

令和3年度応用水理研究部会 講演集



令和3年12月11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3年度応用水理研究部会講演会は、令和3年12月11日8時30分の開会あいさつ、8時35分から12時5分までの研究発表会、13時から16時10分までの特別講演、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)

12月11日（土）開場8:00～、開会あいさつ8:30～、研究発表会8:35～12:05、特別講演13:00～16:10

<https://zoom.us/j/99972725571?pwd=d0E1OF1xNHBTcTkxVkNBK0tMdnVYZz09>

ミーティングID: 999 7272 5571

パスコード: 5aRhL4

12月11日（土）開場16:00～、代表幹事会16:15～

<https://zoom.us/j/94863980131?pwd=Ti9OdGM3YnJQSkdZZjJFUDZBWU5KZz09>

ミーティングID: 948 6398 0131

パスコード: qCiJt5

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。
4. 大会では、開会・閉会のあいさつをされる方、講演者、座長以外の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。
6. 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

1. 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。
3. 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

1. 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。
2. 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）
4. 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、10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）

12月10日（金）13:00～16:00

<https://zoom.us/j/97428702530?pwd=MTNSbUxwam5wb01qQWxXaWdndVZwUT09>

ミーティングID: 974 2870 2530

パスコード: uW91UC

令和3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
8:30	開会挨拶	一恩英二		
	第1セッション	座長：泉智揮		
8:35	発表課題1	○吉田優理	流れ解析を用いた可搬魚道の適切な設置箇所の検討	1
9:00	発表課題2	○佐藤颯凌	微小な角柱群で囲まれた角柱を過ぎる流れの数値計算	3
9:25	発表課題3	○竹内公基	AquaCropを用いたアッサム茶園における灌漑の最適化	10
9:50	発表課題4	○山口真広	非整数階微積分学を利用した土壌水分移動のモデル化	22
10:15	休憩:10分			
	第2セッション	座長：長野峻介		
10:25	発表課題5	○藤山宗	末端用水路における水位調整施設としての複合セキの適用性に関する実験的研究	27
10:50	発表課題6	○泉智揮	Regularization method to estimate parameters in a water balance model for an infiltration pit	32
11:15	発表課題7	○羽田野袈裟義	スルースゲートからの潜り流出のゲート上・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	34
11:40	発表課題8	○稲垣仁根	ヘーゼン・ウィリアムズ式の一般化と流速係数の再評価	39
12:05	休憩:55分			
	特別講演	座長：一恩英二		
13:00	講演1	○中村和正	北海道をフィールドとした研究を振り返る	48
14:00	休憩:5分			
14:05	講演2	○玉井信行	辰巳用水の逆サイフォン送水量から見た建設目的への一考察	55
15:05	休憩:5分			
15:10	講演3	○宇波耕一	粘解性の概念を用いた一次元定常開水路流れに関する研究の梗概	63
16:10	閉会挨拶	一恩英二		
16:15	代表幹事会			

流れ解析を用いた可搬魚道の適切な設置箇所の検討

Investigation of appropriate site for arranging portable fishway by flow analysis

○吉田優理*・前田滋哉*・高橋直己**

○Yuri Yoshida, Shigeya Maeda, and Naoki Takahashi

1. はじめに

農村地域における魚類生息場の保全には、水系ネットワークの分断を解消し、下流水域から水路や水田等の産卵場への魚類遡上を促すことが重要である。魚道は遡上障害を緩和する手段の一つであり、多くの既往研究がある。しかし、河川の落差部に恒久的に設置されてきたコンクリート製魚道は、排水性が重要な農業用排水路への導入が難しい。高橋ら(2021)¹⁾は、小規模・安価であり、設置や取り外しが容易な可搬魚道システムを提案し、農業用排水路に適用した。また、茨城県の農業用排水路の急傾斜部に可搬魚道が導入され、魚類遡上状況の調査、可搬魚道内流れの数値計算^{2,3)}が行われてきた。本研究では、同水路を対象に、排水路と可搬魚道を一体的な解析領域とした流れの数値計算をすることで可搬魚道の適切な設置箇所を分析する。

2. 方法

茨城県美浦村興津地区の高橋川に接続する農業用排水路のうち、急傾斜部(長さ 0.685 m, 勾配 22.6°)を含む 12.685 m の区間を計算対象とした(図 1)。2020 年 10 月 21 日に実施した横断測量結果を基に、路床高を推定した。2021 年 6 月 10 日には、可搬魚道(図 2)を水路流れ方向に 7° の勾配で急傾斜部に設置し、排水路と魚道内の流速と水深を観測した。魚道上流端に網を取り付け、当日 10:20 ~ 12:20 には急傾斜部の左岸側に、13:01~14:19 に右岸側に可搬魚道を設置し、採捕魚の標準体長を計測した。

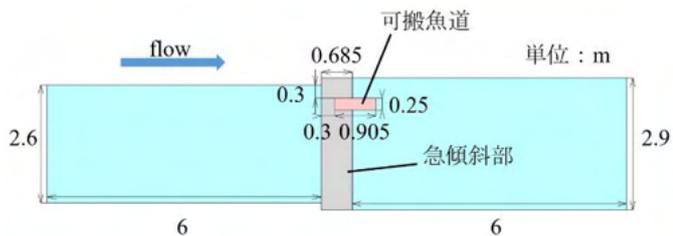


図 1 排水路における急傾斜部と可搬魚道(平面図)

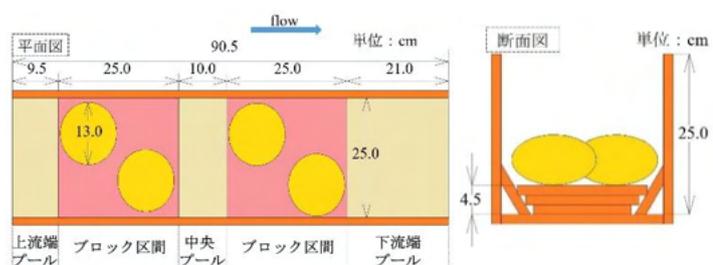


図 2 可搬魚道の平面図と立面図

平面 2 次元流れ解析モデル Nays2DH (iRIC)を用い、図 1 のような可搬魚道を左岸側に設置した排水路流れを計算した。また、魚道を右岸寄りに設置した場合と設置しない場合の流れ計算も行った。2020 年 10 月 21 日、2021 年 6 月 10 日の観測結果を用いてモデルを検証した。その水理データを基に、上流端流量 0.14 m³/s, 下流端水深 0.143 m を与え、300 秒分流れを計算した。

3. 結果と考察

2021 年 6 月 10 日の現地調査では、可搬魚道を左岸側に設置した場合、体長 1.9~2.2cm(平均 2.0cm, 標準偏差 0.1cm)のトウヨシノボリ 20 匹を、右岸側に設置した場合は体長 1.7~3.7cm(平均 2.1cm, 標準偏差 0.3cm)のトウヨシノボリ 48 匹を採捕し、魚類が可搬魚道を遡上していることを確認した。

可搬魚道の設置無(Case 1), 可搬魚道を左岸側に設置(Case 2), 右岸側に設置したとき(Case 3)の流

*茨城大学 Ibaraki University, **香川高等専門学校 National Institute of Technology, Kagawa College 魚道, 数値計算

れ計算による流速分布を図 3 に示す。

Case 1 における急傾斜部の流速は 1.127～1.468 m/s（観測値は 1.179～1.714m/s）であるのに対し、魚道内流速は Case 2 で最大 0.720m/s、Case 3 で最大 0.506m/s となり、流速が半分以下になると考えられる。また、魚道を設置した場合は魚道の左右と下流側に緩流域を形成することがわかる。魚道内で流速が大きいブロック区間では、右岸側に設置した Case 3 でより流速が小さく、ブロック区間の流速は 0.224～0.506m/s、プール部分の流速は 0.034～0.125m/s である。

対象地では須藤ら(2021)²⁾によってメダカの遡上が確認されている。清水ら(2018)⁴⁾によるとミナミメダカの 60 分間臨界遊泳速度は 0.05～0.19m/s とされている。また、泉ら(2018)⁵⁾によると体長 2 cm 台のメダカの突進遊泳速度は 0.33～0.58m/s である。これら流れ計算結果と比較する。魚道内ブロック区間では図 3 のように、ブロックの周囲及び水際近くで流速が大きい。また、ブロック区間の流速はメダカの突進遊泳速度未満である。したがって小型魚類は、魚道内の比較的大きい流速を避けて遡上できると考えられる。

水深については、魚類が遡上するためには体高の 2 倍の長さが必要とされている。採捕したトウヨシノボリの体高は約 0.4cm であり、泉ら(2018)⁵⁾ の実験で使用された体長 2cm 台のミナミメダカの体高は約 0.5cm であることから、遡上には 1cm 以上が必要である。魚道内の計算最小水深は Case 2 で 2.6cm、Case 3 で 3.6cm であるため、十分に遡上可能な水深が生じると考えられる。

4. おわりに

農業用排水路の急傾斜部に可搬魚道を設置した場合の流れ解析を行った。魚道設置により、魚類の遡上障害が緩和されること、右岸側に設置した場合が比較的有效であることがわかった。今後は現地が多様な流量を想定し、より遡上に適した魚道設置位置や設置勾配を検討する必要がある。

引用文献

- 1) 高橋直己・三澤有輝・本津見桜・柳川竜一・多川正・中田和義(2021): 農業水路に適用可能な可搬魚道システムの提案, 農業農村工学会論文集, 312, I_29-I_35. 2) 須藤真弥(2020): 水路急傾斜部に設置した可搬魚道における魚類遡上の調査と流れの解析, 茨城大学卒業論文. 3) 吉成香貫花・須藤真弥・前田滋哉・高橋直己(2021): 農業用排水路の急傾斜部に設置した可搬魚道における流れの数値計算, 応用水文, 33, 96-102. 4) 清水秀成・東信行・丸居篤・矢田谷健一(2018): ミナミメダカの臨界速度に関する実験, 農業農村工学会論文集, 302, II_11-II_18. 5) 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, 306, II_1-II_7

