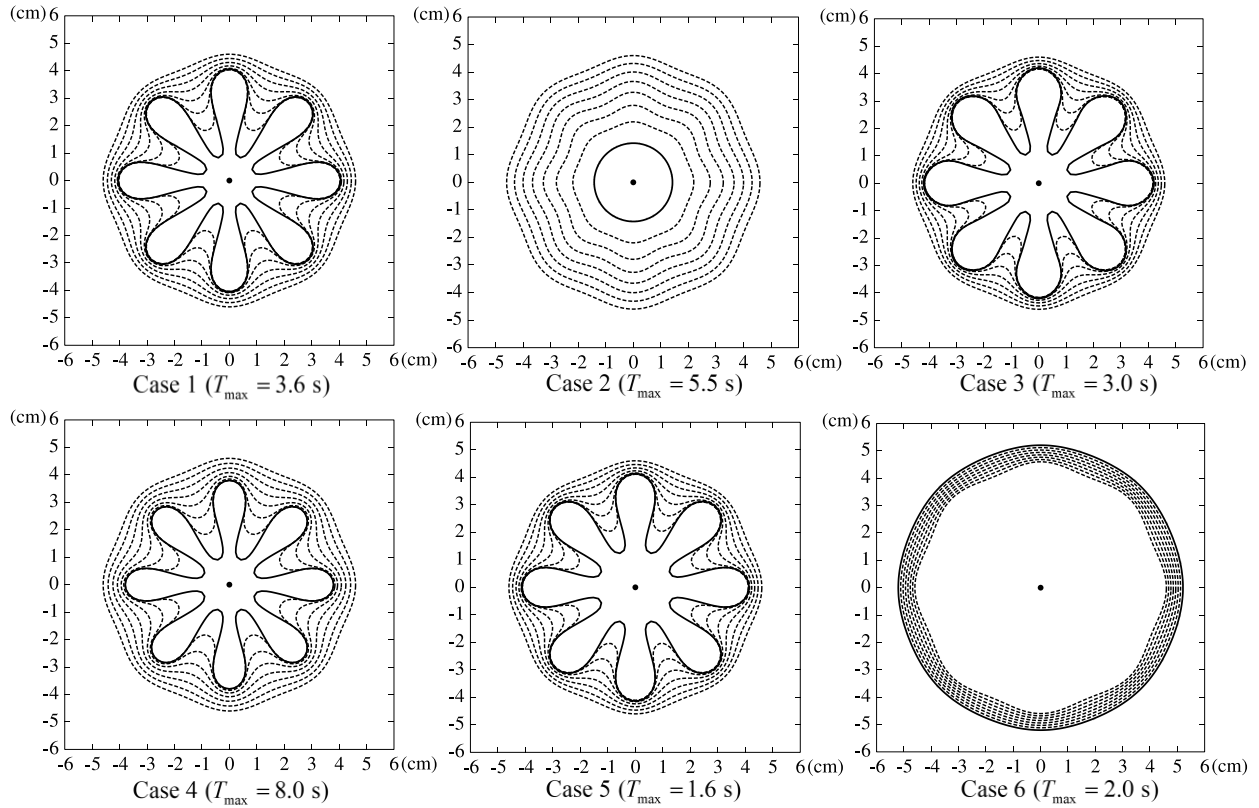


図2 界面の成長過程

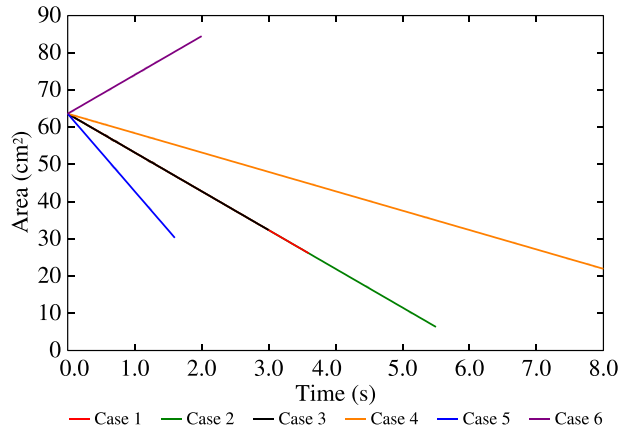


図3 面積の時間発展

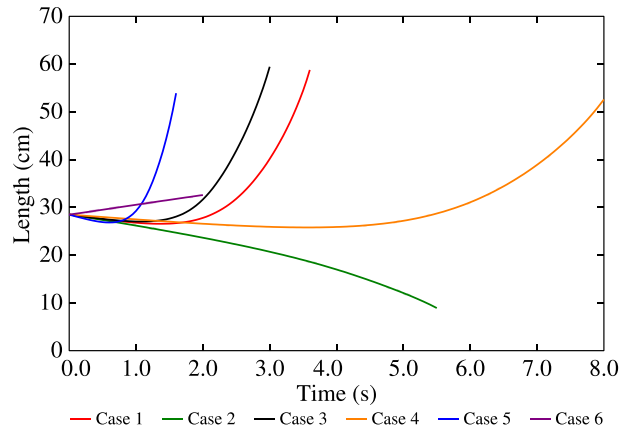


図4 周長の時間発展

参考文献

- [1] Sakakibara, K., and Yazaki, S. (2015): A charge simulation method for the computation of Hele-Shaw problems, *RIMS Kôkyûroku* 1957, 116–133.
- [2] Segall, A., Vantzios, O., and Ben-Chen, M. (2016): Hele-Shaw flow simulation with interactive control using complex barycentric coordinates, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*. Eurographics Association, 85–95.
- [3] Zhao, K. X. H., L. C. Wrobel, and H. Power (1970): Numerical simulation of viscous fingering using B-spline boundary elements, *WIT Transactions on Modelling and Simulation* 13.
- [4] Sakakibara, K., and Yazaki, S. (2015): Structure-preserving numerical scheme for the one-phase Hele-Shaw problems by the method of fundamental solutions, submitted revised version.
- [5] 村島定行(1983): 代用電荷法とその応用, 森北出版.
- [6] Ševčovič, D., and Yazaki, S. (2012): On a gradient flow of plane curves minimizing the anisoperimetric ratio, *arXiv preprint arXiv*, 1203.2238.

地下水への塩水侵入の振動の分岐現象に関する可視化実験

京都大学大学院農学研究科 ○橋本 大志・竹内 潤一郎・藤原 正幸

1. はじめに

密度流は、溶質および熱による流体の密度差によって引き起こされる流体の流れである。海水と淡水の境界においても生じ、河口域や沿岸帯水層で見られる塩水楔や島嶼部での淡水レンズが知られている[1]。これらは静的な現象であるのに対し、ベナール対流やエルダー問題においては、レイリー数が十分大きいときには不規則な動的流れが生じることが知られている[2]。Takeuchi et al. [3]は、不等温地下水流れにおいて、上層の温度が低く下層が高い場合、あるレイリー数を超えると振動的な流れが生じることが数値実験により確認している。また、Kawabata et al. [4]においても、流れのある地下水へ塩水が浸入する際、あるレイリー数を超えると塩水が振動的に流入していくことや、そのレイリー数は地下水流れの流速に依存することが報告されている。これらのパラメータ（ここではレイリー数や地下水流速）が変化したときに、現象の様子が変わること分岐といい、支配方程式の非線形性由来するものと考えられている。本報では、数値実験で確認されたレイリー数や地下水流速の違いによる塩水侵入の挙動の変化について水理実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 支配方程式

本研究で対象とする密度流および溶質輸送の支配方程式は、以下の式で表される[4]。

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\mu_r}{\kappa_z^r} \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\mu_r}{\kappa_x^r} \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right) = Ra \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (1)$$

$$\phi R \frac{\partial \theta}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\phi \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\phi \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Z} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\Psi = \Psi(T, X, Z)$ は無次元化された流れ関数、 μ_r は20°Cにおける粘性係数 μ_0 に対する相対値、 κ_z^r 、 κ_x^r は固有透過係数 κ_0 の、それぞれZ軸、X軸方向の相対値、 Ra はレイリー数、 $\theta = \theta(T, X, Z)$ は無次元化された塩水の濃度、 ϕ は間隙率、 R は遅延係数、 T は無次元化された時間である。対象領域および境界条件は図1のように設定する。図1において、 L' は塩水浸入部の長さ、 Ψ_{top} 、 Ψ_{int} は塩水流入部における流れ関数の値である。流れ関数に関する境界条件は、下端が $\Psi=0$ 、上端が塩水浸入部 L' の部分を除き一定で、塩水浸入部では Ψ_{top} から $\Psi_{top} + \Psi_{int}$ に線型に変化するディリクレ型境界条件で、左端と右端は $\partial \Psi / \partial n = 0$ で与えられるノイマン型境界条件である。塩水に関する境界条件は、塩水浸入部で $\theta=1$ 、それ以外は $\partial \theta / \partial n = 0$ で与えられる。流れ関数の初期条件は $\Psi(0, X, Z) = \Psi_{top} Z$ 、塩水濃度の初期条件は領域内の全ての点において $\theta(0, X, Z) = 0$ とする。

