

# 令和2年度応用水理研究部会 講演集



## 令和2年11月28日

## WEB 開催

(公社) 農業農村工学会応用水理研究部会

### 参加される方へ

- 1. 令和2年度応用水理研究部会講演会は、令和2年11月28日9時の開会あいさつ、9時10 分から14時35分までの研究発表会、閉会後の代表幹事会をすべてWEB会議アプリ 「Zoom」を使ってオンラインで行います。
- 2. 時間になりましたら、下記の本会場のURLをクリックしてWEB会場へお入りください。また、本会場で万が一トラブルが生じた場合は、研究部会事務局(一恩)から参加者全員の登録アドレスに電子メールで予備会場のURLを連絡いたします。

(WEB会場のURL)

11月28日(土)8時30分開場: 開会あいさつ9時~、研究発表会9時10分~14時35分

https://zoom.us/j/96111105844?pwd=eHNOV110a0IVQkVtSzBEbjA1NGZXZz09

ミーティングID: 961 1110 5844

パスコード: 152753

11月28日(土)14時10分開場: 代表幹事会14時40分~

https://zoom.us/j/92381492691?pwd=UGJXcXVVZndTNTJ4ZUVURWUvU2tBdz09

ミーティングID: 923 8149 2691

パスコード: 999925

- 3. 参加中のZoomでのご自身の表示名は、参加申込に記入した氏名(フルネーム)とな るよう設定をお願いします。
- 大会では、開会・閉会のあいさつをされる方、講演者、座長以外はご自身のビデオは オフ、マイクもオフ(ミュート)でお願いいたします。マイクがミュート解除になっ ている場合は、運営委員会(ホスト側)でミュート設定させていただく場合がありま す。
- 5. 参加者による一切の録画、静止画記録、録音は禁止といたします。必要な方は、研究 部会事務局(ichion@ishikawa-pu.ac.jp)までご連絡ください。
- 活発な質疑をお願いいたします。質問・コメントを希望される場合は、ビデオをオン、 ミュートを解除して座長に申し出てください。座長から指名されましたら、質問をお 願いいたします。質問はチャットでも受け付けます。活発な質疑にご参加いただけれ ば幸いです。
- 7. 本大会は技術者継続教育機構の認定プログラムに申請中です。CPD登録を希望される 方は事前に研究部会事務局(ichion@ishikawa-pu.ac.jp)まで、お申込みください。各 セッションの開始時と終了時に、チャットで研究部会事務局一恩英二あて「出席」と 送信してください。WEB会場でのチャットによる出席記録に基づいて、CPDが認定 されます。
- 8. 通信状況が不安定である、参加者のマイクから雑音が入力され聴講が困難などの問題 は、チャットでご連絡ください。その他、お気づきの点がございましたら、研究部会

事務局一恩 英二(076-227-7483) まで随時ご連絡ください。

### 講演される方へ

- 発表時間は1課題当たり25分(講演20分、質疑5分)としてプログラムを組んでおり ます(タイムキーパーは事務局で準備いたします。タイムキーパーから「発表時間残 り5分」、「発表時間終了」、「質疑時間終了」の案内をいたします)。
- 2. 講演予定の方は、発表セッションの開始時刻までに、WEB会場にご入場いただきま すようお願い致します。
- 講演される方は、講演開始時にビデオをオン、マイクをオン(ミュートを解除)にして発表を行ってください。発表に使用するパワーポイント等のファイルは、画面の共有を行って発表してください。ビデオについては、通信状況によってはオフにすることをお願いする場合があります。

### Zoomについて

- 大会に参加される方は事前にZoomアプリをホームページ(https://zoom.us/) よりダ ウンロードをお願いします。アプリはWindows、Mac、iPad、iphone、Androidで利用 できます。
- ホームページ最下部「ダウンロード」の「ミーティングクライアント」をクリックしてミーティング用Zoomクライアントをダウンロードします。
- 3. Zoomのビデオ会議を利用するには、カメラ、スピーカー、マイクが必要です(聴講 するだけであれば、スピーカーまたはイヤホンのみでも参加可能)
- パソコンの内蔵マイクが雑音や環境音を拾うことでハウリングを起こす場合は、音量 を調整するか、ヘッドセットを利用してください。
- 5. 参加者の接続テストのために、27日の13時~16時にWEB会場を設けます。Zoomでの WEB会議やWEB講演会に不慣れな方は下記URLからWEB会場に入って、聴講や発表 の接続テストを行うことをお勧めします。

(接続テスト用WEB会場のURL)

11月27日 (金) 13:00~16:00

https://zoom.us/j/97287755313?pwd=a1dOcG5IakdxelRJZ0NPaU5JcHFZUT09

ミーティングID: 972 8775 5313

パスコード: 576729

| 令和2年度応用水理研究部会講演会プログ | ラム | (WEB 🎚 | 開催) |
|---------------------|----|--------|-----|
|---------------------|----|--------|-----|

| 開始時刻  | 内容          | 講演者/座長  | 題目   | ページ |
|-------|-------------|---|--|-----|
| 9:00  | 開会挨拶        |   |  |     |
|       | 第1セッショ<br>ン | 座長:平松 研   |  |     |
| 9:10  | 発表課題1       | <ul> <li>〇安宅 京志朗・星野</li> <li>光司・長野 峻介・藤</li> <li>原 洋一・一恩 英二・</li> <li>藤原 正幸</li> </ul>      | 扇状地の用排兼用水路におけ<br>る起伏ゲート高さと水理環境<br>条件の変動  | 1   |
| 9:35  | 発表課題 2      | <ul> <li>〇疋田 凌麻・伊藤 義</li> <li>人・桑原 智洋・長野</li> <li>峻介・藤原 洋一・一</li> <li>恩 英二・藤原 正幸</li> </ul> | 海域に流入する用排兼用水路<br>における PIT タグを用いた魚<br>類移動調査   | 9   |
| 10:00 | 発表課題3       | 〇楠堂紡・林大輔・松<br>浦大輝・山本純之・木<br>村匡臣・松野裕   | Encoder-Decoder LSTM によ<br>るため池水位予測モデルの構<br>築  | 17  |
| 10:25 | 休憩          |   |  |     |
|       | 第2セッショ<br>ン | 坐長:木村 匡臣<br>  |  |     |
| 10:40 | 発表課題4       | ⊖Kohei Kimura,<br>Koichi Unami,<br>Masayuki Fujihara  | Comparison between the<br>standardized precipitation<br>index and the dry spell<br>length in terms of indicating<br>drought severity | 19  |
| 11:05 | 発表課題5       | ○羽田野 袈裟義・荒<br>尾 慎司・金守 幸吉  | スルースゲートからの自由流<br>出の流量と上流水深の双方向<br>評価   | 20  |
| 11:30 | 発表課題6       | ○稲垣 仁根・藪口 貴<br>啓・吉岡 敏幸  | 無溶剤形エポキシ樹脂塗装に<br>おける管路内のエネルギー損<br>失について  | 30  |
| 11:55 | 休憩          |   |  |     |
|       | 第3セッショ<br>ン | 座長:長野 峻介  |  |     |
| 12:55 | 発表課題7       | ○清水 海斗・飯田 俊<br>彰・木村 匡臣・安瀬<br>地 一作   | 大規模稲作への低コスト省力<br>化灌漑システム導入に向けた<br>水理学的検討   | 42  |
| 13:20 | 発表課題8       | OXIE Wenpeng,<br>KIMURA Masaomi,<br>TAKAKI Kyoji  | Estimation of water<br>temperature dynamics in<br>paddy fields using LSTM<br>considering vegetation<br>growth status parameter       | 45  |
| 13:45 | 発表課題9       | <ul> <li>○浅田 洋平・鈴木 哲</li> <li>也・木村 匡臣・安瀬</li> <li>地 一作・飯田 俊彰</li> </ul>                     | 管内圧力変動を利用した漏水<br>検知法の現場管路における実<br>験的検証   | 48  |
| 14:10 | 発表課題 10     | <ul> <li>〇鈴木 哲也・斎藤 真</li> <li>歩・浅田 洋平・木村</li> <li>匡臣・安瀬地 一作</li> </ul>                      | 水撃圧作用を利用したモデル<br>パイプラインに発生する応力<br>場の非破壊・非接触同定  | 50  |
| 14:35 | 閉会挨拶        |   |  |     |
| 14:40 | 代表幹事会       |   |  |     |

## 扇状地の用排兼用水路における起伏ゲート高さと水理環境条件の変動 Changes in Flap Gate Height and Hydraulic Environmental Conditions in an Irrigation and Drainage Canal in Alluvial Fan

○安宅京志朗\* 星野光司\*\* 長野峻介\* 藤原洋一\* 一恩英二\* 藤原正幸\*\*\*
 ○ATAKA Kyoshiro\*, HOSHINO Koji\*\*, CHONO Shunsuke\*, FUJIHARA Yoichi\*, ICHION Eiji\* and FUJIHARA Masayuki\*\*\*

#### 1. はじめに

手取川扇状地の右岸側に位置する七ヶ 用水は、2015年4月1日時点の受益面積 は4,747haで3市1町(白山市,金沢市, 野々市市,川北町)を灌漑している(水土 里ネット七ヶ用水,2020).手取川に設置 された白山頭首工で取水された幹線水路 が複数の支線水路に分岐している.調査 対象にした石川県の手取川扇状地は北陸 地方特有の急勾配な地形であり,農業水 路の至るところに落差工や取水口を設け ており,水田用水の反復利用方式も幹線 水路を仲介とした特有の地区内反復利用 体系を取っている(吉田ら,2012).

七ヶ用水を構成する山島用水の 4-2 号 支線では,2008~2009 年に魚類調査が行 われ,アユ 496 個体,ドジョウ 350 個体, アユカケ 95 個体,シマヨシノボリ 78 個 体,ウグイ 30 個体,スミウキゴリ 26 個 体,カジカ 15 個体,ドンコ 12 個体,ウ キゴリ 9 個体,ヌマチチブ 5 個体など, 計 17 種の総数 1,136 個体の魚類が採集さ れた(一恩ら, 2013).

山島用水 4-2 号支線には,これらの魚 類の移動に配慮した階段式魚道型落差工 が多数設置されている.これらの魚道型 落差工には農業用水の取水位を確保する ために起伏ゲートが設置されている場合 が多いが,起伏ゲートは起立すると落差 が大きくなりかつ完全ナップ(水脈)を 生じることが多いので,魚類の遡上が困 難になることが考えられる.起伏ゲート の起立と倒伏は魚類の移動に大きな影響 を与える可能性がある.

本研究は、山島用水 4-2 号支線の米永 分水工下流区間において 2019 年度の非 灌漑期と 2020 年度の灌漑期に起伏ゲー トの高さと水理環境条件を調査して、魚 類の移動調査の結果を分析するために必 要な水理環境条件の変動を明らかにする ことを目的とした.

#### 2. 研究方法

#### 2.1 調査地

本研究は、七ヶ用水を構成する山島用 水の 4-2 号支線の下流部 3.5km の区間で 実施した(Fig.1).対象水路は、石川県白 山市の米永町、宮保町、七郎町、上小川町 を経て、日本海に流入している.対象区 間には、d1~d19 の 19 個の落差工が設置 されている.落差工は、水叩き式(d1)、 段落ち式(d2,d3,d4,d5)、階段式魚道 型(d6,d7,d9,d16,d18)、起伏ゲート

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

<sup>\*\*\*</sup> 新潟県庁 Niigata Prefectural Office

<sup>\*\*\*</sup> 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

キーワード:魚道型落差工,起伏ゲート,水位・水温ロガー,インターバルカメラ,モニタリング

付き階段式魚道型(d8, d10, d15, d17), 起伏ゲート・切り欠き付き階段式魚道型 (d11, d13, Fig.2),切り欠き付き階段式 魚道型(d12),板堰・切り欠き付き階段式 魚道型(d14),斜路式(d19)の8種類が 設置されている.



**Fig.1** 水位・水温ロガーとインターバル カメラの設置地点

Installation points of water level / water temperature loggers and interval cameras



Fig.2 起伏ゲート・切り欠き付き階段式 魚道型落差工(d11) Pool and weir fishway type drop structure with a flap gate and rectangular notches (d11)

そのうちの d1, d10, d11, d14, d15 に 水位・水温ロガーを設置し, d8, d13, d17 にインターバルカメラを設置して調査を 行った.

#### 2.2 水位・水温ロガー

水深と水温のデータを測定するため水 位・水温ロガー(米国オンセットコンピ ューター社 圧力センサーU20-001-04 お よび U20-001-04(Ti), Fig.3)を塩ビパイ プに格納し, d1, d10, d11, d14, d15 に設置した.設置場所は起伏ゲートまた は落差工の上流 4~5m の地点とした. また, 1ヶ月に1回の頻度で水位・水温 ロガーで収集したデータをノートパソコ ンに回収した.

また,大気圧と気温を測定するための ロガーを dl1 の塩ビパイプ内に水位・水 温ロガーと一緒に格納し,大気圧と気温 を測定した.水位・水温ロガーから得ら れた水圧と大気圧の差より,以下の式を 用いて水深を求めた.

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g}$$

ただし h: 水深 (m) p: 水圧 (Pa) p<sub>0</sub>:大気圧 (Pa) ρ:水の密度 (kg/m<sup>3</sup>) g: 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)





#### 2.3 インターバルカメラ

起伏ゲートの高さと水深変化を撮影す るためにインターバルカメラ(FL-Products 防犯カメラセット,株式会社 Front -Line, **Fig.4**) を d8, d13, d17の起伏ゲ ート上流側の橋桁または起伏ゲート上流 側壁天端に設置した.また,インターバ ル時間は2時間とし,1か月に1回の頻 度でカメラ内の画像データを回収した.

画像の分析のために起伏ゲートの側部 戸当たりの金属板に鋼尺を当てた写真を あらかじめカメラで撮影しておいた.イ ンターバルカメラで撮影された写真と鋼 尺を撮影した写真を対照することで水深 やゲート高さの読み取りを行った.



Fig.4 インターバルカメラ Interval Camera

#### 2.4 水質測定

水質調査は,月1回の頻度で水深,水 温,DO,EC,pH,透視度,濁度について 実施した.2019年9月4日は,最下流部 のd1とd17で実施したが,2019年10月 2日以降は,d1とd19で測定を行った. 水深は,鋼尺を用いて測定した.水温は 防水型デジタル温度計(株式会社佐藤計 量器製作所SK-1260,サーミスタセンサ SK-S102T,耐圧,水温測定用)を,DOは 溶存酸素計(株式会社堀場製作所 OM-512)を、pH は pH メーター(株式会社堀場 製作所 Twin pH B-212)を、濁度はオプテ ック社のポータブル濁度センサ(TDM500)を、透視度は同社のポータブル透 視度センサ(TP-M100)を用いて測定した.

#### 3. 結果と考察

#### 3.1 水位・水温ロガー

2019年8月から2020年9月までのd1, d10, d11, d14, d15 で水位・水温ロガー から得られた水深と水温の変化を Fig.5 と Fig.6 にそれぞれ示す. Fig.5 には,参 考のため,気象庁 (2020)の金沢市の最大 1 時間降水量をプロットした.最大 1 時 間降水量が大きかったのは,2019/8/30 の 43mm,2020/7/7 の 43mm,7/18 の 35.5mm, 6/18 の 31mm であるが,2020 年 6 月~8 月には上記以外にも 20~30mm の最大 1 時間降水量が 7 回観測されている.

d1 は起伏ゲートがない水叩き式の落差 工であるので,最大1時間降水量と水深 の関係は,起伏ゲートや板堰がある地点 より対応関係が Fig.5 から明瞭であるこ とが分かる.ただし、2020年の3月は例 外で,降水量が少ない時期で,停水期間 (2/28~3/31) であったにもかかわらず, d1の水深が最大約 0.50m に増大している. この原因は、d1下流の堆積土砂の影響で あると推定される. 堆積土砂による背水 の影響が3月に大きくなったと考えられ る. Fig.7 に示すように, 2020/2/20 に d1 の水位・水温ロガー設置地点に背水の影 響がすでに及んでいた.停水期間 (2019/10/15~11/20 および 2020/2/28~ 3/31)の水位・水温ロガーは,3月のd1以 外は,0.00mに近い水深を記録していた. また、d1 の最大水深は、2019/8/30 の 0.931m であった.





Changes in water depth at the water level / temperature logger installation points



**Fig.6** 水位・水温ロガー設置地点の水温 変化

Changes in water temperature at the water level / temperature logger installation points



Fig.7 d1 におけるせき上げ背水 (2020-02-20) Backwater at d1 point (2020-02-20)

d10 では、2 月中旬に起伏ゲートを起立 させたことが水深の変化から分かる. 2/20 に起伏ゲート高さ 0.49m を現地で確 認した. 灌漑期のゲート高さは 0.41~ 0.53m を現地で測定している. 6/10~7/20 の中干期間は、起伏ゲートを倒伏させて いる (7/3 に現地で確認). また、水深を 見ると 9 月以降のゲートは基本的に倒伏 させていることが分かる.d10 の最高水深 は、0.771m であった (2020/6/3).

d11 の水深変化から, d11 の起伏ゲート は, 停水期間と中干期間を除いて, 1 年中 起立していることが分かる. 灌漑期は 0.39~0.40m に, 非灌漑期は 0.25~0.42m の高さであったことをロガーデータの回 収時に確認した. d11 の最高水深は 0.957m (2019/8/30) であったが, このと きもゲートの自動倒伏装置は作動しなか った.

d14は, 灌漑期に高さ 0.35~0.38m の角 落とし(板堰)を設置していた.水深変化 から,板堰は 4 月中旬に設置されたと考 えられる.2020/9/21 まで角落しが設置さ れていたことを現地で確認した.2020 年 の 6~8 月に 6 回ほど一時的な水位低下 がみられる.増水時に角落としを取り外 している可能性があるが,確認はできて いない. d14 の最高水深は 0.931m (2020/7/7) だった.

d15の起伏ゲートは,d11と同様,停水 期間以外は起立させている. 灌漑期は 0.38~0.39mに,非灌漑期は0.15~0.31m の高さであったことをデータ回収時に確 認した.d14に比較して,d15の最高水深 は0.732m(2020/7/7)と小さく,水位変動 幅も全般的に小さくなっていた.d15につ いても6~8月の降水量の多い時期にゲ ート高さを調整しているかどうかは確認 をしていない.