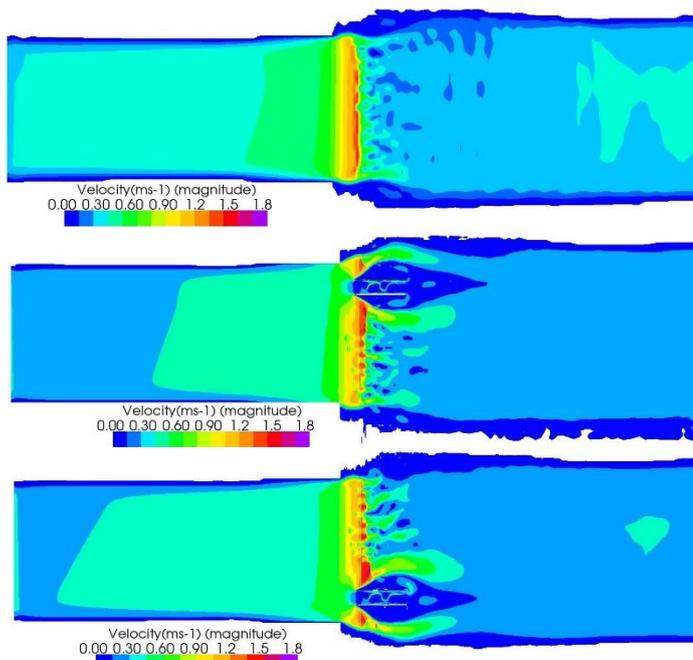


図 3 計算流速分布(上から Case 1, 2, 3)

微小な角柱群で囲まれた角柱を過ぎる流れの数値計算

Numerical Simulations of flow past a square cylinder surrounded by miniscule cylinders

佐藤颯凌*

藤原正幸†

1 はじめに

角柱を過ぎる流れは流体力学の基本的な問題として長年研究されてきた。レイノルズ数の増加に伴い、流れが定常流からカルマン渦を伴う周期流へと発展し、最終的には乱流に遷移することが知られている。この遷移の過程では、レイノルズ数の増加に伴い、後流が1つの周波数 f_1 に支配される周期流、主要な2つの周波数 f_1, f_2 に支配される準周期流の振る舞いを示すことが Saha et al. (2000) によって明らかにされた。特に、準周期流においては、周波数比 f_1/f_2 が一定となる frequency-locking の状態となるレイノルズ数が 325 ~ 375 であることが示された。近年では、多孔質体流れの研究が盛んに行われるようになり、角柱を微小な角柱の集まりとして表現した際の流体現象が注目を集めている。例えば、Tang et al. (2009) は固相率 ϕ を 0.007585 から 0.661 の間で変化させて、渦の剥離が起こるレイノルズ数を 40~45 と推定し単一角柱の場合とほぼ変わらないことを示した。また、Fang et al. (2021) は2種類の多孔質体の配置で高レイノルズ数流れにおける固相率 ϕ の影響を調べた。一方で、工学的な観点から、抗力係数の低減を目的として、角柱周辺に多孔質体を配置することで、渦の相互作用が弱まり、カルマン渦が比較的大きいレイノルズ数でも維持されることが分かっている (Bruneau et al., 2004)。

本研究では、微小な角柱群で囲まれた角柱を過ぎる2次元流れにおいて、3つの微小角柱群の厚さと固相率 ϕ の組み合わせにおいて、レイノルズ数を変化させたときの抗力係数及び角柱後流に及ぼす影響について数値計算により議論する。

2 数値計算法

2.1 支配方程式

非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式を有限体積法の枠組みで離散化し、フラクショナルステップ法で解く。空間項は2次精度の中心法で近似し、時間積分は3次の Runge-Kutta 法を用いる。支配方程式は流入速度 U_{in} 、角柱領域の大きさ D で無次元化した。時間刻み幅は $\Delta t = 0.01D/U_{in}$ である。メッシュサイズについては次節で述べる。また、計算コードは Message Passing Interface (MPI) で並列化し、京都大学スーパーコンピュータ camphor2 を用いた。

* 京都大学農学部

† 京都大学大学院農学研究科

2.2 計算領域及び計算条件

図1に本研究の計算領域を示す. 計算領域は $36D \times 26D$ である. 大きさ D の角柱領域の中に, 多孔質体領域と大きさ d の固体領域を作製した. Navier-Stokes 方程式は角柱領域の大きさ D により無次元化されていることに注意されたい. また, Re_D と Re_d の間には, $Re_d = Re_D \times d/D$ の関係がある. d/D , 多孔質体領域の固相率 ϕ , Carman-Kozeny 式に基づく Darcy 数 Da は Table1 の通りである. 微小角柱群を植生とみなすこともでき, マングローブでは $\phi \sim 0.45$, 海藻が繁茂する海域では $0.01 \leq \phi \leq 0.1$ であるため, 本研究での固相率 ϕ は現実的な値である (Mazda et al. 1997, Furukawa et al. 1997, Luhar et al. 1997, Nepf 2012). 角柱 (固体領域) 周辺に多孔質体を配置する際の流れの数値計算として, 代表的なのが, Brinkmann-Navier Stokes 方程式の数値計算もしくは Penalization 法による計算である (Bruneau et al. 2004, Naito et al. 2012). これらの方法は支配方程式に浸透率 K が含まれており, 流体領域, 多孔質体領域および固体領域において浸透率 K を指定することで固体表面での滑りなし条件を指定せずとも計算できるという手法である. 対して本研究では, 計算メッシュに合わせて多孔質体を作製し, その表面において滑りなし条件を適用することで境界条件のモデル化を避けている. 流入境界条件として, 一様流 $U = (U_{in}, 0)$ を与え, 流出境界は対流境界条件で与えた. 対流速度は流出境界における平均速度である. 計算領域上下端はすべり境界とした.

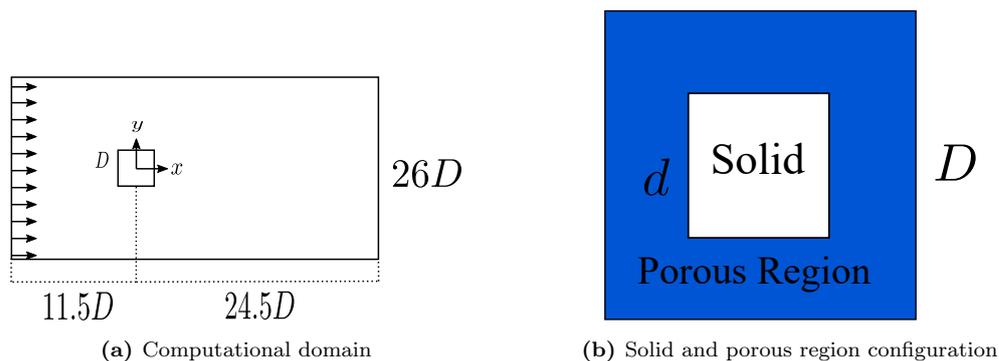


Fig.1: Sketch of the computational domain and a square cylinder domain

Table 1: 計算条件

	d/D	固相率 ϕ	Da
case1	0.5	0.25	2.11×10^{-4}
case2	0.5	0.11	1.56×10^{-2}
case3	0.75	0.12	1.48×10^{-3}

従来の角柱を過ぎる流れの数値計算では, 角柱周辺で密な格子が用いられる. 本研究では, 角柱周辺に同じ大きさの微小角柱を計算メッシュに合わせて配置するため, 等間隔格子を用いるほうが都合が良い. したがって, 角柱の1辺を構成する計算メッシュ数を変化させ, 既存研究 (Bai and Alam 2018, Sharma and Eswaran 2004) と比較することで必要な計算メッシュ数を算出した. $Re_D = 100$ において, $D = 40\Delta x$ のとき, 抗力係数 $\overline{C_D}$, 揚力係数の RMS 値 C'_L , ストローハル数 St について, $\overline{C_D} = 1.48$, $C'_L = 0.175$ 及び $St = 0.14$ が得ら

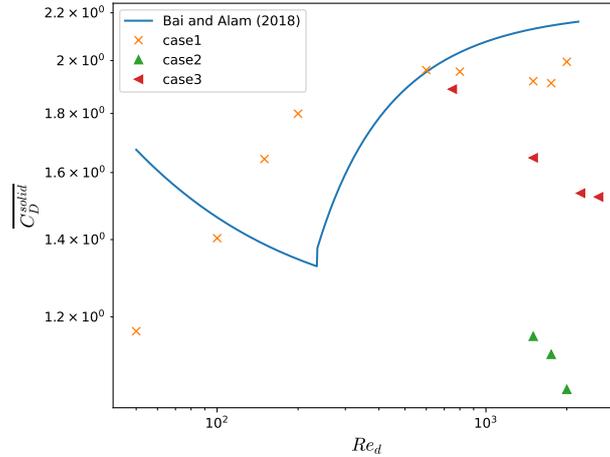


Fig.2: Relationship between Re_d and $\overline{C_D^{solid}}$.