レイリー数 Ra は以下の式で表される。

$$Ra = \frac{H \Delta \rho g \kappa_0}{\mu_0 D} = \frac{H k \Delta \rho}{\rho_0 D} \quad (3)$$

ここで、 H は対象領域の鉛直方向の厚さ、 $\Delta \rho$ は流入する塩水の密度 ρ_s と流入水の密度 ρ_f の差、 ρ_0 は20°Cにおける水の密度、 g は重力加速度、 D は溶質の水理学的分散係数、 k は透水係数である。

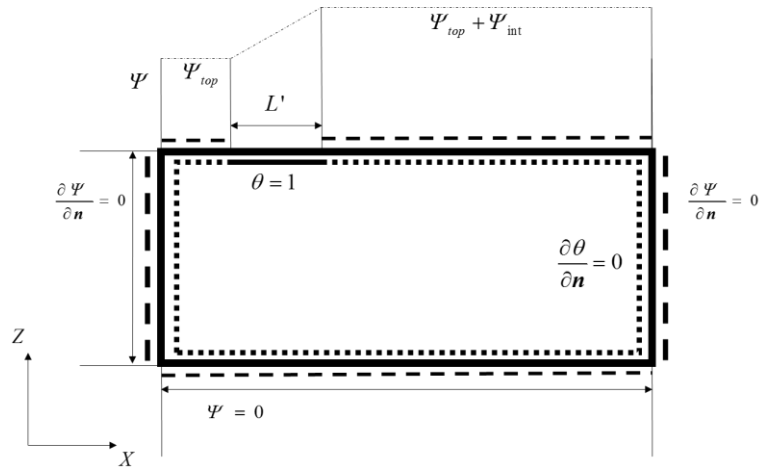


図1 対象領域および境界条件

3. 実験方法

3.1 実験装置

本研究に用いられた実験装置は、橋本[5]の実験で用いられたものの塩水流入部に改良を加えたものである。図2に実験装置の模式図を示す。装置中央の実験層（長さ $L=130\text{cm}$ ，奥行き $b=5\text{cm}$ ）に粒径 $d=2\text{mm}$ のガラスビーズを充填し，上面に加圧板としてアクリル板を取り付ける。これは水深を実験層底面より 40cm に固定し，被圧状態にするためである。

塩水流入タンクより 20cm 下流部地点から 15cm 間隔で等間隔にアクリル板に穴を5つ開け，電気伝導率計のプローブ（HORIBA ES-71）を挿入する。この電気伝導率計を上流から順番にセル1，セル2，セル3，セル4，セル5とする。

実験層左部上面に塩水流入タンクを取り付け，粒径 1mm のガラスビーズで内部を充填する。底面にパンチングを施し，底面の上に不織布を敷くことで，ガラスビーズの実験層への流出を防ぐとともに塩水の流入を可能にしている。本研究では底面部の広さ $10\text{cm}\times 3\text{cm}$ のものを使用した。塩水流入タンクはマリオットタンクにチューブを介して繋がっており，マリオットタンクから一定流量で塩水が流入する。塩水の挙動を可視化するため，食紅（キリヤ化学，食用赤色102号）を溶かしたものを塩水として用い，真水には水道水を使用した。図2における Δh_1 ， Δh_2 ， ΔL は流入部の水位と流出部の水面の水位差，実験層上面からマリオットタンクの自由水面の高さ，塩水流入タンクの底面部の長さを表す。本研究では，これらのパラメータ及びマリオットタンク内の塩水の密度 ρ_s の組み合わせによって各種の実験条件を与える。

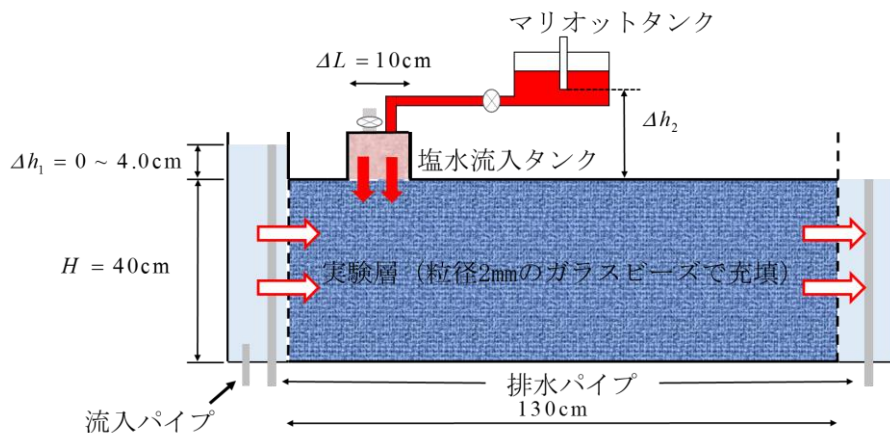


図2 実験装置の模式図

3.2 実験手順

実験の手順は橋本[5]の実験を踏襲する。実験装置に水道水を入れた状態でガラスビーズを高さ 5cm の層ごとに実験層に充填する。各層を充填するたびに混ぜ棒で層を攪拌し、上から均一に押し固めることで、ガラスビーズ層の均質性を確保する。また、中性の界面活性剤をガラスビーズ層に流すことで気泡の混入を防止する。高さ 40cm までガラスビーズを充填した後、水を十分流し、界面活性剤を洗い流す。充填後、アクリル製の蓋と空の塩水タンクを取り付け、ガラスビーズ層に電気伝導率計を差し込み、隙間をパテで埋める。流入側と流出側の排水パイプの水位を調節し、マリオットタンクをラボジャッキの上に置いて、その高さを調節することにより塩水の流入量を設定する。塩水が一定の流量で塩水タンクから流出していることを確認し、電気伝導率計を作動させる。電気伝導率計で 10 秒間隔で塩水濃度を計測するとともに、インターバルカメラで 20 秒間隔で浸透の様子を記録する。また、本実験では計測時間を 6,000 秒とした。

3.3 実験条件

本実験に用いた各パラメータの値を表 1 に記す。Kawabata et al.[4]や橋本[5]の実験において、レイリー数と水平方向の流速に依存して侵入した塩水の挙動に変化が見られたことから、本実験では 3 つの流速条件 ($\Delta h_1 = 1.5, 2.5, 3.5$) を設定する。 $\Delta h_1 = 1.5$ と 2.5 では、レイリー数を大きくすると、定常状態に収束するという侵入様式から不規則に振動しながら浸入するという様式へと分岐が起こったので、その前後のレイリー数について実験を行う。 $\Delta h_1 = 3.5$ では、そのような分岐は起こらなかったため、最大のレイリー数でも定常状態に収束することを確認する。それぞれのケースの実験条件は表 2 に示す。

表 1 各パラメータの値

parameter	value	parameter	value
H	40 cm	Δh_2	15.5 cm
L	130 cm	ρ_s / ρ_f	1.012, 1.024, 1.048, 1.060
b	5 cm	k	0.47 cm/s
ΔL	10 cm	d	0.2 mm
Δh_1	1.5, 2.5, 3.5 cm	D	$1.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

表 2 各ケースの実験条件

case	Δh_1 (cm)	Ra (-)	ρ_s / ρ_f (-)
Case 1	1.5	18.8	1.012
Case 2	1.5	37.6	1.024
Case 3	1.5	75.2	1.048
Case 4	2.5	75.2	1.048
Case 5	2.5	94.0	1.060
Case 6	3.5	94.0	1.060

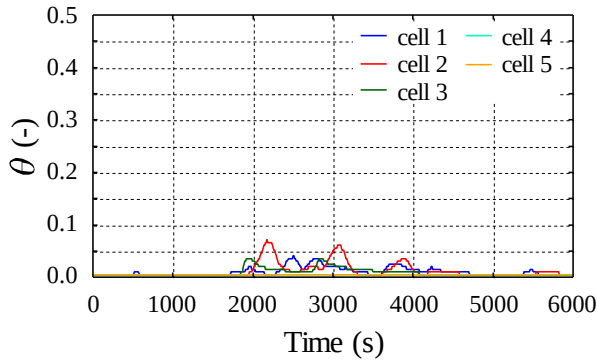


図3 塩水濃度の時間変化
(ケース 1, $\Delta h_1 = 1.5 \text{ cm}$, $Ra = 18.8$)

