

令和4年度応用水理研究部会 講演集



令和4年11月26日

東京大学農学部フードサイエンス棟中島ホール

(公社) 農業農村工学会応用水理研究部会

令和4年度応用水理研究部会講演会プログラム

開始時刻	課題番号	講演者	題目	ページ
8:55			開会挨拶 髙木強治	
		第1セッシ	ョン 座長:藤山 宗	
9:00	発表課題1	竹内雄人	LBM を用いたフィンガー流の研究	1
9:25	発表課題 2	一恩英二	石川県の手取川扇状地における河川と水 路及び人工アユと天然アユの肥満度の違	3
9:50	発表課題 3	佐々木崚馬	メダカ属を対象とした管水路オリフィス 型魚道の開発 	9
10:15	発表課題 4	楠堂紡	農業用ダムの水文データを活用した深層 党羽型ため池水位子測エデルの開発	16
			子百空ため池小位了別モアルの開発	
		休憩	:10:40~10:55	
		第2セッシ	ョン 座長:中田 達	
10:55	発表課題 5	鈴木哲也	3次元画像解析による農業用パイプライ	18
			/ にわりる擬似腧水快山に関りる研先	
11:20	発表課題 6	清水拓哉	水撃圧波形を利用したパイプライン漏水 検知手法の現場適用技術の開発 – 高周波	20
			成分と漏水シグナルの関係について-	
11:45	発表課題7	羽田野袈裟義	ラジアルゲートをすぎる流れの流量と上 流水深の相互依存関係ならびに縮流係数	22
			について	
		休憩	: 12:10~13:30	
		第3セッシ	ョン 座長:浅田洋平	
13:30	発表課題8	人見忠良	低平地排水路における調整水門操作に寄 与する水位予測手法の検討	27
13:55	発表課題9	中田達	ゲート撮影画像の解析による水位および	32
			流量計測の実用性の検討	
14:20	発表課題 10	藤山 宗	開水路掛りが混在するセミクローズドパ	39
			1ノフインシステムにおける流量予測を 活かした降雨時の水管理手法の検討	
14:45	発表課題11	寺澤明人	大規模な頭首工を対象とした水理模型実験の裏例約金	44
			一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	
15:10			閉会挨拶 髙木強治	

LBM を用いたフィンガー流の研究 Lattice Boltzmann Study on fingering flow

○竹内 雄人*·竹内 潤一郎*·藤原 正幸* TAKEUCHI Yuto, TAKEUCHI Junichiro, and FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

不飽和の多孔質体へ水が浸入する際,フィンガー流と呼ばれる選択的な流れが生じることがある. 流体力学的な不安定性によるフィンガー流は透水係数の空間分布が少ない均質な多孔質体におい ても発生し,この現象は40年以上にわたり研究されてきた[1].

近年,多孔質体内の混相流れについて間隙スケールの視点で観測や計算を行う研究が盛んになっており, CT による間隙流体分布の可視化,間隙スケールモデルの構築,流体力学的方程式による直接数値計算が行われている.一方で数値安定性及び計算負荷の面から,直接数値計算の適用範囲は大きくなく,特に,二流体の密度を同一とするといった簡略化が行われることが多い.本研究では数値安定性の高い手法である phase-field 格子ボルツマン法(LBM)を密度比の大きい水と空気の流れに適用し,フィンガー流の数値計算を行う.

2. 格子ボルツマン法(LBM)

phase-field LBM では、二相界面スキームに相当する保存型 Allen-Cahn 方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi u) = \nabla \cdot \left[M \left(\nabla \phi - \lambda n \right) \right]$$
(1)

と連続式及びナビエストークス方程式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} \boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T) \right] + \boldsymbol{F}$$
(3)

を近似的に解いて混相流の計算を行う. ここで、 ϕ は0から1の値をとる秩序関数、uは流速ベクトル、 *M*はモビリティ、 λ は界面厚さと関係がある値、nは界面法線ベクトル、 ρ は密度、pは圧力、 μ は粘 性係数、*F*は界面張力項と重力項から成る体積力である. LBM ではこれらの方程式を直接解くわけ ではなく、摂動展開することで対象の方程式が近似的に導出される格子ボルツマン方程式(LBE)を 解く. LBE のモデルは Liang らのモデル[2]を用いる. $\phi=0$ が空気、 $\phi=1$ が水を表し、 $0 < \phi < 1$ が 拡散界面となる. 添え字a、wをそれぞれ空気、水として、界面での密度と動粘性係数 $v = \mu/\rho$ は以 下の2式により補間する.

$$\rho = \phi(\rho_w - \rho_a) + \rho_a \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\nu}_w - \boldsymbol{\nu}_a) + \boldsymbol{\nu}_a \tag{5}$$

3. 計算条件

5.12×10.365 cm の計算領域内に, 直径 0.5 mm, 接触角 45°の円形固体粒子をランダムに配置し, 模擬的な多孔質体を生成した. 粒子壁面と左右境界にはすべりなし境界を与えた. 上端境界には流 速境界を与え, 水を一定フラックス 8.4084×10⁻⁴ m/s で浸入させた. 下端は圧力境界とし, 基準となる 空気の圧力 P = 0 Pa を与えた. 初期状態での水分量はゼロとして計算を行った. 計算領域を $\delta x = 0.0125$ mm の正方形格子で分割し, 全体で 4096×8292 の格子数とした.

キーワード: 数値流体力学,浸透流,水分移動

^{*}京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

4. 結果

図1に計算開始から4.77 秒後,9.27 秒後,11.46 秒後(下端到達時)の水分分布を示す. 三箇所 から水が内部へ浸入しているが,右側のフィンガーのみが下端へ進行している.4.77 秒後ではフィン ガー内部が完全に飽和している一方で,9.27,11.46 秒後ではフィンガーの上部で排水が行われ,内 部が不飽和となっている. これは saturation overshoot と呼ばれる現象であり,既往の実験でも確認さ れており[3],フィンガー流発生の必要条件とされている[1].

図 2 に図 1 と同じ時間経過における圧力分布を示す.フィンガーの飽和部ではフィンガー先端に 向かうにつれ圧力が大きくなっており、逆圧力勾配となっている.またフィンガー先端は 0 Pa から数十 Pa 程度の正圧,後背部で大きな排水が行われている箇所は-300から-400 Pa 程度となっている. 先端の圧力が水浸入圧,排水箇所の圧力が空気浸入圧に対応すると考えられる.

5. おわりに

本研究では phase-field LBM を用いて多孔質体への間隙スケールの水浸入のシミュレーションを行った. 講演ではこれらの圧力勾配・先端圧力・後背部の圧力が妥当であることをダルシー則と間隙スケールモデルを用いて示す. また, フィンガーの進行速度と幅の計算結果を紹介する予定である.



図1 4.77 秒後, 9.27 秒後, 11.46 秒後(下端到達時)の水分分布

Fig. 1 Water-air distribution at t = 4.77 s, t = 9.27 s, and t = 11.46 s (breakthrough)



図2 4.77 秒後, 9.27 秒後, 11.46 秒後(下端到達時)の圧力分布

Fig. 2 Pressure distribution at t = 4.77 s, t = 9.27 s, and t = 11.46 s (breakthrough)

参考文献

[1] DiCarlo, D. A. (2013). Water Resources Research, 49, 4531–4544.

- [2] Liang, H., et al. (2018). *Physical Review E*, 97(3), 033309.
- [3] Glass, R. J., et al. (1989). Soil Science, 148(1), 60-70.

石川県の手取川扇状地における河川と水路及び人工アユと天然アユの肥満度の違い

Differences Condition Factors between Rivers and Canals and between Artificial and Wild Ayu in the Tedori River Alluvial Fan in Ishikawa Prefecture

○一恩英二* 佐伯卓哉* 長野峻介*藤原洋一* 藤原正幸**

OICHION Eiji*, SAEKI Takuya*, CHONO Shunsuke*, FUJIHARA Yoichi* and FUJIHARA Masayuki**

1. はじめに

両側回遊魚であるアユ Plecoglossus altivelis は春季に海域から河川に加入し, 中流から上流まで遡上し定着する(高橋・ 間野, 2022).また,漁業あるいは遊業の 対象として,内水面水産業において重要 な魚種である(岩田ら, 2007).しかし, アユの河川遡上尾数は,一般に年変動が 大きいため,安定した資源を確保するた めに(増田, 2019),人工アユの放流事業 が全国で行われている.

一方,手取川から農業用水を確保する ための白山頭首工では、2019年以降のア ユの側線上方横列鱗数の研究により,人 エアユの迷入が生じていることが明らか になった(山尾,2020).つまり,農業用 用水路には白山頭首工から迷入している 人工アユおよび天然アユが生息している ことが明らかになった.

本研究は、捕獲したアユの肥満度を計 算することで、水路と河川の生息環境の 違いがアユに与える影響について評価す る.加えて、人工アユと天然アユという 生まれた環境の違いが成育段階にどのよ うな違いを及ぼしているかについて評価 を行うことを目的とした.

2. 研究方法

2.1 調査地

本研究は,石川県の手取川扇状地にあ

る手取川と七ヶ用水を対象に行った (Fig.1). 七ヶ用水は,手取川の白山頭首 工で取水を行い, 共用幹線水路から1号 および2号幹線水路に分岐したのち、い くつかの支線水路に分かれ、直接あるい は河川を経由して海に流入する農業用水 である.研究対象に用いたアユは 2019年 ~2022年に手取川と七ヶ用水で採集した ものを用いた.また、2019年に白山手取 川漁業協同組合から神通川産と揖保川産 の人工アユ,石川県総合水産センター生 産部美川事業所から手取川産の人工アユ をいずれも放流前の各 50 個体の提供を 受けた. さらに, 2021 年に白山手取川漁 業協同組合から手取川産の放流前の人工 アユ 14 個体の提供を受けた(Table 1).



* 石川県立大学生物資源環境学部 Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University ** 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

キーワード:側線上方横列鱗数,Cassie法,肥満度,放流

Table 1 研究に用いたサンプル

Sample used for research									
		野外での捕獲個体							
	河	Ш		水路					
	天然	人工		天然		人工			
2019	106		2	4		10			
2020	136	-		173		1			
2021	-	-		12		1			
2022	1	1		8		1			
	放流前に提供を受けた個体								
	手取川産		神通	川産	判	保川産			
2019	50		5	0		50			
2020	_		-	-		-			
2021	14		-	-		-			
2022	-		-	-		-			

2.2 人工アユと天然アユの判定

既往研究(山尾, 2020)では, 岐阜県河 川環境研究所 (2011) にしたがって, アユ の側線上方横列鱗数を計数することで, 人工アユと天然アユの判定ができること が明らかになった.これに倣い、アユの 背鰭の5番目の鰭条の基部の鱗(2枚の 鱗が基部に重なっている場合は左側の鱗 から計数)から側線上まで鱗のつながり にそって, 斜め下に計数した (Fig.2). 鱗 が斜め下側に続いていない場合は、横方 向の鱗の並びをみて計数した.計数した 鱗数を記録し, ヒストグラムを作成した ところ、グラフ上に2つの山を確認する ことができ、Cassie 法を用いて人工アユ と天然アユを分離することができた (Fig.3). この方法を用いて、2020年か ら 2022 年に採集したアユについても同 様に側線上方横列鱗数を計数し、人工ア ユと天然アユの判定を行った.

2.3 肥満度の計算

2019 年~2022 年に採集したすべての

アユの体長と湿重量を計測し、以下の式 を用いて肥満度を計算で求めた。

肥満度 K(‰) =
$$\frac{湿重量}{(体長)^3} \times 1000$$

(湿重量:g)
(体長:cm)



Fig.2 側線上方横列鱗数 (山尾ら, 2020) Number of scales above the lateral line (Yamao *et al.*, 2020)



Fig.3 野外の鱗数分布と Cassie 法で 分解した分布曲線 (山尾ら, 2020) Scale number distribution of wild ayu and distribution curve decomposed by Cassie

method (Yamao et al., 2020)

3. 結果と考察

 3.1 2019~2022 年のアユの肥満度 2019~2022 年に採集した河川と水路に おける人工アユと天然アユ及び,2019年 と2021 年の放流前の人工アユの肥満度 分布図の結果を Fig.4 に示す.



Fig.4 手取川扇状地におけるアユの肥満度(2019-2022) Condition factors of ayu in the Tedori River alluvial fan (2019-2022)



Fig.4 手取川扇状地におけるアユの肥満度(2019-2022)(つづき) Condition factors of ayu in the Tedori River alluvial fan 2019-2022 (continued)

まず,2019年において天然アユに焦点 を当てると、河川と水路と成育水域が異 なるにも関わらず、平均肥満度がそれぞ れ12.7 と11.8 と河川に生息するアユの 方が肥満度がわずかに高いが大きな違い は見られなかった.一方、人工アユでは 平均肥満度は河川で採集したアユが8.7 であるのに対して、水路で採集されたア ユの方が11.2 と高いことが分かった.こ れは、人工飼育下で育てられたアユにと って、河川よりも餌資源の確保の面にお

いて水路の方が有利に働いた可能性が考 えられる.また,2019年に河川で採集し た人工アユについて,産地がどこである かは分からないものの,2019年の手取川 産,神通川産,揖保川産のそれぞれの産 地の放流前の平均肥満度と比較してもほ とんど変わらないことが分かった.

次に,2020年の河川と水路における天 然アユの平均肥満度の結果から河川で採 集した天然アユの肥満度は9~13前後に 集中しており,最小値及び最大値の肥満 度がそれぞれ 8.4 と 15.7 であった.一方 で、水路で採集された天然アユの肥満度 は 11~17 前後と幅広く、また最小値、最 大値の肥満度がそれぞれ 7.8 と 22.4 であ った.これは、七ヶ用水のなかでもアユ の生息に適している環境と餌資源が乏し い環境の双方があるためと考えられる. また、河川環境と比べて水路環境は落差

工などの障害物により遡上等の移動に制 約があるため幅広く肥満度が計算された と考えられる.

さらに、2019年の河川と水路、2020年 の水路、2021年の水路、2022年の水路に おいてそれぞれの人工アユと天然アユの 平均肥満度を比較すると、全て天然アユ の方が人工アユに比べて肥満度が高いこ とが分かる.これは、原因こそ明らかに なっていないが、人工アユの中には夏季 になると痩せ気味の個体が多くなる傾向 がある(たかはし河川生物調査,2022)と いう報告と一致している.

3.2 全調査期間中のアユの肥満度

比較的にまとまって採集することがで きた 2020 年~2022 年の水路における天 然アユの平均肥満度に着目すると,2020 年から順に 13.6,12.7,12.3 と年代ごとの 大きな違いは見られないことが分かる. そこで,2019 年~2022 年を通じて肥満度 に着目して作成したグラフを Fig.5 に示 す.Fig.5 に示すように,河川における天 然アユの肥満度は 5~18 の中で分布して おり,10.5 で最頻値をとり,平均値が 11.7 であることが分かった.