れ、既存研究と良い一致を得たため、本研究では $D = 40\Delta x$ を主に採用する。総計算メッシュは 1441×1041 である。ただし、case2 においては、 $D = 36\Delta x$ とし、この際の総計算メッシュは 1297×937 である。微小角柱の大きさは Δx である。微小角柱を多くの計算メッシュで構成するほど精度は向上するが、Fang et al. (2021) の計算では、格子ボルツマン法において微小角柱をメッシュ 1 つで構成しても、固相率 ϕ に応じて流れ場を捉えることが出来ている。さらに、直交座標系で複雑境界を扱える埋め込み境界法において、Monti et al. (2019) は、円柱の大部分を 1 つの直行格子に埋め込んでも、平均流の計算精度がほとんど変わらないことを示している。したがって、本研究で採用する微小角柱の解像度は計算結果に著しく影響を及ぼすものではない。

3 結果と考察

3.1 微小角柱群による角柱（固体領域）の抗力係数への影響

時間平均した角柱の抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ は Bruneau et al. (2004) が指摘したように、角柱周辺に多孔質体を配置することで減少する。Fig.2 に得られた抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ と Bai and Alam (2018) による単一角柱を過ぎる流れでのレイノルズ数 Re_d と角柱の抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ の関係を示す。 Re_D を Re_d に変換して比較していることに注意されたい。ほとんどのレイノルズ数 Re_d において、角柱周辺を微小角柱群で囲んだ際の抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ が単一角柱のそれよりも減少することが分かり、流れの制御の点から角柱周辺に多孔質体を配置することの有効性が見て取れる。また、レイノルズ数 Re_d の増加に伴い、case1 では抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ が増加後に横ばい、case2, case3 では減少している。後述するが、これらの Re_d において case1 は準周期流であり、case2, case3 はカオスに遷移しつつある状態であり、抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ は後流がカオスに遷移するにつれて減少する可能性が示唆される。

3.2 後流のダイナミクス

角柱領域後流の $(x, y) = (3, 0)$ における y 方向の速度 v の時系列データについて周波数解析を行い、それぞれの計算条件において後流の振る舞いを調べる。サンプル数は 2^{15} 個である。なお、以下に示す結果は $(x, y) = (2, 0)$ での時系列データでも同様のものが得られた。Fig.3 に case1 における $Re_D = 400, 3500$ の結

果を示す. いずれも 2 つの周波数 f_1, f_2 が後流を特徴づけており, 準周期流であるが, $Re_D = 3500$ の f_1, f_2 は $Re_D = 400$ の f_1, f_2 よりもわずかに大きい値となっている. Fig.4 に case1 の $100 \leq Re_D \leq 3500$ における周波数比 f_1/f_2 を示す. $f_1/f_2 \sim 0.33$ であり, frequency-locking の状態であることが分かる. 単一角柱を過ぎる流れでは, 準周期流が frequency-locking となるレイノルズ数が $325 < Re_D < 375$ とされていることと比べると, 角柱周辺が微小角柱群 (多孔質体) で囲まれていることにより後流のダイナミクスが大きく影響を受けることを示唆する (Saha et al. 2000). また, $f_2 > f_1$ であるのは, 微小角柱の大きさに基づくレイノルズ数が Re_d よりも小さく, ストローハル数がレイノルズ数と反比例の関係にあることに基づくと考えられる. case1 に対して, case2 では後流が異なる振る舞いを示す. Fig.5 は case2 における $Re_D = 3500$ の結果である. case2 は case1 よりも固体の周囲を覆う微小な角柱が少ないために, Fig.3(b) に示した case1 の $Re_D = 3500$ とは異なり, 後流はカオスの振る舞いを示すことが分かる. Fig.5 に $Re_D = 3500$ における case1, case2 の渦度場を示す. 共に流れ場が乱されていることが確認されるが, case1 においては, 渦が周期的に放出されていると言え, 周期性が確認できる. また, case2 の $Re_D = 3000$ では, 周波数解析及び渦度場の可視化からカオスであったため, 遷移レイノルズ数は 3000 未満であると考えられる. case3 については $Re_D = 1000, 2000$ の結果から, いずれも準周期的であり, $Re_D = 3000$ でカオスの振る舞いを示したため, 遷移レイノルズ数は 2000 から 3000 の間であると考えられる.

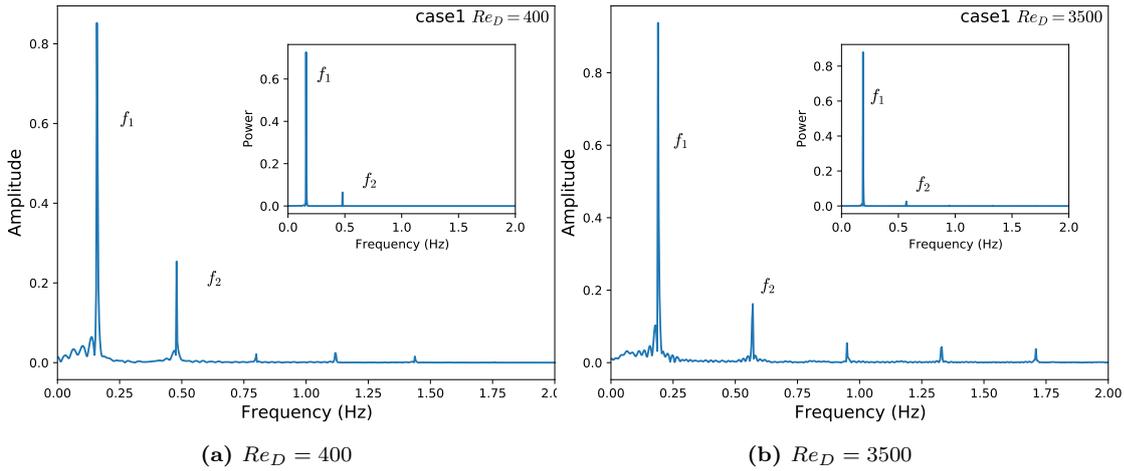


Fig.3: Transverse velocity spectra of case1

周波数解析に加えて, 後流が準周期的であるかカオスであるか区別するために, 同様の時系列データに対して自己相関関数 $A(T)$ を計算する. 自己相関関数 $A(T)$ は次のように定義される.

$$A(T) = \frac{\overline{v(t)v(t+T)}}{\overline{v(t)^2}} \quad (1)$$

$$\overline{v(t)v(t+T)} = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} v(t)v(t+T)dt \quad (2)$$

$|A(T)|$ が 0 に近いほどカオスの振る舞いを示し, 周期的な流れ場では $A(T)$ は周期関数の振る舞いをするとされる. Fig.7 に case1, case2 における $Re_D = 3500$ の自己相関関数 $A(T)$ を示す. 周波数解析及び渦度の可視化から準周期流と判断された case1 (Fig.7(a)) では自己相関関数 $A(T)$ が周期的であり, 準周期流であると言

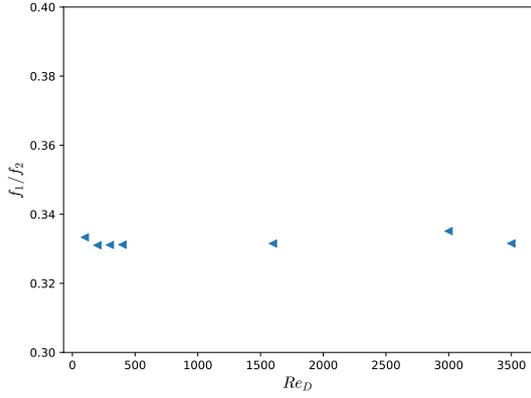


Fig.4: f_1/f_2 at $100 \leq Re_D \leq 3500$ in case1

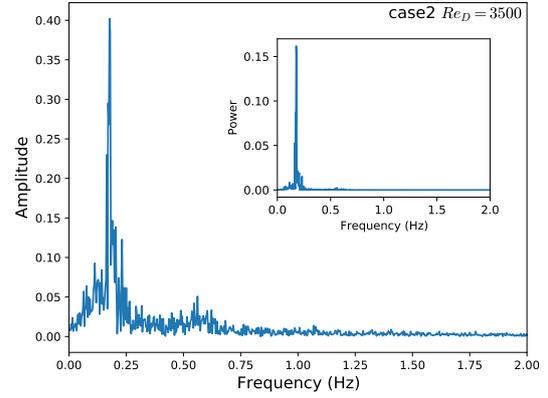
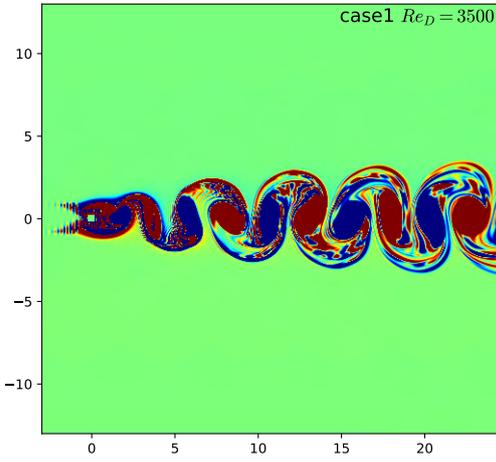
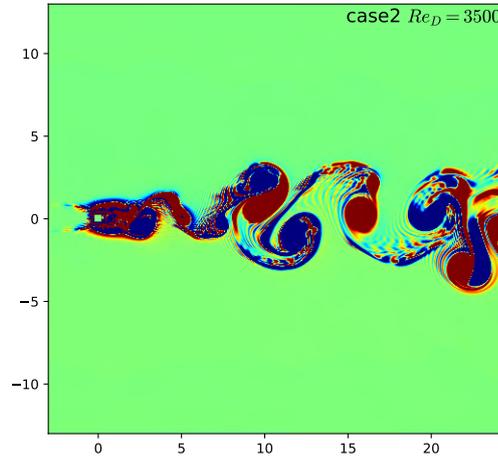