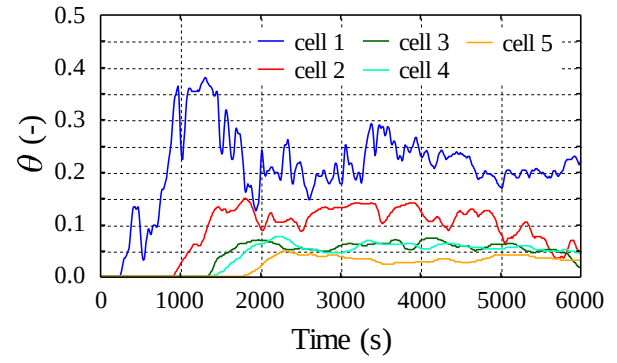


図4 塩水濃度の時間変化
(ケース 2, $\Delta h_1 = 1.5 \text{ cm}$, $Ra = 37.6$)

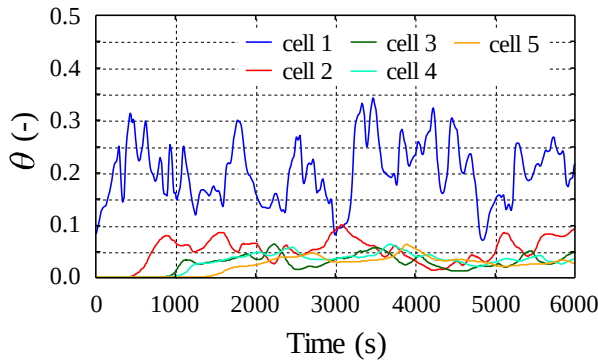


図5 塩水濃度の時間変化
(ケース 3, $\Delta h_1 = 1.5 \text{ cm}$, $Ra = 75.2$)

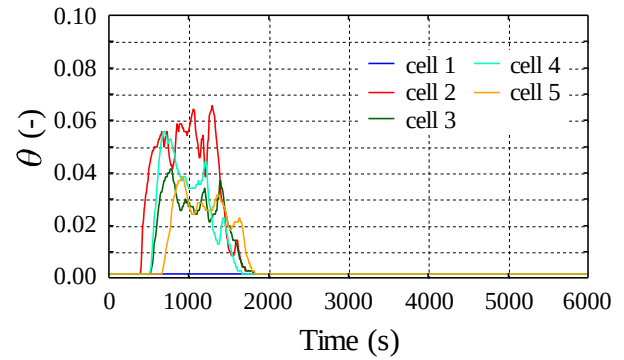


図6 塩水濃度の時間変化
(ケース 4, $\Delta h_1 = 2.5 \text{ cm}$, $Ra = 75.2$)

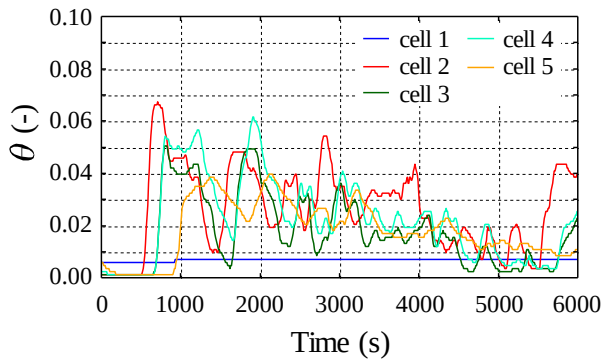


図7 塩水濃度の時間変化
(ケース 5, $\Delta h_1 = 2.5 \text{ cm}$, $Ra = 94.0$)

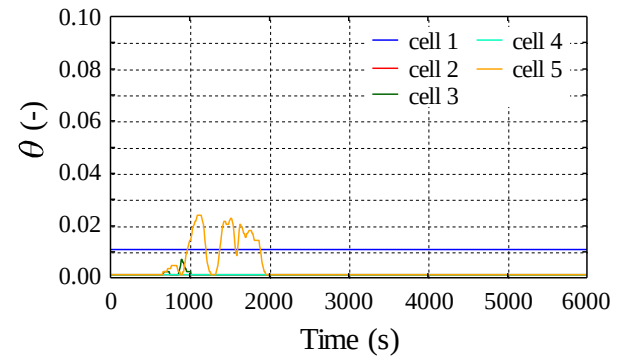


図8 塩水濃度の時間変化
(ケース 6, $\Delta h_1 = 3.5 \text{ cm}$, $Ra = 94.0$)

4. 実験結果

電気伝導率計による各ケースの測定結果を流入塩水の濃度で規格化したものを図3から8に示す。図9には、定常状態に収束する侵入様式と定常状態に収束せず振動的に侵入する様式の典型的な例として、ケース1から3の5分後、30分後、60分後の様子を示す。ケース1 ($\Delta h_1 = 1.5 \text{ cm}$, $Ra = 18.8$) では、侵入した塩水は下方に浸透していくことなくほぼ水平に移動し (図9左), 多少濃度が振動的に変化したのち、定常状態に収束した (図3)。地下水の流速は同じで塩水濃度を増加させたケース2 ($\Delta h_1 = 1.5 \text{ cm}$, $Ra = 37.6$) では、侵入した塩水は、対流により上下に大きく振動しながら下方に浸透したが、60分ごろから対流による攪拌はおさまった。(図9中央)。濃度については、セル1, セル2において60分ごろまで不規則に大きく変化しているが、それ以降は大きな変動は起こっていない。また、後方のセル3以降については、ほぼ一定の濃度で推移している (図4)。ケース3では、測定を行っている間、継続的に対

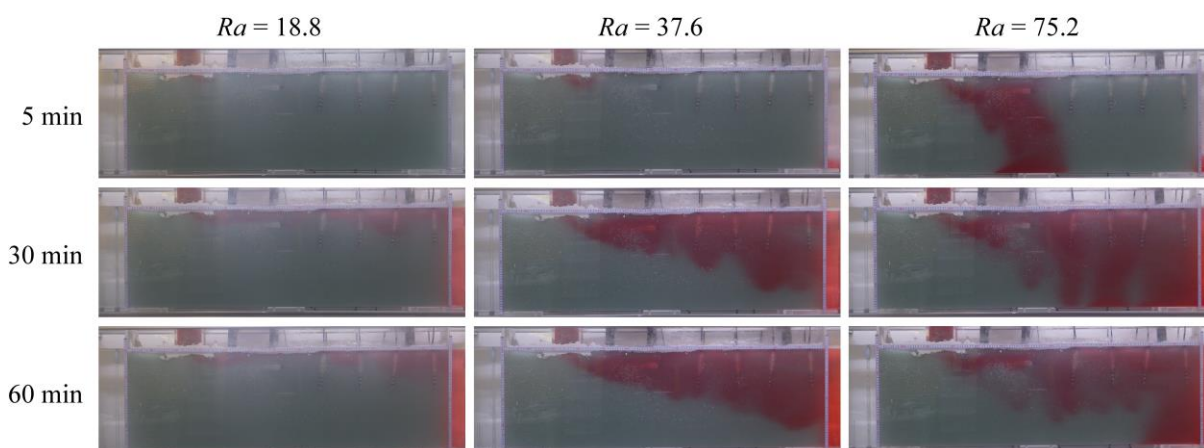


図9 塩水侵入の様子（ケース1（左），ケース2（中央），ケース3（右））

流が発生し，対流により塩水が広範囲に攪拌されている（図9右，図5）．ケース1と2，ケース2と3の塩水の侵入様式の違いは，レイリー数の増加により，それぞれ分岐が生じたものと考えられる．

地下水の流速を大きくしたケース4とケース5においても，ケース2とケース3と同様にレイリー数の増加により，塩水の侵入様式が変化する結果となった（図6，7）．ただし，塩分濃度の変動が観測されたのはセル2以降においてであり，また，分岐が起こるレイリー数は $\Delta h_1 = 1.5\text{cm}$ のときと比べて小さくなっている．これらは Kawabata et al. [4]の数値実験の結果と同様に，流速が大きくなると対流の起こる位置が後方に移動するとともに，レイリー数が増加することとなった．