Fig.5 手取川扇状地におけるアユの肥満度(2019-2022) Condition factors of ayu in the Tedori River alluvial fan (2019-2022)

一方,水路における天然アユの肥満度 は7~23の中で分布しており,河川に比 べて幅広いことが分かった.また,最頻 値が13.5,平均値が13.5と河川に生息す るアユより肥満度が高いことが分かった. 人工アユについても天然アユと同様の結 果を確認することができ,アユにとって 七ヶ用水の環境は河川同様に適した環境 である可能性が高いと推測される.ただ, その一方で,人工アユについては本研究 では肥満度 15 を超える個体の発見に至 ることはできず,放流後の人工アユの成 長過程についても今後研究していく必要 がある.

4. まとめ

2019 年~2022 年に捕獲したアユの肥 満度を計算した結果,水路と河川の比較 では,人工アユと天然アユともに水路に 生息するアユの方が肥満度が高いことが 分かった.また,人工アユと天然アユの 肥満度を比較した結果,河川・水路にか かわらず天然アユの方が肥満度が大きい ことが明らかになった.これらのことか ら七ヶ用水はアユの成育にとって河川同 様又は,河川以上に適した環境である可 能性が高いと推測される.

謝辞:本研究は、日本学術振興会科学研 究費補助金(基盤研究(B))(課題番号: 22H02456,代表:藤原正幸)の支援を受 けて実施した.ここに記して謝意を表し ます.

引用文献

- 岐阜県河川環境研究所 (2011): アユの側 線上方横列鱗数の計数マニュアル Ver.1 入手先 〈https://www.fish.rd.pref. gifu.lg.jp/ko hoshi/pdf/19-1112-ayu.pdf〉 (参照 2022. 10.10)
- 岩田祐士・武島弘彦・田子泰彦・渡辺勝 敏・井口恵一朗・西田陸(2007): ミト コンドリア SNP 標識で追跡した放流琵 琶湖産アユの行方,日本水産学会誌, 73 (2), pp.278-283.

- 増田泰隆(2019):手取川におけるアユの
 遡上量予測,石川県水産総合センター
 研究報告,第6号,pp.13-16.
- たかはし河川生物調査事務所(2022)ア ユの肥満度 入手先〈https://hito-ayu. net/introduction05.html〉(参照 2022.11.1)
- 高橋勇夫・間野静雄(2022): 遡上行動を 阻害する構造物が無い北海道朱太川に おける天然アユの流程分布,応用生態 工学, Vol.25, pp.2-12.
- 山尾幹大・長野峻介・藤原洋一・一恩英 二・荻原浩希・藤原正幸(2020):手取 川扇状地における側線上方横列鱗数を 用いたアユ個体群の移動・分散の推定, 第 28 回日本雨水資源化システム学会 大会研究発表会講演要旨集, pp.22-27.

メダカ属を対象とした管水路オリフィス型魚道の開発 Development of Pipe Flow Orifice Fishway for Medaka (*Oryzias*)

○佐々木崚馬*1 一恩英二* 藤原洋一* 長野峻介*
 ○SASAKI Ryoma*, ICHION Eiji*, FUJIHARA Yoichi*and CHONO Shunsuke*

1. はじめに

現在の水田は稲刈り機等の大型機械の 導入が進み,畑としての利用も増えてき ている(端,2005).そのため,地盤の強 靭化や水田の乾田化が追求されており, 水田内の水を効率良く排水する排水シス テムの向上に技術が進められている(端, 2005).一般に水田で圃場整備を行う場合 の排水路の深さは田面下 0.5~1.2m を有 することになっており(農林水産省, 2000),水田と排水路の間には大きな落差 が生じている.圃場整備事業は,農業生 産効率を大幅に向上させた一方で,深い 排水路を整備することで魚類等の生息場 所の水域ネットワークの分断をもたらし ている(鈴木ら,2004).

水田や水路といった異なる水域を移動 して生活する魚属にはメダカ属(Oryzias) が存在する(端, 2005).メダカ属は一時 的水域である水田へ遡上し,水田で産卵・ 繁殖することが知られている(端, 1999). しかし,圃場整備事業によって,水田へ の遡上が困難となり,生息個体数の減少 を引き起こしている(端, 2005).その結 果,キタノメダカ(Oryzias sakaizumi)と ミナミメダカ(Oryzias latipes)は現在, 環境省レッドリスト 2020の汽水・淡水魚 類において,絶滅危惧II類(絶滅の危険が 増大している種)に指定されている(環 境省, 2020).

圃場整備事業によって分断された水域

ネットワークを修復するために,これま でにアイスハーバー型(端,1999),千鳥 X型(鈴木ら,2001),カスケードM型 (同左),コルゲート管を用いた水田魚道 (佐藤ら,2008)などが開発されてきた. しかし,これらの魚道の設置には広大な 面積を必要とし,設置費や維持管理費等 もかかってしまう.このことを考慮した 上で今後は,どのような水田にも対応で きる安価で高性能かつ設置のしやすい管

本研究では、水田周辺に生息する魚類 の代表種であり、最も遊泳能力が小さい メダカ属を対象として(端,2005)、新た な管水路オリフィス型魚道を開発した. この魚道がメダカ属に適するのかどうか を検証するとともに、メダカ属の遡上の 有無に影響を与える要因を分析すること で最適な魚道諸元を明らかにすることを 目的とした.

水路型魚道の開発が求められる.

2. 方法

2.1 実験装置

幅 60cm, 奥行き 30cm, 高さ 35cm のガ ラス水槽 2 つを隔壁付きの塩ビパイプで つないで装置を製作した (Fig.2). 管水路 オリフィス型魚道には,内径が 52mm の 透明塩ビパイプ TV50 (株式会社クボタケ ミックス), VU 継手 90° VUDL-C50 (東 栄管機株式会社), VU 継手チーズ VUDT-

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

キーワード: 圃場整備事業, 水域ネットワーク, 修復, 遡上実験, 突進速度

C50 (東栄管機株式会社),透明塩ビソケ ット VU-DS(株式会社クボタケミックス) を用い、魚道全体の長さは約 2.0m とな った. 上流側には遡上した個体が下流側 へ戻らないようにするための網を設置し た. また, 循環ポンプ (コンパクトオン 1000、エーハイム社)および水温調節装 置(株式会社イワキのレイシークーラー LX-250ES, コントローラーTC-100 および 株式会社ジェックスのヒーターSH160 か ら構成される)を用いて、流量と水温を 調節できるようにした.実験には、株式 会社ジェックスのカルキ抜きを加えた水 道水を使用した.所定の上下流水位差が 得られるように,循環ポンプの出力を調 整した.

遊泳能力の小さなメダカ属の遡上距離 を短くするように配慮し、厚さ0.5mmの PET 素材(サンデーPET,アクリルサンデ 一株式会社)で内径 52mmの円形板の中 心部に内径 21mmのオリフィス(小孔) を設けた円形オリフィス型隔壁を製作し た.魚道内にこのオリフィス付き円形隔 壁を10cm間隔で11枚取り付けるため、 1mの塩ビパイプを10等分し、その間に 隔壁を挟み込むように透明塩ビソケット VU-DS(株式会社クボタケミックス)を 用いて取り付けた(Fig.2).

魚属が遊泳する際の通路幅については, その魚属の体長の 1/2 を越えないとされ ている(中村, 1997).メダカ属の体長は 一般的には約 30mm とされており(端, 2005), 遡上通路すなわちオリフィスの内 径 d は 15mm あれば十分に通過できる. このことを考慮して,本研究ではオリフ ィスの内径 d を 21mm とした.また,突 進速度で遡上する区間の後には休息場所 が必要である(農業農村工学会, 2014). ここで,休息場所として最小限必要な広 さは長さ(2BL~4BL)×幅(BL/2)程度 とされている(中村, 1997). メダカ属の BLは3cm程度なので,長さ(6cm~12cm) ×幅(1.5cm)が必要である.したがって, Fig.5 のように隔壁間隔が 10cm, 幅が 1.65cmとなるように魚道を設計した.

さらに,メダカ属は中層〜上層を泳ぐ 魚属であるため(中村,1997),その位置 に魚道上り口を設置した.







全体



管水路オリフィス型魚道





2.2 供試魚

供試魚は、石川県かほく市内日角の農 業水路にて採集した.採集には目合い 3mmのサデ網(三谷釣漁具店,bl-S3)を 使用し、体長 20mm 以上の個体を採集し た. 石川県の野生メダカは,本研究では, キタノメダカとミナミメダカの同定は実施していない. 採集した個体は,カルキ ぬき(ジェックス株式会社)を加えた水 道水を満たしたガラス水槽に入れて1~2 日飼育した後,実験に用いた.一度実験 に使用した個体は,他の実験には用いな いこととし,採集場所と同一水系の最下 流地点で放流した.

2.3 実験ケース

メダカ属の遡上に適切な実験時間,実 験時間帯,供試魚個体数,上下流水位差 を決定するために 6 つの実験ケースを設 定した.

Table 1 実験ケース

Experiment cases							
実験	供試	日時(時間)	水位差				
番号	魚数		(cm)				
1	5	10/12, 15:00 \sim	8				
		翌15:00(24時					
		間)					
2	10	10/14, 9:00~	8				
		17:00 (8 時間)					
3	5	10/18, 15:00 \sim	5				
		翌15:00(24時					
		間)					
4	10	$10/21$, $9:00 \sim$	10				
		17:00 (8 時間)					
5	10	$10/22, 9:00 \sim$	10				
		17:00 (8 時間)					
6	10	$10/24$, $9:00 \sim$	10				
		17:00 (8 時間)					

メダカ属の行動は,朝方~昼間にかけ て活発となることから(端,1999),実験 1と実験3以外の実験の実験時間は8時 間,時間帯は9:00~17:00とした.またメ ダカ属の行動は,25℃前後の水温で活発 化すると推定し,実験装置内の水温は 25℃に一定となるように水温調整を行な った.供試魚数は、実験1と実験3のみ 5個体とし、そのほかの実験は10個体と した.

2.4 溯上実験

実験開始時に供試魚を実験装置の下流 側の魚道上り口水槽に放流し、実験2お よび実験 4~6 は1時間ごとに遡上魚(魚 道上り口水槽から魚道に進入して魚道下 り口水槽に到達した個体)の有無を確認 し、遡上魚がいた場合はその個体の体長 を測定して,実験終了個体として別に用 意した水槽に移動した.連続24時間の実 験1と実験3は, Fig.3 に示す時間帯で遡 上魚を確認した.実験終了時には遡上魚 及び非遡上魚の個体数を記録し, 遡上率 (全供試魚数に対する遡上個体数魚の百 分率)を求め,非遡上魚の体長もすべて 測定した.

2.4 水位·流速·流量

実験開始時刻の9:00と実験終了時刻の 17:00 に流速,上下流水位差,水温,水質 (DO, pH, EC), 照度を測定した.

流速は、ポータブル3次元電磁流速計 VP3000(株式会社ケネック)を用いて魚 道上り口の流速を測定した.計測地点は, 土木学会(2001)の五点法にしたがった. 流量 Q は,式(1)より,5 点の測定点の 流速を $v_1 \sim v_5$ とし、これと管断面積 A を 5 等分したΔA1~ΔA5の積の総和から求め た.

> $Q = \Delta A_1 v_1 + \dots + \Delta A_5 v_5$ $= (A/5)(v_1 + v_2 + \dots + v_5) \dots (1)$

水位差は, 鋼尺を用いて上流側プール の水深 H1 及び下流側プールの水深 H2 を 測定し、その差 $(H_1 - H_2)$ を算出した.

3.5 水温,水質,照度

水温測定には株式会社アイシーのサー モ 1050 を, 溶存酸素量の測定にはポータ ブル型溶存酸素メータ D-210D (株式会社 堀場製作所), pH 測定にはコンパクト pH メータ LAQUAtwin B-771 (株式会社堀場 製作所), EC 測定にはコンパクト電気伝 導率計 LAQUAtwin B-712 (株式会社堀場 製作所),照度測定には照度計 T-10(コニ カミノルタ株式会社)を用いた.

水温、水質、照度については特別な管 理は行わなかったため、実験ごとに記録 し、 遡上の有無への影響を考察した.

3. 結果と考察

3.1 遡上実験

実験 1~6 の遡上実験の結果を Table 1 に示す.

Table 1 遡上実験結果

Res	uns of asec	na experim	ents
実験	供試魚	遡上個	遡上率
番号	数	体数	(%)
1	5	3	60
2	10	9	90
3	5	1	20
4	10	9	90
5	10	9	90
6	10	9	90

Results of ascend experiments

水位差 10cm の実験 4~6 は、供試魚 10 個体に対して9個体の遡上が確認された (遡上率 90%). それに対して, 最も遡上 率が低かったのは水位差 5cm の実験 3 で、 供試魚5個体に対して1個体の遡上であ った (遡上率 20%). 水位差 8cm の実験

1と実験2では, 遡上率60%と遡上率90% が得られた.実験2は供試魚数10個体, 9:00~17:00の日中8時間で実施した実験 で,水位差10cmで同様の条件で実施し た実験4~6と同じ遡上率となった.

時間帯ごとの遡上個体数を Fig.3 に示 す. 連続24時間の実験1と実験3では、 いずれも夜間のメダカの遡上は確認され なかった.日中8時間の4つの実験の結 果においても、実験開始から14時くらい までに多くのメダカが遡上しており、16 時以降は遡上個体は観察されなくなった. 供試魚数については、5 個体の実験より 10個体の実験の方が遡上率が高い傾向が あるように思われたので,実験4~6では 10個体の供試魚を用いることとした.メ ダカの遡上実験では、魚道上り口に1個 体が進入するとそれを追尾するように数 個体が魚道上り口に進入する様子が観察 されたおり,メダカ属は群れで泳ぐ魚類 であることから(端, 2005),供試魚数の 多寡が個体の遡上の有無に影響を与えて いる可能性がある.

Table1に示したように,実験3以外の 実験では遡上率が60~90%となっており, 管水路オリフィス型魚道がメダカ属の遡 上に有効に機能していたと考える.

実験 4~6 の供試魚の体長分布は 2 つ の山から構成されている (Fig.4).供試魚 の採集時期は 10 月であり,0 年魚と1 年 魚の2 世代が混合していたと考えられる. 遡上魚の平均体長は 24.7mm で,非遡上 魚の24.1mm よりわずかに大きかった.

一般に魚類の突進速度(cm/s)や巡航速度(cm/s)は、体長(BL:cm)の倍数で表わす方が便利なことがあるが(塚本・梶原,1973),2世代を含む集団において、簡単な体長の倍数で遊泳能力を表すことは難しいのかもしれない。



Number of ascend fish by time periods



Fig.4 供試魚の体長分布 (実験 4~6) Body length distribution of test fish (Cases 4-6)

3.2 水位·流速·流量

魚道上り口で計測した流速から算定し た流量とその流量を魚道上り口とオリフ ィス断面の流積を除して求めた魚道上り 口流速およびオリフィス流速を Table 2 に示す.魚道上り口流速は 8.8~12.0cm/s, オリフィス流速は 54.0~73.7cm/s,流量は 0.187~0.255L/s となった.ここで,塚本・ 梶原(1973)によれば,一般魚類の耐久

(巡航)速度は2BL~3BL/s,突進速度は10BL/sであり、これから供試魚の巡航速度と突進速度を算定すると前者は約4~
9cm/s,後者は20~30cm/sとなる.魚道上り口の流速は供試魚の巡航速度を越えており、オリフィス流速は供試魚の突進速度の約2~4倍の値だったことが分かる.