昨年の非灌漑期(9月末から今年の3月 まで)の水深と今年の灌漑期(4月から8 月末まで)の水深を比較するとd10,d11, d14, d15の起伏ゲートのあるすべての地 点で灌漑期の水深が高くなっていること が分かる.

最後に,水温変化の傾向について述べる. 上流部から,d15,d14,d11,d10,d1と下 流に向かうにしたがって,少しずつ水温は 上昇し,水温の日変動の幅は大きくなる傾 向が,Fig.6から分かる.この理由としては, 起伏ゲートによる堰上げの影響や水田排水 の流入の影響が考えられる.また,停水期 間は,d15を除いて,水深が小さくなった ため,水温ではなく,気温を測定している と考えられる.

#### 3.2 インターバルカメラ

2019年8月から2020年9月までのd8, d13, d17のインターバルカメラの連続写 真から読みとった起伏ゲート上流の水深, ゲート高さの変化および最大1時間降水 量を Fig.8 に示す.d13の2020/4/1~6/4 お よび d17の2020/3/31~6/4のデータは欠 損した.新型コロナウイルス感染症拡大 の影響で,カメラが長期間転倒していた ことを確認できなかった.



**Fig.8** インターバルカメラの設置地点の 水深とゲート高さの変化 Changes in water depth and gate height at

the interval camera installation points

d8 の起伏ゲートは,一恩ら (2013) の 報告のとおり,停水期間を除き,通年起 立していた.灌漑期のゲート高さは,0.32 ~0.45m で,非灌漑期においても 0.33~ 0.35m の高さを維持していた.d8 起伏ゲ ート上流の水深は堰上げによって約 0.50m に維持されている.停水期間以外 に起伏ゲート上流の水深が一時的に 0.00m 近くに低下していることが,2019 年 8 月,10 月,2020 年 7 月,8 月に各 1 回,計4 回見られる.いずれも,降雨イ ベントの前であるので,水位上昇に備え てあらかじめゲートを倒伏させる操作を 行っている可能性がある.調査期間中に 観測された最高水深は 0.92m (2020/7/4) であった.

d13の起伏ゲートは,灌漑期のみ0.275 ~0.29mの高さで起立させていた.また, 7月上旬から8月中旬の中干期間にも起 伏ゲートを倒伏させていた.d13の最高水 深は,0.86m (2020/6/27)を示した.

d17 の起伏ゲートは停水期間も含め通 年起立していた. 灌漑期のゲート高さは 0.24~0.28m, 非灌漑期は 0.15~0.25m に なっていたことをインターバルカメラの 画像データの回収時に確認している. d17 の最高水深は, 2020/7/4 に 0.65m を示し た. d17 においても, 2020 年 6~8 月には, 一時的な水位低下がみられるが, これが ゲート操作によるものかどうかは, 再度 インターバル写真を精査する必要がある.

Fig.5 に示した水位・水温ロガーの水深 変化の傾向と同様に,上流地点ほど水深 の変動幅は小さくなる傾向がある.

#### 3.3 水質調査

水質調査の結果を Table 1 に示す. 2019/11/13 と 2020/10/30 の調査は,停水 期間中に実施された.2019/11/13 の d19 の 水質調査は水深が 1cm に満たない状況で あったので,実施しなかった.

同日の上流端(d19 または d17) と下流 端(d1)の水温差を算定すると,2020/6/3 が最大で 4.1℃となり,10/30 は停水期間 で除外すると,最小は 2019/12/11 と 2020/8/18 の 1.1℃となる.すべての調査 日で上流端の水温より下流端の水温が高 い結果が示された.

各地点の溶存酸素量(DO 値)は,d1 が 10.43~18.12mg/L,d17 が 11.46 mg/L,d19 が 11.07~19.99mg/L だった.日本水産保 護協会(2012)によると,河川・湖沼の一

| Water quality measurement results |      |      |     |              |        |       |       |
|-----------------------------------|------|------|-----|--------------|--------|-------|-------|
| 年月日                               | 水深   | 水温   | pН  | EC           | DO     | 濁度(ホル | 透視度   |
|                                   | (m)  | (°C) |     | $(\mu S/cm)$ | (mg/L) | マジン度) | (cm)  |
| (d1)                              |      |      |     |              |        |       |       |
| 2019-09-04                        | 0.19 | 21.2 | 8.3 | 105          | 10.64  | 54.5  | 13.9  |
| 2019-10-02                        | 0.12 | 22.4 | 8.2 | 145          | 10.43  | 9.7   | 54.3  |
| 2019-11-13                        | 0.02 | 18.9 | 7.6 | 250          | 14.00  | 0.9   | 100.0 |
| 2019-12-11                        | 0.09 | 10.2 | 8.8 | 123          | 14.14  | 11.2  | 48.7  |
| 2020-02-20                        | 0.19 | 8.5  | 8.6 | 112          | 14.39  | 43.1  | 16.7  |
| 2020-06-03                        | 0.22 | 21.6 | 8.5 | 130          | 12.70  | 11.7  | 46.3  |
| 2020-07-03                        | 0.25 | 19.9 | 8.4 | 112          | 12.65  | 38.9  | 18.2  |
| 2020-08-08                        | 0.26 | 20.7 | 7.5 | 107          | 12.05  | 31.3  | 21.2  |
| 2020-08-18                        | 0.21 | 22.2 | 7.9 | 106          | 11.35  | 20.0  | 25.9  |
| 2020-09-21                        | 0.13 | 23.2 | 8.1 | 148          | 11.24  | 24.6  | 27.9  |
| 2020-10-30                        | 0.03 | 16.5 | 9.0 | 420          | 18.12  | 7.3   | 81.6  |
| (d17)                             |      |      |     |              |        |       |       |
| 2019-09-04                        | 0.34 | 19.4 | 8.1 | 90           | 11.46  | 500.0 | 2.0   |
| (d19)                             |      |      |     |              |        |       |       |
| 2019-10-02                        | 0.18 | 19.5 | 8.3 | 129          | 11.07  | 11.4  | 46.3  |
| 2019-12-11                        | 0.16 | 9.1  | 8.3 | 114          | 13.71  | 10.4  | 44.7  |
| 2020-02-20                        | 0.21 | 7.1  | 8.5 | 115          | 14.54  | 42.1  | 16.5  |
| 2020-06-03                        | 0.33 | 17.5 | 9.0 | 103          | 13.45  | 8.9   | 48.6  |
| 2020-07-03                        | 0.20 | 17.6 | 8.5 | 93           | 13.33  | 43.1  | 7.2   |
| 2020-08-08                        | 0.27 | 19.1 | 7.8 | 105          | 13.56  | 21.2  | 28.3  |
| 2020-08-18                        | 0.26 | 21.1 | 8.0 | 99           | 11.78  | 16.4  | 34.9  |
| 2020-09-21                        | 0.14 | 19.5 | 8.1 | 137          | 13.16  | 23.8  | 23.2  |
| 2020-10-30                        | 0.03 | 16.2 | 8.9 | 400          | 19.99  | 44.9  | 17.5  |

Table 1 水質測定結果

般の魚類に対する DO の基準は 6mg/L 以 上, サケ・マス・アユは 7mg/L と定めら れている.各調査地点の DO はいずれも 基準値を満たしていた.一恩 (2004) によ ると,七ヶ用水全体で約 700 ヶ所の落差 工が設置されており,そこで落下水が撹 拌されて曝気されることや,取水された 水がそもそも清浄であったことから基準 値に比べ DO 値が高かったと推定されて いる.調査水路の DO は,魚類の生息や 移動に特に問題がある値ではないと考え られる.

各地点の pH は, d1 は 7.5~9.0, d17 は 8.1, d19 は 7.8~9.0 であった. 日本水産 保護協会 (2012) によると, 河川・湖沼の 一般の魚類に対する pH の基準は 6.7~7.5 と定められているので,各地点の pH は いずれも基準値より高い値を示している. 一恩 (2004) によれば,七ヶ用水の pH は 全体的にアルカリ性であり,七ヶ用水を 取水している白山頭首工の直上流部の手 取川の水自体のpH も 8.4 を示しているた め、七ヶ用水の pH の高さは手取川由来 のものであると推定されている.

各地点の EC は, d1 は 105~420µS/cm, d17 は 90µS/cm, d19 は 93~400µS/cm で あった. 停水期間中の 2020/10/30 に, d1 と d19 の両地点で通常測定されない値を 測定している.

濁度(ホルマジン度)は、d1 が 0.9~ 54.5 度、d17 が 500 度、d19 が 8.9~44.9 度であった.d17 の高い値は、2019/9/3 の 降雨の影響が大きいと考える.透視度は、 d1 が 13.9~100.0cm、d17 が 2.0cm、d19 が 7.2~48.6cm であった.

#### 4 まとめ

水位・水温ロガーとインターバルカメ ラを用いた調査およびデータ回収時の現 地調査から,停水期間中は調査水路のd17 以外のすべての起伏ゲートが倒伏してい た.6/10~7/20の中干期間は,d10,d11, d13 はゲートを倒伏させていたが,d8, d14,d15,d17 は倒伏させていなかった. 倒伏させていなかったd8,d14,d15,d17 についても,中干期間やその後の降水時 に起伏ゲート上流での一時的な水位低下 が観測されているので,その時期の画像 データの精査して,一時的なゲート操作 がなかったか確認する必要があると考え る.

今後は,起伏ゲートで測定した越流水 深と水位ロガーの値に基づいて水路流量 の経時変化を算定する予定である.水路 流量から,調査水路の水路部,落差工の 水叩き部,魚道プール部,隔壁や起伏ゲ ート越流部の水深や流速を算定して,起 伏ゲートの起立時と倒伏時に通過できる 魚類を推定していきたい. 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: 19H03073,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

- 一恩英二,能登達也、山本邦彦,長野峻介、 上田哲行(2013):海域に流入する農業水
   路における淡水魚類の遡上と分布について、雨水資源化システム学会誌, Vol.19,
   No.1, pp.19-28.
- 一恩英二,田中省吾(2004):七ヶ用水の水
   理水質,石川県農業短期大学研究報告,
   33, pp.1-14.
- 気象庁(2020)(参照 2020.11.13):石川県 金沢市の過去の気象データ検索,(オンラ イン),入手先〈https://www.data.jma.go.jp/ obd/stats/etrn/index.php?prec\_no=56&bloc k\_no=47605&year=&month=&day=&view
   =>
- 水土里ネット七ヶ用水 (2020): 七ヶ用水の 概要, http://www.shichika.or.jp/outline/ index. html
- 日本水産資源保護協会(2012)(参照
   2020.11.16):水産用水基準、(オンライン),
   入手先 (https://www.pref.miyagi.jp/
   uploaded/attachment/292209.pdf>
- 吉田 E, 丸山利輔, 能登史和, 高瀬恵次, 瀧本裕士(2012): 手取川扇状地試験地に おける水田用水地区内還元水の分析, 農 業農村工学会論文集, No.282, pp.35-42.

## 海域に流入する用排兼用水路における PIT タグを用いた魚類移動調査 Fish Movement Survey Using PIT Tags in an Irrigation and Drainage Canal Flowing into the Sea

 ○疋田凌麻\* 伊藤義人\*\* 桑原智洋\*\*\* 長野峻介\* 藤原洋一\* 一恩英二\* 藤原正幸\*\*\*
 ○HIKITA Ryouma\*, ITO Yoshito\*\*, KUWAHARA Tomohiro\*\*\*, CHONO Shunsuke\*, FUJIHARA Yoichi\*, ICHION Eijii\*and FUJIHARA Masayuki\*\*\*

#### 1. はじめに

手取川扇状地右岸側の七ヶ用水を構成 する水路の一つである山島用水 4-2 号支 線には,魚類の移動に配慮した多段式の プール(隔壁)タイプの魚道型落差工が 多く配置されている.一恩ら(2013)によ ると,4-2 号支線の魚類調査の結果,17種 類の魚類が生息していること,海域から 水路へ遡上しようとする魚種と 4-2 号支 線での魚類の分布状況を明らかにしてい る.

本研究は、山島用水 4-2 号支線におい て魚類の遡上、降下などの移動状況を調 査することで山島用水 4-2 号支線に設置 されている魚類型落差工の機能を明らか にすることを目的とする.移動調査は、 現在も継続中であるが、本講演要旨では、 2019 年 9 月から 2020 年 8 月までの調査 結果を報告する.

#### 2. 研究方法

#### 2.1 調查対象水路

本研究の調査対象水路は、山島用水 4-2 号支線の下流部 3.5km の区間である (Fig.1).調査対象区間は、石川県白山市 に位置している.対象区間には、Fig.1 に 示すように、d1~d19 の 19 個の落差工が 設置されている. 落差工は, 水叩き式(d1), 段落ち式(d2, d3, d4, d5), 多段式(d6, d7, d9, d16, d18), 起伏ゲート付き多段 式(d8, d10, d15, d17), 起伏ゲート付き 切り欠き付き多段式(d11, d13), 切り欠 き付き多段式(d12), 板堰・切り欠き付き 多段式(d14), 斜路式(d19)の8種類に 分類される.



**Fig.1** 調査対象水路の落差工設置地点 Location of drop structures in the study canal

#### 2.2 調査機材

魚類の移動を把握するために、生物の

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

<sup>\*</sup> 石川県立大学生物資源環境学部 Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University \*\* 中央コンサルタンツ株式会社東京支店 Tokyo Branch Office, Chuoh Consultants Co.,Ltd

キーワード:魚道型落差工,手取川扇状地, PIT タグ,タグアンテナ,ハンディタグリーダー

体内に埋め込んだ状態でも,個体識別が 可能な PIT タグを用いた(Fig.2).森・戸 田(2002)は、甲殻類,魚類,両生類,爬 虫類,鳥類,哺乳類などの動物群を対象 とした飼育下もしくは自然環境下でのテ ストにおいて,PIT タグの残存率はおおむ ね90%以上で,従来適用されてきたマー キング方法に比べて残存性が劣るという ことはなく,また重度な感染症や行動, 成長,生存などへの明らかな影響なども 確認されていないことを明らかにしてい る.

魚類に埋め込んだ PIT タグを読み取る 機材として, タグアンテナ (BioMark 社 製)を使用した (**Fig.3**). タグアンテナと は, ソーラーパネル (RNG-100D-SS, RENOGY 社製), 蓄電池 (M27MF, AC Delco 社製), RFID 型送受信機 (IS1001, BioMark 社製), アンテナジャンクション

(J-Box, BioMark 社製), コードアンテナ (約 15m, BioMark 社製)から構成され る固定アンテナシステムである.PIT タグ からの無線信号は, IS1001 に取り付けた USB メモリーに記録される仕組みとなっ ている.現場でのタグアンテナの設置の 仕方は,組み立てたアングル台を落差工 横の堤防天端に打ち込んだ木杭に針金等 で固定し,固定したアングル台の上にソ ーラーパネル, バッテリー, IS1001, J-Box を固定した. コードアンテナは角材に結 **東バンドを用いて取り付け、角材を落差** エのコンクリート側壁にネジで固定した. 設置場所は,PITタグの読み取りをより精 密に行うため、ノイズの少なさ、設置の しやすさを考慮して d8, d11, d17 にタグ アンテナを設置した.ただし,d17のタグ アンテナシステムは、ソーラーパネルと 蓄電池から電源を供給するためのコント ローラーの故障で、2020年5月から8月 の期間は稼働できなかった.



PIT tag



Fig.3 タグアンテナ Tag antena

#### 2.3 PIT タグの取り付け

移動調査を行うために,d1~d19の水叩 き部において投網、サデ網を用いて魚類 を採集した.採集した魚類の魚種と体長 を測定した. 90mm 以上の個体は正確な 体調を測定し、インジェクター (BioMark 社製, MK-7) を用いて PIT タグ (Biomark 社製,長さ 12.5mm,直径 2.1mm)を腹腔 内に埋め込んだ(以後タグ挿入個体). PIT タグ挿入後タグの識別が可能なハンディ タグリーダー (GPR Plus, BioMark 社製) を用いてタグナンバーを記録した. タグ 挿入個体は水路の水を入れたバケツで観 察し、動きが正常であることを確認した 後,採集した落差工で放流した.90mm 未 満の個体は,魚種と個体数を記録して採 集した落差工で放流した.また,採集し た 90mm 以上の個体はタグ挿入個体かど

うかをハンディタグリーダーで調べた. タグ挿入個体であったら,再捕獲個体と して体長を測定し,タグナンバーを記録 し,捕獲場所で放流した.

#### 2.4 データ解析

採集個体は, すべて魚種, 個体数, 採集 場所を野帳に記録した. タグ挿入個体は, 魚種, 体長, タグナンバー, 放流場所, 放 流時間を野帳に記録した. また, 野帳に 記録したデータは, PC でデータベース化 した. 次に, タグアンテナによって記録 されたタグ挿入個体のデータも同様に, 検出されたタグナンバー, 検出日時, 検 出場所を PC でデータベース化した. 再 捕獲したタグ挿入個体についても, 同じ ように, タグナンバー, 捕獲日時, 検出場 所をデータベース化した.