さらに地下水の流速を大きくしたケース6（ $\Delta h_1 = 3.5\text{cm}$ ）では，最下流の測定点セル5において，不規則な変動が観測されたのち，定常状態に収束している（図8）．これも，Kawabata et al. [4]の数値実験の結果と同様である．

また，いずれの結果においても，観測された塩水濃度の変動は不規則であったが，これは Kawabata et al. [4]の数値実験の結果と大きく異なる点である．数値実験では，濃度変動は単振動や2ピークの振動であったが，本実験では，カオス的な変動を示している．数値実験では鉛直2次元モデルを用いており，本実験においても，鉛直2次元モデルが適用できるように奥行きは5cmにしたが，実際には図8右および中央に見られるように，3次元的な対流が生じていたことが，その原因として挙げられる．

5. おわりに

本研究により，水より密度の大きい汚染物質が地下水に浸入する際には，条件によっては水との密度差による対流によって，下流に広く拡散して流下することが示された．具体的には，その条件は地下水の流速とレイリー数に関するもので，侵入様式が大きく変化する分岐現象と考えられる．本研究で行った水理実験では，流れのある地下水への塩水の浸入挙動に関する分岐を室内実験により確認し，分岐が生じるレイリー数は水平方向の流速に依存していることが実現現象においても確認された．

Kawabata et al. [4]の数値実験では，侵入塩水は単純な周期的変動をしていたが，本実験で得られた結果では塩水は不規則に脈動しながら浸透した．観測された濃度の波形はカオス的に変動しており，非線形時系列解析により，カオス性判定を行なうことが今後の課題である．

引用文献

- [1] Diersch H.-J.G, and Kolditz O. (2002): Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges, *Advances in Water Resources*, 25, pp.899-944.

- [2] Holzbecher E. (1998): Modeling density-driven flow in porous media, Springer, p.286.
- [3] Takeuchi J, Kawabata M, and Fujihara M. (2015): Numerical analysis on occurrence of thermal convection in a flowing shallow groundwater, *International Journal of GEOMATE*, 11 (27), pp.2688-2694
- [4] Kawabata M, Takeuchi J, Fujihara M (2015): Numerical Analysis of Density-Driven Fluctuation in Groundwater Caused by Saltwater Intrusion, *Jurnal Teknologi*, vol.76, No15, pp.7-12.
- [5] 橋本 大志 (2017) : 地下水への塩水浸入の分岐現象に関する可視化実験, 平成 28 年度京都大学農学部卒業論文, 40p.

群集解析と生息場モデルを用いた淡水魚類の生息環境評価手法の比較検討

Comparing fish habitat assessment methods based on community analysis and habitat models

○相原 星哉¹・福田 信二²

○AIHARA Seiya, FUKUDA Shinji

1. はじめに

農業農村整備において、環境との調和は重要な課題のひとつであり、淡水魚類をはじめとする水生生物の生息に配慮した圃場整備が必要とされていることから、農業水路に生息する淡水魚類の生息環境に関する知見の集積が不可欠である。生物の生息環境について評価する際には、生物群集を分類し、生息や分布に寄与する要因を検討する群集解析（クラスタリングや間接傾度分析など）や、対象種の個体数や在／不在の空間分布と環境要因の関係性を数理的に表現する生息場モデルが主に用いられるが、両者による評価を比較した知見は少ない。そこで本報では、農業水路に生息する淡水魚類の生息環境について、クラスタリングを用いた群集解析による手法と、ランダムフォレストを用いた種別の生息場モデルによる解析の 2 手法を用いて評価するとともに、両者の比較を行い、両手法の適用可能性を検討した。

2. 現地調査

府中用水（東京都国立市）に 14 地点の調査区（区間長 10 m）を設定し、魚類相調査および物理環境調査を、2016 年 3 月から 2016 年 12 月にかけて毎月 1 回実施した。魚類相調査では、調査区の上下流を定置網で仕切り、2 人×10 分間の努力量で、投網とタモ網を用いて魚類を採捕した。採捕された魚類は、種を同定し、個体数と全長を記録した。物理環境調査では、調査区内に 5 m ごとに設定した計測断面において、流量観測のために水面幅、水深および流速を計測し、河床材料（大礫、中礫、小礫、砂泥およびコンクリート）の被覆率と植生被覆率を記録した。

3. 解析方法

魚類の生息環境特性について、クラスタリングを用いた群集解析と、ランダムフォレストを用いた種別の生息場モデルの 2 手法により評価するとともに、両手法の比較を行った。各種の解析には、統計ソフト R（R Core Team, 2017）を使用した。

群集解析には modified TWINSpan 分析（Rolecek *et al.*, 2009）を用い、在／不在データに基づく魚類相をクラスターに類型化するとともに、INSpan 分析（Dufrene *et al.*, 1997）を用いて指標種を抽出した。そして、クラスターを指標種に代表される魚類群集として扱い、クラスターに特有の物理環境条件を比較することで、生息環境特性を評価した。

また、各指標種を対象として、ランダムフォレスト（Breiman, 2001）を用いた生息場モデルを構築し、種別に生息環境特性を評価した。モデルの応答変数は各魚種の在／不在とし、説明変数には水面幅、水深、流速、流量、各河床材料の被覆率および植生被覆率を用いた。生態学的情報の抽出には、変数の重要度と応答曲線を用いた。変数の重要度は、モデル精度における説明変数の影響度を示し、応答曲線は、生息場ポテンシャルに基づいて、各魚種の説明変数への応答を可視化したものである。両者から得られた情報を総合して、生息環境特性を評価した。

¹ 東京農工大学大学院農学府 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院農学研究科 Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

キーワード: 生態系, 水環境, 環境保全, 生物多様性, 生態水理学

4. 結果と考察

魚類相調査により、18種の淡水魚類が確認され、modified TWINSpan 分析を行った結果、魚類相は6個のクラスターに分類された。また、INSpan 分析を行った結果、フナ類とムギツク（クラスター1）、オイカワ、カワムツおよびアブラハヤ（クラスター2）、メダカとタモロコ（クラスター3）、モツゴ（クラスター4）、ヨシノボリ類（クラスター5）およびドジョウ（クラスター6）の10種が指標種として抽出された。クラスターが有する物理環境条件の特徴を比較したところ、クラスター1は水深が大きく、フナ類とムギツクが灌漑期に出現することが示唆された。クラスター2は水深と流速の分布が一樣で、局所的な緩流域がないことから、遊泳能力が高い3種が指標種となったと考えられる。クラスター3と4は流速が小さく、遊泳能力が低いメダカや、止水的な環境を好むタモロコ（クラスター3）やモツゴ（クラスター4）に適した環境であった。クラスター5は流速が著しく大きく、吸盤状の腹びれを持つヨシノボリ類のみが生息可能な環境であった。また、大礫の被覆率が高く、礫が形成する微小な緩流域を、生息場として利用していると推察された。クラスター6は水深と流速がともに小さいことで特徴づけられ、ドジョウが水田近傍の小水路に生息することが示唆された（図1）。

種別の生息環境評価においては、変数の重要度では、ヨシノボリ類を除き、流量または水面幅の重要度が高かった。応答曲線による評価と総合すると、フナ類とムギツクは、水深が大きく（20 cm 以上）、流速が小さい環境（10 cm/s 以下）を選好し、灌漑期の幹線水路（水面幅 400 cm 以上）を主な生息場としていた。アブラハヤ、カワムツおよびオイカワは、40 cm/s 程度の流速で生息場ポテンシャルが高く、遊泳能力が高い種であることが示唆された（図2）。メダカやタモロコ、モツゴは流速が小さい環境（20 cm/s 以下）や、植生被覆率が高い環境（40 %以上）を好み、水生植物が緩流域の創出に寄与したと考えられる。ヨシノボリ類は、流速が大きい環境（50 cm/s 以上）や砂泥の被覆率が低い環境（25 %以下）で高い生息場ポテンシャルを示し、吸盤状に発達した腹びれを有することや礫間の局所的な緩流域を利用することで、高流速条件下でも生息できたと考えられる。ドジョウは、水面幅が小さく（50~200 cm）、水深が小さい環境（15 cm 以下）の適正度が高いことから、水田周辺の小水路に分布したことが示唆された。