魚道設計流速は,魚類等の移動を誘う 速度(最低流速)を下回らない流速が必 要である(農業農村工学,2014).実験3 の遡上率が20%と低いのは,魚道上り口 流速(8.8cm/s)がこの最低流速を下回っ ていたか,供試魚数が5個体と少なかっ たことが理由として考えられる.今後, 水位差5cmの日中8時間の実験を10個 体の供試魚で3回実施して.どちらの影 響がより強いのかを明らかにすることが 必要である.

Table 2	水位差,	流速および流量	
Water level	difference	es, flow velocities and	ł

		rates		
実験番号	水位差 (cm)	魚道上り口 流速 (cm/s)	オリフィス 流速 (cm/s)	流量 (L/s)
1	8.0	9.7	59.8	0.207
2	8.0	9.5	58.3	0.202
3	5.0	8.8	54.0	0.187
4	9.6	11.4	69.6	0.241
5	9.8	11.6	71.0	0.246
6	10.0	12.0	73.7	0.255

3.3 水温,水質,照度

水温,水質 (DO, pH, EC),照度の平 均値を Table 3 に示す.日本水産資源保護 協会 (2018) によれば,pH は基準値程度 だったが,DO は基準値以下であった.供 試魚採集地の DO は,実験水の DO より 低い値であったこと,遡上率が 90%と高 かったことから,DO が遡上行動に与えた 影響は大きくなかったと考える.また, EC は 0.26~0.31mS/cm,照度も 890~ 1017lux と,実験ごとの差異は比較的小さ かったと考える.

Table 3 水温, 水質, 照度

Water temperatures, properties of water and

		illumi	nances		
実験番号	水温(°C)	DO (mg/L)	рН	EC (mS/cm)	照度(lux)
1	23.1	3.70	7.3	0.30	970
2	24.3	4.17	7.6	0.31	1009
3	24.0	4.46	7.4	0.26	890
4	24.5	4.50	7.5	0.30	914
5	24.5	4.70	7.5	0.31	948
6	24.5	4.42	7.5	0.30	1017

4. まとめ

本研究より下記の結論を得た.

- ・メダカ属は管水路オリフィス型魚道を 利用して 10cm の水位差を遡上するこ とが可能であった.
- ・メダカ属の遡上行動は夜間には確認さ れなかった.
- ・供試魚数は5個体よりも10個体の方が 遡上率が高くなる傾向があった.
- ・メダカ属の遡上率が最も高くなったのは、魚道上り口の流速が9.5~12.0cm/sのとき、オリフィス流速が58.3~
 73.7cm/sのときだった。
- ・ 遡上魚の平均体長は,非遡上魚より大 きい傾向があった.

今後はメダカ属の遡上の有無に影響を 与える環境因子を一般化線形混合モデル で分析する予定である.

謝辞:本研究は日本学術振興会科学研究 費補助金(基盤研究(C))(課題番 号:22K05889)(代表:一恩英二)の支援を 受けて実施した.ここに記して謝意を表 します.

引用文献

- 土木学会 (2001):水理実験指導書, 土木 学会, pp.29-31.
- 端 憲二 (1999):小さな魚道による休耕 田への魚属遡上試験,農業土木学会誌, 67 (5), pp.497-502.
- 端 憲二 (2005):メダカはどのように危 機を乗りこえるか,農文協, pp.10-77.
- 泉 完,菅原賢治,工藤 明,東 信行 (2004):バーチカルスロット型魚道に おけるアメマスの現地放流実験,農業 土木学会誌,72(7),pp.593-598.
- 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明 (2006):河川流下水を用いたスタミナ トンネルによるウグイの突進速度につ

いて,農業土木学会論文集,74 (4), pp.171-178.

- 泉 完,清水秀成,東 信行,丸居 篤, 矢田谷健一(2018):ミナミメダカの突
 進速度に関する実験,農業農村工学会
 論文集,86(1),pp.Ⅱ_1-Ⅱ_7.
- 環境省(2020):【汽水・淡水魚属】環境 省レッドリスト 2020, <u>https://www.</u> env.go.jp/content/900527441.pdf.
- 中村俊六(1997):魚道のはなし,山海堂, pp.84-174.
- 日本水産資源保護協会(2018):水産用水 基準(2018 年版), <u>https://www.</u> <u>ntsc.co.jp/guidelines/guideline_06.html.</u>
- 農業農村工学会(2014):よりよき設計の ために「頭首工の魚道」設計指針,公益 社団法人農業農村工学会, 237p.
- 農林水産省構造改善局計画部資源課
 (2000):土地改良事業計画設計基準
 計画 ほ場整備(水田)基準書 技術
 書,社団法人農業土木学会, p.181.
- 佐藤太郎, 佐藤 学, 稲垣政則, 佐藤武 信, 安実千智, 土田一也, 三沢眞一 (2007): 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, 26 (4), pp. 434-441.
- 鈴木正貴,水谷正一,後藤 章(2001): 水田水域における淡水魚双方向移動を 保証する小規模魚道の試作と実験,応 用生態工学,4(2),pp.163-177.
- 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 河川の接続が魚の生息に及ぼす効果の 検証,農業土木学会論文集,72(6), pp.641-651.
- 塚本勝巳,梶原武(1973):魚類の遊泳速 度と遊泳能力,水産土木,10(1),pp.31-36.

農業用ダムの水文データを活用した深層学習型ため池水位予測モデルの開発 Development of a deep learning model for reservoir water level prediction using hydrological data from agricultural dams

楠堂紡*,阿波野景*,岡山貴史*,山本純之*,木村匡臣*,松野裕*

Tsumugu KUSUDO, Kei AWANO, Atsushi Okayama, Atsushi YAMAMOTO Masaomi KIMURA, and Yutaka MATSUNO

【はじめに】近年,農業用ため池の老朽化や管理の粗放化による豪雨や地震時の崩壊の危険 性が懸念されている.この対策として,豪雨による流入量の増加を見越した事前放流が有効 と考えられているが,その適切な実施のためには予測される降雨下でのため池の水位変化を 正確に予測する事が重要となる.しかし,管理者の多くが農業従事者であるため池ではダム のように水文データの蓄積や水文モデルの導入が進んでいない.そこで楠堂ら(2021)は水 位,1つ観測点から得た降水量,放流量を用いた簡易的な深層学習型水位予測モデルの構築 と評価を行った.結果として学習経験の豊富な中小規模の降雨イベントに対して良好な精度 を得られた.一方で,深層学習手法全般の課題である学習データ不足と外挿的データの影響 により,大規模降雨イベントに対して著しく精度が下がる結果となった.一般的に画像解析 などで深層学習を用いる場合,データ不足への解決方法として転移学習やFine turning と呼 ばれるデータ拡張手法が用いられる.これらの手法は対象と似たフィールドのデータセット を事前に学習することで,解析精度が向上する.

そこで本研究ではため池を対象とした深層学習型水位予測モデルに農業用ダムの水文データ を活用した転移学習手法および Fine turning 手法を導入することで、大規模降雨イベントに 対する予測精度の向上を試みた.

【研究対象地】研究対象地は奈良県生駒市に位置する高山溜池を,事前の学習には奈良県吉 野郡に位置する大迫ダムの水文データを使用した.

高山溜池は大和川水系にある富雄川の水源の一つであり,流域面積2.3km²,貯水容量約58万m³,堤高約23mのため池である.この高山溜池の堤体付近に設置し降雨量と水位の観測を行い,放流記録を北倭土地改良区よりご提供いただいた.使用するデータの期間は2019年1月1日~2021年12月31日とした.

大迫ダムは,吉野川水系の最上流に位置し,流域面積114.8km²,有効貯水容量2600万m³,堤 高約70mの農業用ダムである.大迫ダムの流域には全国有数の多雨地域である大台ヶ原があ り,高山溜池よりも多くの大規模降雨イベントが観測されている.使用するデータの期間は 2008年4月1日~2019年8月19日であり,1時間ごとの水位,放流量,複数の雨量観測点 からティーセン法を用いて算出した1つの降水量データを用いた.

【モデルの構築と学習データの拡張手法】本研究では深層学習手法の一つである LSTM Encoder-Decoder (LSTM ED) を用いた. LSTM ED はその構造上,連続データの解析に適して いることが知られている.入力項目は 24 時間前から現在までの1時間ごとの水位,水位変化 量,降水量,放流量とし,出力項目は1時間後から 24 時間後の水位変化量とした.中間層の

ハイパーパラメータ等について は楠堂ら(2021)と同様の設定を 行った(Normal モデル).次に、 重み付けの一部を固定し、新た に層を追加し再学習を行う転移 学習モデルとすべての層の重み 付けを再学習する Fine-Turning モデルを構築した. これら2つ のモデルは,事前に大迫ダムデ



ータを用いて学習を行い、高山ため池データを用いて再学習を行った. 各モデルの構造につ いては図1に示す.これら3つのモデルに対し最大降水量時と越流時の予測を行った.評価 手法は二乗平均平方誤差 (RMSE)を用いた.

【結果】評価期間における6時間後,12時間後,24時間後の予測結果を図2に示す.



全ての期間において, Normal モデルが最も RMSE が小さくなる結果となった. Fine turning モ デルは事前に学習を行い、すべてのパラメータを再調整したにも関わらず最も再現性が低か った. 転移学習モデルは、ピーク水位の上振れに対し改善の余地がみられたものの、全体と して予測結果に遅れが生じた.これは高山溜池が大迫ダムに比べ流出に要する時間が短いこ とが要因として考えられる.

【おわりに】本研究では深層学習型水位予測モデルの課題に対し、転移学習及び Fine Turning を用いて改善を試みた. 今後は更なる検証を進め, 簡便かつ大降雨にも適応できる 水文モデルを構築することで,ため池水管理の最適化や治水への活用が期待される.

[【]参考文献】 Development and assessment of water-level prediction models for small reservoirs using a deeplearning algorithm, Tsumugu Kusudo; Atsushi Yamamoto; Masaomi Kimura; Yutaka Matsuno, Water 14 1 55 MDPI ĀG 2022 年 01 月

3 次元画像解析による農業用パイプラインにおける擬似漏水検出に関する研究 Detection of Water Leakage in Service Agricultural Pipeline by Three-Dimensional Image Analysis

新潟大学自然科学系(農学部)○鈴木哲也
 新潟大学大学院自然科学研究科 萩原大生
 筑波大学生命環境系 浅田洋平
 近畿大学農学部 木村匡臣

岩手大学農学部 飯田俊彰

1. はじめに

近年,耐用年数を越えた農業用パイプラインが増加しており,それに伴い事故件数も増加している.筆者らの既往研究¹⁾⁻²⁾では,モデルパイプラインを用いた画像解析による水撃圧現象の非接触検出法の開発を試みている.本報では,実構造物パイプラインにおける疑似漏水現象を対象に,漏水に伴う管材の変形をデジタル画像相関法(DICM)を用いて解析・検討した結果を報告する.

2. 実験および解析方法

実験対象施設は農業パイプラインである. 管体の諸条件は,外半径 300 mm の鋼管およ びダクタイル鋳鉄管である.実験的検討では、 可変定流量弁より上流約 1.78 m 地点に, 縦 80 mm, 横 100 mm の画像解析面のランダムパタ ーンを作成し,水撃圧の発生に伴う管材変形 を2台の CCD カメラ (Grasshopper3 GUS-U3-60S6M, PointGray Reserch 社製)を用いて撮 影を行った. 圧力計 (THLV-003-MP-5, 東京 計測 社製)を管体の分岐に取り付け, 電圧デ ータロガー (MCR-4V, T&D 社製) を用いて 記録を行った.計測地点より上流約 75 m に ある排泥弁工の仕切弁を常時開放すること により漏水を再現した. 解析的検討では, 撮 影された画像に対して, デジタル画像相関法 を用いて管体表面の変形量を求めた. デジタ ル画像相関法とは、 ランダムパターンを追跡 することで対象物の変形量などを算出する 手法である. 解析条件は円筒座標系を用い,



Fig.1 水圧の時系列変化

サブセットサイズ 55×55 pixel, ステップサ イズ 13 pixel およびフィルターサイズ 31 と した. 圧力計により計測された電圧値を水圧 に変換後,周波数成分を検討するために短時 間フーリエ変換³⁾を行った.

本解析では,時間窓あたりの変換数を1,024 データ,オーバーラップ率 50 %, 窓関数を ハン窓とした.

3. 結果および考察

水圧の計測結果を Fig.1 に示す. 同図より, バルブを開閉した際に水撃圧が発生するこ とが分かる. Fig.2 は短時間フーリエ変換の結

果である. Fig.2 より, 擬似漏洩の有無により, バルブ閉塞後の周波数成分に相違があるこ とが確認された.バルブ開放時には漏水の有 無にかかわらず 30kHz 前後で高い周波数成 分が確認される.一方バルブ閉塞時において、 漏水無しでは高周波数帯に特徴は見られな いが、漏水有りの場合ではバルブ開放時と同 じような傾向が見られる. Fig.3 に画像解析結 果およびローパスフィルター処理を行った 結果を示す. 5.6 Hz は管の固有振動数を算出 したものであり、0.1 Hz は水圧由来の周波数 帯である. Fig.3 より, 無処理と 5.6 Hz 以上 をフィルター処理にかけた結果ではノイズ が存在するのに対して, 0.1 Hz 以上をフィル ター処理にかけた結果では水圧の変化を周 方向ひずみの変化に一致性が確認された.

4. おわりに

本研究では、既設配管における擬似漏洩を 検出することを目的として、水撃圧発生時の 水圧と画像解析の2つの視点から計測を行っ た.その結果、①漏水の有無によって水圧の 周波数成分が異なること、②画像解析結果を フーリエ変換後、フィルター処理をかけるこ とで水圧の変化との一致性が確認された.こ のことから、水圧と管材変形の関係性から、 管内部における水理現象を管外から非接触 で検出できる可能性が示唆された.