#### 3. 結果と考察

#### 3.1 採集個体とタグ挿入個体

2019年9月19日~11月21日,2020年 3月17日~3月30日,5月26日~6月1 日の3期間の魚種別採集個体数を Table 1 に示す.最も多く採集された魚類は、ヨ シノボリ類で 362 個体であった.次に、 ドンコの300個体,ウキゴリ類187個体, ドジョウ163個体,アユカケの157個体, カマツカ 146 個体と、上位はすべて底生 魚が占めており,最も多く採集された遊 泳魚はアユ108個体である.1.457個体の うち,PIT タグを埋め込んだ個体は180 個 体で,魚種別タグ挿入個体数を Table 2 に 示す. Table 2 に示すように, 魚種別タグ 挿入個体数は、カマツカが66個体と最も 多く,アユが43個体,ドジョウ30個体, ドンコ28個体と続いている.また、タグ 挿入個体の内訳は,2019年9月~11月に 79個体, 2020年3月は17個体, 5月~6 月は 84 個体となっている.

| Table 11 | 魚種別採集個体数 |
|----------|----------|
|----------|----------|

| Number of fishes collected |       |       |       |       |  |  |  |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
| 項目                         | 9/19- | 3/17- | 5/26- | 合計    |  |  |  |
|                            | 11/21 | 3/30  | 6/1   |       |  |  |  |
| スズキ                        | 3     | 0     | 0     | 3     |  |  |  |
| マハゼ                        | 1     | 0     | 0     | 1     |  |  |  |
| ドジョウ                       | 95    | 35    | 33    | 163   |  |  |  |
| ヨシノボリ類                     | 147   | 60    | 155   | 362   |  |  |  |
| ウキゴリ類                      | 89    | 56    | 42    | 187   |  |  |  |
| カジカ                        | 7     | 0     | 0     | 7     |  |  |  |
| アユカケ                       | 13    | 0     | 144   | 157   |  |  |  |
| ドンコ                        | 240   | 56    | 4     | 300   |  |  |  |
| カマツカ                       | 98    | 24    | 24    | 146   |  |  |  |
| アユ                         | 3     | 0     | 105   | 108   |  |  |  |
| サクラマス                      | 0     | 0     | 1     | 1     |  |  |  |
| ウグイ                        | 7     | 3     | 3     | 13    |  |  |  |
| アブラハヤ                      | 3     | 2     | 0     | 5     |  |  |  |
| タカハヤ                       | 2     | 0     | 0     | 2     |  |  |  |
| コイ                         | 0     | 1     | 1     | 2     |  |  |  |
| 合計                         | 708   | 237   | 512   | 1,457 |  |  |  |

Table 2 魚種別タグ挿入個体数

| NT 1     | C C 1     | • . • .      | •        |
|----------|-----------|--------------|----------|
| Number   | of tichor | $\mathbf{w}$ | incortod |
| INUITOEL |           | s with tag   | mscheu   |
|          |           |              |          |

|       |       |       | ~     |     |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| 項目    | 9/19- | 3/17- | 5/26- | 合計  |
|       | 11/21 | 3/30  | 6/1   |     |
| ドジョウ  | 9     | 4     | 17    | 30  |
| ウキゴリ類 | 4     | 0     | 0     | 4   |
| ドンコ   | 27    | 0     | 1     | 28  |
| カマツカ  | 35    | 11    | 20    | 66  |
| アユ    | 0     | 0     | 43    | 43  |
| サクラマス | 0     | 0     | 1     | 1   |
| ウグイ   | 0     | 1     | 2     | 3   |
| アブラハヤ | 2     | 0     | 0     | 2   |
| タカハヤ  | 2     | 0     | 0     | 2   |
| コイ    | 0     | 1     | 0     | 1   |
| 合計    | 79    | 17    | 84    | 180 |

落差工別の採集個体数を Fig.4 に示す. Fig.4 に示すように, d2~d5 の段落ち式落 差工では, 魚類をほとんど捕獲すること ができなかった.

2019 年非灌漑期(9月~11月)におい て,調査対象水路では、ヨシノボリ類、ド ンコ、ウキゴリ類、カマツカなどの底生 魚が全体の97%を占めていた.特に、d7 と d11 においてヨシノボリ類が多く採集 された.また、アユの捕獲数は3 個体で あり,全て d1 での捕獲であった.増田 (2019)は、手取川でのアユの産卵期は 10月上旬~11月中旬、降下期は 10月中 旬~11月下旬であり、翌年 4月上旬~6 月下旬に河川に遡上すると述べられてい る.このことから、非灌漑期に d1 で採集 されたアユは、産卵期または降下期にお いて、上流から降下した個体だと考えら れる.また、d12より上流の区間では、ド ンコが多数を占めていた.対象区間の d6 より上流の落差工の水叩き部や魚道プー ル部は全般的に堆積土砂が多く、底生魚 にとって生息しやすい環境であったと考 えられる.

2020 年 3 月には d8 で多くのウキゴリ 類が採捕された. 底生魚が全体に占める 割合は, 非灌漑期の調査と同じ 97%であ るが, 捕獲された総個体数は 708 個体か ら 237 個体に減少した. d8 落差工の起伏 ゲートは防火用水を確保するために, 非 灌漑期においても起立しており(一恩ら, 2013), このため魚類が多く滞留していた 可能性がある.

2020年の5月~6月の調査ではアユ105 個体,アユカケ144個体,サクラマスも d18 で1個体捕獲された.これら3 種類 は回遊魚であり灌漑期は回遊魚にとって 活発な時期であると考えられる.143 個体 のアユカケ幼魚は d1 で採集された. 田原 ら(2019)によると、アユカケは初夏に河 川を遡上し,ごく低い堰でも遡上を阻害 されるとある.このことから、アユカケ にとって d1 の落差工は遡上することが 困難であったと考えられる. 灌漑期は遊 泳魚であるアユが海域から遡上するため に、底生魚が全体に占める割合は79%に 低下していた.また,d8より上流で採集 したアユは d10 で 2 個体, d11 で 1 個体, d18 で2個体の計5個体であった.5月26 日~6月1日の調査期間においては, d1

~d8 区間でのアユ採集数は、アユ採集数 全体の95%を占めていた.d8の起伏ゲー ト付き多段式落差工がアユの遡上を阻害 していた可能性が高いと考えられる.





#### 3.2 タグ挿入個体の移動状況

アユのタグ挿入個体 43 個体のうち, ア ンテナで検出または再採捕によって位置 情報を確認できたアユは 28 個体であっ た (Fig.5).



Fig.5 アユの移動状況 Migration of Ayu

28 個体のうち, アユ1, アユ4, アユ 5, アユ7, アユ12, アユ20, アユ26, アユ27の8 個体は, d8 に放流して, d8 のアンテナで検出されたアユであり, 落 差工間の移動が確認できなかった個体で ある.また,降下が確認されたのは,アユ 19 とアユ 21 の 2 個体であった.それ以 外の 18 個体は,遡上行動を示した.前述 の増田 (2019)のとおり,Fig.5のアユの 遡上行動は 5 月下旬から 6 月下旬にみら



Fig.6 カマツカの移動状況 Migration of Kamatsuka

れており,海域から手取川にアユが遡上 する時期と一致している.調査水路のア ユも海から遡上した個体だと考えられる.

灌漑期間中に起伏ゲートや板堰を起立 させて取水を行っている多段式落差工が 調査区間に7ヵ所あるが,d18において も2個体のアユを採集していることから, これらをすべて遡上して d18にたどり着 いた個体がいた可能性がある.Fig.5 は, 調査期間中に12個体のアユが d8の起伏 ゲートを通過して,短期間で d11 まで移 動したことを示している.

次に,カマツカの 66 個体のタグ挿入個 体のうち,19 個体が再捕獲またはアンテ ナに検出されて位置情報を収集できた. 19個体のカマツカの移動状況を Fig.6 に 示す.Fig.6 より.わずかに遡上した個体 は9個体,同じ位置に留まっていたのは 8個体,降下したのは1個体(カマツカ 8),降下後再遡上したのは1個体(カマ ツカ 19)であった.カマツカの移動はア ユに比べると距離は短く,移動しない個 体も多くみられた.移動個体の移動の多 くは灌漑期に見られた.タグを挿入した ドジョウ 30個体のうち5個体がタグア ンテナに検出された.位置情報が得られ た5個体のうち,3個体は放流場所から 移動がなく,2個体は降下行動をとって



**Fig.7** ドジョウほかの移動状況 Migration of Dojou and others

いた (Fig.7). 斎藤 (2001) によるとドジ ョウの産卵期は6~7月である. ドジョウ の産卵場所である水田は山島用水 4-2 号 支線の下流部 3.5km の区間において水路 に沿って多く存在しており、調査水路に は小用水路へ灌漑用水を取水する取水口 や小排水路が流れ込んでいる落差工下流 プールが多数存在する. 今回の移動調査 では、小用水路や小排水路を対象として いないので、Fig.7 の5個体のドジョウに ついても,見かけは「移動なし」と「わず かに降下」という判定になるが、対象水 路と水田の間往来しているかどうかは分 からない.また、ドジョウは一般には水 田周辺で繁殖するといわれているが、4-2 号支線のような比較的大きな水路内にお いても, 起伏ゲート上流や落差工水クッ ション部の堆積土砂の中などで繁殖して いる可能性があるのかもしれない.

ウキゴリ類4個体,ドンコ28個体にタ グを挿入したが,移動情報が取得できた のは各1個体だった.どちらの個体も非 灌漑期に放流したものだったが,1月に 反応があり,ウキゴリ類は3月にも反応 があった.両個体とも降下行動を示して いた. 宮地ら (1976) によると, ドンコは 季節による移動はあまりないとされてい るが, コンクリート水路のような環境で は, 両種とも何かの理由で降下する必要 があるのかもしれない.

ウグイは移動情報を得られたのは1個 体のみで,短時間での降下を示していた.

#### 4. まとめ

魚類移動調査の結果, アユ 28 個体, カ マツカ 19 個体, ドジョウ 5 個体, ウグイ 1 個体, ドンコ 1 個体, ウキゴリ類 1 個 体の位置情報を収集した. その結果, ア ユのような遊泳力のある魚類は短時間で 長距離を遡上する個体が多かったのに対 して, 底生魚であるカマツカやドジョウ は移動しなかったものや移動距離が短か かったものが多かった.

今後移動したものについては,どのよ うな水理環境を移動したのかを明らかに 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(B))(課題番号: 19H03073,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

- 一恩英二・能登達也・山本邦彦・長野俊介・上田哲行(2013):海域に流入する農業用水路における淡水魚類の遡上と分布,日本雨水資源化システム学会誌19(1),pp.19-28.
- 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.
- 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦
   (1976):原色日本淡水魚類図鑑
   ドンコ,保育社,pp.343-345.
- 森 哲・戸田守(2002):長期野外調査に おける個体識別法としての PIT タグの 利用例:ヒメハブにおけるタグ残存率, 爬虫両棲類学会報 2002(2), pp.59-67.
- 斉藤憲治(2001):山渓カラー名鑑 改訂 版日本の淡水魚 ドジョウ,山と渓谷 社, pp.382-385.
- 田原大輔・青木治男・中村圭吾(2019): 九頭竜川におけるアラレガコ(カマキ リ)の保全・再生に向けて,応用生態工 学,22(1), pp.1-17.
- 上野智・仁尾雅浩・長田芳和(2000):カ マツカの生長と繁殖生態,大阪教育大 学紀要3自然科学・応用科学 第48巻 第2号, pp.97-106.

## Encoder-Decoder LSTM によるため池水位予測モデルの構築 Development of Water Level Prediction Model in Reservoirs by Encoder-Decoder LSTM

楠堂紡\*,林大輔\*,松浦大輝\*,山本純之\*,木村匡臣\*,松野裕\* Tsumugu KUSUDO, Daisuke HAYASHI, Daiki MATSURA, 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.流出解析やダム等の水位予測を対象とした近 年の研究では,深層学習を活用した事例が多く報告されており,中でも長短期記憶(LSTM) を用いた再帰型ニューラルネットワークは学習を時系列として処理できるため,流量の時 系列データの予測に有効であることが報告されている.しかし,用いられている LSTM モ デルの多くは系列入力に対して単出力を行う多対一型であり,系列入力に対して系列出力 を行う多対多型についての報告事例は少ない.出力においても時系列処理を行える多対多 型の LSTM は,ため池水位の連続的な予測により有用であると考えられる.そこで本研究 では,多対多型 LSTM のひとつである Encoder-Decoder LSTM (ED-LSTM)を用いてため 池水位予測モデルを構築し,多対一型 LSTM モデルとの比較・評価を行った.

【研究対象地】奈良県生駒市に位置する高山ため池を研究対象とし、気象センサーおよび 水位により雨量とため池水位の観測を行った.高山ため池は大和川水系富雄川の水源の一 つで、満水面積約9ha,灌漑面積約530ha,貯水容量約58万m<sup>3</sup>,堤高約23mの農業用た め池である.

【モデル構築及び評価方法】ED-LSTM 及び多対一型 LSTM を用いて 24 時間先までの水位 予測を行うモデルを構築した. ED-LSTM は入力された系列データを固定長ベクトルに変



\*近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University

キーワード:ため池 深層学習 LSTM

換する Encoder と、固定長ベクトルを系列データに変換する Decoder の構造を併せ持って いる.本研究では、Encoder 部分に 1~24 時間前の 1 時間毎水位、降雨量、現在時刻との水 位差を、Decoder 部分に Encoder から抽出した固定長ベクトルと将来降雨量、出力された予 測水位を入力して 1~24 時間後の水位を出力した(Fig.1 左側).多対一型 LSTM モデルに は 0~24 時間前の水位、降雨量、現在時刻との水位差を入力し、1 時間後の水位変化量を 出力した.出力した予測値を直前のデータとして入力し、また次の時刻の予測を行う.こ れを繰り返し 24 時間後までの水位予測を行った(Fig.1 右側).両モデルともに、出力され た水位差を 0 時間時点の水位に加算し、実測の水位変化と比較・評価した.評価関数には 二乗平均平方誤差(RMSE)を用いた.使用するデータ期間は 2018/7/1~2020/7/24 であり、 このうち農繁期に向け貯水を行う時期にあたる 2019/2/8~2019/5/1(A)と最大降雨を含む 2019/7/2~2019/9/23(B)をテストデータとした.2020/5/2~2020/7/24 の期間を学習度確認 のための検証データとして用い、残りの期間を学習データとして用いた.

【結果】ED-LSTM における予測結果を Fig2,3 に示す.学習データにも含まれる程度の 降雨強度であれば,24 時間先までの予測においても RMSE が 0.05 m と高い精度が得られ た.また、学習に含まれないほどの強さの降雨イベントに対しても、ピークのタイミング や水位変化の立ち上がりについては良好に予測できていた.多対一型 LSTM モデルとの比 較では、8 時間後程度までは顕著な差はみられないが、より長期的な予測になると 24 時間 先までの予測で RMSE が 0.02 m 程度、ED-LSTM の方が優位であった.以上より、学習デ ータ値以上の降雨がある場合や、変動が著しいため池水位を長期的に予測する場合、ED-LSTM がより高い精度で予測を行えることが示唆された.



【おわりに】ため池における長期的な水位予測において,従来の多対一型LSTMに対する ED-LSTMの優位性が示された.ため池からの放流量に関するデータセットの整備・入力を 行えば,さらに高い精度での予測も可能であると考える.ED-LSTMを活用し長期的な予測 をより高精度で行うことで,早い段階での事前放流や危険検知が可能となり,放流量調節 による防災やため池の管理に役立てることが期待される.

## Comparison between the standardized precipitation index and the dry spell length in terms of indicating drought severity

#### 1. Introduction

The amount of precipitation during a prescribed interval is a common drought index. It is often standardized to evaluate spatio-temporal distribution of drought severity [2]. While, the dry spell length (DSL), having a straightforward Markovian structure [1], may be a more practical criteria to make decisions on supplemental irrigation during drought period [3]. In this study the standard precipitation index (SPI) is compared with the DSL in terms of indicating drought severity, referring to the practices in an irrigation tank for supplemental irrigation for paddy fields.

#### 2. Definition of SPI and DSL

The statistics of precipitation are assumed to be year-periodic. The year is divided into periods  $\{\Omega_k\}$  indexed with the integer k. The precipitation depth on a generic day s is denoted by  $R_s$ . The amount P(t;T) of precipitation during a prescribed interval T up to a generic day t is

$$P(t;T) = \sum_{s=0}^{s (1)$$

For a set of observed precipitation data at a weather station, the sample mean and the unbiased estimation of standard deviation for P(t;T)during a specified *k*-th period  $\Omega_k$  of the year are denoted by  $\mu_{T,k}$  and  $\sigma_{T,k}$ , respectively. The SPI on the day *t* with the interval *T*, denoted by  $X(t;T, \{\Omega_k\})$ , is defined as

$$X(t;T,\{\Omega_k\}) = \frac{P(t;T) - \mu_{T,k}}{\sigma_{T,k}}, \quad t \in \Omega_k.$$
(2)

While, the DSL on the day t with a threshold  $r_{\theta}$ , denoted by  $Y(t;r_{\theta})$ , is defined as

$$Y(t;r_{\theta}) = \inf_{\tau \in \{s \mid r_{\theta} < R_{s}, s \le t\}} (t - \tau).$$
(3)

It is noteworthy that the time-continuous counterpart of an SPI  $X(t;T,{\Omega_k})$  is a continuous stochastic process, while that of an DSL  $Y(t;r_{\theta})$  is a càdlàg stochastic process.

#### 3. Data acquisition

The irrigation tank is located in an anomaly dry part of Kohka City, Shiga Prefecture, Japan. The water level of the irrigation tank is being recorded ○Kohei Kimura<sup>1</sup>, Koichi Unami<sup>1</sup>, Masayuki Fujihara<sup>1</sup> <sup>1</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University

every 10 minutes since April 19, 2016. The nearest AMeDAS station is Tsuchiyama, which is located 7.1 km apart from the irrigation tank, and daily precipitation data since January 1, 1979 until October 30, 2020 were retrieved from the website of Japan Meteorological Agency. However, there are 38 days of missing data, where the data from the other AMeDAS station Higashiohmi are substituted.

#### 4. Results

Supplemental irrigation withdrawing water from the tank is performed if the local farmers perceive drought severity, mostly during the first half of August. Therefore, the year is divided into 24 periods of equal length, and the period indexed as k = 14 mostly falls on the first half of August. The values of  $\mu_{30,14}$  and  $\sigma_{30,14}$ , calculated form the AMeDAS data during the years 1979-2015 are 197.7 and 119.2, respectively. For *T* smaller than 30 days, those statistics yield spurious oscillations among the periods due to the lack of enough number of data. Table 1 compares SPI and DSL with  $r_{\theta} = 1$  mm for all the days when water is withdrawn from the irrigation tank.

 Table 1. SPI and DSL on the days of water withdrawal from the irrigation tank

| Day        | $X(t;30,\{\Omega_k\})$ | Y(t;1) |
|------------|------------------------|--------|
| 09/08/2016 | -1.15                  | 5      |
| 04/08/2018 | 0.15                   | 6      |
| 10/08/2018 | -0.68                  | 12     |
| 02/08/2019 | 0.71                   | 6      |
| 11/08/2020 | -0.27                  | 8      |

#### 5. Conclusions

In the context of Japanese tank irrigation where Markov decision process is the common practice, DSL, rather than SPI, might be a better indicator of drought severity.

#### References

[1] Anagnostopoulou C, Maheras P, Karacostas T, Vafiadis M (2003) Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 74:77-91. [2] Awchi TA, Kalyana MM (2017) Meteorological drought analysis in northern Iraq using SPI and GIS. *Sustainable Water Resources Management*, 26:2453-2473. [3] 宇波耕一 (2019) マルコフ連鎖による連続千天日数のモデル化,土地改良の測量と設計, 88:22-27.