両手法による評価を比較すると、クラスターの傾向と種別の生息環境解析結果が概ね一致し、群

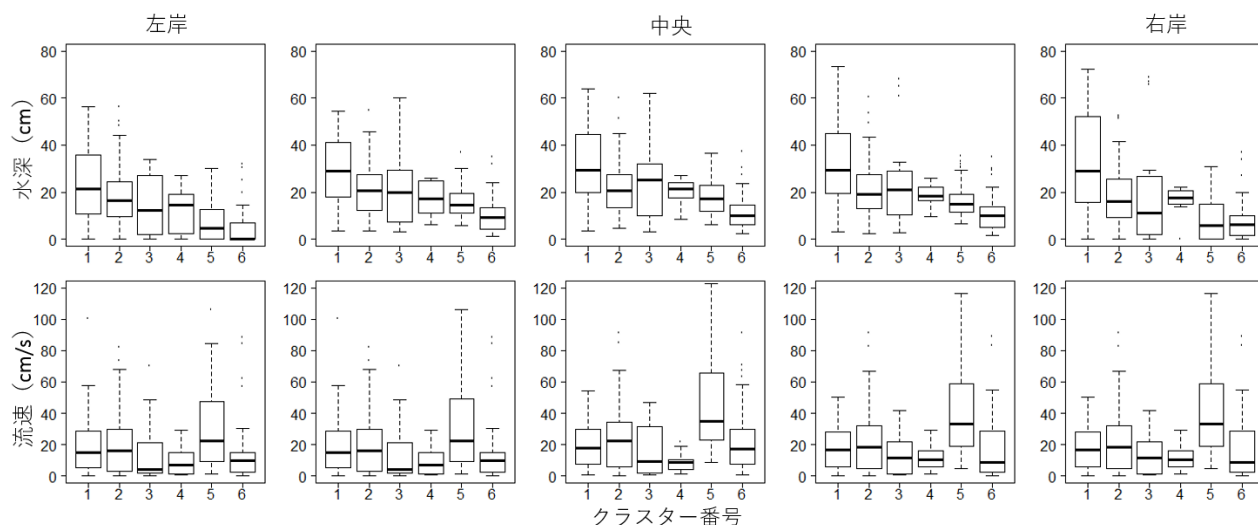


図1 各クラスターと水深および流速の関係

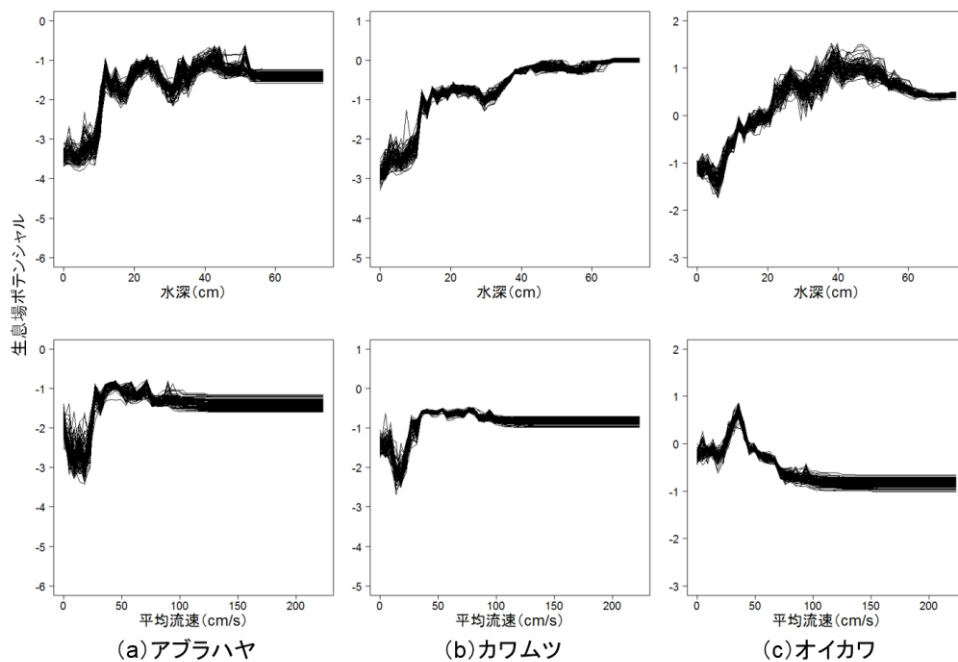


図2 アブラハヤ (a), カワムツ (b), およびオイカワ (c) の水深と流速に関する応答曲線

集解析によって、種が有する生息環境特性を表現することができた。これは、各魚種が指標種となったクラスターによって、各魚種の在データが有する物理環境の傾向を、十分に表現できたためと考えられる。一方で、複数種の指標種が抽出されたクラスター（1～3）では、一部の説明変数の応答曲線において、クラスターの傾向と異なる特性を示す種も存在した。これは、水面幅や流量に関する評価から、幅広い分布を有する種に顕著であり、クラスターが示す範囲よりも広い環境に分布し、クラスターが生息環境の傾向を反映しきれなかったことに起因すると考えられる。

5. おわりに

Modified TWINSpan 分析を用いた群集解析と、ランダムフォレストを用いた生息場モデルの2手法により、淡水魚類の生息環境解析を行った結果、各魚種（群）に特有の生息環境特性がみられ、その傾向は両手法で概ね一致した。群集解析により、種別の生息環境特性を反映することができたが、幅広い水理条件を利用する魚種については、クラスターによって特徴を表現しきれない可能性が示唆された。本研究では、在／不在データを用いたが、個体数を反映した魚類相データを用いることで、異なる生息環境評価が得られる可能性が考えられる。本研究で用いた2手法は、量的データにおいても同様の解析を行うことができるため、個体数データを反映した解析が今後の課題である。

引用文献

- Breiman (2001): Random forests. *Machine Learning*, 45, 1, 5-32.
- Dufrene, M. *et al.* (1997): Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological monographs*, 67 (3), 345-366.
- Rolecek J. *et al.* (2009): Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity. *Journal of Vegetation Science*, 20, 596-602.

府中用水と矢川における生態水理調査概要

Preliminary report on echydraulic surveys in Fuchu Yosui irrigation system and Yagawa

○福田 信二¹

○FUKUDA Shinji

1. はじめに

小河川や農業水路から形成される水域ネットワークは、幹線水路と支線水路が相補的な機能を有しており、一時的な水域を含めて、水圏生態系にとって重要な生息環境を提供している (Ohira and Fukuda, 2018) . しかしながら、都市化や圃場整備、水質汚濁等に起因する水環境の劣化とともに、近年の外来種問題の深刻化により、在来生物の生息環境の喪失が急速に進行しており、生態系の保全・修復に向けた取り組みが喫緊の課題となっている。一般に、農業水路やため池が構成する農業水路ネットワークに生息する淡水魚類は、灌漑等による流況変化の影響を強く受けるため、その保全にはネットワーク内の流況の季節変化（農業由来と自然由来の両方）を考慮する必要がある。これまで、灌漑期と非灌漑期の生息環境の変化や非灌漑期の通水の有無の影響などによって示されてきたが、河川からの取水や湧水あるいは分水によって生じる異なる流況との関連性はほとんど検討されていないため、流況に伴って変化する水深や流速、土砂移動といった生息環境構造の変化に対する魚類群集の応答を明らかにする必要がある。そのため、農業水路ネットワークにおける生態系保全を議論する際には、水理学と農業水利学、生態学の融合が必要不可欠であり、継続的なモニタリングに基づく実証的研究が強く求められる。そこで本報では、農業水路である府中用水と湧水河川である矢川における物理環境特性と魚類相の定期調査の結果について概要を報告する。

2. 方法

東京都国立市に位置する府中用水およびその流入小河川である矢川において、区間長10 mの調査区間を14地点ずつ設定し、府中用水は2014年5月から、矢川は2015年6月から、毎月定点調査を実施した。調査では、流水環境特性（水深、流速、水面幅、河床材料、植生被度）および魚類相について調査した。流水環境調査は5 mおきに実施し、魚類の採捕は、タモ網、投網、定置網を用いて、1区間2人×10分の努力量で行い、水域の大きさに応じて、適宜、採捕時間を調節した。水深と流速の測定には、それぞれ金尺と電磁流速計（KENEK, LP30・LPT-325）を使用した。河床材料および植生被度は、各断面単位で目視により定量した。

3. 結果と考察

府中用水では、計26種の淡水魚が採捕され、府中用水には未定着であると考えられる外来淡水魚4種が確認された。例えば、スゴモロコのように、2014年～2015年には採捕されていたが、2016年～2017年には採捕されず、2018年に再度採捕されるなど、採捕される魚種の傾向が調査年度ごとに異なっていることから、取水口周辺の魚類相の影響を強く受けているものと考えられる。矢川では基本的には11種の主要魚種が採捕されるが、府中用水との合流点付近では多様な魚種が採捕されており、比較的上流の区間ではカジカやオヤニラミ、金魚等が採捕されることもある。そのうち、オヤニラミや金魚については放流であると考えられる。府中用水と矢川に共通する主としては、カワムツやオイカワ、アブラハヤ、ホトケドジョウ、メダカ等があげられるが、ホトケドジョウの分布は湧水起源の水域に限られている。