引用文献

- 鈴木哲也(2019):三次元画像解析によるパイプ ライン水撃圧現象の非接触検出に関する研究, 第65回理論応用力学講演会要旨.
- 2) 鈴木哲也,斎藤真歩,浅田洋平,木村匡臣,安瀬 地一作(2020):水撃圧作用を利用したモデルパ イプラインに発生する応力場の非破壊・非接触 同定,農業農村工学会応用水理研究部会講演要 旨集,pp. 50-51.
- 小野順貴(2016):フーリエ変換の基礎と応用, 日本音響学会誌 72 巻 2 号, pp. 764-769









Fig.3 DICM による周方向ひずみの検出結果

水撃圧波形を利用した

パイプライン漏水検知手法の現場適用技術の開発

- 高周波成分と漏水シグナルの関係について-

Development of Leakage Detection Method

by Water Hammer Wave Reflection in Irrigation Pipeline

- Relationship between high frequency component and leakage signal-

○清水拓哉*, 加藤亮*, 福重雄大**, 安瀬地一作***, 浅田洋平****

⊖Takuya SHIMIZU*, Tasuku KATO*, Yudai FUKUSHIGE**, Issaku AZECHI***, Yohei ASADA****

1. はじめに

農業用管水路の大半は高度経済成長期に整備されたため、老朽化が進み、漏水による突 発事故が増加している。漏水は地中で起こるため目視による点検が難しいが、いったん大 量に漏れると道路の不通や用水の不足などが問題となる。そこで、漏水が少ない段階でも 検知しうる、簡便かつ高精度な漏水検知手法が求められている。 浅田ら(2018)は下流制水 弁を急閉鎖させ、管内に水撃作用による大きな圧力上昇を起こし、水撃圧波形における漏 水による圧力変化量を圧力センサーにより捉えることで漏水検知を行う方法を開発した。 その手法において、管構造由来の高周波成分が漏水検知性能に影響していると予想される。 なぜなら、漏水による圧力低下(漏水シグナル)は高周波成分に紛れると区別が難しいから である。しかしながら、水理条件によって高周波成分の大きさがどのように変化するのか は現在まで議論されていない。そこで、末端流量と漏水量をそれぞれ変化させたときの高 周波成分と漏水シグナルの変化について実験的に調べた。

2. 方法

(1)高周波成分の評価方法

本研究では、高周波成分の大きさを振幅で評価した。振幅を求める方法として、ゼロア ップクロス法を採用した。ゼロアップクロス法とは、波形データが基準(ex. 平均値)を 切り上がる点から再び切り上がる点までを一つの波として、その最大値と最小値の差の半 分を一波の振幅とする方法である。水撃圧波形ではラインパッキング現象により圧力が 徐々に上昇するので回帰直線を基準とした。データ全体に対してロバスト線形回帰を行っ た後、ゼロアップクロス法により振幅を算出する。

(2)実験手順

実際の農業水利システムを参考に構築さ れた図-1 のような茨城県農村工学研究部門 内の装置を用いて実験を行った。管内の圧力 伝播速度は実測と理論式より約1310 m/s と 分かっている。漏水部はバルブを取り付けた 漏水孔にチューブをつないで漏水を再現し ており、チューブの出口は漏水孔と同じ高さ





* 東京農工大学大学院 農学府、 **(国研)農研機構 農村工学部門、 *** 三重大学大学院生物資源 学研究科、 **** 筑波大学 生命環境系 キーワード:漏水検知,圧力変動,ストックマネジメント

表-1 実験条件

	漏水量(L/sec)		流量(L/sec)										
漏水無し	0	0.102	0.092	0.085	0.073	0.067	0.058	0.050	0.040	0.033	0.023	0.018	0.007
最大漏水	約0.059	0.097	0.092	0.083	0.075	0.067	0.058	0.050	0.042	0.032	0.025	0.017	0.010
中間漏水	約0.025	0.100	0.095	0.083	0.075	0.067	0.057	0.050	0.042	0.032	0.023	0.015	0.008
最小漏水	約0.011	0.103	0.090	0.083	0.075	0.063	0.057	0.048	0.040	0.035	0.027	0.015	_

に固定している。漏水量はバケツとストップウォッチを使って測定し、管内の圧力は圧力 センサーとロガーを用いて電動ボール弁直上部において計測した。装置では、コンプレッ サーで上流水槽に圧力をかけ、管路に水を流した。実験条件は表-1に示す通りである。漏 水無しのケースで高周波成分の振幅を算出、漏水有りのケースで漏水シグナルの大きさを 算出した。漏水位置は全てのケースで上流水槽から 750.34 mの位置とした。

3. 結果と考察

観測点で計測した水撃圧 波形に前述のゼロアップク ロス法を用いた。また、漏水 シグナルの大きさは水撃圧 波形における漏水シグナル 前後の各回帰直線の切片の 差から算出した。それらの 結果を図-2に示す。図-2よ り、高周波成分の振幅と漏 水シグナルの大きさはとも



との関係

に末端流量と比例関係にあることが明らかになった。最小漏水のケースにおいては漏水シ グナルが振幅に紛れており、最大・中間漏水のケースにおいてはすべての末端流量の条件 で漏水シグナルが振幅よりも大きくなるという結果になった。

4. 結論

本研究では、水撃圧波形において末端流量と漏水量をそれぞれ変化させた時の高周波成 分と漏水シグナルの変化を調べた結果、以下が分かった。:①漏水量が小さい場合には高 周波成分の振幅と漏水シグナルの大きさは同程度となり漏水の検知は難しくなる,②漏水 量が大きくなると末端流量(つまり、発生させる水撃圧の大きさ)の変化に対する漏水シ グナルの変化が大きくなるため、小さな水撃圧でも漏水を検知することが可能である。今 回の実験における高周波成分は主に管の曲がり由来のものであり、漏水量が約0.011 L/sec 程度より大きい場合では漏水シグナルが大きくなることが分かった。今後は様々な管構造 由来の周波数成分について調査し、最適な水撃圧の大きさについての検討が必要である。 参考文献

1)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),74(4),pp. | _613- | _618,2018.

ラジアルゲートをすぎる流れの流量と上流水深 の相互依存関係ならびに縮流係数について

羽田野袈裟義1·宇根 拓孝2·荒尾 慎司3

¹第一復建株式会社 顧問室(〒812-0006 福岡市博多区上牟田 1 丁目 17-9) E-mail: hakesayoshi@gmail.com

²徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県周南市学園台) E-mail: une@tokuyama.kosen-ac.jp

³松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4) E-mail: arao@matsue-ct.jp

ラジアルゲートはポピュラーなゲートであるが,流量係数や縮流係数が自由流出の水理計算に対してさ え自在に使える式形に整理されておらずゲート操作と流路設計が非効率のままに放置されているといえる. 本研究では,水平路床上の自由流出について運動量の定理に基づき無次元のゲート上流水深と限界水深の 相互依存関係を推論し,両者の相互依存関係を実験データにより定式化した.また流量係数,流速係数, 縮流係数の関係を組み合わせて縮流係数の計算式を導き,これに流量係数の実験値を用いて縮流係数を求 めた.さらに無次元のゲート上流水深と限界水深の定式化と縮流係数の計算式の結合により縮流係数の計 算値を求めた.両方の縮流係数は良好に一致することが示された.

Key Words: radial gates, constraction coefficient, evaluation and formulation, momentum theorem, relation between critical depth and upstream depth

1. はじめに

ゲートは取水や分水などのため開水路の水位や流量を 制御するために用いられる.現実のゲートでポピュラー なものはスルースゲートとラジアルゲート(テンターゲ ート)である.このためこれら2つの形式のゲートの水 理が鋭意研究されてきた.

スルースゲートについては潜り流出まで含めた解析方 法が Henry¹) により提案され,縮流係数が確定すれば流 量係数の理論的な評価が可能な状態になった^{3,3}. それ 以後の水理検討は Henry¹) を基準になされているが,流 量係数の理論式を示した文献は安田ら³以外は見当たら ない. 一方, ラジアルゲートについては, Metzler⁴) や Toch⁵) の実験的研究⁶) に続く多くの研究にも拘わら ず流量を理論的に計算できる状態には至っていない. これにはゲートの形状やゲート背後の流れが複雑なこ とが研究者を躊躇させている事情が考えられる.

以上は流量評価に関する研究動向であるが,ゲートは流れをせき止めて上流水域の水位上昇をもたらす.このためゲートの設置計画では流量評価だけで

なく治水対応としてゲート上流水深(水位)の評価 が必須である.しかしながら,ゲート上流水深の評 価についてはスルースゲートに関して Rajartnam and Subramanya⁷⁾や Swamee⁸⁾により流量係数の提案式の 応用として言及された程度でその結果の表示もなく, 上流水深自体の評価式は近年の羽田野ら^{9,10)}により 初めて示されたと認識される.

また所定のゲートについて自由流出ではゲート開度,上流水深および単位幅流量の3つの水理量の間で一定の関係,そして潜り流出ではゲート開度,上流水深,下流水深そして流量の4つの水理量の間で一定の関係があるとみなされる^{11,12,13}.

以上の事情を踏まえ、本研究ではスルースゲート からの潜り流出に関する Henry の解析方法をラジア ルゲートに適用してラジアルゲートからの潜り流出 におけるゲート開度、上流水深、下流水深そして流 量の間の関係を与えるための一里塚を目標として、 Gentilini¹⁴による自由流出の系統的な実験データを 分析し縮流係数の評価式を構築することを試みる. まずゲート上流と縮流断面の間の水に運動量の定理 を適用して無次元化された上流水深(上流水深/ゲ ート開度比)と限界水深(限界水深/ゲート開度比) の間の1対1の関数関係を推論し,この関係を実験 データから決定する¹⁵⁾.そしてこの関係から流量係 数の表現式を求め,流量係数と縮流係数の関係¹⁶⁾ から縮流係数の計算式を求める.

2. 上流水深と流量の関係の定式化¹⁵⁾

(1) 上流水深と流量の関係の運動量の定理に基づく 検討

ー定幅の長方形水路に設置されたラジアルゲート からの自由流出を図-1の設定でモデル化する.ゲート 上流の静水圧分布と一様流速分布を示す流水断面とゲー ト直下流の縮流断面を検査面として両検査面の間の部分 に適用した運動量の定理の水平成分は次式となる.

$$\rho\left(\frac{q^2}{C_c a} - \frac{q^2}{h_0}\right) = \frac{1}{2}\rho g h_0^2 - \frac{1}{2}\rho g (C_c a)^2 - F_D \qquad (1)$$

ここで、*ρ*は水の密度、*q*は単位幅流量、*a*はゲート開度、 *C*。は縮流係数、*h*。は上流の流水断面の水深、*g*は重力加 速度、*F*_Dはゲート上流面でのゲート・水の相互作用力 の水平成分である。両方の検査面において流速は水平で あるから、このコントロールボリュームに対して運動量 の定理の鉛直成分はゲート・水の相互作用力の鉛直成分 のつり合い式となる。ラジアルゲートからの流出の縮流 部の圧力分布や流速分布の既往の測定結果を確認できて いないが、流れの変化がより急激なスルースゲートの場 合に縮流断面での静水圧分布と一様流速分布の近似が定 着している^{17,18,19}. そこでスルースゲートの取扱い¹⁰を 踏襲し、縮流断面の静水圧分布と一様流速分布の測定結果 を参照し、既報^{10,11,12}と同様に次式で仮定する.

$$F_D = K_D \frac{1}{2} \rho g \left\{ h_0 + \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{h_0} \right)^2 - a \right\}^2$$
(2)

上式の中の Koは無次元の流体力係数で,式(1)より次 式で与えられる.

$$K_D = \frac{1 - C_c^2 a^2 / h_0^2 + 2h_c^3 / h_0^3 - 2h_c^3 / C_c a h_0^2}{\left(1 + \frac{1h_c^3}{2h_0^3} - \frac{a}{h_0}\right)^2}$$
(3)

ここで、 $h_c = (q^2/g)^{13}$ は限界水深である. K_D はゲート上流面の圧力分布の測定結果¹⁴から 1.0 より多少小さい値であることが示唆されるが、このことは宇根ら¹⁵により確認されている.

ここで式(3)の中の無次元量間の関係を検討する.式(3)は、無次元量*K*_D,*C*_c,*h*₀/*a*,*h*_c/*a*の間に一定の関係があることを示している. Montes¹⁸と羽田野・荒尾¹⁰によると、スルースゲートの縮流係数



 C_c はレイノルズ数 Re = q/v (v は動粘性係数)が 40,000~60,000 程度以上ではほぼ一定となる.同じ ようにラジアルゲートでもレイノルズ数がある程度 大きい場合には縮流係数があまり変化しないと予想 される.縮流係数の変化を無視すると、ラジアルゲ ートでは所定のゲート先端傾斜角 θ (図-1) に対して、 無次元量 K_D , h_0/a , h_c/a の間の一定の関係が示唆さ れる.ゆえに θ ごとに K_D のある値の範囲に対して h_0/a と h_c/a の間の一定の関係が示唆される.すなわち、

$$\frac{h_0}{a} = f\left(\frac{h_c}{a}\right) \tag{4}$$

(2) 実験データによる無次元量間の関係の定式化

式(4)中の無次元量 $h_0/a \ge h_c/a$ の間の関係を Gentilini¹⁴⁾の系統的な実験のデータを用いて検討する. **図**-2 はその実験データから求めた $h_0/a \ge h_c/a$ の 関係を示す. 図は原論文に与えられた流量係数と h_0/a の対のデータから単位幅流量を求めて整理して いる. 同図よりいずれのゲート先端傾斜角 θ につい ても $h_0/a \ge h_c/a$ は 2 次曲線で近似されるほぼ一定の 関係を示すことがわかる. すなわち両者は次の式で 関係づけられる.

$$\frac{h_0}{a} = \alpha \left(\frac{h_c}{a}\right)^2 + \beta \left(\frac{h_c}{a}\right) + \gamma \tag{5}$$

23



式(5)の中の係数 α , β , γ の値はゲート先端傾斜角に より異なり、この実験データでは**表-1**に示すようである. 式(5)は流量からゲート上流水深を求める式であ る. 図-3 は h_0 の実測値と式(5)から求めた計算値 の比を $h_{c/a}$ に対して図示したものである.式(5) と逆にゲート上流水深から流量を求める式は次式と なる.

$$\frac{h_c}{a} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha(h_0/a - \gamma)}}{2\alpha} \tag{6}$$

図-4は*h*_cの実測値と式(6)による計算値の比を *h*₀/a に対して図示したものである.**図-3**と**図-4**は**図-2**に 示した上流水深と流量の相互依存関係をさらに明瞭 に示している.

3. 流量係数と縮流係数の評価

流量係数と縮流係数の評価に先立ち、諸水理量の



間の一連の関係を確認する.流量係数 Caは次式:

$$q = C_d a (2gh_0)^{1/2} ; \quad C_d = \frac{q}{a(2gh_0)^{1/2}}$$
 (7)

で定義されるが、回帰式(6)を用いて表すと、

$$C_d = \left[\frac{-\beta + \left\{\beta^2 + 4\alpha \left(\frac{h_0}{a} - \gamma\right)\right\}^{1/2}}{2\alpha}\right]^{3/2} \left(\frac{a}{2h_0}\right)^{1/2} \tag{8}$$

また,流量係数 C_d は縮流係数 C_c および流速係数 C_v と次式の関係をもつ^{16,20)}.

$$C_d = C_c C_v \sqrt{\frac{1 - C_c a/h_0}{1 - C_v^2 C_c^2 a^2/h_0^2}}$$
(9)

流速係数 C_vはスルースゲートの場合,レイノルズ数 Re=q/v が 40,000~60,000 以上では 0.95 程度のほぼ 一定の値をとる¹⁶. このためC_v = 1.0に限定せずに取 り扱う.式(9)の帰結として,縮流係数 C_vは次の3 次方程式の根として求められる.

$$C_c^3 - \left(C_d^2 \frac{a}{h_0} + \frac{h_0}{a}\right) C_c^2 + \frac{h_0}{a} \frac{C_d^2}{C_v^2} = 0$$
(10)

図-5は Gentilini¹⁴⁾のグラフの再現である.また図-6 は図-5 の横軸を変えて示したものである.両図から, 流量係数 C_d は $h_0/a \approx h_c/a$ の増加により増大し,ゲー ト先端傾斜角 θ に応じたほぼ一定の値に漸近するこ と,および θ が小さく水平に近いほど C_d が大きいこ とが確認される.