#### 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

Both sides evaluation between discharge and upstream depth of the free outflow passing through sluice gates

羽田野袈裟義\* 荒尾 慎司\*\* 金守 幸吉\*\*\*
Kesayoshi HADANO\* Shinji ARAO\*\* Kokichi KANAMORI\*\*\*

#### 1. はじめに

スルースゲートをすぎる流れの水理はこ れまで流量評価が最も重要な関心事として 研究されてきた.しかしながら,昨今では異 常降雨が頻発しており,幹川などより大きな 流路に流入する手前にゲートを有する流路 のゲート上流の溢水による浸水の回避が極 めて重要な課題となっている.また,水理学 の問題として,自由流出では流量とゲート上 流水深は表裏一体のものであることから,従 来の流量評価一辺倒の水理検討は片手落ち と言わざるを得ず,学問として改善の余地が ある.

ゲート上流の水深の評価に言及した既往 研究として Rajaratnam and Subramanya(1967) と Swamee(192)が挙げられるが,いずれも流 量係数の評価式を転用するもので,流量係数 が上流水深の関数であるため,上記の方法に よるゲート上流水深の評価は繰り返し計算 を必要とする.また,前掲の2つの研究とも にゲート上流水深の評価結果を示していな い.

本研究では,スルースゲートからの自由流

出を対象とし、ゲート上流の流水断面とゲー ト直下流の縮流断面の間の水に運動量の定 理を適用して流量とゲート上流水深の間の 相互関係を示し、これを基に流量とゲート上 流水深の双方向の評価を試みる.この方法は 既に羽田野ら(2018, 2019)により示されて いるが、ここでは運動量の定理の適用の合理 性や利点を説明すると共に、この定理のゲー トの水理への適用について見直しを行なっ ている.

#### 2. 運動量の定理の適用に関する考察

#### 2.1 ベルヌーイの定理と運動量の定理

ゲートからの流出に関する既往研究は、ベ ルヌーイの定理が与える縮流断面の流速(一 様)と縮流断面の面積の積に係数を掛けて流 量評価式の式形を与える.一方、本研究では、 Fig.1 のように、ゲート上流の流水断面と縮流 断面の間の水に運動量の定理を適用して流 量とゲート上流水深の間の関係を求める.

ここで、ゲートの水理への適用を念頭にお いて、ベルヌーイの定理と運動量の定理を簡 単に比較する.ベルヌーイの定理は、スカラ

所属:\*九州産業大学,\*\*松江工業高等専門学校,\*\*\*第一復建株式会社
 Affiliation: \*Kyushu Sangyo University, \*\*NIT, Matsue College, \*\*\*Civil Engineering Consultant Daiichi Fukken Co.ltd.
 キーワード:スルースゲート,自由流出, 流量・上流水深,双方向評価

ー量である全エネルギー水頭(ピエゾ水頭+ 速度水頭)のフラックスのエネルギー損失に よる変化を表現する.一方,運動量の定理は, コントロールボリュームの入口・出口を通過 する運動量(ベクトル量)のフラックスのコ ントロールボリューム内の流体への全作用 力による変化を表現する.運動量の定理の実 際の適用では,各方向について式を立てる. したがって,2方向以上の方向の速度成分が 関与する流れへの適用では,独立な方程式の 数(情報量)が増える,各方向成分の形に書 かれた運動量の定理は当該方向の速度成分 と作用力の成分だけを含むため関与する水 理諸量間の緊密な関係づけが可能になる,な どの利点をもつ.

板に衝突する噴流による作用力や急拡大 管路のエネルギー損失係数の評価,跳水前後 の水深の関係づけは運動量の定理のなせる 業である.また,運動量の定理の適用により 刃形堰上の完全越流の越流水深と流量の関 係が従来公式に比べて格段に広い水理条件 の範囲で定式化されている(羽田野ら,2017). 運動量の定理適用の鍵は,(1) コントロール ボリュームの入口・出口を一様流速の断面に 選ぶこと,(2) コントロールボリューム境界 での圧力分布など流体への作用力を的確に 評価すること,である.

#### 2.2 ゲートの水理への運動量の定理の適用

羽田野ら(2018, 2019)と同様, Fig.1 の設 定で考える. コントロールボリューム入口・ 出口の断面として, 流速分布がほぼ一様と従 来から見なされているゲート上流の流水



Fig.1 解析のための模式図 Schematic view used for analysis

断面とゲート直下流の縮流断面(Rajaratnam, 1977; Roth and Hager, 1999)を選び,両断面の間の水に運動量の定理を適用する.

また, Rajaratnam and Subramanya(1967)をは じめ既往研究では底面摩擦などによるエネ ルギー損失を無視して上流水深(または上流 水深と縮流断面の水深の差)と縮流断面の流 速(一様)の間の関係を与えており,それに 対応してここでは底面摩擦を無視する.この とき,流れの単位幅あたりの運動量の定理は 次式で表される.

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

ここで, q は単位幅流量, C<sub>c</sub>は縮流係数, k<sub>c</sub>は 縮流断面の圧力分布の補正係数, F<sub>D</sub>はゲート 上流面を水が押すことへの反作用としてゲ ートが水を上流向きに押し返す力である.

F<sub>D</sub>はHom-Ma et al.(1956)のFigs.5,6 や石原・ 本間 (1958) の図 2・2・77 を参照して次式で置 く.

$$F_{D} = K_{D} \frac{1}{2} \rho g \left\{ h_{0} + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{h_{0}} \right)^{2} - a \right\}^{2}$$
(2)

ここで、 $K_D$ は流体力係数(無次元)である. 前掲の Hom-Ma et al.(1956)などの論文中の図 から  $K_D$ は  $h_0/a$  がある程度大きい範囲では 1 より小さい値になることが示唆される.

次に,式(1)中の*kc*を検討する.ゲート下 流の水路底面圧力の測定結果が Rajaratnam (1977)の FIG.7, Montes (1997)の FIG.10 およ び Roth and Hager (1999)の Fig.7 に示されてい る.それによると,ゲートから開度の2 倍程 度以上下流では底面の圧力が静水圧とほぼ 等しい.縮流断面は上記と同程度の位置にあ ることが一般に知られている.そこでモデル 上の縮流断面がゲートの下流 2*a* の位置にあ ると仮定すると,式(1)中の係数*kc*は*kc*=1 と置くことができる.したがって,式(1)は 次のように書かれる.

$$\rho \left( \frac{q^2}{C_c a} - \frac{q^2}{h_0} \right) = \frac{1}{2} \rho g h_0^2 - \frac{1}{2} \rho g (C_c a)^2 - K_D \frac{1}{2} \rho g \left\{ h_0 + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{h_0} \right)^2 - a \right\}^2 \quad (3)$$

ここで  $K_D$ に注目する.式(3)から  $K_D$ は 次のように書き表される.

$$K_{D} = \frac{h_{0}^{2} - C_{c}^{2} a^{2}}{\left(h_{0} + \frac{1}{2}\frac{h_{c}^{3}}{h_{0}^{2}} - a\right)^{2}} + 2\frac{h_{c}^{3} / h_{0} - h_{c}^{3} / C_{c} a}{\left(h_{0} + \frac{1}{2}\frac{h_{c}^{3}}{h_{0}^{2}} - a\right)^{2}}$$
(4)

ここで  $h_c = (q^2/g)^{1/3}$  は開水路流れの限界水深 である.上式中の縮流係数  $C_c$ は,荒尾ら(2019) と羽田野・荒尾(2020)の詳細な検討により, レイノルズ数がある程度大きいとほぼ一定 になることが明らかにされている.ゆえに現 地への適用では *C*。を一定として取り扱って 差し支えない.

 $k_c \geq C_c$ に関する上記の知見から,式(4) は $K_D$ の特定の値に対して, $h_0/a \geq h_c/a$ の間 に一定の関係が存在することを意味する.す なわち,特定の $K_D$ の値に対して次の関係が 成立する.

$$\frac{h_0}{a} = F\left(\frac{h_c}{a}\right) \tag{5}$$

これは羽田野ら (2018,2019) が導いた関係と 同じであるが、以上でみたように、本研究の 導出では既往の k<sub>c</sub> と C<sub>c</sub>に関する既往の研究 成果を踏まえて無理のない仮定や近似のも とに導かれ、理論が精緻化されている.した がって、以下ではこの式を基に検討する.

## 実験データを用いたパラメータ間の関係 の同定と水理量の評価式の検証

式(5)中の無次元量 h₀/a と h₀/a の関係を 調べるために室内水理実験を行った.実験は 松江工業高等専門学校の水理実験室の循環 式水路を用いて行った.実験に用いた水路は 幅 0.30m×有効水深 0.25m の長方形断面を有 する長さ 10.3m の可変勾配水路で,模型ゲー トは水路上流端から 4.5m の位置に厚さ 1cm のアクリル板で成形したものを設置した.実 験の詳細は羽田野ら (2018) に示した.実験 はゲート開度 a=2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 6cm, 7cm, 8cm の条件で行った.

#### 3.1 流量と上流水深の相互依存関係

本実験の結果を Fig.2 に示す.図には Rajaratnam and Subramanya (1967)の実験結果



**Fig.2**  $h_0/a \ge h_c/a$ の間の関係 Relationship between  $h_0/a$  and  $h_c/a$ 

を併記した. 同図より ho/a と ho/a の関係は, ゲート開度やゲート上流水深によらずほぼ 一本の線(2次曲線)に沿って分布しており 普遍的な関係といえよう. すなわち,

$$\frac{h_0}{a} = A \left(\frac{h_c}{a}\right)^2 + B \left(\frac{h_c}{a}\right) + C$$
(6)

これは流量からゲート上流水深を求める式 である.逆にゲート上流水深から流量を求め る式は式(6)から次のように与えられる.

$$\frac{h_c}{a} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0 / a - C)}}{2A}$$
(7)

このように式(6)と(7)はスルースゲートからの自由流出の流量とゲート上流水深の間の相互依存関係を表わす.図に示された 全範囲の水理条件に対応する実験式を得る ため, *h*<sub>d</sub>*a* の値を区切って上式中の係数 *A*, *B*, *C*を求めた結果は次の通りである.

$$A = 5.162, B = -6.173, C = 2.921$$
(8a)  
(0.647 \le h\_c/a \le 1.663; 1.09 \le h\_0/a \le 6.93)  
$$A = 7.728, B = -13.183, C = 7.481$$
(8b)  
(1.663 \le h\_c/a \le 3.039; 6.93 \le h\_0/a \le 38.8)

#### 3.2 ゲート上流水深の評価式の適合性

前述のように式(6)は流量からゲート上流 水深を求める式で,既往研究を調べた限りで は羽田野ら(2018,2019)の研究以外この量の 評価の提案はなく,この式は本論文の新規性 において最も重要な結果である.ここで,式 (6)の適合性を名合(1977)の実験データで 検証する.Fig.3は名合の a/B=0.1,0.2,0.3, 0.4,0.5の全実験のゲート上流水深の実験値 と計算値の比を示す.同図より実験値と計算 値は小さなゲート開度の条件での一部不一 致を除けば全体的に良好な一致を示し,式(6) はゲート上流水深の妥当な評価式といえる.





Verification of the calculation of upstream depth







#### 3.3 流量評価式の適合性

次に流量評価式であるが,式(7)より単位幅 流量は次式で与えられる.

$$q = \sqrt{2gh_0} a \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0 / a - C)}}{2A} \right\}^{3/2} \sqrt{\frac{a}{2h_0}}$$
(9)

ゆえに次式(10)

$$q = C_d a \sqrt{2gh_0} \tag{10}$$

で定義される流量係数Caは次式で表される.

$$C_{d} = \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^{2} + 4A(h_{0}/a - C)}}{2A} \right\}^{3/2} \sqrt{\frac{a}{2h_{0}}} \quad (11)$$

これが本研究で与えられる流量係数である. ここで流量係数の本堤案の式(11)と既住の 諸式(式(12))の計算結果との対比を示す.比 較に用いた提案式は次の諸式である.

Rajaratnam and Subramanya (1967)の式:

$$C_{d} = \frac{0.611\sqrt{1 - 0.611a/h_{0}}}{\sqrt{1 - 0.611^{2}(a/h_{0})^{2}}}$$
(12a)

Larsen and Mishra (1990)の式:

$$C_d = 0.489 \left(\frac{a}{h_0}\right)^{0.075}$$
 (12b)

Swamee (1992)の式:

$$C_d = 0.611 \left( \frac{h_0 - a}{h_0 + 15a} \right)^{0.072}$$
 (12c)

Alhamid (1999)の式:

$$C_d = 0.6113 \left(\frac{h_0 - a}{h_0 + 15a}\right)^{0.0649}$$
 (12d)

Garbrecht (1977)の式:

$$C_d = 0.6468 - 0.1641 \sqrt{\frac{a}{h_0}}$$
 (12e)

Noutsopoulos and Fanariotis (1978)の式:

$$C_d = 0.62 - 0.15 \sqrt{\frac{a}{h_0}}$$
 (12f)

Nago (1978)の式:

$$C_d = 0.6 \exp\left(-0.3 \frac{a}{h_0}\right) \tag{12g}$$

Fig.4 は Fig.3 に示した全ての実験データに よる検証の結果を示す.同図によると,本堤 案の式(11)による流量係数は名合の式と同程 度の適合,全体として既住の諸提案式と同等 かもしくはそれ以上の適合といえる.ゆえに 本研究の結果は流量評価式でも妥当といえ る. なお,羽田野ら(2018)において示した Rajaratnam and Subramanya(1967)の式の表記 に誤りがあった.ここではそれを修正して示 している.



Fig.4 流量係数の諸式の適合性の検証

Verification of the applicability of the formulas of discharge coefficient











(e2) a/B=0.5, a=10 cm



(e3) a/B=0.5, a=15cm

**Fig.4** 流量係数の諸式の適合性の検証(続き) Verification of the applicability of the formulas of discharge coefficient

#### 3.4 流体力係数 んの性状について

式(2)および(4)の流体力係数*K<sub>D</sub>*の値は本研 究の取扱い方法の妥当性を判断する材料と なる. Fig.5 は式(6)で与えられる*h<sub>0</sub>/a とh<sub>c</sub>/a* の関係の式(4)に代入し,レイノルズ数の効果





が無視できる状況の縮流係数の値とみられ る $C_c$ =0.62を用いて $K_D$ と $h_c/a$ の関係を示した. 図によると、 $h_c/a$ がほぼ 1.0以上( $h_0/a$ が 1.9 程度以上)において $K_D$ <1.0になっており、式 (2)に関係して述べたことと一致する.一方、  $h_c/a < 1.0$ の範囲では逆に $K_D$ >1.0となってい る.これは、 $h_c/a$ が小さい条件では、ゲート 上流のかぶりが小さく、水面勾配による流れ の性格が残存している結果の現れとみられ る.このような流れでは、流速分布が一様で なく、表面付近で速い流れとなる.この速い 流れがゲートにあたるために $K_D$ >1.0となる と考えられる.

#### 4. 結言

以上,スルースゲートをすぎる流れを運動 量の定理に基づき検討した.本研究で得られ た主要な結果は次のとおりである.

(1) スルースゲートの上流の流水断面と縮流 断面の間の水塊に運動量の定理を適用す ることの妥当性を既住研究から明らかに した.

- (2) 流量(限界水深h<sub>c</sub>)とゲート上流水深h<sub>0</sub>を ゲート開度 a で除して得られる無次元量 h<sub>0</sub>/a とh<sub>c</sub>/a が相互依存の関係にあること を導いた.
- (3) 無次元量h<sub>0</sub>/a とh<sub>c</sub>/a がそれらの値の広い 範囲で一義的な関係にあることを見出し, その関係式を(6), (7), および(8)として与 えた.これらはそのまま上流水深と流量 の評価式となる.
- (4) 式(6), (7), および(8)による上流水深と流
   量の評価は既住の実験データを良好に再
   現した.

本研究により治水計画上不可欠でありな がら定式化がなおざりにされていたゲート 上流水深の評価が可能となった.洪水時に重 要となる潜り流出の上流水位などは別の機 会に発表する.

謝辞:本研究の遂行にあたり,松江工業高等 専門学校環境・建設工学科の卒研生桑山なる み氏と安井美沙希氏には実験で熱心な協力 を頂いた.記して深甚の謝意を表す次第であ る.

#### 引用文献

- Alhamid, A.A. (1999): Coefficient of discharge for free flow sluice gates, *Jour. of King Saud University*, Engineering Science, Riyadh, Saudi Arabia, 11(1), 33-48.
- 荒尾慎司,羽田野袈裟義,亀井悠喜信(2019):ゲートからの流出の縮流係数のレイノルズ数依存について、令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会 CD-ROM, II-93.

Garbrecht, G.(1977): Discussion of discharge computation at river control

structures, Jour. of the Hydraulic Division, ASCE, 103(12), 1481-1484. 羽田野袈裟義,多田羅謙治,永野博之,黄安多 (2017): 刃形堰の 流量と越流水深の関係の定式化の試み,土木学会論文集 B1 (水 工学), 73(2), 34-42.

- 羽田野袈裟義,荒尾慎司,李洪源,天野卓三(2018):スルースゲートをすぎる流れの水理の運動量の定理に基づく検討,山口大学 工学部研究報告, 68(2),33-40.
- 羽田野袈裟義,荒尾慎司,李洪源(2019):スルースゲートの上流水 深と流出流量の関係を規定する無次元パラメータの導出,日本 流体力学会 2019 年会.
- Hom-ma, M., Senshu, S., and Tsuchiya, A. (1956): A study on hydraulic pressure acting on a sluice-gate, Trans. JSCE, 36, pp.15-23.
- 石原藤次郎,本間仁 (1958):応用水理学,中 I,丸善, pp.159-160.
- Lasen, A.P. and Mishra, P.K. (1990) : Constant discharge device for field irrigation, *Jour. of Hydraulic Research*, IAHR, 28(4), 481-489.

Montes, J. S. (1997) : Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates, *Jour. of Hydraulic Engineering*, ASCE, **123**(3), 219-232.

名合宏之(1977):開水路底流型水門の自由流出に関する基礎的研 究,土木学会論文報告集,264,77-86.