¹東京農工大学大学院農学研究院 Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

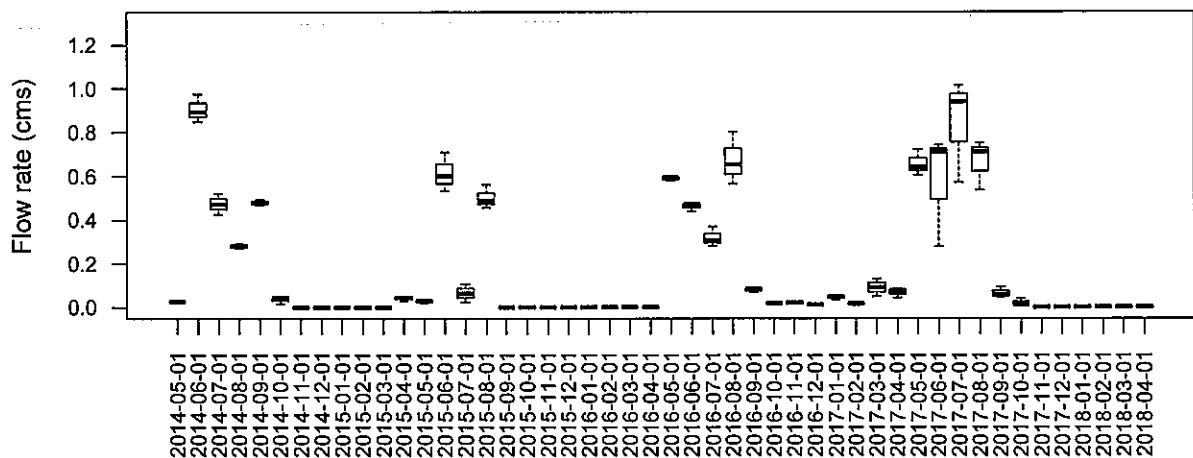


Fig. 1 Flow rate (cms: m^3/s) of station ST2 in Fuchu Yosui irrigation system, of which box plot indicate descriptive statistics of flow rates among three cross sections in a station.

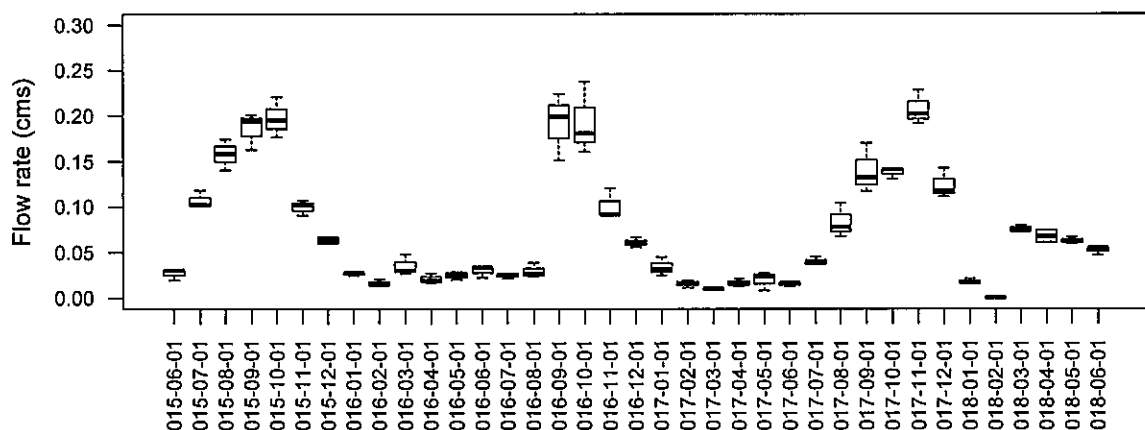


Fig. 2 Flow rate (cms: m^3/s) of station ST2 in Yagawa, of which box plot indicate descriptive statistics of flow rates among three cross sections in a station.

府中用水における流量の変化は灌漑の有無に大きな影響を受けており (Fig. 1), ST3とST4の湧水の流入により恒久的に水が流れる地点が存在する。なお、府中用水では、2014年および2017年の灌漑期終了後には、工事のために完全に干出する区間が生じたため、その後の魚類相に大きな変化がみられた。

矢川の流量は、9月～11月にピークを呈し、その後、減衰する傾向を示しており、毎年、ほぼ同様の傾向となっている (Fig. 2)。湧水は、最上流域に多く存在するが、下流域でも流量の増加が観察されることから、崖線沿い等にも湧水の流入地点があるものと推察される。

府中用水と矢川の水利環境について比較すると、流量の差から、水深と流速の分布が大きく異なるとともに、レイノルズ数やフルード数にも差がみられた (Figs. 3-4)。

府中用水の魚類相は、灌漑に伴う多摩川からの魚類の移入があるため、流量と魚種数の強い相関が予想されるが、種数と物理環境の関係 (Fig. 3c) から、流量よりも水深や流速等によって特徴づけられ、水深が大きく、低流速な区間で種数が多くなることがわかる。ちなみに、矢川には、崖線付近に急勾配区間があるため、高流速となる地点も存在するが、同区間でも魚類は採捕されており、魚類の空間分布を特徴づける際には断面平均流速に基づく評価では分布ポテンシャルを過小評価してしまう可能性がある。これは、高流速区間であっても、河床材料の

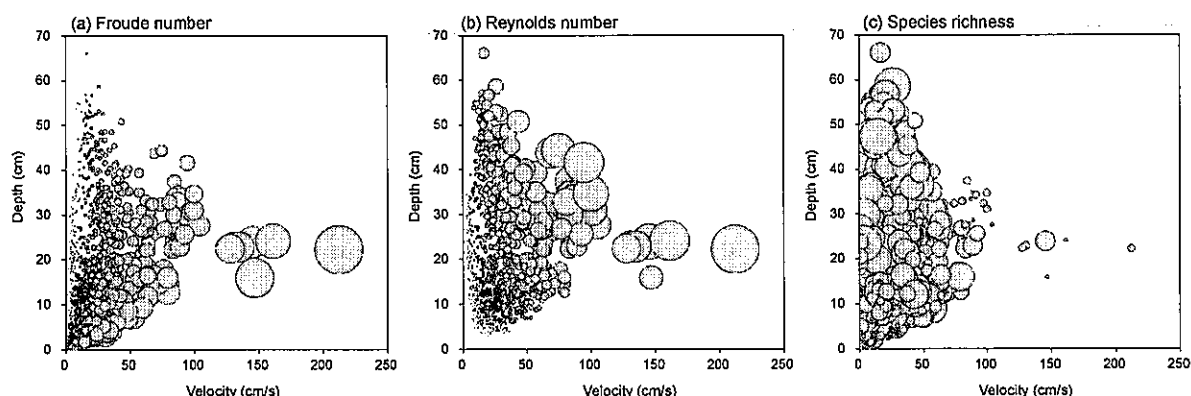


Fig. 3 Scatter diagrams of depth and velocity of Fuchu Yosui irrigation system, with varying mark sizes indicating (a) Froude number, (b) Reynolds number and (c) Species richness.

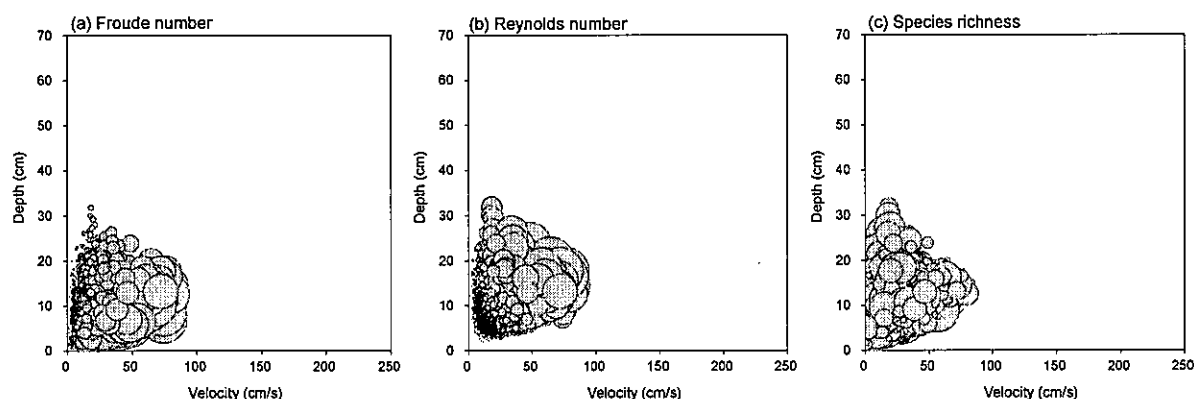


Fig. 4 Scatter diagrams of depth and velocity of Yagawa, with varying mark sizes indicating (a) Froude number, (b) Reynolds number and (c) Species richness.