24



次に、図-7と図-8は C_d および h_0/a の実測値と C_v = 1.0を用いて式(10)から求めた縮流係数 C_c (図-9と 図-10ではこれを縮流係数の「実測値」と示す)を 個々の実験の h_0/a および h_c/a の値に対して図示した ものである。両図から、 C_c はゲート先端の傾斜角 θ が小さいほど大きな値を示すこと、そして h_0/a ある いは h_c/a の増加とともに増大することは C_d の傾向 と同様である。 C_d との相違は、式(9)から示唆さ れるとおり C_c は C_d に比べて大きいこと、 h_0/a あるい は h_c/a による値の変化が C_d より小さいこと、そして θ =90度では h_0/a あるいは h_c/a による値の系統的な 変化が殆ど認められないことである。 C_c が h_0/a や h_c/a によりあまり変化しないことは式(4)の前提の 妥当性を裏づけている。

コンピュータ解析によるゲート設計のためには図-7 と図-8 に示した C_c を計算で与えることが必要となる. そこでこれらの図の描点を再現する曲線を次のような手順で計算して求めた. すなわち, θ ごとに定まる式(5)中の α , β , γ (表-1)と h_c/a から求まる h_0/a を式(8)に代入して C_d を求め,これら h_0/a と C_d そして C_v に1.0を用いて式(10)から C_c を求める. 潜り流出まで考慮すると, C_c の計算の基準はあくまで h_c/a であり h_0/a はこの計算の基準となりえないことに注意を要する. ともかくこれを C_c の「計算値」と呼ぶことにする. 図-9と図-10はそれぞれ



図-7 と図-8の縦軸に示した C_c の実験値を上記の「計算値」で除した量を h_c/a に対して図示したものである.両図より C_c の実測値と計算値の比はほぼ1の値を示しており、上述の C_c の計算法の妥当性を示している.

4. 潜り流出の水理計算への利用

自由流出の上流水深と流量はそれぞれ式(5) および(6) により計算することができ,これらの計算に縮流係数 Ccの値自体は不要である.一方,潜り流出の上流水深 hoと単位幅流量 q は下流水深を h2 としてそれぞれ式(11) および(12)

$$h_0^3 - \left[\left\{ 2\frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{c_c a} \right) + h_2^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{q^2}{2g(c_c a)^2} \right] h_0^2 + \frac{q^2}{2g} = 0$$
(11)
$$q^4 + 2Bq^2 + C = 0$$
(12)

$$B = \frac{h_0}{\frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2}} - \frac{1}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a}\right) \frac{1}{\left\{\frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2}\right\}^2}$$
(12a)

$$C = \frac{h_0^2 - h_2^2}{\left\{\frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2}\right\}^2}$$
(12b)

4

25

により双方向の計算^{10),13)}が可能であるが、その計 算には Ce自体の値が必要となる. Ceの値は,図-7と 図-8に示したように、ゲート先端傾斜角 θにより明 らかに異なり、また θが 90 度から減少してゲート先 端が水平に近づくと ho/a あるいは hc/a により多少変 化するようになる. その変化を無視できる場合には θ ごとの平均値を使えばよい. そうではなく h_0/a あ るいは hc/a による Ccの変化を無視できない場合,前 述の手順で求めた C_cの「計算値」 (図-9 と図-10 の 作成に使用した値)を使えばよい.その際,式(11) による hoの計算では h_a から計算される C_をその まま使えばよいが,式(12)による q の計算では前 処理が必要である.まず C_e を図-8から θ に平均的な 値に仮定して式(12)により q を計算し、その結果 を用いてCcを修正し、その修正値を式(12)に用い て q を求め直すなどの手順となる.具体的な計算は 今後に示す予定である.

5. 結言

以上, ラジアルゲートからの潜り流出の上流水深 と流量の計算に必須の縮流係数を自由流出に関する 既往の実験データから評価することを試みた.本研 究の主要な結果は次のようである.

- (1) 運動量の定理により上流水深と限界水深の間に
 式(4)の関係を推論し、実験データの解析から図-2、式(5)、(6)そして表-1を得た.
- (2) 流量係数 C_d, 流速係数 C_v, 縮流係数 C_cの間の 関係から式 (10) を導き,実験データから C_cの 実験値を求めた.このC_cは,図-8のように,ゲ ート先端傾斜角 θ による変化が明瞭でθが大き いほど小さい値を示す.
- (3) 式(5), (8), (10)の組み合わから h_c/a に対 する C_cを計算により特定でき,この計算値は上 記(2)の C_cと良好に一致した.

今後は潜り流出の実験データを収集して式(11)と (12)による計算の検証を行なう予定である.

謝辞:本研究の発端となる文献の入手で九州産業大学図 書館職員山口葉子氏の献身的な御協力を頂いた.記し て深甚の謝意を表す次第である.

参考文献

- Henry, R.: Discussion of "On submerged jets", *Trans.* ASCE, Vol. 115, pp.687-694, 1950.
- 2) 椿東一郎:水理学I, 森北出版, p.199, 1973.

- 安田浩保、山田正、後藤智明:スルースゲートの閉 塞に伴い発生する段波の水理実験とその数値計算, 土木学会論文集, Vol.733, pp.89-105, 2003.
- Metzler, D.E.: A model of study of tainter-gate operations, M.S. Theisis, *Iowa State University*, 1948.
- Toch, A.: Discharge characteristics of tainter gates, *Transactions ASCE*, Vol.120, pp.290-300, 1955.
- 6) 土木学会: 2018 年水理公式集, p.410, 2019.
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K.: Flow equation for the sluice gate, *Jour. of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol.93, No.3, pp.167-186, 1967.
- Swamee, P.K.: Sluice-gate discharge equations, *Jour. of Ir*rigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol.118, No.1, pp.56-60, 1992.
- 羽田野袈裟義,荒尾慎司,李洪源,天野卓三:スル ースゲートをすぎる流れの運動量の定理に基づく検 討,山口大学工学部研究報告,Vol.68, No.2, pp.33-40, 2018.
- 羽田野袈裟義,荒尾慎司,金守幸吉:スルースゲート上流水深の評価式の提案,農業農村工学会論文集, Vol. 312, pp.I_111-I_118, 2021.
- 11) 羽田野袈裟義,荒尾慎司,金守幸吉:スルースゲートからの自由流出の流量と上流水深の双方向評価, 農業農村工学会令和2年度応用水理研究部会講演集, pp.20-29,2020.
- 羽田野袈裟義,荒尾慎司、野田誠:傾斜ゲートをす ぎる流れの流量と上流水深の相互依存関係,日本流 体力学会誌「ながれ」第41巻第2号,pp.93-98, 2022.
- 13) 羽田野袈裟義,荒尾慎司,野田誠:スルースゲートからの潜り流出におけるゲートの上流水深,下流水深,流量およびゲート開度の間の相互依存関係の検討,農業農村工学会令和3年度応用水理研究部会講演集,pp.34-38,2021.
- 14) Gentilini, B.: Ecoulement sous les vannes de fond inclines ou a secteur, *La Houille Blanche*, 1947, 2, pp.145-149, 1947(in French).
- 15) 宇根拓孝,羽田野袈裟義,荒尾慎司:ラジアルゲートからの自由流出のゲート上流水深と流量の双方向 評価,土木学会第77回年次学術講演会講演概要集, II-150,2022.
- 16) 羽田野袈裟義,荒尾慎司:実験データの分析による スルースゲートをすぎる流れの縮流係数のレイノル ズ数依存の検討と流量係数の評価,農業農村工学会 論文集, No.310, pp.I 125-I 134, 2020.
- Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, Jour. of the Hydraulic division, ASCE, Vol.103, No.4, pp.345-351, 1977.
- Montes, J.S.: Irrotational flow and real fluid effects, *Jour.* of *Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, No.3, pp.219-232, 1997.
- Roth, A. and Hager, W.H.: Underflow of standard sluice gate, *Experiments in Fluids*, Vol.27, No.4, pp.339-350, 1999.
- 石原藤次郎,本間仁:応用水理学,中 I,丸善, pp.159-160, 1958.

低平地排水路における調整水門操作に寄与する水位予測手法の検討

Examination of Water Level Prediction Methods Contributing to the Operation of Check Gates in Low-Lying Drainage Canals

○人見忠良*・浪平篤**・向井章恵*・中矢哲郎*HITOMI Tadayoshi, NAMIHIRA Atsushi, MUKAI Akie, NAKAYA Tetsuo

<u>1. はじめに</u>

低平地排水路における調整水門は、豪雨時においては排水路の水位を速やかに低下させる排水操作が重要である。一方、揚水ポンプ等により用水の水源として低平地排水路が利用される場合は、利水に支障が生じないよう水位を維持することが調整水門の操作に求められる。このように調整水門には、治水時の速やかな排水と利水時の適切な水位維持という、状況によって相反する目的が課される。実運用上では、こうした調整水門の操作は管理者の経験に基づいて行われる場合もあり。昨今の土地改良施設の管理上の人手不足が問題となっている中、管理者の世代交代後もこの経験則が引き継がれることが農業地域の治水あるいは利水の安全性を高める上で重要である。

このため本研究では、治水と利水の両者に配慮した操作を行っている地区において現地 調査を実施し現状の低平地排水路における調整水門の運用実態を明らかにするとともに、 適切な施設操作の継承に有効な支援方法について考察する.さらに、ICT を活用した遠隔 監視データに基づく排水路の水位予測が支援方法として効果を有することが明らかにされ たため、調査地区における水位予測手法の精度についても検討する.農業地域の中小規模 の排水路において、こうした遠隔監視データを利用した排水操作支援手法の適用を検討し た事例は少なく、本研究はICT による排水操作支援の検証事例として位置づけられる.

2. 調査対象の調整水門の概要

本調査の対象とする調整水門は,利 根川下流域に位置するA土地改良区の 管理区域の幹線排水路であるB幹線排 水路の末端に位置する(図1).A土地 改良区の管理区域は平坦な低平地であ り,受益面積が403km²の水田単作地帯 である.本地区の用水系統は,河川に 設置した樋管から自然灌漑が行われる 地区と,揚水ポンプにより配水される 地区に分かれており,約8割がパイプ



ライン方式によるポンプ灌漑である.また,調整水門上流の管理区域内の排水は通常は自 然排水によりB幹線排水路に集水され下流へ流下するが,調整水門のゲート操作のみでは

*農研機構農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO **農林水産省農林水産技術会議事務局 Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council, MAFF(元農研機構農村工学研究部門) キーワード:治水,利水, ICT, NN法

排水が十分ではない場合は,3 基の 県営排水機場(図 1)の洪水排水ポ ンプを起動する.

調整水門の断面図を図2に示す. 調整水門は5門のゲートで構成され ており,各ゲートは4段の堰板を重 ねる構造となっている.A土地改良 区の職員は,この堰板の枚数や高さ を変更することで調整水門の上流水 位を調整する.平常時は,調整水門 によりB幹線排水路を堰上げること で貯水し,受益地区内の排水路から 取水する揚水ポンプの水源を確保し



ている.一方,降雨時はその規模に応じて適切な枚数の堰板を取外すことで速やかに排水 させ,受益地区内の排水路からの溢水を抑制している.なお,この調整水門は,堰板の取 外しや取付けを手動で行う必要があり,また,調整水門の操作や見回りのために,昼夜を 問わず現地に足を運ぶ必要があるため,調整水門を管理するA土地改良区にとって,その 管理が大きな労力負担となっている.

<u>3. 検討方法</u>

本調査では、A 土地改良区の職員に対して調整水門の運用や管理上の課題に関する聞取 りを行った.また、B 幹線排水路の調整水門の直上流の水位を測定するため、C 排水機場 (図 1)の吐水槽に水位計を設置した.なお、調整水門地点の水位と、この排水機場の吐 水槽の水位とは相関を有していることを確認しており、この排水機場の吐水槽の水位から 調整水門の水位を推定した.

前述のように、調整水門の操作支援を行うことを想定して、遠隔監視データに基づく排 水路の水位予測手法の精度について検討する.水位予測手法としてモデル係数を設定する 手法(パラメトリック手法)では、このパラメータを推定するステップが必要となる.本 研究の対象である農業排水路は一般に、施設操作の人為的要因と降雨等の自然的要因によ り水位が変化するため、パラメトリック手法で予測する場合は、これらの要因を考慮した 複雑なモデル構造が必要となる.一方、パラメータを推定するステップがないノンパラメ トリック手法では、モデル構築が簡便である利点を有する.パターン認識手法の1つであ る Nearest-Neighbor 法(NN 法)は、時系列解析に応用することで水位や流量の予測が可能 であることが報告されており¹⁾²⁾、本研究でも NN 法を水位予測手法として採用する.

NN 法は、現在と過去の水位-雨量パターンの類似度を比較し、類似度の高い(ユークリッド距離の短い)過去のパターンから将来の水位を予測する手法である. NN 法では、まず、現時刻を *j* とする特徴ベクトルを設定するが、本研究では調整水門における水位と降水量を要素とする次式で特徴ベクトルを表現する.

 $X(j) = (h(j), h(j-1), \cdots, h(j-m_1+1) \ r(j) \cdots r(j-m_2+1))$

ここで, X(j):時刻 j における特徴ベクトル, h(j):時刻 j における調整水門水位, r(j):

時刻 *j* における降水量, *m*₁, *m*₂: 調整水門水位および降水量の 要素数.

次に過去データから、時刻 i(1 $\leq i \leq j$ -1)における X(j)と同 じ要素で構成される特徴ベク トル X(i)を形成し、X(j)とのユ ークリッド距離を逐次計算す る.ここでベクトル X_a と X_b の 要素をそれぞれ (x_{a1} , x_{a2} , …, x_{an}) (x_{b1} , x_{b2} , …, x_{bn})とする と、ユークリッド距離は次式に より計算される.

$$d(X_a, X_b) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_{ai} - x_{bi})^2}$$

ユークリッド距離が小さい 順に *k* 個抽出し, *k* 個の *h*(*i*+*l*) の平均値を *j*+*l* 時点における予 測水位 *h*(*j*+*l*)とする (*l*:リード タイム).本研究では 1h 間隔の データを使用し,過去データの



図3 調整水門のゲート開放操作のフロー

期間は 2018 年 4 月 15 日 0:00~2021 年 7 月 6 日 23:00 とし,水位予測期間は 2021 年 7 月 7 日 0:00~2021 年 8 月 25 日 23:00 とする.また, m₁=1,2,3,4, m₂=0,1,2,3,4,5, *k*=1,3,5,10,15,の全ての組合せについて計算し,水位予測期間の平均 2 乗誤差平方根 (*RMSE*)が最小となった値を予測値とする.なお,本研究では水位の設定方法として,*h*(*j*), *h*(*i*)の代わりに 1 ステップ前の時刻にける水位との差分である *h*'(*j*)=*h*(*j*)-*h*(*j*-1),*h*'(*i*)=*h*(*i*)*h*(*i*-1)を用いた計算も行った.