Fig.5: Transverse velocity spectra of case2

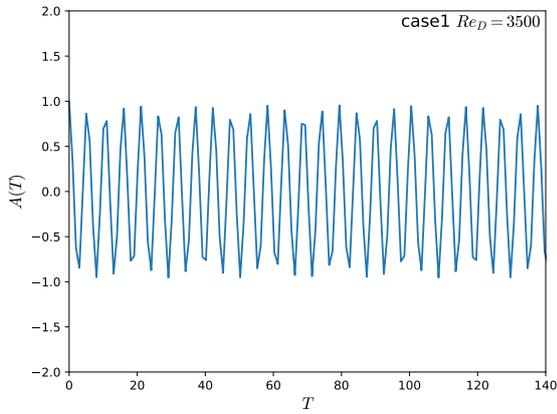


(a) case1

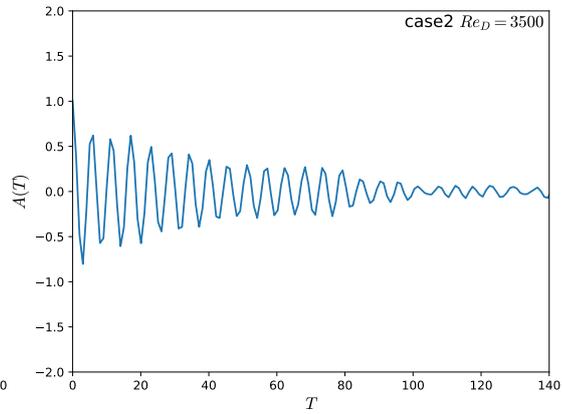


(b) case2

Fig.6: Vorticity field at $Re_D = 3500$



(a) case1



(b) case2

Fig.7: Autocorrelation function $A(T)$ of transverse velocity on $(x, y) = (3, 0)$ at $Re_D = 3500$

える。対して、カオスと判断された case2 (Fig.7(b)) では、自己相関関数 $A(T)$ が T の増加とともに 0 に近づいており、周波数解析及び渦度の可視化の結果を支持するものとなっている。

3.3 $C_L - C_D$ 図による後流の分類

本節では、固体の揚力係数 C_L^{solid} および固体の抗力係数 C_D^{solid} の scatter-plot により後流の分類を試みる。Fang et al. (2021) は、このプロットにより $Re_D = 4000$ において微小角柱群で作製した大きさ D の角柱領域を過ぎる流れが乱流であると判断している。以下、 C_L^{solid} は C_L 、 C_D^{solid} は C_D として表記する。Fig.8 に case1, case2 における $Re_D = 3500$ の $C_L - C_D$ 図を示す。ただし、 $t \leq 100D/U_{in}$ の値は除いてある。

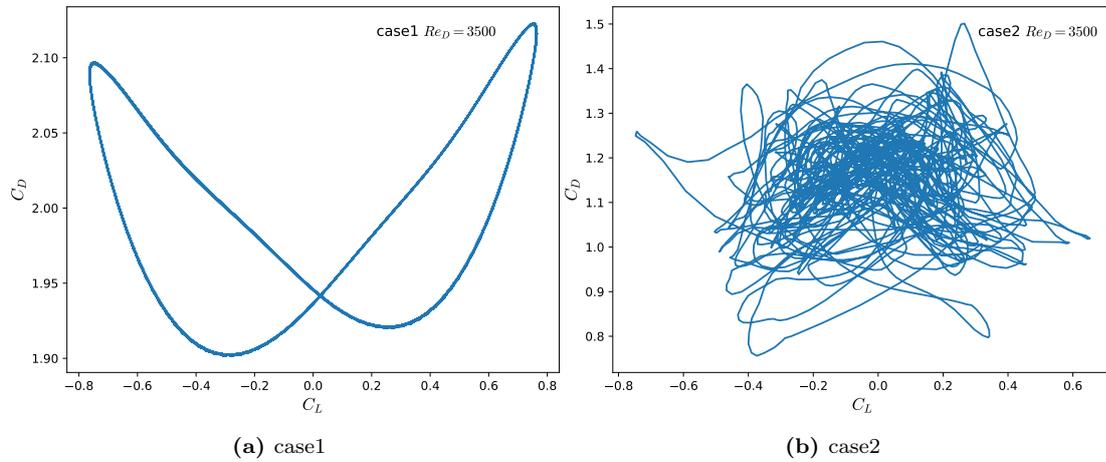


Fig.8: $C_L - C_D$ plot at $Re_D = 3500$

準周期流である case1 の $C_L - C_D$ 図である Fig.8(a) は $C_L = 0$ に関して 2 つの閉じた領域が左右非対称に描かれており、準周期流であることを示すと同時に、カオスに近づきつつあることを示唆していると考えられる。なお、case1 の $Re = 400$ における $C_L - C_D$ 図は $C_L = 0$ に関してほぼ対称であった。 $Re_D = 100$ の単一角柱を過ぎる流れは周波数 f_1 による周期流であるが、同様の $C_L - C_D$ 図を描くと、閉領域は 1 つのみであった。このことから、 $C_L - C_D$ 図により後流の主要な周波数が何個あるか判断できる可能性があり、Saha et al. (2000) で y 方向の速度 v の周波数解析では判断が出来なかった 3 つの周波数 f_1, f_2, f_3 による準周期流が発生するレイノルズ数について見積もることができると考えられる。対して、Fig.8(b) は後流がカオスであるため、規則性は見られず乱雑であることから、 $C_L - C_D$ 図により、後流の分類が可能となる。

4 結論

本研究では、角柱周辺に微小角柱群を配置したときの抗力係数に与える影響及び、後流のダイナミクスについて議論した。角柱の周囲を微小角柱群で覆うことで、抗力係数 $\overline{C_D^{solid}}$ が従来の単一角柱のそれに比べて減少する場合が多数であることを確認した。また、後流がカオスに近づくにつれて、 $\overline{C_D^{solid}}$ が減少する可能性があることが分かった。後流のダイナミクスについては、広範なレイノルズ数において準周期流の様相を示し、かつ frequency-locking の状態であることを示した。加えて、 $C_L - C_D$ 図を描くことで、後流を特徴づける主要な周波数が何個あるか確認できることを示し、3 つの周波数 f_1, f_2, f_3 による準周期流が発生するレイノルズ数を見

積もれる可能性があることを示した。今後はそれぞれの計算条件において準周期流及びカオスとなる遷移レイノルズ数をさらに詳細に調べるとともに、最大有限時間リヤプノフ指数などの定量的な指標による議論を試みる。また、角柱を多孔質体で構成したときに確認される vortex suppression について Large Eddy Simulation により調べる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H03073 の助成を受けたものである。本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。

参考文献

- [1] A. K. Saha, K. Muralidhar, G. Biswas, Transition and Chaos in Two-Dimensional Flow Past A Square Cylinder, *J. Eng. Mech.* **126**, 523, 2000
- [2] A. Monti, M. Omidyeganeh, A. Pinelli, Large-eddy simulation of an open-channel flow bounded by a semi-dense rigid filamentous canopy : Scaling and flow structure, *Phys. Fluids* **31**, 065108, 2019
- [3] A. Sharma, V. Eswaran, Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime, *Numer. Heat Transfer, Part A*, **45**, 247, 2004
- [4] C. Bruneau, I. Mortazavi, Passive control of the flow around a square cylinder using porous media, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **46**, pp.415-433, 2004
- [5] H. Bai, Md. M. Alam, Dependence of square cylinder wake on Reynolds number, *Phys. Fluids* **30**, 015102, 2018
- [6] H. Naito, K. Fukagata, Numerical simulation of flow around a circular cylinder having porous surface, *Phys. Fluids* **24**, 117102, 2012
- [7] H. Nepf, Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **44**, pp.123-142. 2012
- [8] M. Luhar, S. Coutu, E. Infantes, S. Fox, H. Nepf, Wave induced velocities inside a model seagrass bed, *J. Geophys. Res.*, **115**, C12005, 2010
- [9] K. Furukawa, E. Wolanski, H. Mueller, Currents and sediment transport in mangrove forests, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **44**, pp.301-310, 1997
- [10] T. Tang, P. Yu, X. Shan, J. Li, S. Yu, On the transition behavior of laminar flow through and around a multi-cylinder array, *Phys. Fluids* **32**, 013601, 2020
- [11] Y. Fang, Z. Yang, Y. Ma, Q. Li, Z. Du, Study of Unsteady Flow Through and Around an Array of Isolated Square Cylinders, *J. Fluids Eng.* **143**(3), 2021
- [12] Y. Mazda, E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka, M. Magi, Drag forces due to vegetation in mangrove swamps, *Mangroves Salt Marshes*. **1**, pp.193-199, 1997

AquaCrop を用いたアッサム茶園における灌漑の最適化

京都大学大学院農学研究科 ○竹内公基

竹内潤一郎・藤原正幸

1. はじめに

南アジアに位置するインドは、茶の生産量において中国に次ぐ世界第2位(1,345千トン、2018年)^[1]に位置し、また紅茶においてはアッサム、ダージリン、ニルギリといった広く親しまれる品種の生産国として、世界最大の生産量を誇る^[2]。モンスーンの影響を強く受けるインドでは乾季の間、天水による農地への水供給が見込めないため、茶を含む作物の生育を支える灌漑の最適化は重要な課題となっている。

灌漑の最適化において、作物の水需要に対する過不足のいずれも問題視される。水供給が不足すれば作物は生育を阻害され、収益を損なうこととなる。一方で水供給が過剰である場合、直接的には根腐れなど作物の病気を引き起こす原因となり得る^[3]。また、施肥の肥料成分を溶脱することによる周辺地域の水質汚染や、灌漑量に伴ったエネルギーコストの増大、そして深刻化する水不足問題への打撃にもつながる^[4]。これらの事由から、本研究では環境及び経済に配慮し、効率的に収量を増加させることを目的として灌漑の最適化を目指す。

2. 調査対象

2.1 調査対象地

本研究はインドのアッサム州、都市テズプル近郊に位置する茶園(図1, 26°39'59"N, 92°27'55"E)をベースに行う。アッサム州は温帯夏雨気候であり、1年が雨季と乾季に大別される。

2.2 調査対象作物

本研究においては茶樹のうちアッサム種(*Camellia sinensis* var. *assamica*)を対象とする。茶樹はアッサム種と中国種(*var. sinensis*)に大別される。アッサム種はアッサム地方を原産とし、中国種と比較してより温暖な気候を好み、植物体はより大きく生長する。特にアッサム地方で栽培されるアッサム種は「アッサム」の銘柄と呼ばれミルクティーなどとして親しまれている。茶樹の栽培に際し、植物体の老化と樹高の伸長を抑えるため、おおよそ4年に1度大きく剪定する。