- Nago, H. (1978): Influence of gate-shapes on discharge coefficients, Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 10(2), 116-119.
- Noutsopoulos, G.K. and Fanariotis, S. (1978): Discussion to free flow immediately below sluice gates, by N. Rajaratnam, *Jour. of Hydraulic Division*, ASCE, **104**, 451-454.
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1967): Flow equation for the sluice gate, *Jour. of Irrigation and Drainage Div.*, ASCE, 93(4), 167-186.
- Rajaratnam, N. (1977): Free flow immediately below sluice gates, *Jour. of Hydraulic Division*, ASCE, **103**(4), 345-351.
- Roth, A. and Hager, W.H. (1999): Underflow of standard sluice gate, *Experiments in Fluids*, 27(4), 339-350.
- Swamee, P. (1992): Slice gate discharge equations, *Jour. of Irrigation and Drainage* Engineering, ASCE, **118**(1), 56-60.

宮崎大学農学部 稲垣仁根

日本水道鋼管協会 薮口貴啓

(独)水資源機構関東事業室 吉岡敏幸

#### 1. はじめに

管路の摩擦損失係数fは、定数ではなく、配管のパラメ ータ及び流れの流速による変数であり、レイノルズ数の 増減によって、変化する関係にある.

また, ヘーゼン・ウィリアムスの式は, 摩擦損失係数の 代わりに, レイノルズ数の関数とならない流量係数 Cを 採用して, 計算の負担を軽減している.

農業用の内面塗装管については、内壁面の表面粗さ が低減された液状エポキシ塗装管が普及しているが、 実験による流速係数は、概ね、一定値に収まる結果となっており、乱流における滑面あるいは粗滑遷移領域の 取り扱いが可能であった.

また,上水道で採用されている無溶剤形エポキシ塗装は,表面の均一な塗膜が得られるので,表面粗さが 液状エポキシ塗装よりも減少している.

そこで、無溶剤形エポキシ塗装の流速係数を検証するために、管路設計の対象であるレイノルズ数 Re が10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>の範囲で、水理実験を行った.実験結果から求めた流速係数は160を超え、さらに流速の増加に合わせて、流速係数が増加する結果が得られた.

流速と流速係数が連動することは、ヘーゼン・ウィリア ムス式の概念から逸脱し、流速係数がレイノルズ数の関 数となっていることを意味する.

これらの点について,流体力学の知見を用いて,ど のような現象が生じているのかを考察した.

#### 2. 無溶剤形エポキシ樹脂塗装の導入について

農業用パイプラインの管内の内面塗装の種類として、モ ルタルライニング、タールエポキシ樹脂、エポキシ樹脂 粉体塗装が使用されてきた.これまでは、大口径では、 タールエポキシ樹脂が使用されてきたが、平成元年に タールエポキシ樹脂塗料に替わる材料として、日本水 道協会規格として溶剤形エポキシ樹脂(以降,液状エ ポキシ樹脂)塗料が制定され,現在では,タールエポキ シ樹脂は使用されていない.

液状エポキシ樹脂塗料は、エポキシ樹脂、硬化剤、ト ルエンやシンナーなどの溶剤からなる2液性の溶剤形 塗料で、水道用に使用する場合には、溶剤による希釈 を行うため、残留溶剤による水質への影響を十分留意 する必要がある.液状エポキシ樹脂は、水中での防食 性能が、従来のタールエポキシ樹脂塗料に比べて優れ ており、さらに、表面粗さによる内面の摩擦損失も抑制 されており、流速係数は、150程度となっている.

農業用パイプラインにおいては、水道ほどの水質管 理は求められないが、農業用水の水道用水との共用区 間や多面的な使用を想定すれば、環境保護の観点か らも、今後、より水質等に配慮した塗料の採用が必要に なるケースも考えられる.

有機溶剤を含まない無溶剤形エポキシ樹脂塗装は, 20年前から、上水道、飲料水用貯水槽、船舶タンク、 床、プールなど特に臭気等に配慮が必要な施設に用い られてきたが、農業用パイプラインにおいては、溶剤を 使用した塗料の使用が一般的である. 今後は、パイプラ インの水質面等での見地から、無溶剤形塗料の使用が 求められるケースも想定される.

#### 3. 無・溶剤形エポキシ樹脂を塗装した管の水理実験

管の内面塗装に、液状エポキシ樹脂、無溶剤形エポキ シ樹脂の2種類を用いた場合の摩擦損失について、表 1に示す屋外および現地水理実験を日本水道鋼管協 会が水資源機構の協力を得て実施し、水理学的な検証 を行った(水資源機構総合技術センター、2018;日本水 道鋼管協会、2019).また、タールエポキシ樹脂の実験 結果(日本水道鋼管協会、2003)も比較検討のために 引用した.

| ケース | 塗装         | 年                     | 実験場所           | 現地 | 屋外    | 口径<br>m | 延長<br>m | 流速<br>m∕s | 実験設備                   |
|-----|------------|-----------------------|----------------|----|-------|---------|---------|-----------|------------------------|
| С   | 無溶剤形エポキシ樹脂 | 2018.6                | 水資源機構          |    | O 0.3 |         | 11      | 0.5~4.0   | 吸水槽,ポンプ,<br>真如水槽, 新ンプ, |
| А   | オルナポナンはモ   |                       | 応ロ奴割センター       |    | 0     |         |         |           | 向木小怕,                  |
| В   | 液扒エ小キン倒脂   | 2019.5                | 水資源機構<br>木曽川用水 | 0  |       | 1.1     | 265     | 0.7~2.2   | 自然流下                   |
| D   | タールエポキシ樹脂  | 1983.7<br>~<br>1986.8 | 日野川<br>土地改良区   | 0  |       | 1.5     | 668     | 0.4~1.4   | 自然流下                   |

表 1: 水理実験一覧表

 4. 無・溶剤形エポキシ樹脂を塗装した管の流速係数 3 種類の内面塗装について、4 ケースの実験結果に 基づいて、ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数 Cを 整理すると、図 1 に示す結果が得られている. 液状 エポキシ(A, B)では、流速係数は、150~160の範囲 にあり、平均は、155 である. また、無溶剤形エポキシ (C)では、流速の大きさに比例して、流速係数 Cが 150~170 の範囲で増加している(数口・笠原 ら、2018). なお、タールエポキシ樹脂(D)は、135~ 140 の範囲にあり、平均は、143 である.

また, 無溶剤形エポキシ(C)と液状エポキシ(A) は, 実験施設, 口径, 管路延長, 流速などの実験条 件が同じであり, 両者の流速と損失水頭の関係を図 2 に示した.また, 液状エポキシ(A)に対する無溶剤 形エポキシ(C)の流速差を補正した場合の損失水頭 の割合 C/A を図 2 に示した.損失水頭の比 C/A は, 流速の増加とともに低下し, 流速 4m/s 近傍では, 88%に低下している.従って, 無溶剤形エポキシ(C) は, 液状エポキシ(A)に対して, 通常の流速範囲 1.5 ~3m/s においては, 損失水頭が 5~10%程度減少 することになる.



図 1: 流速と流速係数



図 2: 流速と損失水頭

#### 5. 層流, 乱流における流速分布と摩擦損失係数およ びレイノルズ数の関係

円管内の十分に発達した流れにおける摩擦損失 係数 f, レイノルズ数 Re, 及び相対粗度 ks/Dの3つ の無次元数を関係付けるために、ムーディー線図が 用いられる.ムーディー線図は、ダルシー・ワイスバッ ハの式を用いて、損失水頭 h<sub>f</sub>を求め、流れ領域での レイノルズ数に対しダルシー・ワイスバッハの式の摩擦 損失係数をプロットしている(Moody,1944).

ムーディー線図は2つの流れ領域である層流及び 乱流に分けることができるが、乱流領域においては、 摩擦損失係数とレイノルズ数の関係(抵抗則)は複雑 である.

5.1 層流領域の流速分布と抵抗則(Re<2000)

円管を流れる層流は、円管の壁面で流速 u=0 となる ノンスリップ条件を満たしており、層流の流速分布は、 ハーゲン・ポアズイユ流れにより、放物線分布(円管の 層流解)となる、ノンスリップとは壁などの境界上の接 点で流れが止まった条件(速度ゼロ)である.

この流速分布式を断面で積分することにより, ハーゲン・ポアズイユの式が得られ, ダルシー・ワイスバッハの式に代入することにより, *Re*<2000の領域の抵抗係数. *f*=64/*Re* が得られる.

5.2 乱流領域の滑面の流速分布(Re = 3×10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>) 円管内の乱流速度分布に関しては、古くからプラント ル、ニクラーゼ、カルマンらにより研究されており、乱流 の速度分布を表す式としては、対数法則と指数法則が 用いられている.

対数法則の速度分布式は、壁面の粗滑を問わず, 流れのレイノルズ数に関係なく成立するとされている が、管中心付近では実験値からはずれる傾向にある. また、指数式である 1/7 乗根法則の速度分布式は、流 れのレイノルズ数によって、指数が 1/7 付近で変化す る.

5.2.1 流速分布(べき乗則:ブラジウスの 1/7 乗則) 乱流の壁面付近での速度分布は,壁に沿う流れの流 速 *u* を無次元化した *u* / *u*<sub>max</sub> の分布が壁面からの 距離 *y* を無次元化した *y* / *a* の指数関数の実験式 で与えられることが確かめられている。*a* は円管の半

径, r は円管の中心からの距離である.

$$\frac{u}{u_{\text{max}}} = \left(\frac{y}{a}\right)^{1/n} = \left(1 - \frac{r}{a}\right)^{1/n} \tag{1}$$

ブラジウスは,局所抵抗係数はレイノルズ数の -m 乗に比例するとして,実験により,滑らかな面を有する 管の場合のべき指数を m=1/4 と定めた.

1/n=m/(2-m)=1/7 となるので,(1)式は,ブラジウス の1/7 乗速度分布則と呼ばれる(禰津家久・冨永晃 宏,2000).また,指数nはレイノルズ数によって変化 し,(2)式で与えられる(島田,2008).

$$n = \frac{1}{\frac{1.085}{\ln Re} + \frac{6.535}{\left(\ln Re\right)^2}}$$
(2)

円管内乱流の最大速度 $u_{\text{max}}$ は、管中心にあるが、 管内平均流速 $U \ge u_{\text{max}}$ の関係はRe数に依存しており、 $10^{4} < Re < 10^{6}$ の範囲で(3)式となる.

$$U/u_{\rm max} = 0.75 \sim 0.85$$
 (3)

にある. *Re* = 10<sup>5</sup> 近辺では平均流速 *U*と最大流速の 比は, 0.80~0.82 となる.

#### 5.2.2 流速分布(速度欠損則)

プラントルは不規則な運動をしている乱流に混合距離 ℓ という概念を導入し, (4)式で表した.

$$l = \kappa z \tag{4}$$

ℓは混合距離, κはカルマン定数で,実験により通常 0.4 くらいとされている. 壁面近傍の混合距離は, 高さ z に比例すると仮定する. なお,壁面では,壁 面では速度が 0 となるため, 渦は発生しない.

プラントルは乱流の乱れによるせん断応力について,混合距離を用いて定義した.壁面近傍の剪断応力は $\tau = \tau 0$ とおき,(5)式で表す.

$$\tau_0 = \rho l^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2 = \rho \kappa^2 z^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2 \qquad (5)$$

(5)式を(16)式の摩擦速度を用いて置き換え, (6)式 を得る.

$$u_*^2 \rho = \rho \kappa^2 l^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2$$
$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{\kappa} \frac{1}{z}$$
(6)

(6)式を積分することで管内の流速分布を求める.

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \int \frac{1}{z} dz = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + C \tag{7}$$

管の中心 z=roのとき最大流速 u=uo (umax)とおい て積分定数を求める.

$$C = u_0 - 2.5u_* \ln r_0 \tag{8}$$

(8)式の積分定数を(7)式の管内の流速の式に代入する.

$$u_{\max} - u = 2.5u_* \ln\left(\frac{r_0}{z}\right)$$
$$u_{\max} - u = 2.75u_* \log\left(\frac{r_0}{z}\right) \tag{9}$$

この式は、管軸付近の最大流速を基準にとり、速度 欠損則と呼ばれており、乱流の流速分布が対数で表 せることを示している.しかし、最大流速がわからない と流速を求めることができないので実用的な式ではな い.

#### 5.2.3 流速分布(対数分布則)

プラントルとカルマンは,乱流の流速分布式として, (10)式を導入した.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{yu_*}{v}\right) + A \quad A = f\left(\frac{u_*k}{v}\right) \tag{10}$$

ここで, *A* は積分定数で, ニクラーゼの実験結果に よると 5.0~5.5, カルマン定数 x=0.41 (壁面乱流の 種類によらず一定), u\*は摩擦速度, *k* は壁面の粗さ (凹凸)の平均高さ(絶対粗度), v は動粘性係数

この式は、乱流における流速分布を表す一般式で あり、速度分布の対数法則と呼ばれている.

カルマン定数 x=0.4 積分定数 A=5.5 を使用して, (11)式とする.

$$u = u_* \left\{ 2.5 \ln\left(\frac{yu_*}{v}\right) + 5.5 \right\}$$
(11)

管内乱流の一般速度分布から最大速度 u<sub>max</sub> は y=r<sub>0</sub> でおこるので, (12)式となる.

$$u_{\rm max} = u_* \left\{ 2.5 \ln \left( \frac{r_0 u_*}{\nu} \right) + 5.5 \right\}$$
 (12)

断面全体の流速分布を考慮して積分し,流量を求める.

$$Q = \int_0^{r_0} 2\pi r u dr$$
  
=  $\pi r_0^2 u_* \left( 1.75 + 5.75 \log \frac{u_* r_0}{v} \right)$  (13)

流量を断面積で割って乱流の平均流速の式を求 める.

$$U = \frac{Q}{A} = u_* \left( 1.75 + 5.75 \log \frac{u_* r_0}{v} \right)$$
(14)

#### 5.3 乱流領域の抵抗則(*Re*=3×10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>)

#### 5.3.1 抵抗係数(抵抗則の 1/4 乗則)

壁面上に生じる乱流境界層の速度分布が 1/7 乗則 に従うものとして,壁面上の摩擦応力  $\tau$  w は,実験 結果から(15)式で与えられる. v は,水の動粘性係 数,  $\rho$  は密度である.

$$\tau_{w} = 0.022 \rho u_{\max}^{2} \left(\frac{\nu}{u_{\max}a}\right)^{1/4}$$
(15)

ここで, 摩擦速度 u\* は, (16)式で与えられる. なお, 摩擦速度は, 摩擦力の基準を示す量であり, 速度に次元を持つ.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{16}$$

(16)式に(15)式を代入して, (17)式が得られる.

$$\frac{\tau_w}{\rho u_{\max}^2} = \left(\frac{u_*}{u_{\max}}\right)^2 = 0.0225 R e^{-1/4}$$
(17)

また,ダルシー・ワイスバッハの式と周囲の流体との 間に作用する剪断応力を用いて,(18)式が得られる.

$$h_{L} = f \frac{L}{D} \frac{U^{2}}{2g} = \frac{\tau_{w}L}{\rho gR}$$
(18)

ここで, *R=D*/4 は径深である. (18)式を変形して, (19)式となる.

$$f\frac{U^2}{8} = \frac{\tau_w}{\rho} \tag{19}$$

(19)式に, (16)式の摩擦速度 u\* を代入して, (20) 式が得られる.

$$f\frac{U^2}{8} = u_*^2$$
 (20)

(20)式に平均流速の(3)式よりRe=104近傍の

$$U = 0.755 u_{\text{max}}$$

を代入して, (21)式となる.

$$f = 8 \left(\frac{u_*}{U}\right)^2 = 14.032 \left(\frac{u_*}{u_{\text{max}}}\right)^2$$
 (21)

(21)式に(17)式を代入して、(22)式が得られる.

$$f = 0.316 R e^{-1/4} \tag{22}$$

(22)式は、ブラジウスの 1/4 乗則と呼ばれ、対数で表示すると(23)式のようになる.

$$\log f = -\frac{1}{4}\log Re - 0.5$$
 (23)

#### 5.3.2 円管内乱流の圧力損失

円管内乱流の圧力損失を表すファニングの式より, 圧力損失 / pは, (24)式で与えられる.

$$-\frac{\Delta P}{L} = 4f\left(\frac{\rho U^2}{2D}\right) \tag{24}$$

壁のせん断力間の関係は、(25)式となる.

$$\tau = -\frac{\Delta p}{L} \frac{r_0}{2} \tag{25}$$

(24)式を(25)式に代入する. ここで, D=2r0

$$\tau = -\frac{\Delta p}{L} \frac{r_0}{2} = 4f\left(\frac{\rho U^2}{2D}\right)\left(\frac{r_0}{2}\right)$$
(26)

(26)式に, (5)式の摩擦速度を用いると, (27)式が得られる. 乱流範囲でも半理論的に *f* が求められる.

$$f = 2\frac{\tau/\rho}{U^2} = 2\left(\frac{u_*}{U}\right)^2 \tag{27}$$

#### 5.3.3 プラントル・カルマンの式

(14)式の u\* を (27)式を用いて消去して,式(28)を得る. なお, D/2=r である.

$$\frac{1}{2\sqrt{f}} = 2.035 \log\left(\frac{UD}{v} 2\sqrt{f}\right) - 0.91 \qquad (28)$$

この式は実験と合わせるため係数を少し変えて、(29)式とする.

$$\frac{1}{2\sqrt{f}} = 2.0\log\left(Re2\sqrt{f}\right) - 0.80$$
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4\log\left(Re\sqrt{f}\right) - 0.4$$
(29)

f は円管の場合,特にファニングの管摩擦係数と 呼び,水理学ではダルシーの管摩擦係数λが使用される.

$$\lambda = 4f \tag{30}$$

なお,以降の管摩擦係数 λは, f に置き換えて記述 する. (30)式を(29)式に代入すると, (31)式が得られ る.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0\log\left(Re\sqrt{f}\right) - 0.8\tag{31}$$

この式をプラントルの管内摩擦係数の一般法則またはカルマンの式と呼ぶ.この式はf について陰関数なので,実際の摩擦係数の計算には試行法が必要である.