4. 検討結果

4-1 聞取り調査

A 土地改良区の職員への聞取りから、本地区では洪水排水ポンプの稼働が少なく(2021年は2回,2020年は0回)、調整水門の操作は灌漑期間に数10回は行っていたことが明らかにされた.このため、この地区の排水操作は、主にB幹線排水路末端の調整水門のゲート高さを変更し、B幹線排水路の水位を調整することで行っていたといえる.

職員への聞取りをもとに推察した調整水門のゲート開放操作のフローを図3に示す.調整水門のゲート開放を行うに際して,職員はまず降雨予報の情報から調整水門の直上流の水位を予想し,これが Y.P.1.7m を超過するかどうかをゲート開放の判断基準としていた.調整水門の直上流の水位が Y.P.1.7m を超過すると,受益地区内の排水路で溢水が生じる可能性があるため,この水位をゲート開放の基準としているとのことであった.前述のよう

に本地区の排水路は揚水ポンプの水源でもあるため、ゲート開放の期間を短くすることが 求められる.このため、職員は経験則に基づき利水と治水の両者に配慮しながら、ゲート 開放の判断を下しているのが現状であり、この経験則を世代交代後も継承することが課題 であると考えられる.この課題に対する1つの対応手段として、遠隔監視データに基づく 水位予測が挙げられる.降雨前もしくは降雨後に、調整水門において上昇する水位が予測 できれば、現状のゲート開放操作フローにおける水位予想や調整水門における水位目視の 要否判断に対して有用な支援情報を提供できると考えられる(図3).なお、職員は、Y.P.1.7m をゲート開放の判断基準としているため、降雨に伴う水位上昇期間の内、特に Y.P.1.7m を 超過する期間の予測精度を高めることが、水位予測の適用性を高める上で重要である.

4-2 水位予測手法の精度検討

水位予測期間全期間における NN 法による水位予測結果を図4に示す.また,前述のように,降雨に伴う水位上昇期間の内,Y.P.1.7m を超過する期間の予測精度が重要であることから,①降雨時&ゲート開放操作なし(8/141:00~8/145:00),②降雨時&ゲート開放操作あり(8/83:00~8/89:00)の期間について検討する.また,これらとの比較対象として,③無降雨時&ゲート開放操作なし(8/214:00~8/34:00)の期間についても検討する.①, ②および③の期間はいずれもY.P.1.7m を超過する水位上昇が生じた期間である.図5に期間①②③の予測結果を示す.なお,図5にはh'(j),h'(i)を用いた予測結果も示す.また,表1に各予測期間のRMSEを示す.

図4から予測期間全体を通して、概ね実測値の傾向を予測できているといえる.ただし 4h後予測値は0.1m程度の振幅を示しており、実測値から大きく外れる場合もみられた.



図5と表1から,降雨に伴う水位上 昇期間では,リードタイムが長くな るほど実測値と予測値の乖離が大 きく,予測値は水位を過少評価する 可能性が高い.この降雨に伴う水位 の立上り部における予測値の遅延 に対しては,降水予測等を計算に取 り込むことで改善される可能性が あるが検証が必要である.①期間や 別間に比較して,無降雨時の③期 間では予測精度が高かった.B幹線 排水路からのポンプ揚水の影響で 低下し,夜間では上流域の集水域か らの流入で上昇する日周期を示す

表1 各予測期間の平均2 乗誤差平方根

期間	l	水位設定	RMSE (m)
	21	h	0.031
全期間	211	h'	0.030
$(4/15\ 0:00 \sim 7/6\ 23:00)$	41	h	0.064
	411	h'	0.064
	26	h	0.084
①降雨時&ゲート開放操作なし	211	h'	0.057
(8/14 1:00~8/14 5:00)	1h	h	0.16
	411	h'	0.10
	26	h	0.078
②降雨時&ゲート開放操作あり	211	h'	0.068
(8/8 3:00~8/8 9:00)	1h	h	0.17
	411	h'	0.13
	26	h	0.026
③無降雨時&ゲート開放操作なし	211	h'	0.027
(8/2 14:00~8/3 4:00)	4h	h	0.065
	411	h'	0.056
$k=10, m_1=3$	$m_2 = m_2 = m_2$	$0 \ (l:2h, 7)$	k位設定: h)
$k=10 m_1=3$	$m_{2} =$	$0 (1 \cdot 4h) = 7$	k 位設定・h)

k=10, $m_1=3$, $m_2=0$ (l:4h, 水位設定:h) k=5, $m_1=3$, $m_2=2$ (l:2h, 水位設定:h)

k=10, m1=3, m2=1 (l:4h, 水位設定:h')

(図 4). ③期間は、この夜間の水位上昇期間であるが、過去データ期間でも、予測期間と 同様の周期を繰り返していた.このため、③期間と類似度の高い水位変化パターンを過去 データから抽出できたため、比較的精度の高い予測が可能であったと推察される.

また,水位設定 h'を使用した場合の方が,水位設定 h を使用した場合より予測精度が向上した. NN 法では,予測期間の変化パターンと類似度の大きいパターンが過去データに 多く含まれている程,精度が向上すると考えられ,一つ前の時刻の水位からの差分の方が 各時刻における水位の絶対値より,比較対象として類似性が高かったと推察される.

5 おわりに

本研究では、聞取り調査から治水と利水に配慮した低平地排水路における調整水門の運 用実態を明らかにし、この運用を支援するための水位予測手法の精度について検討した. この結果、土地改良区職員は経験則に基づく水位予想を基にゲート開放の判断を行ってお り、水位予測手法の適用がこの経験則を継承する上で有効であることが明らかにされた. また、本報告では言及していないが、図3に示すように、土地改良区職員は受益地区内に おいて面的に広く敷設されている排水路の溢水状況もゲート開放の判断に利用している. 今後は、B幹線排水路における水位予測に加えて広域の溢水状況の把握や予測も考慮し、 改良区職員の排水施設の管理を支援するシステムの構築につなげたい.

謝辞:本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「AI等の活用による利水と治水に対応した農業水利施設の遠隔監視・自動制御システムの開発」JPJ009837の援助を受けて行った.

引用文献

¹⁾田中丸治哉,藤村達也,畑 武志,多田明夫(1999): Nearest-Neighbor 法による実時間洪水予測, 応用水文, 12, 110-117

²⁾藤原洋一,田中丸治哉,畑 武志,多田明夫(2003):Nearest-Neighbor 法による実時間流出予測 の実用的適用法に関する研究,水文・水資源学会誌,16(1),33-44

ゲート撮影画像の解析による水位および流量計測の実用性の検討 Accuracy assessment of water level and flow measurement using the gate photographed image analysis

○中田達*・吉瀬弘人*・島崎昌彦* ○Toru Nakada・Hiroto Kichise・Masahiko Shimazaki

1. はじめに

農業用水門は農業用水の配分制御に用いられるだけでなく,排水路にて反復利用の ための堰上げや,沿岸部における防潮水門として役割など,集中豪雨の激甚化などの 地域の洪水リスクが高まるなかで,地域防災における管理の重要性が増してきている. しかし,中小規模の水門の多くは、土地改良区職員や地元農家による巡回管理によっ て行われており,モニタリング設備が十分ではなく,施設管理者は遠隔で映像にて水 門近辺の状況を把握したいというニーズがある.そのため,SIP(戦略的イノベーショ ン創造プログラム)第2期「スーパー台風被害予測システムの開発」のうちの「危機管 理型水門管理システムの開発」では,われわれは,農業用水門を対象として,開閉状況 等の画像認識技術等の開発,さらにはその情報をアップロードする水門監視システム の開発を行ってきた(関島ら,2021).

また,農業用水門は,大雨時以外の平常時にも農業用水の確保や生態系の維持のために,ゲート開度を微調整して水路の水位を調整する必要がある場合がある.そのため,水門の遠隔監視には画像での状況確認のニーズとともに,ゲートの単なる開閉のみならずゲート開度や水門上下流の水位の情報を取得したいというニーズがある.

そこで、本報では、この水門開度モニタリングシステムを用いて、ゲート開度や水門 上下流の水位をもとにスルースゲート(以下、ゲート)を通過する流量の計測が可能か どうかを検証することを目的とした.カメラ1台で水位計2箇所およびゲート開度セ ンサを代替することができれば、施設インフラの整備コストでも圧倒的に優位となる.

2. モニタリングシステムの構成

本システムの構成の主要部分は, AI 演 算を含む各処理を行うシングルボード コンピュータ, 3D カメラ,赤外線ライト, およびモバイルルータである(図-1). 3D カメラは,可視光画像を記録するととも に2眼のレンズの視差により対象物まで の距離を測定する(図-2b).コンピュー タは, AI による物体検出アルゴリズムと して YOLO v3 (You Only Look Once ver.3) を用いて可視光画像からゲート上部(天 端)領域(図-2a の矩形選択領域)を検出





し,領域の測距結果からゲートの天端高さを算出する.ゲート近傍の水位は,予め設定 した領域の測距結果から算出する.予め多数の水門画像を教師データとして事前に学

*農研機構農村工学研究部門, NARO National Institute of Rural Engineering キーワード 水門,施設管理,防災,画像解析, AI

習したモデルを用いて,現地ではエッジコンピューティングを用いて撮影した画像の 認識と距離算出のみを行う.

通信には、セキュリティを確保するために、インターネットを経由せずモバイル閉 域網通信を利用して、基地局端末に画像および取得したデータを送信する.

直上画角

斜め画角





図-2 水門開度モニタリング画像 a)可視光画像および認識矩形領域, b)測距ヒートマップ Gate monitoring images, a) optical image and recognition rectangle area, b) distance-measuring heat map

3. 水門認識モデルの概要

ゲートを画像から認識する方法では、深層学習のフレームワークは Tensorflow-1.13.1 と Keras-2.2.4 を利用し、物体検出アルゴリズムは Yolo v3 (You only look once Version3) を用いた. Yolo v3 は、オブジェクト検出に対して処理速度が速く、検出精 度が高いため、様々な分野での画像認識に活用されている.

学習データは、これまでに 10 数地点での連続撮影を含む 50 地点以上の水門にて収 集した画像から約 3 千枚を選択するとともに、反転、移動、ランダムマスク等の Data Augmentation 処理によって総計 9713 画像を作成した.テストデータは、収集した画 像のなかから特徴的なものを抽出した 271 画像とし、教師画像との重複は無い.アン カーボックスは、ゲートの学習データに応じて最適化した.

ゲートの認識においては、アンカーボックスが長方形であるため、スピンドルや支 柱が計測範囲に入り込む可能性が極めて高い.また、太陽光の映り込み等によって距 離を計算できない場合がある.そこで、これらの誤差要因に対して、次の処理を行っ て計測値の改善を図った.まずゲートと認識した領域に対して median フィルタを適 用し、測距出来なかった部分を除いた後、平均±標準偏差×1以外を外れ値として除 外後、外れ値や測距出来ない部分以外の中央値を距離として算出した.

水門認識モデル構築時点での、ゲートの認識結果を表1に示す.テストデータに対 する、判定結果と正解領域の重なりを表す指標のIoU(Intersection over Union)は 0.88 であり、一定の精度を有していると判断された.

4. 測距精度の検証方法

4.1. 検証模型

幅1mの矩形コンクリート開水路に、高さ0.5m、ゲート天端厚み0.15mの全幅ス ルースゲートを設置し、水理模型を製作した(図-3).ゲートの直上(x = 0m とす る)および上流側1.5m(x = -1.5m)の位置に水路底から2.5mの高さにそれぞれ3D カメラを設置した.カメラによる水位計測領域は、ゲート上流(x = -0.5m)および下 流(x = 0.5m)とし、2台のカメラで同じ領域を計測するよう設定した.カメラによ る測距精度の検証のために、x = -1.0m、x = 1.5mの位置にサーボ式水位計を設置し、 水位の経時変化を記録した.

実験水路は、上流からの流量を制御でき、0.025 m³/s、0.05 m³/s、0.075 m³/s、0.1 m³/s の4パターンの流量を設定し、その遷移間は線形に増加するようにハイドログラフを設定した. 下流端は0.1 m、0.2 m、0.3 mの3パターンの堰板でゲート下流水位を堰上げた. ゲート開度はおよそ0.1 m、0.2 mの2パターンとした. いずれの条件下でも、ゲート下流側の水位は潜り流出であることを確認している.

4.2. 水門認識モデルの評価指標

学習したモデルの精度は、上述したように、学習画像データセットのおよそ 10%に





Experimental Figures a) Cross-sectional view, b) Longitudinal view

あたるテスト用ラベル付きデータ 271 画像に対して評価された.テストにおけるアル ゴリズムの結果は,認識精度 (Accuracy), IoU (intersection over union),BF score (Boundary F1 score)などの評価指標を用いて評価された (図-4). 評価指標は,真陽 性 (TP), 偽陽性 (FP), 真陰性 (TN), 偽陰性 (FN)の4つの指標を用いて計算され た. TP は、ゲートとして検出した領域のうちの正しく分類された画像ピクセルであ り、TN は,非ゲート (背景) クラスに正しく分類されたピクセル数である. FP はゲ ート領域に属さないが誤ってゲートと分類された画素数、FN はゲートクラスに属す るはずだが誤って背景領域として分類付けられてしまった画素数である.

認識精度(Accuracy)とは、画素がどのクラスに属するかを問わず、正しく識別された画素数と総画素数との比である.これは、式(1)を用いて計算された.

IoU (Intersection over Union) は、オーバーラップ率とも呼ばれ、セグメンテーションの結果を評価する際の標準的な指標である. IoU は、検出された領域とグランドトゥルース領域との間の重複面積を測定することによって計算される. IoU は,式(2)で定義される.