3. AquaCrop

AquaCrop^[5]は Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) により提供されている、図2に示すような水利用量に対して得られる作物の生長を算出するモデルである。最終的な作物の収穫量 Y は収穫指数 HI 、生物体量 B 、水生産性 WP 、蒸散量 Tr



図1 茶園と気象観測点

を用いて

$$Y = HI B \tag{1}$$

$$B = WP \sum Tr \tag{2}$$

と計算される。また、蒸散量 Tr は樹冠被覆率 CC と比例した作物係数 K_{CTr} に基準蒸発散量 ET_0 を乗じることで得られる。非ストレス環境における樹冠被覆率 CC は作物の生長段階に応じて変化の度合いが異なり、

$$CC = CC_0 e^{CGC t} \quad (CC \leq 0.5CC_X) \tag{3}$$

$$CC = CC_X - (CC_X - CC_0) e^{-CGC t} \quad (CC > 0.5CC_X) \tag{4}$$

と表される。ここで、 CGC は樹冠生長係数、 CC_0 は初期樹冠被覆率、 CC_X は最大樹冠被覆率である。これによって得られる曲線を最適状態の生育状態とし、ここに水分、施肥、塩類、温度それぞれによるストレス係数が乗じられ、設定された環境における作物の生育状態が算出される。

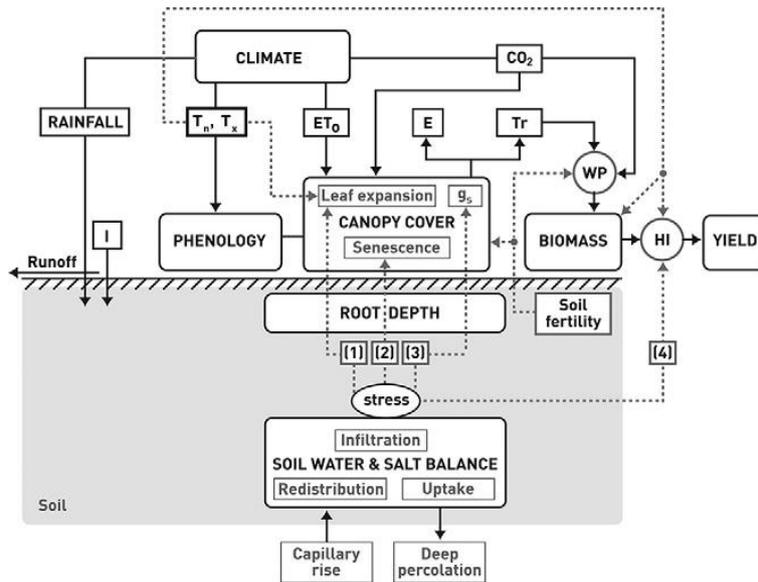


図 2 AquaCrop の主となるチャート [5]

4. 入力パラメータ

4.1 気象データ

AquaCrop に入力する気象データは、降水量、最低気温、最高気温、基準蒸発散量、二酸化炭素濃度である。この内、二酸化炭素濃度は AquaCrop 内にプリセットとして用意されているハワイのマウナロアでの測定値を用いる。降水量、気温、基準蒸発散量については調査対象地から 30km ほどの都市テズプルで 2009 年から 2018 年にかけて測定されたデータ (図 3) を入力する。ただし、2015 年 4 月 8 日から同月 28 日までの間に記録された気温がほぼ変化しておらず、該当期間前後と比較して明らかに異常であるため、この期間の気温データのみサイト “timeanddate”^[6] を利用して補完を行なった。

4.2 土壌パラメータ

調査対象地において茶園の土壌サンプルを採取し、粒径分布と透水係数を測定した。粒径分布から壤土であると判断し、Liao *et al.* (2014)^[7] の壤土における van Genuchten モデルパラメータを用いた水分保持曲線^[8]

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (5)$$

から、飽和容水量、圃場容水量、永久しおれ点を求めた。透水係数についてはサンプルで測定された値を用いた。デフォルト値を用いたパラメータを除く入力パラメータを表 1 に示す。

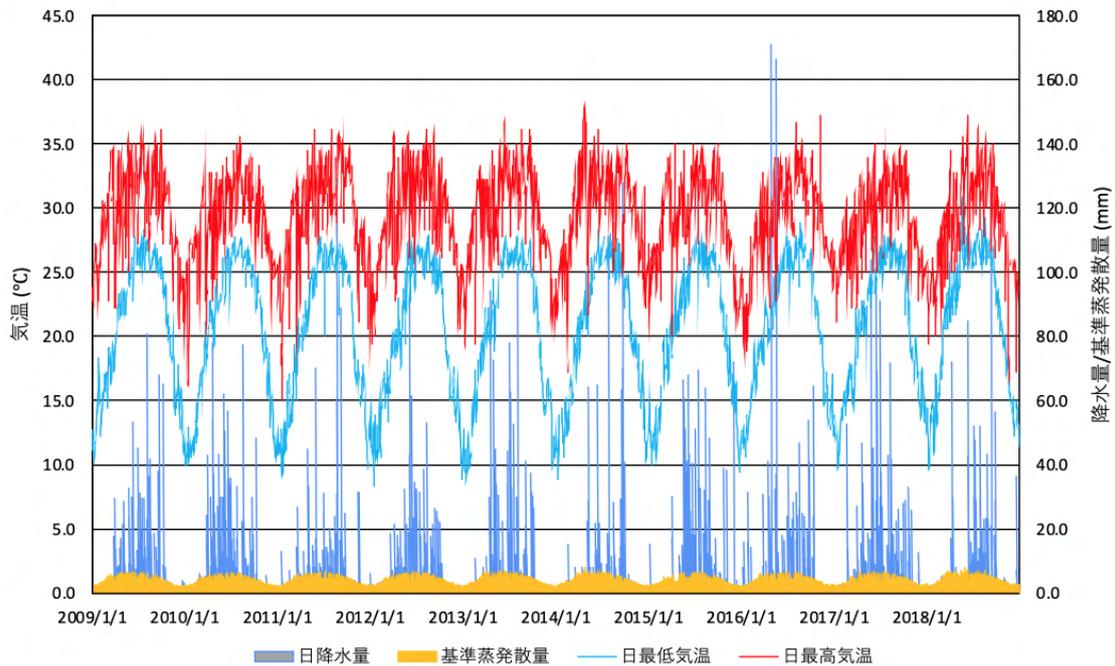


図3 テズプルの気象データ(2009-2018)

表1 入力した土壌パラメータ

土壌の層厚	土質	飽和含水率	圃場容水量	永久しおれ点	透水係数
4m	loam	34.1%	28.7%	24.8%	570.2mm/day

4.3 作物パラメータ

AquaCrop は主要穀物などいくつかの作物について参考となるパラメータを有しているが、茶樹のパラメータは有しておらず入力する必要がある。AquaCrop を用いた茶樹の調査がケニアで行われており^[9]、ケニアの気候が温暖でアッサム種に適した環境であること、ケニアで栽培される茶樹はアッサム種の流れを汲む^[9]ことから、ここで作成されたパラメータを本研究の作物パラメータに利用した (表 2)。4 年周期で行なわれる剪定を 1 月 1 日に設定し、4 年間の生育を評価した。尚、今回は土壌の肥沃度および塩類ストレスについてデータを入手していないため、負荷を与えない設定としている。

5. ケースと結果

現実的に考えられる灌漑計画としては、1) 定期定量灌漑：現在行われている灌漑パターンを参考にして、予め灌漑期間、頻度および灌漑ごとの水量を設定する方法、2) 補給灌漑：定めた灌漑パターンを基準に降雨の発生や一定期間の無降雨に応じて灌漑を削減・追加する方法、3) 不定期定量灌漑：土壌水分量を常に測定し、定めた値を下回った際に一定量の

表2 アッサム系茶樹の作物パラメータ^[9]

栽植密度	13,448/ha	生長時に必要な最低気温(T_{base})	8°C
初期樹冠被覆率(CC_{im})	25%	生長時に有効な上限気温(T_{upper})	30°C
最大樹冠被覆率(CC_x)	95%	蒸散に対する低温ストレス発生閾値(日平均気温 $T_{mean}-T_{base}$)	8°C day
樹冠生長係数(CGC)	0.7%/day	樹冠拡大に影響する水分不足上位閾値($P_{exp,lower}$)	0.10
周期	1,461 days	樹冠拡大に影響する水分不足下位閾値($P_{exp,upper}$)	0.40
最大根長(Z_x)	2m	樹冠拡大に対する水分ストレス係数の形状係数	3
最小根長(Z_n)	2m	気孔機能に対する水分不足閾値(P_{sto})	0.25
最大樹冠到達時の蒸散に関する作物係数($Kc_{T,x}$)	0.85	気孔機能に対する水分ストレス係数の形状係数	3
加齢による作物係数の減衰	-	樹冠老化に対する水分不足閾値(P_{sen})	0.60
基準蒸発散量及び二酸化炭素濃度に応じた水生 産性(WP*)	14 g/m ²	樹冠老化に対する水分ストレス係数の形状係数	3
基準収穫指数(HIo)	14%	無酸素状態閾値	5 vol %
基準収穫指数に到達するまでの期間	30%/4 years		

灌漑を行なう方法の3通りが考えられる。AquaCrop 上では土壌水分の不足が一定値に達するごとに設定した水分量まで回復させるシミュレーションを行うこともできるが、実地の灌漑において灌漑後の水分量を設定して灌漑を行なうことは困難である。また、測定機器や柔軟な灌漑運営が要求されるため、運営者は運営状況に応じて選択することが望ましい。