5.4 乱流領域の完全粗面の抵抗則(3×10<sup>4</sup>< Re) 粗い円管で Re が十分高い流れの摩擦損失係数を 求める経験式として, (32)式のカルマン・ニクラーゼの 式がある。 粗いパイプの抵抗係数は、パイプ径に対する相対 的な粗さks/Dにのみ依存し、レイノルズ数には無関 係になる.これは、(34)式のコールブルックの式に対し  $Re \rightarrow \infty$ の極限を取ってfについての陰的な項を省略 しても得られる.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log 3.7 - 2\log\left(\frac{k_s}{D}\right)$$
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2\log\left(\frac{k_s}{D}\right)$$
(32)

ここで, ks:粗度の高さ, D:口径

管摩擦係数では,実用上は管内壁の粗度(凸凹)の影響が大きい.凸凹の高さ ks が与える影響の大きさが管摩擦係数に与える影響を把握するために,表2のように4種類の絶対粗度を設定した.図3のムーディー線図(Moody,1944)に用いる口径と,相対粗度も併記した.なお,実際に使用されている管の絶対粗度は,表3に示している.

| 衣 2. 首 2 纪 2 1 日 2 1 1 日 2 1 日 2 1 日 2 1 1 日 2 1 1 日 2 1 1 日 2 1 1 日 2 1 1 1 日 2 1 1 1 1 |         |                  |         |  |  |  |  |
|--|---------|------------------|---------|--|--|--|--|
| 竺话   | 絶対粗度    | 口径               | 相対粗度    |  |  |  |  |
| 「E <sup>*</sup> 1里   | ks (mm) | $D(\mathrm{mm})$ | ks/D    |  |  |  |  |
| Ι  | 0.001   | 100              | 0.00001 |  |  |  |  |
| П  | 0.050   | 100              | 0.00050 |  |  |  |  |
| Ш  | 0.300   | 100              | 0.00300 |  |  |  |  |
| IV   | 1.000   | 100              | 0.01000 |  |  |  |  |

表 2: 管の絶対・相対粗度

#### 5.5 乱流領域の滑面・粗面遷移領域(4000< Re)の 抵抗則

滑らかな円管及び荒い円管における摩擦損失係数を 求める経験式として,粗管と滑管の相関関係をひとつ の式に組み合せる内挿式として,コールブルック・ホワ イトにより与えられた(Colebrook and White,1937;Cole brook,1939)

流れが十分に発達した満水状態の配管内定常流 において,レイノルズ数が 4000 より大きい場合,摩擦 損失係数 *f* は, (33)式で求められる.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} + 2\log\left(\frac{k_s}{D}\right) = 1.14 - 2\log\left(1 + 9.35\frac{D/k_s}{\operatorname{Re}\sqrt{f}}\right)$$
(33)

(33)式の右辺, 第2項が完全粗面の(32)式に追加 された部分である. (33)式を整理して, (34)式がコール ブルックの式として得られる.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{k_s/D}{3.7} + \frac{2.51}{\operatorname{Re}\sqrt{f}}\right)$$
(34)

ここで, k<sub>s</sub>:絶対粗度, D:配管の内径, Re:レイノル ズ数 完全粗面の(32)式と粗滑遷移領域の(34)式の境界は, (35)式で与えられる(Streeter, 1950).

$$\operatorname{Re}\sqrt{f}\,\frac{k_s}{D} = 200\tag{35}$$



図 3: 管路の相対粗度によるfとReの関係

## 内面塗装の違いが摩擦損失係数とレイノルズ数の関係に与える影響

6.1 ムーディー線図における f と Re の一般的関係 乱流の滑面, 粗面および滑面と粗面の遷移領域につ いて, 摩擦損失係数とレイノルズ数の関係をムーディ ー線図において, 整理する.

図3のムーディー線図に、表2の絶対粗度を用いた滑面と粗面の遷移領域と完全粗面のfとReの関係、滑面のブラジウスの1/4 乗則、Reの増加により、 摩擦損失係数が1/4 乗則より次第に上方にずれるプラントル・カルマンの式を示す。

#### ① 完全粗面の領域

粗い円管で Re が十分高い流れの場合は, 摩擦損 失係数がレイノルズ数には無関係になり, パイプの相 対的な粗さ k<sub>s</sub>/D にのみ依存する. (32)式のカルマン・ ニクラーゼの式で摩擦損失係数が与えられる.

#### 滑面と粗面の中間領域

一般に使用されるパイプの場合には、低レイノルズ 数においては、f値は完全粗面の状態のf値より大き いが、レイノルズ数の増加と共に、完全粗面の状態に 漸近する.

これは,管内面の粗度が均一ではないため,レイノルズ数が小さく,粘性低層がそれほど薄くない状態で

も, 粗度要素の一部が低層上に突出して, 粗度効果 を発揮するためである。

不完全粗面で粘性と粗度の影響がともに効くような 遷移区間においては、(34)式のコールブルックの式で 摩擦損失係数が与えられる.また、①の完全粗面と② 滑面と粗面の中間領域の境界線は、(35)式で表され る.

③ 乱流領域の滑面(ブラジウスの 1/4 乗則)

レイノルズ数  $Re = 3 \times 10^3 \sim 10^5$ の範囲で、滑らかな 内壁に適用できる実験式として、(22)式のブラジウス の 1/4 乗則がある. この領域では、流速分布が、(1)式 の乱流の流速分布を表すブラジウスのべき指数 n en = 7 としたブラジウスの 1/7 乗則に従う.

従って,抵抗係数における1/4 乗則は,流速分布の1/7 乗則と等価である. Re が,105までは,1/4 乗則と対数則の差はほとんど生じない.

#### ④乱流領域の滑面(プラントル・カルマンの式)

レイノルズ数  $Re = 3 \times 10^3 \sim 10^6$ の範囲で, 対数則で ある(31)式のプラントル・カルマンの式がある.

Reが10<sup>5</sup>を超えると、摩擦損失係数が1/4乗則より 次第に上方にずれる.これは、ブラジウスのべき指数 nは、(2)式で与えられるが、Reに依存するため、レイ ノルズ数の増加に従い、nが大きくなることが原因であ る.

#### 6.2 タール・液状・無溶剤形エポキシ樹脂塗装におけ る摩擦損失係数とレイノルズ数の関係

タールエポキシ樹脂,液状エポキシ樹脂,無溶剤形 エポキシ樹脂の3種類の塗装について,水理実験を 行った結果を図4~7のムーディー線図にプロットす る.さらに,液状・無溶剤形エポキシの2種類の塗装 について,サンプルプレートの表面粗さを計測して物 理学的絶対粗度(稲垣,2019c)を求め,相対粗度に換 算して,(34)式のコールブルックの式を用いて,摩擦 損失係数を求めた.また,タールエポキシについて は,実験値より求めた水理学的絶対粗度(稲 垣,2019b)を用いて,摩擦損失係数を求めた.摩擦損 失水頭の計算に使用した絶対粗度は,表3に示す.

表 3: タール・液状・無溶剤形エポキシ樹脂管の絶対 粗度と相対粗度

| ケース | 管種 | 會種 塗装 実験場所 (?  |                 | 物理学的<br>絶対祖度<br>(表面粗さ) | 水理学的<br>絶対粗度<br>(実験より<br>逆算) | 口径   | 相対粗度       |
|-----|----|----------------|-----------------|------------------------|------------------------------|------|------------|
|     |    |                |                 | ks=∏Ra                 | ks                           | D    | ks/D       |
|     |    |                |                 | mm                     | mm                           | mm   |            |
| с   |    | 無溶剤形エ<br>ポキシ樹脂 | 水資源機構総<br>合技術セン | 0.00026                |                              | 303  | 0.0000086  |
| Α   |    | 液状エポキ          | ター              |                        |                              | 304  | 0.00001756 |
| в   | 鋼管 | シ樹脂            | 水資源機構木<br>曽川用水  | 0.00534                |                              | 1100 | 0.00000485 |
| D   |    | タールエポキ<br>シ樹脂  | 日野川土地改良区        |                        | 0.15484                      | 1499 | 0.00010329 |

さらに, 流速係数を140,150,160 で固定した場合の レイノルズ数と摩擦損失係数の関係も図示した. 流速 係数 C=150, 160 のラインは, レイノルズ数 Re = 3×10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>の範囲で, プラントル・カルマン式のライン に交差する方向で漸近し, 合流する.

従って,この領域においては,流速係数は,レイノ ルズ数の影響を受けている.さらに, Re > 10<sup>6</sup>におい て,流速係数とプラントル・カルマン式のラインは,平 行になるので,この領域でヘーゼン・ウィリアムス式が 成立する(稲垣,2019a).



図 4: タールエポキシ樹脂塗装のムーディー線図

#### 6.2.1 タールエポキシ樹脂塗装について

タールエポキシ塗装における摩擦損失係数とレイノル ズ数の関係を図4に示した. 摩擦損失係数が, プラン トル・カルマンの式のラインから上方の粗滑遷移領域 に入っている.

さらに、実験値から求めた水理学的絶対粗度を用いて、コールブルック式により、レイノルズ数と摩擦損失係数の関係を示す曲線を図4に示した.実験結果はコールブルックのラインに近接しており、粗面と滑面の中間遷移領域に入っている.また、摩擦損失係数が、150~140の範囲に分布している.

#### 6.2.2 液状エポキシ樹脂塗装について

液状エポキシ樹脂塗装における摩擦損失係数とレイ ノルズ数の関係を、図5,6に示した.摩擦損失係数 がレイノルズ数の増加により、ブラジウスの1/4 乗則 より次第に上方にずれるプラントル・カルマンの式に 漸近する.既存の内面粗度を減少させた管内面塗装 は、プラントル・カルマンの式に沿ったラインを描く.

また, 摩擦損失係数は, 流速係数 C=150~160 の ラインの間に分布しており, 流速係数の存在するレイ ノルズ数の範囲が, Re = 3×10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup> であるので, 流 速係数のラインと実測値のラインが交差する傾向にあ る. ヘーゼン・ウィリアムス式が成立するが, 摩擦損失 係数に対して, レイノルズ数の影響がやや認められ る.





図 6: 液状エポキシ樹脂塗装のムーディー線図



図 7: 液状エポキシ樹脂塗装の Cと Re の関係

計測した表面粗さからから求めた物理学的絶対粗 度を用いて、コールブルック式により、レイノルズ数と 摩擦損失係数の関係を示す曲線を図5、6に示した. コールブルックのラインは、実験結果に重なるが、僅 かに上方を通過している.従って、乱流滑面において は、物理学的な絶対粗度から.コールブルック式を経 由して摩擦損失係数を推定することは可能であると考 えられる.

ケースAにおける流速係数とレイノルズ数の関係 を図7に示した.図7は、図5の縦軸を摩擦損失係 数から流速係数に変更して示したものであり、図5と 同じデータを用いている.流速係数は、摩擦損失係 数と同様に、レイノルズ数の増加に合わせて、プラント ル・カルマン式のラインに接近している. Re>10<sup>6</sup>の範 囲では、コールブルック式のラインから離れて、プラン トル・カルマン式のラインに従う傾向が窺える.高レイ ノルズ数の領域では、水理実験結果から逆算した水 理学的絶対粗度は、ゼロであり、表面粗さの影響がほ とんどなくなり、プラントル・カルマン式のラインに、実 測値が接近するものと推定される.

#### 6.2.3 無溶剤形液状エポキシ樹脂塗装について 無溶剤形エポキシ樹脂塗装における摩擦損失係数と レイノルズ数の関係を,図8に示した.レイノルズ数が 増加しても、プラントル・カルマンの式に漸近せず、ブ ラジウスの1/4 乗則の延長線に接近している.また、 摩擦損失係数は、流速係数 C=150~160のラインを 横切るように分布しており、レイノルズ数に連動して、 変化している.さらに、コールブルック式のラインは、 絶対粗度が非常に小さいため、プラントル・カルマン の式に重なっている.

無溶剤形エポキシの摩擦損失係数は, 粗滑遷移 領域を表現するコールブルック式では, 記述できない ことが示された. さらに, プラントル・カルマンの式とブ ラジウスの 1/4 乗則の延長線に挟まれた領域は, 既 存の管が存在しないが, 無溶剤形エポキシの摩擦損 失係数のみが存在し、レイノルズ数の増加に比例して、減少することが明らかとなった.

摩擦損失係数とレイノルズ数の回帰式を求め, (36) 式のように与えられた.

$$f = 0.484 R e^{-0.279} \tag{36}$$

図8の縦軸を摩擦損失係数から流速係数に変更 し、図8と同じデータを用いて、図9に示した.流速 係数は、レイノルズ数が10<sup>5</sup>レベルであれば、摩擦損 失係数と同様に、レイノルズ数の増加に合わせて、プ ラントル・カルマン式のラインからブラジウスの1/4 乗 則の延長線に接近している.



図8: 無溶剤エポキシ樹脂塗装のムーディー線図



図 9: 無溶剤形エポキシ樹脂塗装の Cと Re の関係 乱流滑面のプラントル・カルマン式のラインの上方 の領域に入っており、これまでの既設管の内面にお ける流速係数とレイノルズ数との関係を逸脱している.

*Re>10<sup>6</sup>*の範囲においても, ブラジウスの 1/4 乗則の延長線にさらに漸近する傾向は窺えるが, 未知の領域なので, 実験による確認が必要である.



図 10: 1/7 乗則による流速分布のパターン

#### 7. 内面塗装の違いが流速分布に与える影響

#### 7.1 管内の流速分布

実験結果は、平均流速 Uなので、最大流速 umax を 求める. (1)式の流速分布式を円管面積で積分し、断 面平均流速 Uを求める.

$$u = u_{\max} \left( 1 - \frac{a}{r} \right)^{1/n}$$

$$U = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a 2\pi r u dr = \frac{2u_{\max}}{a^2} \int_0^a r \left( 1 - \frac{a}{r} \right)^{1/n} dr$$

$$= \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} u_{\max}$$
(37)

流速分布を求めるために, 最大流速 *u*<sub>max</sub>を求める.

$$u_{\max} = \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2}U$$
 (38)

平均流速 Uを1として,最大流速 umax を(38)式か ら求め,さらに(1)式により流速分布 u を求めて,図 10 に示す.平均流速が同じ条件において,べき指数が n=7,9,11の3種類について,流速分布を描いてい る.n=7の場合は,中心軸の最大流速が大きく,流速 分布が放物線を描いている.べき指数が大きくなる と,中心軸の最大流速は減少し,平均流速との差が 縮小するので,流速分布の形状が四角形に近くなる.

べき指数が n=7 の場合は, 流速分布が放物線となるので, 管壁面に近接する流速については, 小さくなっており, べき指数の増加に合わせて, 流速が僅かに大きくなる.

#### 7.2 液状エポキシ樹脂管の管内流速分布

液状エポキシ管の実験結果の平均流速からレイノル ズ数を求めて、(2)式から、ブラジウスのべき指数を求 め、Re=1.42\*10<sup>5</sup>~1.10\*10<sup>6</sup>から n=7.25~8.94 を得 る.

さらに,実験による平均流速 Uを用いて,(38)式より, 最大流速を求めた.図11にブラジウスのべき指数と 液状エポキシ樹脂の平均流速,最大流速を比較して 示す







図 12: 液状エポキシ樹脂管の管内流速分布



図 13: 無·溶剤形エポキシ樹脂の Re, f, n の関係

さらに,最大流速とブラジウスのべき指数を用いて, (1)式より,流速分布を求めた.図12に液状エポキシ 樹脂の流速分布をべき指数で比較して示す.

流速分布の形状は,壁面にごく近いところを除い て,流速が一様に近い分布となり,四角形の形状となる.

液状エポキシ樹脂では、レイノルズ数が増加するに 伴い、平均流速が増加すると、ブラジウスのべき指数 が大きくなり、摩擦損失係数は、プラントル・カルマン 式に従い、流速分布の形状は、四角形に近くなるよう に変形する.従って、液状エポキシの流れは、一般的 な乱流の特徴を示している.



図 14: 無溶剤形エポキシ樹脂管の平均・最大流速

7.3 無・溶剤形エポキシ樹脂管の Re, f, n の関係 図 13 にレイノルズ数に対応する液状エポキシ樹脂の 摩擦損失係数, 無溶剤エポキシ樹脂の摩擦損失係 数と回帰式, ブラジウスの 1/4 乗則の延長線, プラン トル・カルマン式のライン, (2)式によるブラジウスのべ き指数を示した.

液状エポキシ樹脂の摩擦損失係数は、プラントル・ カルマン式のラインにほぼ重なる結果となっている.また、摩擦損失係数は、レイノルズ数と両対数をとった 場合に直線関係にならないので、ブラジウスのべき指 数は一定値にならず、(2)式で示すような勾配を有す るラインとなる.

無溶剤形エポキシ樹脂塗装の摩擦損失係数は, レイノルズ数が, *Re*=2.5\*10<sup>5</sup>までは, 液状エポキシと 同程度の摩擦損失係数となっている. さらに, レイノル ズ数が増加すると, プラントル・カルマン式のラインか ら離れて, ブラジウスの 1/4 乗則の延長線に接近して 来る.

乱流滑面の流速分布の 1/7 乗則と摩擦損失係数 のブラジウスの 1/4 乗則と等価であるため, 摩擦損失 係数がブラジウスの 1/4 乗則の延長線に接近してい ることは, 流速分布の 1/7 乗則が成立していることを 意味していると考えられる.

そのため, (36)式の実測値に基づく摩擦損失係数 とレイノルズ数の回帰式によれば, m=0.279 であり, レ イノルズ数が, *Re*=2.5\*10<sup>5</sup>~1.10\*10<sup>6</sup>の範囲では, ブ ラジウスのべき指数は *n*=(2-*m*) /*m*=6.17 となる.

従って, *Re*=1.42\*10<sup>5</sup>~2.5\*10<sup>6</sup>の範囲では, (2)式の ブラジウスのべき指数に従い, *Re*=2.5\*10<sup>5</sup>~1.10\*10<sup>6</sup> の範囲では, ブラジウスのべき指数は *n*=6.17 の一定 値に維持されていると考えられる.

#### 7.4 無溶剤形エポキシ樹脂管の管内流速分布

べき指数を、図 13 のように仮定して、実験による平均 流速 Uを用いて、(38)式より、最大流速を求めた.図 14 にブラジウスのべき指数と無溶剤形エポキシ樹脂 の平均流速、最大流速を比較して示す



図 15: 無溶剤形エポキシ樹脂管の管内流速分布





さらに,最大流速とブラジウスのべき指数を用いて, (1)式より,流速分布を求めた.図 15 に無溶剤形エポ キシ樹脂の流速分布をべき指数で比較して示す.

無溶剤エポキシは、レイノルズ数*Re*が増加しても、 *n*=6.17 近傍の流速分布のままであるので、液状エポ キシより壁面近傍の流速が小さく、管軸地点の最大流 速が大きくなり、流線が放物線の形となる.