Precision は正しく分類された陽性結果の数を全ての陽性結果で割ったもの(式(3)) であり, Recall は正しく分類された陽性結果の数を陽性と分類されるべきであったサンプルの数で割ったもの(式(4)) である. BF スコアは, Precision と Recall の調和平均であり, その数学的表現は, 式(5)のように定義される.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$BF \ score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$



4.3. 流量測定の計算手法

本報告での流れは潜り流出を対象としており,スルースゲートを通過する流れの単位幅あたりの流出量 q は,式(6)で表される.

$$q = Ca\sqrt{2gh_1}$$

(6)

ここで、Cは潜り流出の流量係数、gは重力加速度である. 潜り流出の流量係数 C は、ゲート上流水深 h₁、ゲート上流水深 h₂、ゲート開口高さ a の関係で決まり、式 (7)で表される(浪平、2021).

$$\left(\frac{C}{C_c}\right)^4 \left(H_1 - \frac{1}{H_1}\right)^2 + 2\left(\frac{C}{C_c}\right)^2 \left\{1 - H_1^2 + 2H_1\left(1 - \frac{1}{H_2}\right)\right\} + H_1^2 - H_2^2 = 0$$
(7)

ここで、 H_1 および H_2 はそれぞれ次式のとおりである.また、Ccはゲートの収縮係数で、既往事例と同じく 0.625 とした.

$$H_1 = \frac{h_1}{C_c a} \quad , \quad H_2 = \frac{h_2}{C_c a}$$

本報告での潜り流出条件下での h₁/a および h₂/a の値は,ともに 1.5 から 2.5 程度であ り,既往報告(浪平, 2021,および,安田・富田, 2015)による(7)式の解析値の適用 条件範囲内に含まれていることを確認している.

ゲートの上下流 (x = -1.0 m, 1.5 m) に設置したサーボ式水位計による水深 (「水 位計」と呼称),ゲートの直上の3Dカメラの測距結果 (x = ±0.5 m) から算出した 水深 (「直上カメラ」と呼称),ゲート上流 1.5m から斜め画角で同位置 (x = ±0.5 m)を撮影して測距した水深 (「斜めカメラ」と呼称)の,3種の計測結果を比較し た.ゲート開度 a は,水位計による流量算定では手計測による実測値を,直上カメラ と斜めカメラによる流量算定では3Dカメラのゲート天端の測距結果 (x = 0m) から の算定値を使用した.

5. 測距および流量推定精度の検証結果

5.1. 水門認識スコア結果

図-2の,直上と斜めのそれぞれの画角に おいて,ゲート開度を種々に変えて3Dカ メラによる撮影を行い,Yolov3によるゲー トの認識精度を比較した.総計120回撮影 したうち,ゲートを検出した回数は,直上 画角カメラでは112回,斜め画角では118 回であり,水門認識モデルの構築において 直上画角を学習データの対象としているも のの,斜め画角でも良好に認識した.検出 した試行で精度評価指標を算定し,その平 均値を表-1に示す.IoUは直上カメラと斜 めカメラでそれぞれ0.73,0.63となり,水 門認識モデル構築時のテスト画像の認識結 果(IoU=0.88)には及ばなかった.ただ

直トカメラ 3 Dカメラ計算値 (m) 斜めカメラ 0.4 1:1 0.3 0.2 0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0 ゲート開度 実測値 (m)

(8)

図-5 ゲート開度のモデル計算値の精度 Accuracy of model calculated values of gate opening

し、物体検出における IoUは一般的には 0.6 程 度あれば良好な結果と みなされるため、学習 データに含まれていな い新規の水門を検出す るに当たり十分な精度 を有していると考えら れる.

表−1 水門認識モデルの精度評価指標

0.5

Aggregate dataset metrics of since gate recognition mode	Aggregate	dataset metrics	of sluice	gate	recognition	model
--	-----------	-----------------	-----------	------	-------------	-------

	水門認識モ	デル構築時	本報告	水理実験	
	ベース	DAあり	直上	斜め	
loU	0.82	0.88	0.73	0.63	
Precision	0.98	1.00	0.80	0.98	
Recall	0.98	0.96	0.89	0.64	
BF score	0.98	0.98	0.84	0.77	

Yolo v3 で検出された矩形検出領域を比較すると、図-2 に示したように、直上画角 ではゲート天端の両端の水路壁面部分までを検出しているのに対して、斜め画角では 逆にゲート天端の一部分を検出し、天端部分に見逃し部分が生じていることがわか る.このことで斜め画角では Recall が 0.64 と低くなっている.しかし、矩形検出領 域内の測距結果の平均値からゲート高さを算定することを鑑みれば、むしろ望ましい 検出結果と言える.図-5 に、ゲート開度の実測値と水門認識モデルで算出された計算 値との関係を示した.直上画角ではゲート天端の両端の水路壁面部分が誤差となり、 実測値よりも 1.8 cm 程度ゲート開度を過大に評価していた.斜め画角は線形変換でゲ ート開度を算出するが、実測値と良好に一致していた.

5.2. 水位の測距精度および流量の推定精度

図-2の,直上と斜めのそれぞれの画角において,流量,ゲート開度,水路下流端堰 上げ高さを変化させることで,ゲート上下流を様々な水深となるようにして3Dカメ ラによる撮影を行い,水位の測距精度および流量の推定精度を検討した.表-2に,ゲ ートを検出した直上画角カメラ 112回,斜め画角 118回の撮影について,水位計での 同一時刻における計測と比較したそれぞれの RMSE を示す.全体の傾向としては,ゲ ート上流の水深は堰上げにより水面が安定しており,直上カメラ・斜めカメラともに 2.5 cm と誤差が小さかった.それに対して下流水深は,少流量(低水深)のときにカ メラと水面との距離が長くなるため,とくに斜めカメラでの RMSE が 7.4 cm と誤差が 相対的に大きくなった.

図-6 に、実験結果の一例として、ゲート開度 0.2m、下流端堰上げ高さ 0.2m とした ときの、流量の変動に伴うゲート上下流の水深を示す.また、図-7 に、同様にカメラ の測距による流量の計算値を示す.少流量のときには上下流の水位差が小さく、水位 計での流量算定であっても安定的な流量の計測は難しく、実験水路で制御する計測流 量と乖離が生じている.カメラによる算定流量も少流量(0.025 m³/s, 0.05 m³/s)の際 には、水位計での算定流量と比較してそれぞれ 9~15%程度の誤差が生じた.

6. まとめ

実験水路に全幅スルースゲートを設置し,水門開度モニタリングシステムでゲート 上下流の水位とゲート開度を画像解析から算定し,潜り流出の公式より流量を計測す

ることを試みた. Yolo v3 によるゲートの認識精度は 高く, 3Dカメラによる水 深およびゲート開度の算定 は,それぞれ誤差 2~ 7cm, 2cm以下と実用可能 な性能を確認した.より精 度を向上させるためには, Yoloの学習に適用箇所の教 師データを含めて再学習さ

表−2	画像解析における水位計測定値との計測誤差	(RMSE)

Measurement error (RMSE) from constant water level measurement

	直上	斜め
上流水深 (cm)	2.5	2.5
ゲート開度 (cm)	1.8	1.4
下流水深 (cm)	4.1	7.4
流量 25 L/s (%)	9.5	14.7
流量 50 L/s (%)	8.6	15.9
流量 75 L/s (%)	7.3	9.7
流量 100 L/s (%)	8.1	7.1

せる,ゲート天端以外の領域を除外する設定を模索する,などの方策が考えられる. 潜り流出の流量計測の精度は10%前後であり,現地での実測値とのキャリブレーショ ンを適切に行うことで,概算値としての把握は十分可能であると考えられる.遠隔監 視システムが整備されていない分水工等への適用が期待される.



図-6 流量変化に対する水門開度モニタリングシステムで計測した 水深・ゲート開度の経時変化

Temporal changes in water depth and gate openings measured by the sluice gate openings monitoring system in response to changes in flow rate



図-7 水門開度モニタリングシステムで算出した流量の経時変化

Temporal changes in flow rate calculated by the sluice gate opening monitoring system

引用文献

1) 関島ら(2021) 農業農村工学会誌, 89:15-18

2) 浪平(2021) 土木学会論文集 B1(水工学), 77:I_949-I_954

謝辞:本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の SIP「国家レジリエンス(防災・減災)の強化、テーマVI:スーパー台風被害予測システム開発」(管理法人:JST)、および日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号:21H02310、代表:吉永育生)の支援を受けて実施された.

開水路掛りが混在するセミクローズドパイプラインシステムにおける 流量予測を活かした降雨時の水管理手法の検討

○藤山 宗*・中矢哲郎*

FUJIYAMA So and NAKAYA Tetsuo

1. はじめに

台風等の大雨が予想される場合に用水の取水を停止する水管理(以降,「降雨時管理」 と称する.)は、開水路で実施されており、転倒・転落による人身事故の危険性が指摘され ている(島ら,2002).降雨時管理の実施判断は、降水量等が参考になるものの施設管理者 の経験と勘によるところが大きく、近年の降雨形態の変化により実施判断に遅れが生じ、 事故リスクが増大しているおそれがある.

ー方パイプラインでは、オープンタイプについては開水路と同じく降雨時管理が実施さ れているが、クローズドおよびセミクローズドタイプについては需要主導型の水管理方式 であるため降雨時管理を必要としない.しかし、クローズドおよびセミクローズドタイプ のパイプラインでも、支線に未整備地区の開水路掛りが混在する場合には支線分水を停止 する降雨時管理が必要とされる事例(藤山・中矢、2020)が見られ、この場合には開水路 と同じく事故リスクが伴うことが想定される.これらのパイプラインシステムでは、部分 的に需要主導型の水管理方式であり農家の給水栓操作により幹線流量が変化する水理特性 を有するため、幹線流量の変化から用水需要を把握できる可能性がある.そのため、この 水理特性を活かして、降雨時管理の実施判断に流量予測を適用できれば、流量の低下傾向 を基にした適切な実施判断により事故リスクを低減できる可能性がある.

以上のことから本研究では、転倒・転落事故リスクを有する降雨時管理の実施判断技術 を構築するために、施設管理者からのアンケート調査および聞き取り調査に基づき転倒・ 転落事故の実態把握を行うとともに、支線に開水路掛りが混在するセミクローズドパイプ ラインシステムを対象とした流量予測手法を検討する.

研究の方法

2.1 対象地区の概要

研究対象とする豊川用水地区では、愛知県と静岡県の2県にまたがる農業受益面積約 18,000ha へ農業用水を供給するために、大野系幹線水路, 牟呂松原系幹線水路等の幹線水 路を通じた送配水が行われている.大野系幹線水路は、大野頭首工から取水し、東西分水 工より東部幹線水路と西部幹線水路に分岐し、さらに両幹線水路ではそれぞれ 107 支線、 56 支線へ分水される.なお本研究では、東部幹線水路と西部幹線水路から分岐する 163 支 線を対象とした.

163 支線の内 75 支線では,事前の流量申し込みに基づく降雨時管理が実施されており, この申し込みに基づき幹線水路では送水管理が行われている.目安であるが,時間雨量 30mm/hr,累積雨量 100mm 以上の降水が想定される場合には,前日正午までに申請し,次

*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, National Agriculture and Food Research Organization キーワード:農業水利施設,降雨時管理,人身事故, ICT,流量予測

の日午前中に,最終的な降雨時管理の実施判断が求められるものの,実施判断に遅れが生 じていることが事前の聞き取り調査から明らかとなっている.

2.2 転倒・転落事故の実態把握のためのアンケート方法

降雨時管理が行われている豊川用水地区の75支線を対象とした,施設管理者からのアン ケート調査により,降雨時管理における転倒・転落事故の実態を把握する.アンケートで は,各支線での管理施設名称と,それぞれの管理施設における,a)転倒・転落の経験,b) ヒヤリ・ハット(ヒヤリとしたりハッとしたりする状態)の経験,c)該当無しを整理する. 本アンケートでは,a)とb)を合わせたものを事故リスクと定義する.

2.3 セミクローズドパイプラインシステムにおける流量予測手法

セミクローズドパイプラインシステムにおける流量の予測には、時系列データから予測 や制御を行うための統計モデルの1つである時系列解析モデルを用いる.本検討では、限 られた観測データ数であっても予測が可能であり、比較的モデル構造が単純で拡張性が高 い自己回帰モデル(たとえば、中矢ら、2020)(AR model: Auto-Regressive model,以降「AR モデル」と称する.)を用いる.またパイプライン流量は、天候に左右される農家の給水栓 開閉操作による人為起源の偶発的な変動に影響される.このような偶発的な変動へのAR モデルの適用は不向きであるが、AR モデルに、人為起源の偶発的な変動を再現するため のファジィメンバーシップ関数の項を追加することで、ファジィ理論に基づくAR モデル

(郭ら, 2012)(以降,「Fuzzy-AR モデル」と称する.)を構築する.本手法では,式(1), 式(2)より流量を予測する.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{P} a(i) \cdot x(t-i) + r(t)$$
(1)
$$r(t) = \mu_{R} \cdot W_{R}$$
(2)

ここで、y(t):日時tにおける流量予測値、x(t):tにおける真値、a(i):ARパラメータ、 p:ARモデルの次数(本検討では3次)、r(t):ファジィ理論に基づく補正項、 μ_R :時間降 水量にかかるファジィ所属度、 W_R :重み係数である.ARパラメータはYule-Walker方程 式より求め、ARモデルの次数は赤池の情報量基準(AIC)により決定する.またFuzzy-AR モデルのフローチャートは図1に示すとおりであり、図中のr(t)の算出は、水管理特性と しての降水量と流量に関するIF-Thenルール(以下のRule1, Rule2)に基づくものである.

- Rule1: 気象観測所①(蒲郡観測所)の時間 t-1の時間降水量が 0mm より大きい場合 には,流量が小さくなりやすい.
- Rule2: 気象観測所②(蒲郡観測所)の時間 t-1の時間降水量が 0mm の場合でも,気 象観測所②(広島観測所)の時間 t-1の降水量が 0mm より大きい場合には,流 量が小さくなりやすい.



図-1 Fuzzy-AR モデルのフローチャート

結果と考察

3.1 転倒・転落事故の実態把握のためのアンケートの集計結果

図-2は、アンケート集計結果を示す.図-2(a)より、降雨時管理を実施する 75 支線の 中で事故リスクが確認されたのは約8割であり、降雨により事故リスクが大きくなってい ることが想定される.図-2(b)より、75支線の管理施設の総数265に対して、事故リス クが有るのは約6割であった.



ける管理施設の事故リスクの内訳

図-2 アンケートの集計結果

また転倒・転落の経験がある A 支線では、農地内および管理施設敷地内におけるバルブ 閉操作時の転倒経験であり、後者については池内への転落のおそれがある人命にかかる重 大な事故リスクであることがわかった.この2施設における転倒の要因の一つには、降雨 により路面が滑りやすくなっていたことが、施設管理者からの聞き取り調査から明らかと なっている.これらの事故の発生要因分析については今後の課題である.

3.2 A 支線における降雨時管理の実態

転倒・転落の経験が確認されたA支線(図-3)に おける降雨時管理の実態について豊川管理事務所の 施設管理者からの聞き取り調査を行った.A支線は, フロートバルブスタンド(調圧水槽)が複数配置さ れたセミクローズドパイプラインシステムであり, 水田地区の末端水路にはパイプライン掛りと開水路 掛りが混在する.そのため降雨時管理では,開水路 掛りのバルブ閉操作と,バルブ閉操作に伴う流量変 動分を調整する調圧水槽の水位監視が実施されてい る.