5.1 定期定量灌漑

現在、対象地の茶園では乾季に水不足を補うため、1ヶ月に50mmで1回の頻度で灌漑を行なっている。雨季乾季の区別については、村上(2020)^[4]をもとに1年のうち11月から3月までの150日を乾季、残り215日を雨季として、現在行われている50mm/30日のパターンで計算した結果を図4及び表3に示す。また、同じ総灌漑量で灌漑頻度を変更したパターンとして、25mm/15日の場合の結果を図5及び表4に、10mm/6日の場合の結果を図6及び表5に示す。ここで、 Tr は蒸散量、 CC は樹冠被覆率、 Dr は根域の水分枯渇量を表す。 $Dry\ yield$ は収量の乾燥質量、 B は地上部の乾燥質量、 B_{pot} は非ストレス環境における B の理想値であり、 $Ratio$ は B/B_{pot} を百分率で表したものである。 B_{pot} の変化は気温に関係する。この時、4年間の総灌漑量は1000mmである。 Dr の推移から、乾季中の水分が不足し、 CC の伸び悩みあるいは若干の減少が発生していることがわかる。

50mm/30日から25mm/15日では $Ratio$ の増加が見られるが、25mm/15日と10mm/6日では $Ratio$ の伸びが小さく、平均82%程度で頭打ちとなってしまっている。収量の向上を目指すにあたって現在の灌漑から頻度のみの変更では収量のこれ以上大きな向上は見込み難いと言える。また、根域水分の推移から、乾季の土壌水分の減少に灌漑による水供給が追いついていないことを示しており、これが茶樹の生育にストレスを与えていることが樹冠被覆率の推移にも表れており、絶対的に灌漑量が足りてないことがわかる。以降は、共通して $Ratio$ が最も高い2009年開始時と、最も低い2013年開始時について計算を行う。

表 3 定期定量 50mm/30 日

開始年	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dry yield(t/ha)	19.481	19.199	18.545	18.561	18.422	19.386	19.715
B(t/ha)	139.148	137.138	132.465	132.580	131.589	138.471	140.819
B _{pot} (t/ha)	168.191	169.046	169.768	170.556	171.573	172.288	172.954
Ratio	83%	81%	78%	78%	77%	80%	81%

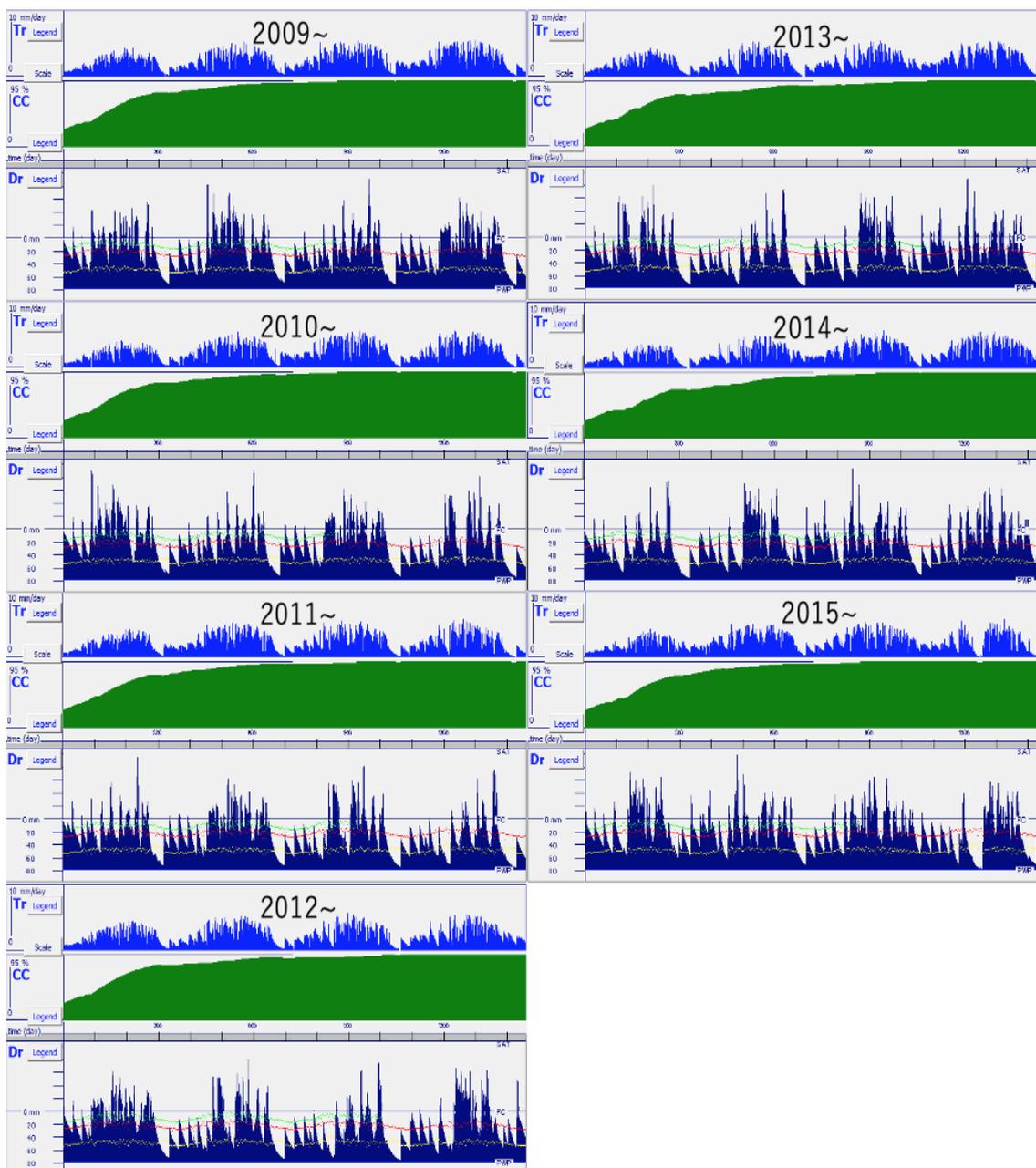


図 4 定期定量 50mm/30 日

表 4 定期定量 25mm/15 日

開始年	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dry yield(t/ha)	20.110	19.899	19.115	19.014	18.919	19.890	20.443
B(t/ha)	143.641	142.133	136.535	135.813	135.134	142.071	146.024
B _{pot} (t/ha)	168.191	169.046	169.768	170.556	171.573	172.288	172.954
Ratio	85%	84%	80%	80%	79%	82%	84%

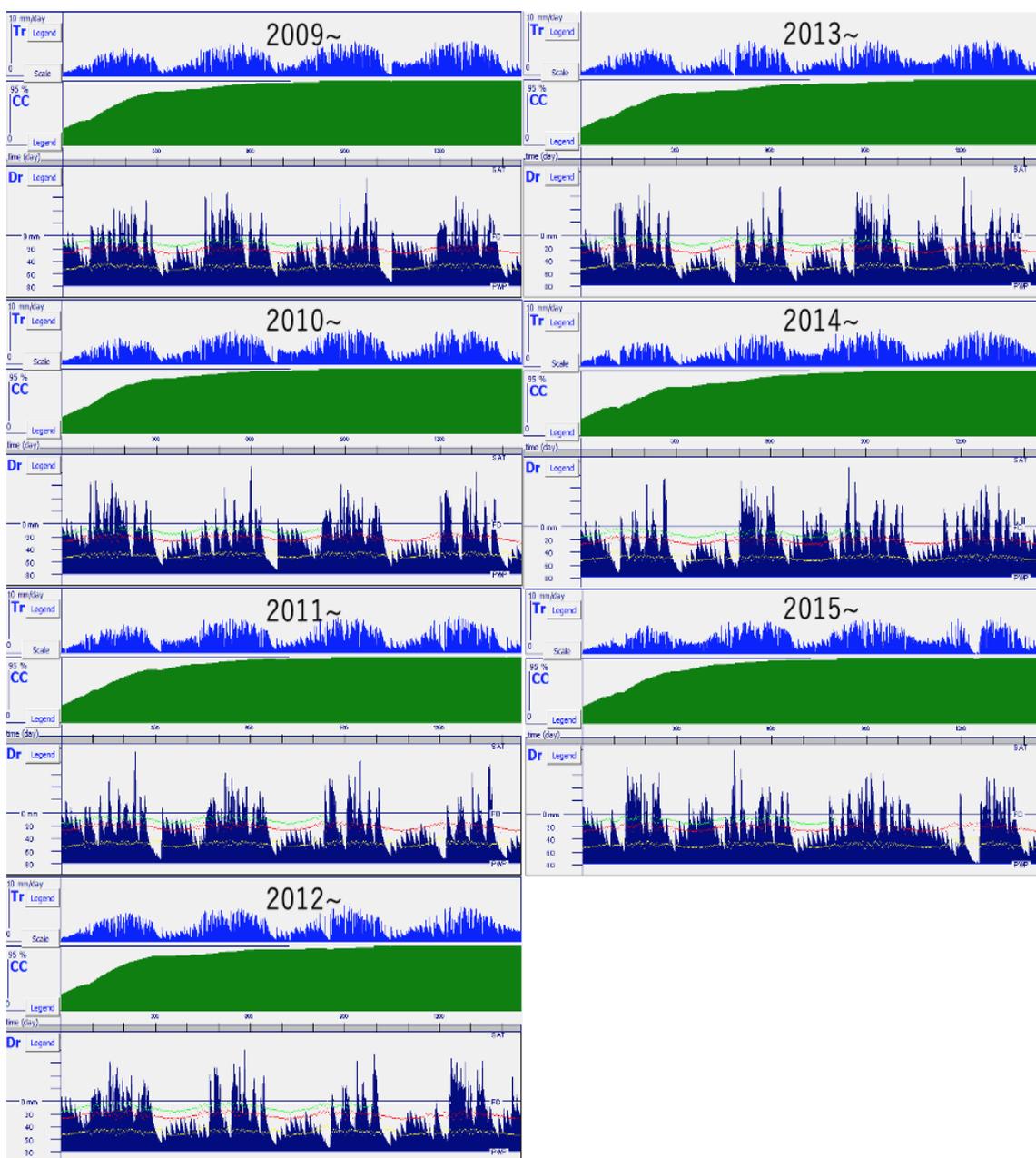


図 5 定期定量 25mm/15 日

表5 定期定量 10mm/6日

開始年	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dry yield(t/ha)	20.355	20.112	19.415	19.190	19.053	19.948	20.473
B(t/ha)	145.393	143.657	138.681	137.071	136.091	142.489	146.235
B _{pot} (t/ha)	168.191	169.046	169.768	170.556	171.573	172.288	172.954
Ratio	85%	84%	80%	80%	79%	82%	84%