また,図16に無溶剤形と液状エポキシ樹脂の流速 分布を比較して示す.なお,実線が無溶剤形で,破 線が液状エポキシ樹脂である.

液状エポキシ(点線)では,流速が大きくなるほど, (2)式のブラジウスのべき指数は増加するが,無溶剤 形エポキシ(実線)は,べき指数が変化しないので, 液状エポキシの流速分布との乖離が大きくなることに なる.

8. 無・溶剤形エポキシ塗装のエネルギー損失の仮説

#### 8.1 管内流れのエネルギー損失

液状エポキシ樹脂と無溶剤形エポキシ樹脂を用いた 管内流のエネルギー損失についての諸要素の相関 関係について整理し,図 17,18 に示した.



図 17: 液状エポキシ樹脂管のエネルギー損失



図 18: 無溶剤形エポキシ樹脂管のエネルギー損失

#### 8.1.1 摩擦エネルギー損失

管路内を流体が流れる時には、複数の原因によって エネルギー損失が生じる.このエネルギー損失には、 管壁と流体との摩擦、流体の内部摩擦、管路断面の 変化、管路内に挿入された継ぎ手や弁類によるもの がある.

管径一定で水平な直管内を流体が流れる場合の エネルギー損失は、管壁と流体との摩擦および流体 内部の摩擦によるものであり、これを特に摩擦エネル ギー損失と呼ぶ.

ダルシー・ワイスバッハ式は摩擦損失, ヘーゼン・ウ ィリアムス式は流速係数により, この摩擦エネルギーを 評価している. これまでは, 摩擦損失係数がレイノル ズ数の関数になることによる困難さを,一定値で取り 扱うことの出来る流速係数を導入して,摩擦エネルギ 一損失を求めてきた.

#### 8.1.2 滑面乱流におけるレイノルズ数と摩擦損失係 数の関係

乱流領域では、管摩擦係数はレイノルズ数だけの関数では表現できず、管路内の壁面の粗さにも依存するため、滑らかな円管及び荒い円管における摩擦損失係数を求める経験式である(34)式のコールブルック式が用いられる.

管壁面の粗さが僅かで,流体との摩擦の少ない滑らかな内壁においては,摩擦損失係数とレイノルズ数の関係は,レイノルズ数 Re = 3×10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>の範囲で,(22)式のブラジウスの1/4 乗則に従うが, Re が 10<sup>5</sup>を超えると,摩擦損失係数が1/4 乗則より次第に上方にずれて,(31)式のプラントル・カルマン式に従う.なお,両式とも,摩擦損失係数は,レイノルズ数 Re の関数で表される.

#### 8.1.3 滑面乱流のエネルギー損失

乱流については、高いレイノルズ数において発生し、 無秩序な渦や不安定な流れが生じて、前には流れて いるもののミクロ的にみると各流体微粒子が前後左右 に好き勝手に流れている状態になっている.そのた め、乱流では、流れの衝突や渦が発生することによる エネルギー損失が発生する.

管壁と流体との摩擦が少なく,摩擦損失係数が(22) 式のブラジウスの 1/4 乗則および(31)式のプラントル・ カルマン式に従う場合は,流体内部の摩擦によるエネ ルギー損失がほとんどを占めていると考えられる.

#### 8.2 管内の流速分布

#### 8.2.1 層流と乱流の流速分布

摩擦損失係数が 1/4 乗則から外れて、 プラントル・カ ルマン式に従う範囲においては、(1)式の管内の流速 分布の形状を規定するブラジウスのべき指数 n は、 レ イノルズ数によって変化し、(2)式で与えられる.

べき指数nは、レイノルズ数の増減に連動して、増減し、べき指数が大きいほど、壁面近傍の流速が増加し、管軸の最大流速との差が縮小して、中央部の膨らみが拡大して、流速分布が放物線から四角形に変化することになる.

乱流は、高レイノルズ数なので、流速分布の形状 は、壁面にごく近いところを除いて、流速が一様に近 い分布となり、四角形の形状となる.

一方,層流については,低いレイノルズ数において 発生し,粘性力が支配的であり,滑らかで安定した流 れになる.流速分布は,管の中心で流速が最も大き く,管壁に近づくほど流速は小さくなり,壁上で流速は 0となり、放物線を描く.従って、流速分布が放物線となることは、流れが直線的で、内部の乱れが少ないことを意味していると考えられる.

#### 8.2.2 液状エポキシ樹脂塗装の管内流速分布

液状エポキシ樹脂では、レイノルズ数が増加するに伴い、平均流速が増加すると、摩擦損失係数は、プラントル・カルマン式に従い、ブラジウスのべき指数が大きくなり、流速分布の形状は、四角形に近くなるように変形する結果が得られている.従って、液状エポキシの流れは、一般的な滑面乱流の特徴を示している.

#### 8.2.3 無溶剤形エポキシ樹脂塗装の管内流速分布

無溶剤形エポキシ樹脂においては、管の内面塗装の 表面粗さが、極限に近くまで減少したことにより、レイ ノルズ数 Re>10<sup>5</sup>の領域でも、摩擦損失係数が、滑面 乱流のプラントル・カルマン式に従わないで、ブラジウ スの 1/4 乗則の延長線に接近し、管内の流速分布 は、1/7 乗則のままで、放物線形状の流速分布が変 形しない結果となっている.

無溶剤エポキシの場合は、レイノルズ数が増加して も流速分布が、放物線の形状のままであるので、流れ の乱れによるエネルギー損失が少なくなると推定され る.

8.3 無・溶剤形エポキシ樹脂塗装のエネルギー損失 一般的には、レイノルズ数が増加すると、摩擦損失係 数がブラジウスの1/4 乗則から外れて、プラントル・カ ルマン式に従い、ブラジウスのべき指数が増加して、 流速分布が四角形になる.

無溶剤形エポキシでは、レイノルズ数が増加しても、 プラントル・カルマン式に従わず、摩擦損失係数がブ ラジウスの1/4 乗則の延長線に接近しており、ブラジ ウスのべき指数は、1/7 乗則に維持され、流速分布は 放物線を描いている.

図2に示すように、平均流速2~4m/sの範囲で、 同じ平均流速においても、無溶剤形エポキシの損失 水頭は、液状エポキシの損失水頭より減少している.

これは、両者における乱流の持つ内部構造の差に 起因すると考えられる.同じ平均流速においても、液 状エポキシのように、べき指数が大きい場合は、流速 分布が一様で、四角形になり、一方、無溶剤形エポキ シのように、べき指数が 1/7 乗則の近傍であれば、放 物線を描くと考えられる.

#### 9. まとめ

無溶剤形エポキシ樹脂は、流速が大きくなるほど、エ ネルギー損失の増加割合が少なくなり、流速係数が 増加するという結果となっているが、これは、液状エポ キシと無溶剤形エポキシの流速分布の形の違いによ る流れの乱れによるエネルギー損失の差が,影響していると推察される.

従って, 無溶剤剤形エポキシ樹脂は, 管水路の水 理にとって, 管の内面塗装の表面粗さが, 極限に近く まで減少したことにより, 「高レイノルズ数の乱流であり ながら, 流れの乱れが小さい流速分布になり, 管路 内のエネルギー損失が抑えられる」という未経験の領 域に入ったことを意味すると考えられる.

また, 流速係数が 160 以上に到達する内面塗装に おいては, 流速係数がレイノルズ数の関数になるとい う結果になっており, ヘーゼン・ウィリアムス式の利点 が失われる状況となっている.

従って,新しい内面塗装の水理特性の検証と流速 公式の取り扱いの模索を必要としていると考えられ る.

なお,本検証においては,流速分布については, 既存の理論を用いて検証を行ったが,流速分布自体 の計測は行っていない.

管内における流速分布の計測には,超音波流速分 布計測法が用いられ,伝播時間差式超音波流量計 が試験的に開発されている.既設配管における流量 計測については,クランプオン式超音波流量計が開 発中であるが,実用段階にはないので,今後の研究 開発の進展が待たれる.

#### 引用文献

[1] Colebrook, C. F. and White, C. M. (1937): Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 161 (906), pp.367-381. Colebrook, C.F. (1939): Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws, Journal of the Institution of Civil Engineers (London), pp.133–156.

- [2] 稲垣仁根(2019a):管水路の平均流速公式の学び直し (1)-摩擦損失係数fと流速係数Cと粗度係数nはどこが 違うのかー,畑地農業731, pp.18-28.
- [3] 稲垣仁根(2019b):管水路の平均流速公式の学び直し
   (2)-管路の流速係数は,水理学的絶対粗度とレイノルズ数の影響を受ける?-,畑地農業 732, pp.7-19.
- [4] 稲垣仁根(2019c):管水路の平均流速公式の学び直し
   (3)-物理学的絶対粗度から流速係数の推定は可能
   か?-,畑地農業 733, pp.13-24.
- [5] 禰津家久・冨永晃宏(2000):水理学, 朝倉書店, pp.103-104.
- [6] 日本水道鋼管協会(2003):内面塗装鋼管管摩擦損失 水頭の実測報告書
- [7] 日本水道鋼管協会(2019):液状エポキシ樹脂塗装鋼管 の実管路における流速係数調査報告書
- [8] 水資源機構総合技術センター(2018):流速係数確認実 験報告書
- [9] Moody, L. F. (1944): Friction factors for pipe flow, Transactions of the ASME ,66 (8), pp.671-684.
- [10] 島田正志(2008):水理学 流れ学の基礎と応用,東京 大学出版会, pp.179-180.
- [11] Streeter, V. L. (1950): Steady flow in pipes and conduits, Engineering Hydraulics, John Wiley, pp.387-443.
- [12] 薮口・笠原ら(2018):鋼管内面塗装の流速係数確認実 験,第69回農業農村工学会関東支部大会講演会要旨 集,pp.118-119

#### 大規模稲作への低コスト省力化灌漑システム導入に向けた水理学的検討

Hydraulic study on a low-cost labor-saving irrigation system for large-scale rice cultivetion

○清水 海斗<sup>\*</sup> 飯田 俊彰<sup>\*\*</sup> 木村 匡臣<sup>\*\*\*</sup> 安瀬地 一作<sup>\*\*\*\*</sup> ○Kaito Shimizu<sup>\*</sup> Toshiaki lida<sup>\*\*</sup> Masaomi Kimura<sup>\*\*\*</sup> Issaku Azechi<sup>\*\*\*\*</sup>

#### 1. はじめに

水田稲作での担い手への圃場集積が進む とともに,単位面積当たりの耕作者数は減 少し、水田水管理の粗放化を招くことが懸 念されている. その打開策として遠隔操作 を基本とした次世代型水管理システムが圃 場でも導入され始めたが、これらのイニシ ャルコストやランニングコストは依然とし て高く、多数の区画への導入はコスト面か ら現実的でない.この現状に対し、開水路 地区で圃場整備事業を行う際に、1人の担 い手の耕作圃場を1本の末端水路沿いに連 続した数区画から 10 数区画の大区画圃場 へ集約し、これらの区画では同一品目、同 一栽培として,同一の水管理を行う超省力 的水管理法が考案されている. 少数の次世 代型水管理システムで末端水路沿いに連続 したすべての大規模圃場に対し、省力化か つきめ細かな水管理を施すためのシステム を考案する必要がある.

#### 2. 本研究の目的

最初の試みとして,末端水路沿いに連続 した区画へ同じ一定量を給水するシステム を構築し,末端水路の上流端に設けた遠隔 操作ゲートで用水を制御することによる, 超省力的水管理を考案した.各区画へ同じ 一定量を給水するために,引込み水路の分 岐点の直下流で末端水路を堰上げ,各引込 み水路の水深をほぼ一定に揃えつつ,各引 込み水路に定量分水工である Baffle distributorを設置し,各区画への流入量をほ ぼ一定に揃えることの可能性を模型水路実 験によって検討した(図-1).

第二の試みとして,最上流に位置する区 画に対して湛水深一定制御自動給水栓を導 入し,区画間に設置した浮き弁付きサイフ オンで送水することによって各区画の湛水 深をほぼ一定に保つ水管理を考案した(図-2).浮き弁によってサイフォンの上下流の 水位差がある値より小さい場合には止水さ れるため,連続した区画に田面標高差があ る場合でもそれぞれの湛水深が一定に保た れると推測される.そこで本研究では作成 した模型浮き弁付きサイフォンを用いて, 上下流の水位差と流量の関係を調査し,全



G-1 連続した水田区画への定量灌漑システムの概略図

\*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; \*\*岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University;\*\*\*近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University; \*\*\*\*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 キーワード:管・開水路流れ,水利構造物,水田灌漑



湛水深一定制御自動給水

図-2 浮き弁付きサイフォンを用いた連続した 水田区画の湛水深調節システムの概略図

区画の湛水深を適正に保つことの可能性を 検証した.

#### 3. 方法

#### 3.1. 模型水路

国内で広く用いられている幅 60 cm のフ リューム式の末端水路を想定し,縮尺 1/2 の 水理模型実験をフルード相似で行った. 模 型末端水路(以下,模型水路)は,全長 50 m,水路幅(内法)30 cm,側壁高 25 cm, 水路底勾配 1/800 で,水理計算に用いる粗 度係数を,あらかじめ等流で測定した流量 と模型水路諸元からマニング式で求めた. 模型水路上流端から 15 m, 30 m,45 m の 3 箇所の左岸側に引込み水路を設け,引込み 水路内に図-3 に示すような縦断形状の Baffle distributor を設置した. Baffle distributor の水路底クレスト頂部が模型水 路の左岸側壁から 30 cm となる位置に Baffle distributor を設置した.

#### 3.2. 模型水路の測定方法

模型水路下流端および各引込み水路の下 流側に設置した溜枡の水深の増加を圧力式 水位計で計測し,それぞれの流量を測定し た.引込み水路内の水深を可動式の容量式 波高計によって,模型水路内各地点の水深 をポイントゲージによって測定した.

#### 3.3. 模型浮き弁付きサイフォン

内径が 25 mm と 50 mm の塩ビ管をエル ボと異径接手でつないだ模型サイフォンを



図-3 模型 Baffle distributor の縦断面図

作成した. 浮きは角柱状に成形した発泡 スチロールの上下にそれぞれ発泡スチロー ルの半球を接着し作成した. 角柱は底面が 一辺 35 mm の正方形で高さが 41 mm, 半球 は直径 35 mm とした. 異径接手の部分が弁 として浮上した浮きと接触する. また異径 接手を半透明とし, 浮きの様子を確認でき るようにした.

### 3.4. 模型浮き弁付きサイフォンの実験 方法

2 つの水槽に水を貯め,浮き弁付きサイ フォンの口が双方の水面下に位置するよう に設置した.それぞれの水槽の上方にポイ ントゲージを設置し,水位を測定できるよ うにした.上流側の水槽は常に溢水するよ うにホースで水を供給し続け,またジャッ キの上に載せることで,水面の標高を変更 できるようにした.下流側の水槽は一回り 大きな水槽内に設置することで,サイフォ ン内を通り下流側の水槽から溢水する水を うけられるようにした.その流量は底に沈 めた圧力式水位計によって測定した.

#### 4. 結果および考察

#### 4.1. Baffle Distributor の HQ 曲線

図-4 に模型実験で得られた Baffle distributorのHQ曲線を示す.縦軸は水路底 クレスト頂部からの水位である.このBaffle distributorの設計流量 0.0028 m<sup>3</sup>/s の±10%の 流量は,水位 6.5 ~10 cm の 3.5 cm の水位 範囲で生じた.





#### 4.2. 末端水路の水面形

3 か所の引込み水路の直下流の堰板の高 さを,上流側から5 cm,7 cm,10 cm (パタ ーン1),7 cm,10 cm,12 cm (パターン2) に設定し,模型水路最上流端から 0.0174 m<sup>3</sup>/s を連続給水して3箇所の引込み水路へ 通水した.パターン1とパターン2での, 模型水路各点での実測水位と水理計算で得 た計算水位とを,それぞれ図-5,図-6 に示 す.計算値はおおむね実測値と一致してお





図-7 模型浮き弁付きサイフォンの HQ 曲線

り,実際に必要な堰板の高さは簡単な水理 計算で求められることが示された.ただし, 下流から上流へ向かって計算を進めるにつ れて,計算値が次第に実測値と乖離する傾 向が認められた.

## 4.3. 模型浮き弁付きサイフォンの実験 結果

図-7 は実験によって得られた,上下流水 位差と流量の関係を示したグラフである. 実験は弁の位置が下流側水槽の水面から鉛 直下方向に0cmと10cmの2通りに設定し て行ったため区別して記載した.また水位 差を増加させた際と減少させた際のデータ も区別して記載した.

浮き弁が開放した際にグラフの通り流量 が急激に増加しており,水位差が小さな場 合には少量の通水があるものの浮きが止水 の役割を果たした.ただし,開放する際の 水位差は水面と弁の位置の関係によって少 し異なった.また水位差が増加する段階と 減少する段階で流量のヒステリシスが観察 された.

本実験で用いた浮きは開放した際に振動 や回転する場合があったため,現場に実装 する際の耐久性の観点から,形状や材質を 変更する必要がある.

**謝辞** 本研究は富山県庁から受託研究費 を受けて進められた.

#### 植物生育係数を考慮したLSTMによる水田水温ダイナミクスの推定

Estimation of water temperature dynamics in paddy fields using LSTM considering vegetation

growth status parameter

謝 文鵬\*、木村 匡臣\*\*、高木 強治\*

#### XIE WENPENG, KIMURA MASAOMI, TAKAKI KYOJI

\*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 \*\*近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University

#### **<u>1. Introduction</u>**

In recent years, neural networks have yielded exciting results in many fields, such as natural language processing, computer vision, and time sequence processing. As opposed to traditional physics-based models, neural networks are datadriven models and use observation-based feedback to train parameters to reach global minima. In this study, we use neural networks to model the thermal environment of the paddy field and infer the water temperature based on meteorological observations.

Long short-term memory (LSTM) is an artificial recurrent neural network architecture. Unlike standard feedforward neural networks, LSTM has feedback connections. It can not only process single data points but also entire sequences of data. Therefore, LSTM networks are well-suited to processing and making predictions based on time series data, such as water temperature dynamics of paddy fields, since there can be lags of unknown duration between important events in a time series.