施設管理者からの聞き取り調査によると,降雨時 管理の実施回数は,例年,2~3回程度/年であり, 2021年と2022年の実施回数はそれぞれ2回であっ た.降雨時管理は,広域に点在する25施設を2班体 制(2人/班),1時間程度で実施されている.A支線 を管理する豊川管理事務所では,A支線の他に29 支線の降雨時管理に,限られた人員での対応が余 儀なくされており,A支線での降雨時管理が事故



図-3 A 支線の用水系統図

リスクが高まる降水発生時となるケースがあり,2021~2022年の計4回の降雨時管理の内, 3回がこのケースに該当した.また,降雨時管理の最適な実施タイミングは,確実に降水 が発生し用水需要が低減することが想定された段階,かつ事故リスクがない無降雨時に降 雨時管理を完了できる段階であることが明らかとなっている.そのため,現在の班体制で 降雨時管理を完了できる1時間前に,用水需要の低下傾向を精度良く予測することができ れば,無降雨時の段階あるいは降雨時でも比較的少雨時(5mm/hour 未満)に降雨時管理を 完了できる可能性があり,その結果として事故リスクの低減が期待できることが示唆され た.

3.3 A 支線における流量予測結果

2021~2022 年の取水流量観測結果に よると、国府支線の近傍の蒲郡観測所で の降水量が 0mm の場合でも、離れた地 点の観測所(たとえば、広島観測所)で 降水が発生すると、用水需要としての流 量の緩やかな低下傾向が見られ、さらに 蒲郡観測所での降水が発生すると流量の 変化勾配が急になる傾向が確認された

(図-4).この降水量と流量に関する水管 理特性については,式(1),式(2)に考 慮している.



図-4 降雨状況に応じた流量変化における 観測値と予測値の比較

そこで、降雨状況に応じた流量変化を 予測するために、降雨時管理が実施され ていない 2021 年 6 月 3 日~5 日の時系列 データをもとに、Fuzzy-AR モデルを構築 するためのパラメータ設定を行うととも に、観測値と、AR モデルおよび Fuzzy-AR モデルによる予測値との比較を行った (図-4). 図中より、蒲郡観測所における 3mm/hour (6 月 4 日 9:00) から 6mm/hour

(6月4日10:00) への降水量の増加に応 じて, 農家の給水栓閉操作による流量の 著しい低下傾向が見られ, Fuzzy-AR モデ





ルは人為起源の偶発的な変動を再現できる可能性があることがわかる.

また図-4 をもとに構築した Fuzzy-AR モデルを,降雨時管理における流量データの再現 に適用した例(2021年6月30日~7月2日)を図-5に示す.Fuzzy-AR モデルは,7月1 日 5:00の流量の変化傾向を再現しているものの,実際に施設管理者が降雨時管理を実施し たのは7月1日13:00であり,その時には少雨条件で流量の変化はほぼ見られなかった. この結果より,降雨時管理の実施判断へのFuzzy-AR モデルによる予測手法の適用には, 実際に降雨時管理を実施できる時間帯に流量の低下傾向が生じる必要があるとともに,予 測精度を向上させるには,降雨形態により異なるであろう人為起源の偶発的な変動パター ンの類型化が必要となることが明らかとなった.

4. おわりに

本研究では、豊川用水地区におけるアンケート調査に基づき、降雨時管理を行う支線の 約8割にてヒヤリハットを含めた転倒・転落の事故リスクがあることを明らかにした.ま た、事故リスク低減対策としてのFuzzy-ARモデルによる流量予測手法の適用可能性が示 されたものの、今後さらなる予測精度の向上が課題である.なお本研究は、農林水産省委 託プロジェクト研究「AI等の活用による利水と治水に対応した農業水利施設の遠隔監視・ 自動制御システムの開発」JPJ009837の支援を受けて実施した.

【参考文献】1)島武男,田中良和,中達雄,川尻裕一郎,片山秀策(2002):中山間地水路 の維持管理実態と自動止水ゲートの開発,農業土木学会誌,70(2),27-31.2)藤山宗,中矢 哲郎(2022):セミクローズドパイプラインシステムにおける利水時および降雨時の管理に 効果的な ICT 水管理システムの監視箇所に関する現地調査,2022 年度農業農村工学会大会 講演要旨集,283-284.3)中矢哲郎,藤山宗,武馬夏希(2022):水田灌漑地区の用水節減の ためのバッファーポンドと分水ゲートの運用手法,土木学会論文集 B1(水工学),印刷中. 4)郭悠翔,倉本圭,小橋昌司,畑豊(2012):Fuzzy-AR モデルを用いた姫路市の年代別喘 息発作数予測,28th Fuzzy System Symposium, 193-197.

大規模な頭首工を対象とした水理模型実験の事例紹介 Case study of hydraulic model experiments for large headwork

寺澤 明人

TERAZAWA Akito

(本文)

1. 豊川用水の概要

(1) 豊川用水の概要と歴史

豊川用水は渥美半島全域を含む愛知県東三河地方と静岡県湖西市の地域に農業用水, 水道用水,工業用水を供給する用水路である。1949年(昭和24年)に農林省直轄の国営 事業(豊川用水事業)として始まり,1951年(昭和26年)に天竜東三河地域が国土総合 開発法に基づく「特定地域」に指定され総合開発事業に,1961年に国営事業及び県営事 業を愛知用水公団が承継し,1968年(昭和43年)に事業が完了している。

その後,営農形態の近代化,人口増加と生活水準の高度化が急速に進んできたことから,1980年度(昭和55年度)より水源強化の豊川総合用水事業が始まり,1999年度(平成11年度)に水資源開発公団が事業を承継し,2001年度(平成13年度)に完成した。

施設の老朽化への対策としての施設改築を行う豊川用水施設緊急改築事業を1990年 度(平成2年度)から1998年度(平成10年度)にかけて実施した。

現在は、豊川用水施設,豊川総合用水施設の管理事業と併せ,1999年度(平成11年度) から豊川用水二期事業に着手し,老朽化した水路施設の改築や大規模地震対策等を実施 している。

(2) 豊川用水の主な施設

豊川用水施設は水源施設,取水堰又は頭首工,幹線水路,地区内調整池,支線水路で構成している。

水源施設は、ダムとして,宇連ダム, 大島ダム,流域変更施設として大入頭 首工,振草頭首工,寒狭川頭首工,天竜 川水系の佐久間ダム及び佐久間導水路

(かんがい期に限る)がある。

取水堰又は頭首工として大野頭首 工, 牟呂松原頭首工がある。

幹線水路は,大野頭首工で取水する 大野導水路(約6km)及び大野系幹線水 路(約112km)と牟呂松原頭首工で取水 する牟呂松原系幹線水路(約24km)が ある。



図-1 豊川用水施設概要図

所属(和)独立行政法人水資源機構 総合技術センター(英)Japan Water Agency Water Resources Engineering Department (キーワード)管・開水路の流れ,水利構造物 大野系幹線水路は,長大な自然流下方式の開水路系水路で平均導水勾配は 1/1,400~ 1/1,000 であり、水位調節堰,支線水路分水口を設置している。大野系幹線水路では,豊 川用水二期事業で併設水路(管水路)を設置し,水路の複線化を進めている。

河川余剰水の貯留,必要量の調整,管理余水の有効活用を図る目的で設置された 7 つの地区内調整池(駒場池,三ツロ池,初立池,大原調整池,万場調整池,芦ヶ池調整池,蒲郡 調整池)がある。(図-1)

この他,支線水路(約3,000km以上)がある。 (3)大野頭首工,牟呂松原頭首工

大野頭首工は宇連川を堰き止め,大野系幹線水路に取水する施設である。頭首工では あるが堤高 26m の重力式コンクリート堰堤(ダム)であり利水ダムの分類では第3類と なっている。

牟呂松原頭首工は豊川を堰き止め,牟呂松原系幹線水路に取水する,堰長約181mの可 動堰である。

(4)大野導水路の概要

大野導水路は,大野頭首工から大野系幹線水路が東部幹線水路と西部幹線水路に分岐 する東西分水工までを導水する開水路系用水路(約 6km)であり,大野頭首工から最大 30m3/sの用水を取水・導水する。

大野導水路に並行して併設水路(トンネル掘削: TBM約5.9km)が設置され,既設導 水路の取水口部で合流する形となっており,水理模型実験は既設導水路から併設水路へ の分流部(新設分水工,併設水路)を対象として実施している。

2. 水理模型実験

(1) 水理模型について

水理模型は,測定対象とする現象が重力の卓越した現象であることから,フルードの相 似則を適用し、模型への実験設備による給水量や再現する最大流量(Q=30m3/s)から,縮 尺を1/20としている。

模型による再現範囲は,模型実験で確認する内容を考慮し,大野導水路は取水口から下

流約 120m (模型:6m) ま で,大野頭首工は貯水池 上流側約 100m (模型:5m) としている。(図-2)

大野頭首工, 既設大野導 水路, 新設分水工は木製 で, 併設水路はアクリル 樹脂板製で製作してお り, 使用材料は, 実験で確 認する内容, 改造の容易 性等を考慮して選定して いる。



図-2 水理模型再現範囲

(2)実験計画(当初案)

水理模型実験では,新設構造物の設置前後の流況確認や,流況が不安定な状態となる場 合の流況改善策の検討を行うために模型の改造が伴う。 模型は一度改造すると, 改造前 の状態に復元することが容易ではないため、計測の段取りや模型改造の計画を綿密に構 築することが実験結果の有用性を大きく左右する。

豊川用水を管理する豊川用水総合 事業部から水理模型実験において 確認したい内容として提示された のは次のとおりであった。

 ①既設大野導水路から併設水路へ 分岐する分岐部(新設分水工)の流 況

②併設水路と大野頭首工貯水池の 水位-流量関係式(以下「H-Q 関係式) という。)

③新設分水工設置後の既設大野導 水路と併設水路の流下能力の確認

表─1 実験計画(当初案)					
実験段階	模型の状態	計測計画(流況確認,流量計測)			
	《当初模型》				
	既設大野導水路				
i)	既設大野導水路(3門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)			
	Ļ				
ii)	既設大野導水路(2門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)			
	Ļ				
	《模型改造》				
	既設大野導水路+併設水路				
iii)	併設水路(1門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)			
	Ļ				
iv)	既設大野導水路(2門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)			
	Ļ				
v)	既設大野導水路(2門取水) +併設水路(1門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)			

これら①~③の要求を満たすため,実験計画(当初案)を立案した。(表-1)

(3) 実験計画(変更案)

実験段階 i, ii は実験計画(当初案)のとおり進み,併設水路を既設大野導水路に取り 付ける模型改造を行った。

実験段階ⅲの流況確認において新設分水工内に不安定な流況が確認された。

実験計画(当初案)に,新設分水工内に確認された不安定な流況を改善する実験の追加 を検討し,次の①~③を改善目標として実験計画の見直しを行った。

①併設水路の流量係数の向上

②幹線水路側ゲートからの跳ね返

り流による併設水路始点部隔壁沿 いに発生する縮流の軽減

③併設水路内に発生する旋回成分 の軽減

新たな実験計画(変更案)に④,⑤ の実験を追加した。(表-2)。

④新設分水工内にある併設水路始 点部隔壁の形状変更(6ケース)

⑤新設分水工底部に導流壁設置(あ り,なし)

新設分水工内で確認した不安定な 流況の発生箇所と模型の改造箇所を 図-3に示す。

表-2 実験計画(変更案)					
実験段階	模型の状態	計測計画 (流況確認,流量計測)	当初・追加		
	《当初模型》				
	既設大野導水路				
i)	既設大野導水路(3門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)	当初		
	Ļ				
ii)	既設大野導水路(2門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)	当初		
	Ļ				
	《模型改造》				
	既設大野導水路+併設水路				
iii) -1	併設水路(1門取水)	〈不安定な流況を確認〉	当初		
iii)−2	併設水路(1門取水)+併設水路始 点部隔壁形状検討(6ケース)	流況確認,流量計測(形状比較用デー タ収集)	変更		
	Ļ				
iii) −3	併設水路(1門取水)+併設水路始 点部隔壁形状(最終案)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)	変更		
	Ļ				
iv)	既設大野導水路(2門取水)	流況確認,流量計測(H-Q関係式作成 データ収集)	当初		
	Ļ				
v)	既設大野導水路(2門取水) +併設水路(1門取水)+併設水路 始点部隔壁形状(最終案)	流況確認,流量計測(H−Q関係式作成 データ収集)	変更		
	Ļ				
vi)	併設水路(1門取水)+併設水路始 点部隔壁形状(最終案)+新設分水 工底部導流壁設置検討(2ケース)	流況確認,流量計測(設置効果比較用 データ収集)	変更		
	Ļ				
v)-2	併設水路(1門取水)+併設水路始 点部隔壁形状(最終案)+新設分水 工底部導流壁 設置(あり)	流況確認,流量計測(設置効果比較用 データ収集)	変更		

実験計画(変更案)のiii)-2で行 う,併設水路始点部隔壁の形状変 更の実験では,(3)に示す①~③の 改善目標のうち,流況変化を水面 形の計測により速やかに把握でき る②の縮流の軽減に着目した。



縮流の軽減効果は、併設水路始点

部左右岸の水位差,縮流発生区間の上下流水位差を指標とし,水位差が最も小さくなる 隔壁形状を最終案として選定している。

さらに、併設水路に流下する新設分水工内の流れを強制的に併設水路側に向ける導流 壁を新設分水工底部に設置し,縮流の軽減効果を隔壁形状(最終案)で確認している。

実験計画(変更案)のとおり全ての実験を実施し、模型実験は終了した。

(4)実験の成果について

豊川用水総合事業部が確認したい内容①~③に対する成果を,実験結果の組み合わせることで得ている。

- ▶①に関する成果:新設分水工内で確認した不安定な流況と対策案(隔壁形状の最終 案,導流壁設置効果)
 - (具体の内容)併設水路始点部隔壁の形状の検討実験の結果,新設分水工底部への導流 壁設置実験の結果

▶ ②に関する成果:併設水路の実験で作成した H-Q 関係式

(具体の内容)併設水路の H-Q 関係式(当初案,最終案,最終案+導流壁あり)

- ▶③に関する成果:既設大野導水路の実験で作成した H-Q 関係式、既設大野導水路と 併設水路を同時通水する実験における流況,②の成果
- (具体の内容) 既設大野導水路(3門取水時,2門取水時)のH-Q関係式,既設大野導 水路と併設水路を同時通水した時の流況及び流量配分

(5)あとがき(水理模型実験を実施して)

事前に行われていた水理計算結果 をもとに、実験計画(当初案)を作成 しており、実験は順調に進むと想定 していたが,実験により水理計算に 表現されない水理現象(不安定な流 況)を確認し,実験計画の見直しを行 うこととなった。

水理現象の発生理由を考えると要 因が想定できることから、水理計算 と実現象を結びつけ,水の流れを考 えることの重要性を本実験が改めて 示したと考えている。



図-4 水理模型全景

公益社団法人農業農村工学会 応用水理研究部会 http://www.jsidre.or.jp/ouyousuiri/

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.

> 事務局:〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1 東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻気付 応用水理研究部会事務局(部会長:高木強治)