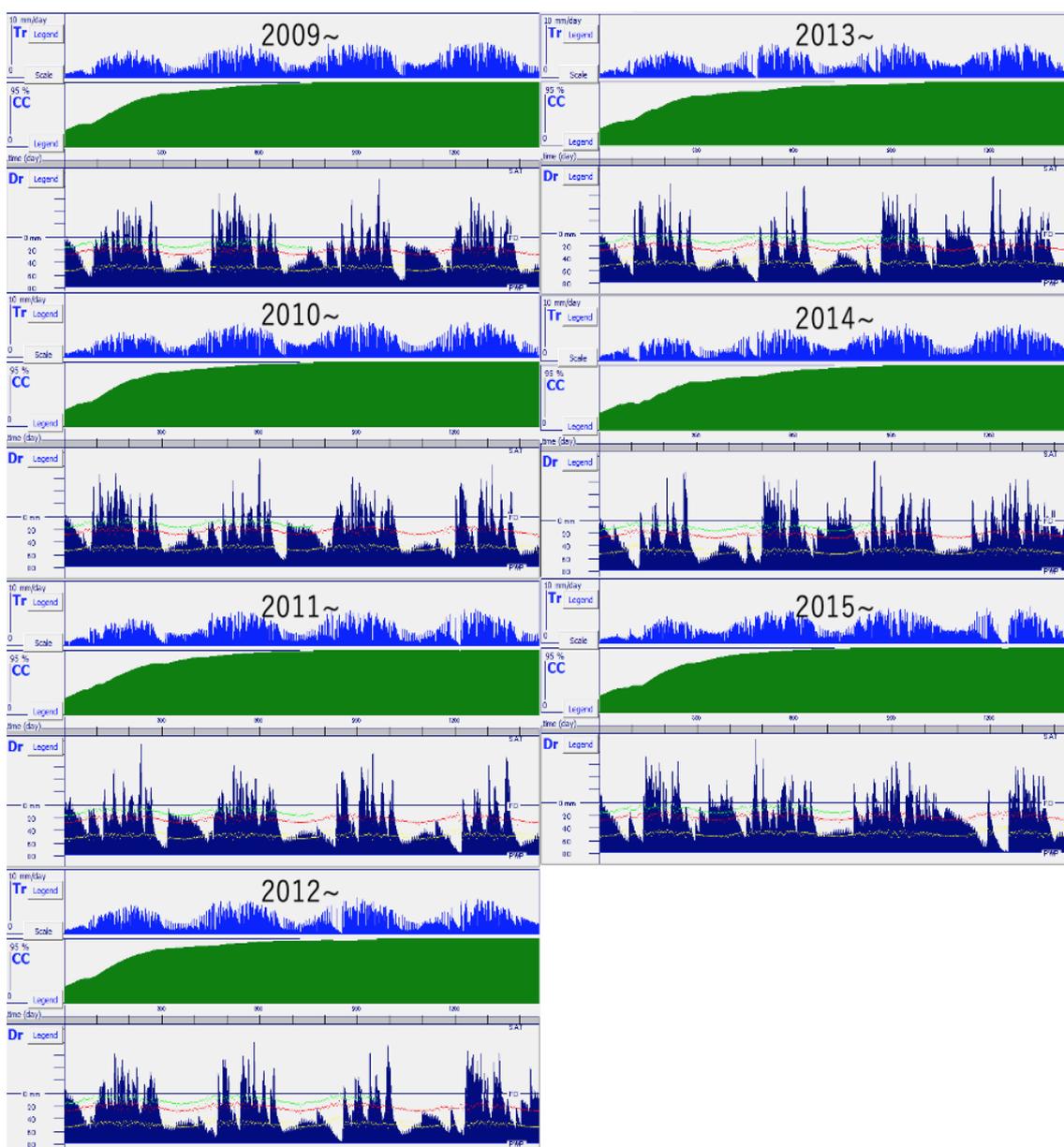


図6 定期定量 10mm/6日

同じ総灌漑量 1000mm の中で僅差ながらも Dry yield が最も高い 6 日毎において、一度の灌漑量を 15mm, 20mm, 25mm と増やした際の結果を表 6 に示す. この時, 総灌漑量は順に 1500mm, 2000mm, 2500mm である. 15mm と 20mm の収量の差と, 20mm と 30mm の収量の差から, 20mm/6 日を超えての灌漑量増加は効果が薄いことがわかる (補足として 50mm/15 日, 総灌漑量 2000mm の灌漑で得られる収量は 15mm/6 日の収量を下回っており, 頻度による効率の差が明確となった). 図 7 に示す 20mm/6 日の場合の根域水分の推移から, 乾季中であっても灌漑によって水分が必要量供給されていることがわかる.

表 6 乾季 6 日毎灌漑の各パターン

灌漑量(6日)	15mm		20mm		25mm	
開始年	2009	2013	2009	2013	2009	2013
Dry yield(t/ha)	21.750	21.124	22.035	21.619	22.078	21.713
Ratio	92%	88%	94%	90%	94%	90%

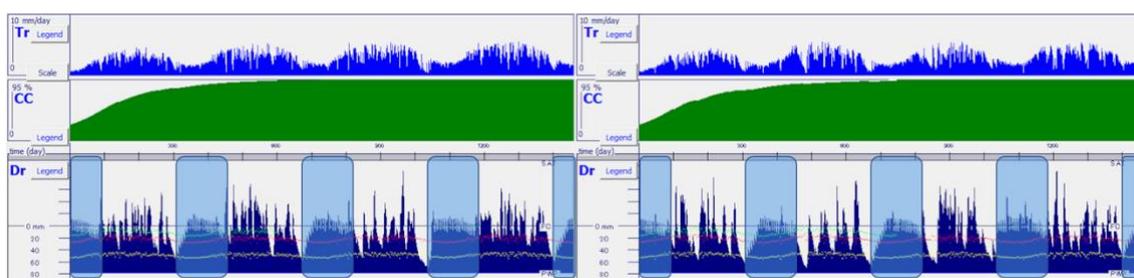


図 7 定期定量 20mm/6 日左 2009・右 2013 開始, 青色着色部は灌漑期間を示す)

5.2 補給灌漑

2013 年開始時の収量が理想値に対して特に少なくなる理由として, 降雨が雨季中に安定して発生していないことが挙げられる (図 8). 図 6 で根域水分が大きく減少している部分と照らし合わせると, 2014 年・2015 年 4 月 (下段 day456~・821~) など雨季期間の少雨

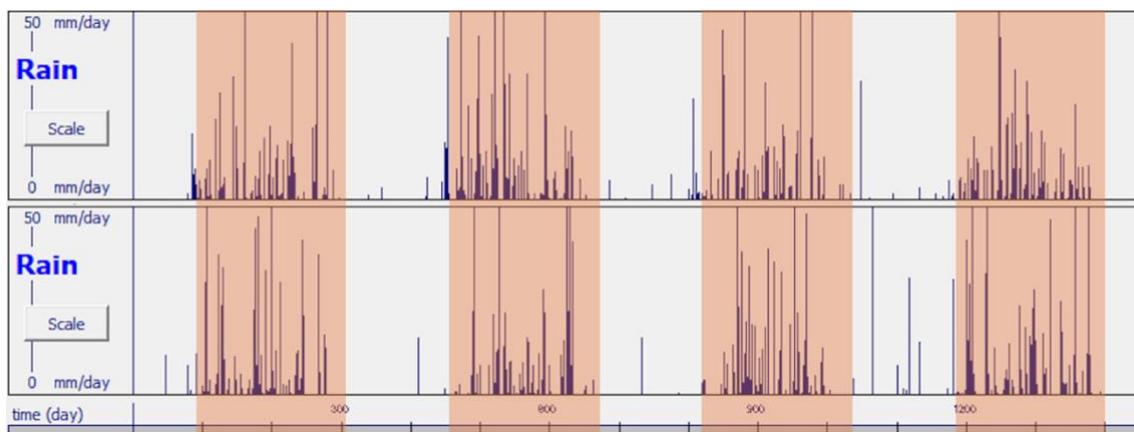


図 8 降雨の発生 (上段 2009・下段 2013 開始, 着色部は雨季設定期間)

が大きく影響していることが読み取れる。このような年毎の気候の変化によるリスクを抑えるため、雨季中の降雨が乾季中の灌漑量 20mm/6 日を下回る場合に雨季であっても灌漑によって水供給を補う方法について考察する。2009 年から 2012 年までの 4 年間の間に、乾季中に降雨量が 20mm/6 日を超える回数は 3 回、対して雨季中に下回る回数は 66 回に上る。単純に差分 63 回の灌漑を追加すると総灌漑量は 1260mm 増加し 3260mm となる。また、雨季中 6 日間で 20mm を下回り追加の灌漑を行なった当日や翌日にまとまった降雨が発生する場合もあり、天気予報などと組み合わせて柔軟に対応する必要がある。

5.3 不定期定量灌漑

収量の最大化を目指す場合、乾季雨季に関わらず常に土壌水分量を一定以上に保ち作物への水分ストレスを避けるために挙げられるのがこの方法である。この方法は、気候変動に柔軟に対応することで収量の最大化と総灌漑量の効率化を狙えると考えられる。根域水分の圃場容水量からの不足量の閾値及び 1 回あたりの灌漑量を 20mm, 30mm, 40mm とした際の結果を表 7 に示す。

表 7 不定期定量灌漑

閾値・灌漑量	20mm		30mm		40mm	
	開始年	2009	2013	2009	2013	2009
Dry yield(t/ha)	23.169	23.634	23.086	23.489	22.410	22.685
Ratio	98%	98%	98%	98%	95%	94%
総灌漑量	2300mm	2680mm	1920mm	2400mm	1640mm	2040mm
灌漑の最短間隔	5日前後	3日前後	10日前後	10日前後	10日以上	10日前後