There are many successful applications of LSTM in hydrology, such as flood prediction, water temperature prediction in lakes, and water level prediction in rivers. To the best of our knowledge, no studies have focused on modeling the thermal environment of paddy fields using LSTM. Unlike thermal environment in lakes

which have been modeled by the previous study<sup>[1]</sup>, paddy fields, as shallow water thermal environments, are susceptible to surrounding environment and anthropogenic factors, because of low heat capacity of water body. Furthermore, the paddy fields are sensitive to the climate responses. Thus, the contribution of this study is demonstrated by the use of LSTM to calculate water temperature in the paddy fields and to investigate the effects of paddy field-specific environmental variables (vegetation growth status parameter,  $K_L$ ) on the performance of various neural networks. Here,  $K_L$  is the introduced parameter by Xie et al. (2020)<sup>[2]</sup> with a range of [0, 10] which is related to radiation transmittance and corresponds to the denseness of the vegetation layer.

#### 2. Model

The time series processing power of LSTM is reflected in its "gate system" with the following equations:

$$f_t = \sigma(W_h^f h_{t-1} + W_x^f x_t) \tag{1}$$

$$g_t = \sigma(W_h^g h_{t-1} + W_x^g x_t) \tag{2}$$

$$o_t = \sigma(W_h^o h_{t-1} + W_x^o x_t) \tag{3}$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_h^c h_{t-1} + W_x^c x_t) \tag{4}$$

$$c_t = f_t \otimes c_{t-1} + g_t \otimes \tilde{c}_t \tag{5}$$

$$h_t = o_t \otimes \tanh\left(c_t\right) \tag{6}$$

Where,  $f_t$ ,  $g_t$ , and  $o_t$  are forget gate, input gate and output gate, respectively.  $\tilde{c}_t$  and  $c_t$  are candidate and formal cell state, respectively.  $h_t$  is the output of LSTM unit.  $\sigma(\cdot)$  and  $\tanh(\cdot)$  are activation functions. W indicate the weight and  $\otimes$  indicate entry-wise product.

Functionally, cell state stores past information. In the t-moment computation, the forget gate controls how much past information cell state forgets, the input gate controls how much information is sunk into cell state from the current moment input, and the output gate controls how much information is output by cell state for the current moment computation. With the gate system, LSTM can handle time series problems and consider the effects of past variables on present calculations.

In this study, we also use the fully connected network (ANN) and physical-based model (2-Layer heat balance model, 2-Layer)<sup>[2]</sup> as baseline to evaluate the performance of LSTM.

#### 3. Methodology

Meteorological data observed in paddy fields are used to train and test models. We performed field experiments from 19 July to 19 September in 2016 at Tochigi. The measured items include the air temperature (°C), solar radiation (W/m<sup>2</sup>), relative humidity (%), air pressure (kPa), the horizontal wind speed (m/s), water temperature (°C) and water depth (m) with observation interval is 10 min. Vegetation growth status parameters were back extrapolated from the total heat change in the paddy water layer, using methods from Xie et al. (2020)<sup>[2]</sup>

We designed four scenarios to explore the capabilities of the models, corresponding to LSTM and ANN and the presence or absence of vegetation growth status parameters. Besides, we discussed the effect of the amount of training data on the computational accuracy of the model.

#### 4. Results

The prediction accuracy of the four models under different training sizes is shown in Figure 1. For setting up the training, we chose the first 60% of the observations as the training set and the last 40% as the test set. The horizontal coordinates in Figure 1 represent the extent of the training set used for model training, e.g., 10% means that the 10% of the training set was randomly selected to train the model. From the figure, the models with  $K_L$  in the training data performs better than the models without  $K_L$ , which indicates that for the thermal environment of the paddy field, the level of vegetation layer affects the water temperature. For the LSTM models, the training set containing  $K_L$  provides better computational performance when the training data set is small, but the prediction accuracy of the two models is similar when there is sufficient training data (under 100% training set), which could be due to the fact that the LSTM learns the characteristics of the thermal environment of the paddy field.

The accuracy of the neural network versus the physical-based model is shown in Table 1. From Table 1, all models, except the ANN model, have higher computational accuracy than the physical-based model when sufficient training data are available. Furthermore, the models containing  $K_L$  outperforms the physical-based model even under 50% of the training data. This shows that the neural network model has the potential to be applied in the field of agro-ecosystems.

<sup>[1]</sup> Read JS et al. 2019. Process-guided deep learning predictions of lake water temperature. Water Resources Research.

<sup>[2]</sup> Xie W et al. 2020. Simulation of water temperature in paddy fields by a heat balance model using plant growth status parameter with

interpolated weather data from weather stations. Paddy and Water Environment.



Figure 1. Estimation of paddy field water temperature under three training sets using different models. KL after the model name means that the training set contains  $K_L$ 

Table 1. mean RMSE of various models.

|         |             |                  | (Unit: °C)       |
|---------|-------------|------------------|------------------|
| Method  | 10%         | 50%              | 100%             |
| 2-Layer | -           | -                | 1.31             |
| LSTM    | 2.28(±0.41) | $1.56(\pm 0.51)$ | 1.01(±0.18)      |
| LSTM-KL | 2(±0.62)    | $1.20(\pm 0.24)$ | 0.98(±0.21)      |
| ANN     | 2.17(±0.37) | 2(±0.39)         | 1.77(±0.16)      |
| ANN-KL  | 2.3(±0.27)  | 1.17(±0.1)       | $0.86(\pm 0.03)$ |

- 47 -

## 管内圧力変動を利用した漏水検知法の現場管路における実験的検証 Experimental verification of Leak detection using Pressure transients in Field Pipeline

○浅田洋平\*、鈴木哲也\*\*、木村匡臣\*\*\*、安瀬地一作\*\*\*\*、飯田俊彰\*\*\*\*\* ○Yohei Asada\*, Tetsuya Suzuki<sup>\*\*</sup>, Masaomi Kimura<sup>\*\*\*</sup>, Issaku Azechi<sup>\*\*\*\*</sup>, Toshiaki Iida<sup>\*\*\*\*\*</sup>

#### 1. はじめに

農業用管水路はその大半が高度経済成長期 に整備されたものであり, 老朽化が進んでいる ため漏水・破損事故は年々増加の一途をたどっ ている(1)。よって、簡便かつ安価で信頼性の高 い漏水検知法は、農業用管水路の維持管理や機 能診断に対して早急に求められている。近年, 管内の圧力変動を利用して漏水を検知する方 法が他手法と比べて低コスト,小労力で漏水検 知ができると期待されている<sup>(2)</sup>。しかし、従来 までに報告されている圧力変動を用いた漏水 検知法の現場での検証は非常に数が少なく,日 本での現場検証は著者らの知る限り確認され ていない。本研究では、新潟県佐渡市にある小 倉幹線用水路を現場検証の対象地とし, 圧力変 動を用いた漏水検知法について有効性の検証 及び考察を行った。

#### 2. 現場管路実験

小倉幹線用水路は小倉調整水槽(上流水槽) ~管路~新保注水工(下流端バルブ)からなる 全長 17833.4 m(約 18 km),最大水圧 1.19 MPa (水頭 121 m)のパイプラインシステムである。 このシステムの途中にはいくつかの分岐があ るが,調査当日は皆川支線用水路へとつながる 分岐だけが開いており常時 4.60×10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/s の流 量が皆川支線用水路へと流れていた(図 1)。小 倉幹線用水路の概要を表1に示す。皆川支線用 水路の全長は 2580.51 m,管種はダクタイル鋳 鉄管,管径 250 mm,管厚 7.5 mm である。本 実験では、用水路下流末端部に位置する新保注 水工の制水弁を手動で操作した。初期の制水弁 開度を 1/2 回転、1 回転、3 回転の 3 パターンに 設定し、それぞれ流況が安定した後、バルブ閉 塞操作を行い圧力変動を発生させた。圧力変動 はバルブ直上流に圧力計を設置することで計 測した。また、漏水がある場合の管内の圧力波 形を測定するために、新保注水工から約 73 m上 流にある排泥工のバルブ(排泥弁)を開けるこ とで、漏水を模擬した。すべての場合において、 漏水を模擬する際は排泥弁の開度は2 回転とし 漏水量は 0.051 から 0.054 m<sup>3</sup>/s であった。図 2 に新保注水工の制水弁の初期開度 1/2 回転にお ける漏水がない場合とある場合の圧力波形を





表1 小倉幹線用水路の概要

| 小倉調圧水槽からの<br>距離(m) | 管種       |        | 管径(mm) | 管厚(mm) |
|--------------------|----------|--------|--------|--------|
| 0~9455.923         | 鋼管(SP)   |        | 1000   | 6.0    |
| 9455.923~16169.66  | 鋼管(SP)   |        | 900    | 6.0    |
| 16169.66~17833.4   | ダクタイル鋳鉄管 | (DCIP) | 600    | 7.5    |

\*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 \*\* 新潟大学自然科学系(農学部) Faculty of Agriculture, Niigata University \*\*\*近畿大学農学部環境管理学科 Faculty of Agriculture, Kindai University \*\*\*\*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 \*\*\*\*\*岩手大学農学部食料生産環境学科 Faculty of Agriculture, Iwate University キーワード:流体力学一般、管水路流れ、水理学的波動,漏水検知, 圧力波形減衰 示す。計測結果から小さな圧力変動でも十分に 解析可能な状態であることが明らかになった。 以上から、今回は制水弁初期開度が 1/2 回転の 場合の結果で検証を行う。

#### 3. 解析手法及び結果

漏水位置が下流側にあるほど, 圧力波形の減 衰は大きくなることが知られている(3)ので、本 研究では実測値と数値シミュレーションによ る圧力変動の減衰を比較することで漏水位置 を推定する手法をとった。数値モデルは1次元 水撃作用流れモデルを使用した。また、圧力変 動は指数関数的に減衰することが知られてい る(4)ので、その指数関数変化の指数の絶対値を 減衰評価の指標とした(以降、この指標を減衰 係数と呼ぶ)。減衰係数は1周期目と2周期目 の絶対値圧力変化の平均値から求めた。まず, 漏水がない場合において数値シミュレーショ ンと実測値の圧力変動が合致するようにキャ リブレーションを行った(図3)。その結果,二 つの圧力変動の 2 周期目までの RMSE が 1.20 mとなった。このキャリブレーションした数値 シミュレーションを用いて減衰係数と漏水位 置との関係を求めた(図4)。図4の縦軸は漏水 がある場合の減衰係数から漏水がない場合の 減衰係数を引いた漏水による減衰係数 RL, 横軸 は上流水槽からの漏水位置を管の全長で無次 元化した無次元漏水位置 xL\*で表している。漏水 による減衰係数 RL が実測の RL = 0.1191 となる 無次元漏水位置 x<sub>L</sub>\*を図 4 から読み取ったとこ ろ,  $x_L^* = 0.980$ となり実際の漏水位置  $x_L^* = 0.996$ との誤差は管の全長に対して1.6%となった。以 上から, 圧力変動を用いた漏水検知法によって, 現場管路の模擬漏水が 2%以下の精度で検知で

きることが明らかになった。

#### 4. おわりに

現場管路において漏水による管内圧力変動 の減衰の違いから漏水位置を推定できること が確認できた。本手法は漏水がない場合の圧力 変動を数値シミュレーションで再現する必要 があり,より正確な再現が漏水位置の推定精度 の向上につながる。今後,漏水位置や漏水量を 変化させて本手法の追加の検証を行う必要が あると考えられる。



- (1) 農村振興局(2017): 農業用水利施設におけるストックマネジメントの取組について
- (2) Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., & Massari, C. (2011). Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems. Journal of Hydroinformatics, 13(3), pp. 334–345.
- (3) Y. ASADA, M. KIMURA, I. AZECHI, T. IIDA, & N. KUBO (2019). Leak detection by monitoring pressure to preserve integrity of agricultural pipe. Paddy and Water Environment, 17(3), pp. 351-358.
- (4) 浅田洋平,木村匡臣,安瀬地一作,飯田俊彰,久保成隆(2019): 管水路内のエネルギー減衰を利用した漏 水検知法の適用性検討 土木学会論文集 B1(水工学),75(2),I 799-I 804.

#### 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

Use of Water-Hammer Phenomena for Nondestructive and Noncontact Detection of Stress Field in Model Pipeline

〇鈴木哲也\*·斎藤真歩\*\*·浅田洋平\*\*\*·木村匡臣\*\*\*\*·安瀬地一作\*\*\*\*\*

OTetsuya Suzuki, Maho Saito, Yohei Asada, Masaomi Kimura and Issaku Azechi

#### 1. はじめに

パイプラインは水撃圧に代表される非定 常流況過程において管軸方向と周方向に応 力場の影響を受けて変形する.その理論解は, 周方向が軸方向と比べ2倍の変形量を有する 事が確認されている<sup>1)</sup>.本研究では,欠損を 施したモデルパイプラインを対象に,水撃圧 により均一応力場を形成し,3次元画像解析 による管体変形挙動の同定を試みた.

#### 2. 実験・解析方法

実験対象施設は管路延長 900.43 m, 内径 24.2 mm, 外径 27.2 mm, 管種はステンレス鋼 (SUS304) である. 下流から 24.43 m 上流に き裂を長さ 50 mm のスリットにより模した モデル管体を配置した. 下流端には電磁弁が 取り付けられ、 弁の閉塞は急閉塞の条件が成 立する.実験は下流末端弁の閉塞により圧力 波を発生させ,モデル管体に対し可視画像計 測を行った. スリット深さ条件を 0.5 mm, 1.0 mm およびスリットなしの3条件,最大水圧 を 0.52 MPa, 0.67 MPa および 0.85 MPa の 3 条件とし Case 1 から Case 9 と設定した.ス テレオ撮影で得た画像に対し3次元画像解析 を行い、管体表面の変形量を解析的に求めた. 解析条件はサブセット長 51×51 pixel および ステップサイズ 5 pixel とした.

#### 結果および考察

#### 3.1 内圧を受ける管の応力と変形

パイプラインに内圧が作用した時の応力

を求める.モデルパイプラインを両端閉鎖 の厚肉円筒と仮定し,パイプライン表面の 軸方向応力を式(1)に,周方向応力を式 (2)に示す.

$$\sigma_z = \{a^2/(b^2 - a^2)\}p$$
 (1)

$$\sigma_{\theta} = \{a^2/(b^2 - a^2)\}2p$$
 (2)

ここで σ<sub>z</sub>:軸方向応力 (N/mm<sup>2</sup>), σ<sub>θ</sub>:周方向 応力 (N/mm<sup>2</sup>), p:内圧 (MPa), a:内半径 (mm) および b:外半径 (mm) である.式 (1) 式 (2) から周方向応力が軸方向応力よ り2倍の値をとる.水圧と画像解析から得た 管の周方向変位と軸方向変位の時系列デー タを図-1 に示す.同図より理論値と実測値と の一致が確認された.軸方向変位は水圧の周 期とほぼ一致した.周方向変位は各種振動要 素が混在していることが確認された.

#### 3.2 管体振動の影響評価

実験において管体振動が確認され,画像解 析に影響を与えた.画像解析で確認される変 位の原因は水圧による管の変形とパイプラ インの拘束条件による管体振動の2種類であ る.これらを,高速フーリエ変換(以後FFT と記す)を用いて分類を試みた.パイプライ ン構造から,両端支持で中心に集中荷重を受 けたはりと仮定し,固有振動数を求めた(式 (3),式(4)).

$$f_1 = (\pi/2l^2)\sqrt{EI/\rho s} \tag{3}$$

$$f_p = f_1 / \sqrt{1 + B(P/W)}$$
 (4)

\*新潟大学自然科学系(農学部) Faculty of Agriculture, Niigata University \*\*山形県庁(元新潟大学農学部) Yamagata Prefectural Government (Faculty of Agriculture, Niigata University) \*\*\*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 \*\*\*\*近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, KINDAI University \*\*\*\*\*農研機構農業工学研究部門 National institute for Rural Engineering, NARO キーワード:パイプライン,非定常流況,画像解析,非破壊検査,管材応力 ここで、*f*<sub>1</sub>:固有振動数(Hz)、*f*<sub>p</sub>:集中荷重
 を受けた固有振動数(Hz)、E:縦弾性係数
 (N/mm<sup>2</sup>)、I:断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)、

*l*:区間長 (mm), *ρ*:単位長さあたりの質量

(kg/mm), S:断面積(mm<sup>2</sup>), B:集中荷重 係数, W:区間パイプライン質量(kg)およ びP:集中荷重(kg)である.モデルパイプ ラインの固有振動数は4.47 Hzである.水撃 圧の周波数を FFT により求めた.水撃圧の FFT の結果を図-2 に示す.図-2 より0.3 Hz 帯に高い振幅値が確認された.画像解析で求 めた変位データに対して FFT を行った結果 を図-3 に示す.結果より水撃圧由来の周波数 帯と管体振動由来の周波数帯に高い振幅値 が確認された.

#### 3.3 破壊力学指標による応力集中評価

水撃圧発生時のスリット近傍における応 力分布の理論値と実測値を図-4に示す.理論 値は計測水圧を用いて式(5)式(6)より求 めた.

$$\sigma_0 \sqrt{\pi a} = K \tag{5}$$

$$\sigma_{\theta} = K / \sqrt{2\pi r} \tag{6}$$

ここで、 $\sigma_{\theta}$ :周方向応力 (N/m<sup>2</sup>)、K:応力拡 大係数 (Pa· $\sqrt{m}$ )、 $\sigma_{0}$ :負荷応力 (N/m<sup>2</sup>)、 a:き裂長さ(m),r:き裂端部からの距離(m) である.実測値は画像解析で求めた周方向ひ ずみに対し、管体振動である 4.47 Hz 帯以上 にローパスフィルター処理を行った周方向 ひずみを用い算出した.その結果、スリット 近傍 4 mm 付近までで応力集中が確認できた. 4. おわりに

3次元画像解析を援用し、モデルパイプラ インの変形挙動を評価した.その結果、周 方向変位は軸方向変位と比べ2倍の値をと り、理論値との一致が確認された.画像解 析より得た応力値が理論値と一致し、き裂 端部での応力集中が確認され、管体表面に 発生する応力集中から損傷を同定できる可 能性が示唆された.



#### 参考文献

 Reynold King Watkins and Loren Runar Anderson : Structural Mechanics of Buried Pipes, 19 Stress Analysis, CRC Press, pp. 239-268, 2000.

## 公益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:〒921-8836 石川県野々市市末松1-308 石川県立大学生物資源環境学部環境科学科気付 応用水理研究部会事務局(部会長:一恩 英二)