礫間や植生帯とうによって形成される微小な緩流域を利用している魚種が存在することに起因している。特に、粗度の取り扱いを含め、水理学的な検討が求められる項目である。物理環境と魚類相の関係の理解深化のためには、種ごともしくは生息環境特性等の生態が類似した種群ごとに、複数の環境要因による複雑な相互影響について解析する必要がある。

4. おわりに

農業用水路と湧水小河川における定期調査から、流況と魚類相のダイナミクスについて検討し、両水域で異なる季節性を有することが明らかになった。また、同程度の流量であっても区間内の水理条件が異なることで、魚類の生息状況が異なることが確認できた。既往の研究には、魚類等の生息に配慮した工法であっても、流況によってはその効果が小さいという報告もあるため、今後の農業水路の多様な利用形態と異なる流況を考慮し、魚類群集の保全のあり方について議論する必要がある。その際、水理解析が果たす役割は大きく、生態学と水理学の融合によって解析手法を検討するとともに、現地調査と室内実験によって検証を進めることが極めて重要である。

引用文献

Ohira, M. and Fukuda, S. (2018): Flow regime shapes seasonal patterns of fish species richness and abundance in main and branch channels of a rice irrigation system. *Paddy and Water Environment*, 16(4), 783–793.

矢川の網羅的水理解析に向けた地形測量と生態水理調査 Topographic and ecohydraulic survey for hydrodynamic modelling in Yagawa

○近藤雅人¹・福田信二²
○KONDO Masato・FUKUDA Shinji

1. はじめに

東京には多数の湧水が存在し、都市開発の進む地域においても多様な生物の重要な生息環境が残存していることが知られている。松澤（2018）は、東京都国立市を流れる都市小河川において、魚類相および流速・水深・河床材料などの物理環境に関する定点調査を実施し、2年を超える調査結果から、湧水起源の小河川が絶滅危惧種ホトケドジョウを含む淡水魚類に良好な生息環境を提供していることを報告した。一方、矢川は流量の増減が大きいことから、流路内の保全地域の特定やゾーニングをする際には、矢川全体における物理環境特性とそれに対する生物の応答（流況分布の変化等）について評価する必要がある。そこで本報では、矢川を網羅する生態水理モデルの構築に向けて実施した地形測量と物理環境調査に基づいて、矢川が有する生態水理特性を評価した。

2. 方法

矢川は、湧水起源の都市小河川であり、約 1.5 km を流下した後、府中用水に合流する。流路幅は 5 m 以下であり、水深も比較的小さいが、勾配の大きい地点では高流量時に 1 m/s を超える流速が観測されるなど、流況は大きく変化する。このような流況ダイナミクスの再現には、非定常 1 次元水理モデルが有効であるため、その構築に向けた基礎調査として、流路の地形測量と物理環境調査を 2018 年 5 月に実施した。地形測量では、水準測量により、府中用水との合流点から最上流部付近の湧水流入地点までの地形や水路形状が大きく変化する断面について調査した。その際、流路内 5 点とその外部 2 点の計 7 点を基本とし、必要に応じて測点を追加した。また、水理解析のために、各測点において、水深、流速、河床材料（大礫、中礫、小礫、砂泥の割合）、植生被覆度を記録した。結果として、府中用水との合流部の基準断面と矢川の 108 断面（0.5 m～93.5 m 間隔）の計 109 断面で測量・計測を実施した。

基礎解析には、統計解析ソフト R を用いた。まず、地形測量の結果から標高および水位の縦断分布図を作成し、横断形状や水面形に応じて、測量結果を修正した。次に、計測断面ごとに、水面勾配（I）や通水断面積（A）、潤辺（S）、径深（R）、断面平均流速（ V_m ）を計算し、実測流速と水面勾配、径深に基づいてマンニングの平均流速公式から粗度係数を推定した。続いて、マンニング・ストリクラーの式で求めた各粒形区分の粗度係数を各計測点での河床材料の被覆度によって合成粗度係数を計算し、各測点の代表面積による重み付け平均により各断面の合成粗度係数を算出した。なお、河床材料の区分と代表粒形（ k_s ）は、Table 1 の値を用いた。ここでは、それぞれの方法で求めた粗度係数を比較し、河床材料に基づく粗度係数の設定方法や流況に影響を及ぼす要因について検討した。

¹ 東京農工大学農学部 School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院農学研究科 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

3. 結果と考察

矢川の地形と水面形(**Fig.1**)から、下流端から 400 m までは勾配が大きく、そこから 1000 m までは勾配が小さくなるなど、矢川の物理環境特性の形成要因がみてとれる。植生

の被覆度は、水面勾配の大きい領域で比較的大きくなっており、流路内の粗度に影響を及ぼすことが推察された。合成粗度係数から計算した断面平均流速と実測値(**Fig. 2**)から、合成粗度係数に基づく断面平均流速が過大評価していることが明らかになった。**Fig. 2c**では、過大評価している領域での植生被覆度が大きくなっていることから、植生の影響が示唆された。その他、過大評価の要因として、測量誤差等も考えられる。

4. おわりに

本報では、現地調査の結果から基礎水理量について報告し、水理解析時に影響を及ぼす要因について検討した。河床材料から推定した粗度係数では流速を過大評価する傾向がみられたことから、植生被覆度等の考慮が必要ではあるが、植生の種類や形態(抽水植物や沈水植物等)が影響するため、現実的な水理解析に向けた取り組みが求められる。

Table 1 Roughness estimates used in this study

Class	Diameter (m)	k_s (m)	Roughness n
LG	0.064~	0.128	0.02960464
MG	0.016~0.064	0.032	0.02349722
SG	0.002~0.016	0.005657	0.01760303
Sand/Clay	~0.002	0.001414	0.001651452

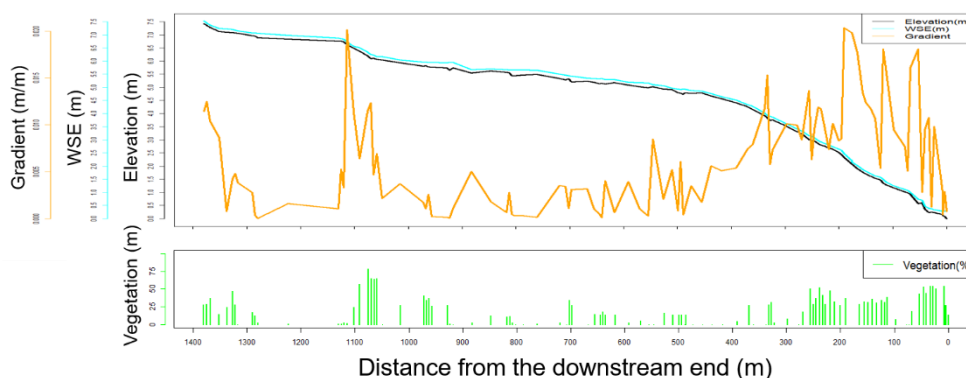


Fig. 1 Elevation(m), WSE(m), Gradient and percent vegetation coverage along Yagawa

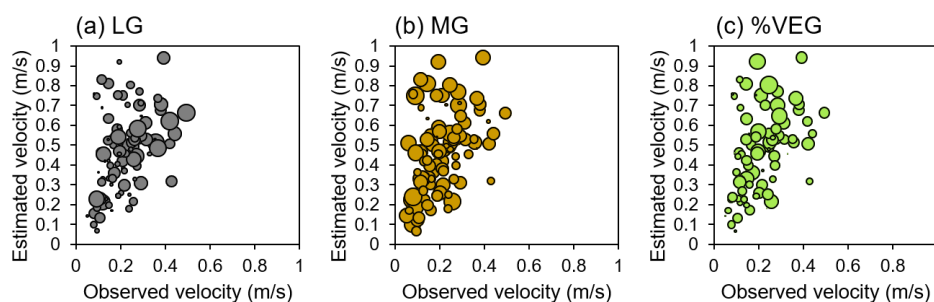


Fig. 2 Observed vs estimated water velocities in Yagawa, of which bubble size indicate the percent coverage of (a) large-sized gravel (LG), (b) medium-sized gravel (MG), and (c) vegetation (VEG).

引用文献

松澤 (2018) ランダムフォレストを用いたホトケドジョウの生息環境および魚種間共存パターンの解析. 東京農工大学大学院農学府農業環境工学専攻 修士論文

水生植物による流速低減効果に関する野外調査と室内開水路実験

Effects of aquatic vegetation as a flow resistance under field and laboratory conditions

○船越 寛¹・相原星哉²・福田信二³

○FUNAKOSHI Kan・AIHARA Seiya・FUKUDA Shinji

1. はじめに

水生植物は、流路内の水理環境によって空間分布を規定される一方で、生態系エンジニアとして流速分布や土砂輸送等に影響を与えている。植生が水の流れに及ぼす影響については、河川工学を中心に、数理解析や実験等による様々な研究がなされてきた(安瀬地ら, 2008)。水路内の植生は、通水障害の主要因になるため、問題視されることが多いが、魚類や水生昆虫等は、植生や河床材料によって形成される微小空間をマイクロハビタットとして使用していることから、水利面と環境面でのバランスの取れた管理のための知見の集積が求められる。そこで本報では、水生植物を介した水路内流況と魚類行動の関係性解析を最終目的とし、その基礎知見として集積した植生の抵抗特性に関する現地調査と室内開水路実験について報告する。その際、府中用水や矢川の一部に繁茂しており、既往の定点調査から複数種が使用することが報告されているセキショウに注目する。

2. 方法

2.1 現地調査

本調査は、府中用水（東京都国立市）において、水路内に繁茂している水生植物による流速低減効果の評価を目的とする。2018年の灌漑期に、セキショウ（*Acorus gramineus*）が繁茂している区間を5地点、オオフサモ（*Myriophyllum aquaticum*）とミクリ（*Sparganium erectum*）についてはそれぞれ1地点ずつを調査した。各地点において、流速および水深、水路幅、水面幅、植生幅、植生長、植生高、水温を測定した。流速の測定には、1次元電磁流速計（KENEK社製、LP30）を使用して、各計測点について5回計測し、最大値と最小値を除外し、平均流速を計算した。

2.2 室内開水路実験

東京農工大学農学部（東京農工大学農学部）の室内開水路（幅40 cm、全長810 cm、平均水路勾配1/2500）において、セキショウの流速減衰効果の検討を目的に、室内開水路実験を実施した。本研究では、実験水路の流下方向をx軸、横断方向をy軸、鉛直方向をz軸と定義し、2 mの実験区間を設定した。実験で使用するセキショウは、土を取り除いた状態にし、金網（17 cm×21 cm）に固定し、平均粒径4 mmの小礫を厚さ3 cmになるように敷き詰め、金網が埋まるように設置した。その際、実験区間内の流速分布への影響を考慮し、実験区間の上下流の1 mに小礫帯を延長した。植生群は、実験区間の上流端から50 cmの断面を先頭に、金網の長辺が左岸側の水路壁に接するよう配置した。水深は、水路床の小礫上面から15 cmになるように調節し、流速は流下方向に10 cm間隔で、横断方向には5点～10点、鉛直方向に3点（水深3 cm、12 cm、15 cm）について、3次元電磁流速計（KENEK社製、VP3000）を用いて計測した。さらに、流速の測定結果から、統計ソフトRのパッケージ「akima」を使用し、各水深における流速分布の平面図を作成した。

¹ 東京農工大学農学部 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院農学府 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

³ 東京農工大学大学院農学研究院 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

2.3 植生の流速低減効果の定量評価

本報では、植生の流速低減効果を示す指標として、植生帯抗力比 $R_i=f_i/f_0$ を用いた。ここで、 $f_i=\rho \cdot U_i^2 \cdot A/2$ であり、 f_i は動圧 ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)、 ρ は水の密度 (kg/m^3)、 U_0 は植生带上流側の代表流速 (m/s)、 U_i は断面平均流速 (m/s)、 A は植生帯を横断方向に投影した面積 (m^2) である。実水域での植生帯は、場所によって植生の幅が変化するが、ここでは直方体を仮定し、流速の低減効果を評価した。

3. 結果と考察

流速低減効果の評価指標として抗力比を計算した結果、実水域での調査結果では植生被覆面積が大きくなるほど抗力比が増大する傾向がみられたが、室内実験の結果では逆の傾向であった (**Fig. 1**)。これは、**Fig. 2** のように、植生帯の側方の高流速域が植生後方に侵入していることに加え、実水域とは異なり、実験水路では植生の分布が固定部に集中していることに起因していると考えられる。なお、底層 ($z=12 \text{ cm}$ および $z=15 \text{ cm}$) は、表層 ($z=3 \text{ cm}$) と比較すると、流速低減効果が小さくなっている。これは、セキショウが根元から葉に向かって扇状に広がっているため、根元に比べて上部の方が水と接する面積が大きくなり、より大きな減衰効果を発揮したためと考えられる。また、抗力比の傾向は、セキショウとオオフサモやミクリとでは傾きが異なっており、抽水植物と沈水植物という形態の違いを反映しているものと推察される。

4. おわりに

本報では、現地調査と室内開水路での観測結果から、水生植物が有する流速低減効果を評価した。結果として、やや不明瞭な傾向ではあったが、植生帯の大きさや植生種と形態の違いによって低減効果が異なることが明らかになった。一般に、低減効果を定量的に表現する抗力係数は、抵抗体の形状や配置によって変化するため、より実水域に近い状態での評価に加え、マニングの粗度係数の算出等のような生態水理解析に資する理論的な考察が必要である。今後は、魚類による植生帯の利用形態に関する実験結果に基づいて、物理環境－植生－魚類の相互関係について解析する予定である。

引用文献

安瀬地ら (2008) 水路側岸に水没した下植生群を有する開水路流れの一次元解析モデル。農業農村工学会論文集, 258, 479–484。

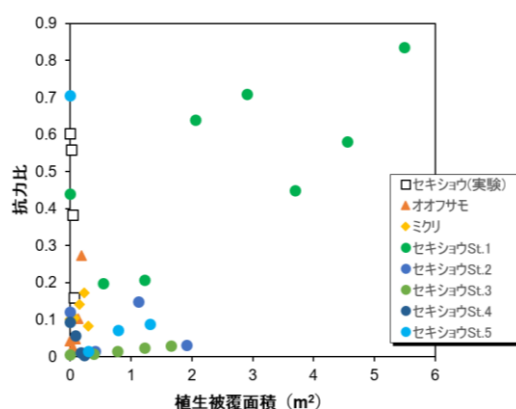


Fig. 1 植生帯の被覆面積と抗力比

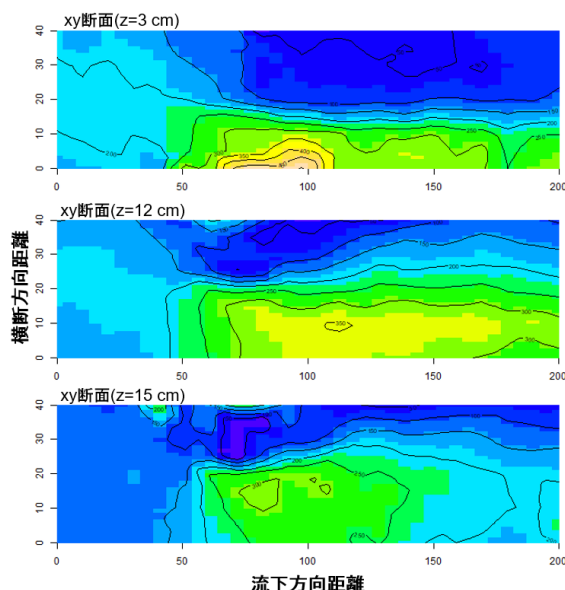


Fig. 2 実験水路内の平面 2 次元流速分布

公益法人農業農村工学会 応用水理研究部会

本研究部会は、応用水理に関する学理と応用についての科学的研究を推進し、農業農村工学分野の学術・技術の振興と社会の発展に寄与することを目的としています。

<http://www.jsidre.or.jp/ouyousuiri/>

事務局：〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1 - 1

宮崎大学農学部 森林緑地環境科学科気付

応用水理研究部会事務局（部会長：稲垣 仁根）