表 4 など定期定量灌漑で示した灌漑パターンと比較して、30mm や 40mm 設定では同等の総灌漑量ながら収量の伸びが著しい。20mm 設定では季節問わず頻繁な灌漑が要求されながらも 30mm 設定からの収量の増加は頭打ちとなるが、30mm 設定では 40mm 設定と比べて収量の大幅な向上が見られる。

5.4 考察

まず、現在実施されている 50mm/30 日の定期定量灌漑から、総灌漑量を維持したまま灌漑頻度を上げることで 3.4%ほど収量の向上が見込めることがわかった。しかし、灌漑頻度を 6 日にしても Ratio は平均 82%ほどで伸び悩み、また乾季中の土壌水分の維持をできておらず、茶樹の十分な生育に不足していることから、収量の向上を目指すためには灌漑量の増加が重要であるという結果が示された。灌漑量について 6 日間隔の灌漑で比較した場合、2009 年・2013 年開始時の Dry yield の平均において 10mm/6 日と比較して 15mm/6 日では 8.8%、20mm/6 日では 10.8%、25mm/6 日では 11.1%の増加となり、15mm/6 日の段階で収量の大幅な増加、20mm/6 日で頭打ちという結果が得られた。尚、総灌漑量が 2,000mm

となる 50mm/15 日の収量が総灌漑量 1,500mm の 15mm/6 日を下回っており、灌漑頻度の重要性がより明確に表れた結果となった。故に、定期定量灌漑において現在の総灌漑量のまま効率の向上を図るのであれば灌漑頻度を上げることが重要であり、灌漑量の増加が可能であれば灌漑効率を重視した 15mm/6 日、もしくは収量を重視した 20mm/6 日での灌漑を提案する。

加えて、より高度な灌漑方法の提案として土壌水分に応じた柔軟な不定期定量灌漑を検証した。定期定量灌漑 20mm/6 日との効果を比較すると、根域水分の圃場容水量からの不足量閾値および灌漑量 40mm 設定では収量 3.3%増、30mm 設定では 6.7%増、20mm 設定では 7.2%増となった。総灌漑量においては 40mm 設定で 1640~2040mm と概ね 2,000mm を下回り、30mm 設定では微増、20mm 設定では大幅増であり、収量の増加幅が 30mm 設定と 20mm 設定で小さいこと、灌漑間隔の都合からも、収量の向上を目指す場合 30mm 設定、総灌漑量を重視する場合 40mm 設定を不定期定量灌漑として提案する。ただし、今回提案した不定期定量灌漑は恒常的な土中水分の測定と柔軟な灌漑が必要となり、設備環境及び作業コストの面から農場の余力に依存した発展的な選択肢としての提案となる。

6. おわりに

本研究では、AquaCrop を用いることにより現状のアッサム茶園における灌漑を評価し、より適した灌漑パターンを提案した。今後は“地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース”^[10]を利用した将来的な気候変動を踏まえた灌漑計画の提案を目指す。また、AquaCrop 単体では困難である土中の窒素動態を含めた施肥・灌漑の最適化についても考えていく。

引用文献

- [1]総務省統計局. “世界の統計 2021”. 総務省統計局. www.stat.go.jp/data/sekai/0116.html, (参照 2021-11-19)
- [2]FAO. “Medium-term prospects for agricultural commodities: PROJECTIONS TO THE YEAR 2010”. Rome, FAO, 2003, 192p. ISBN: 92-5-105077-5.
- [3]山ノ下卓, 丹下健. “土壌の過湿害”. 樹木医学研究, 2001, 5(1), p. 23-24.
- [4]文部科学省科学研究費補助金, 基盤研究(A), 研究成果報告書 (2016~2019), 村上章, 2020
- [5]Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, (2009) “AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles”, *Agronomy Journal*, vol. 101, doi: 10.2134/agronj2008.0139s.
- [6]Time and date AS. “Past Weather in Tezpur, Assam, India — April 2015”. [timeanddate. https://www.timeanddate.com/weather/@1254710/historic?month=4&year=2015](https://www.timeanddate.com/weather/@1254710/historic?month=4&year=2015), (参照 2021-11-15)
- [7] Liao, K., S. Xu, J. Wu, Q. Zhu (2014) Uncertainly analysis for large-scale prediction of the

- van Genuchten soil-water retention parameters with pedotransfer functions. *Soil Research*, Vol. 52, pp. 431-442. <https://doi.org/10.1071/SR13230>.
- [8] van Genuchten, M. T. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- [9] Elbehri, A., A. Azapagic, B. Cheserek, D. Raes, P. Kiprono, C. Ambasa, ..., P. Mejias. (2015) Kenya's Tea Sector under Climate Change: An impact assessment and formulation of a climate-smart strategy. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i4824e.pdf>
- [10] The Earth Simulator jointly by science programs (SOUSEI, TOUGOU, SI-CAT, DIAS) of the MEXT, Japan, "How to use.", database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF), http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/design_en.html, (参照 2021-11-04)

非整数階微積分学を利用した土壌水分移動のモデル化

京都大学大学院農学研究科 ○山口真広・宇波耕一・藤原正幸

1. はじめに

従来、土壌中の水分移動は、水ポテンシャルの勾配によって駆動されるものとして解析されてきた。この前提の下では、土壌の体積含水率と水ポテンシャルをどのように関連づけるか、また、間隙水の流速が大きい場合に Darcy 則が成立するのか、といった課題が議論されている。一方、これらとは異なった巨視的なモデル化手法として、非整数階微積分学を利用した研究が増えている (Freitas et al., 2017; Fomin et al., 2011; Pachepsky et al., 2003)。

非整数階微積分学においては、一般的な自然数階の導関数に加え、 $1/2$ 階や $\sqrt{2}$ 階といった実数階、さらには複素数階の導関数を考慮する。非整数階導関数の定義はいくつかあるが、本研究では、実数階導関数として最もよく使われる定義の一つである Riemann Liouville 導関数(RL 導関数)を用いる。この RL 導関数による関数 $f(t)$ の $\alpha(\in \mathbf{R})$ 階導関数 ${}^{RL}D_t^\alpha f(t)$ は、

$${}^{RL}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{d^m}{dt^m} \int_0^t (t-\tau)^{m-\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (1)$$

で定義される。ここに、 m は α 以上の最小の整数である。非整数階導関数は、RL 導関数の定義式(1)の中に積分項を含むことから分かるように、過去の履歴を参照することによって導かれる値である。そのため、記憶性・履歴性のある現象や、フラクタルのようなべき乗特性を示す現象についての物理モデルを記述するのに有効な手法であると考えられる(島本, 2012)。土壌水分移動のみではなく、水文学における降雨流出モデルでも、このような非整数階導関数は利用されている(Guinot et al., 2005; Unami et al. 2021)。

ここでは、この非整数階導関数を移流分散方程式の時間項ではなく空間方向の分散項に適用した fractional advection dispersion equation (FADE)を、実際の土壌における不飽和浸透流の記述に応用する。

2. 理論

FADE の定義とその離散化にもとづく数値計算方法について説明する。

土壌水分移動が、FADE

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = -v \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} + d \frac{\partial^\alpha \theta(x,t)}{\partial x^\alpha} \quad (2)$$

によって記述されると仮定する。ここに、未知変数 $\theta(t,x)$ は、時刻 t (hour)、地表面からの距離 x (cm)での体積含水率を表すものとする。また v は移流係数、 d は分散係数、 α は非整数階導関数の階数を表し、 $\alpha \in (1,2)$ を満たすものとする。なお式(2)における非整数階導関数は RL 導関数を指す。

Meerschaert et al. (2004) によると、安定的な FADE の計算結果を得るには shift Grunwald method (SGM)と呼ばれる離散化手法により非整数階導関数を近似すること、加えて時間方

向には陰解法により計算することが必要条件とされる。SGM による非整数階導関数の離散近似は、

$$\frac{\partial^\alpha \theta(x_i, t_n)}{\partial x_i^\alpha} \approx \frac{1}{\Delta x^\alpha} \sum_{k=0}^{i+1} g_k \theta_{i-k+1}^n \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 $g_k = \Gamma(k - \alpha) / \Gamma(-\alpha)\Gamma(k + 1)$ であり、構造格子 $x_i = i\Delta x$ ($i = 1, 2, \dots, M$), $t_n = n\Delta t$ ($n = 1, 2, \dots, N$)を用いる。移流項に標準的な一次精度の風上差分を適用すれば、離散化された FADE (2)は

$$\mathbf{A}\Theta^{n+1} = \Theta^n \quad (4)$$

の形になる。ここに、行列 \mathbf{A} の ij 成分 A_{ij} は

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & (j \geq i + 2) \\ -g_0 B & (j = i + 1) \\ 1 + E - g_1 B & (j = i) \\ -E - g_2 B & (j = i - 1) \\ -g_{i-j+1} B & (j \leq i - 1) \end{cases}, \quad (5)$$

$\Theta^n = [\theta_0^n, \theta_1^n, \dots, \theta_i^n, \dots, \theta_{M-1}^n]$, $E = v\Delta t / \Delta x$, $B = d\Delta t / \Delta x$ である。

以上の方法を用いて FADE を計算し、実測値と比較する。

3. 方法

3.1 研究対象地

ガーナ国北部州の変湿環境(hydromorphic environment)において、2009年から2010年の間に計測した体積含水率の時系列データを用いる。この地域の年平均降水量は1050mmで、雨季は一年に一回(4月~10月)のみである。体積含水率は地下10cmから80cmまでの区間で10cmごと、計8か所で観測しており、それぞれ5分ごとに値を計測している。本研究では簡単のため地下30cmまでのデータを用いる。また、比較に用いるデータは土壌の水分移動が明確に確認できる3回の降雨イベントについてであり、各1000分間のデータを用いる。各イベントの計測期間に関しては表1のとおりである。

表 1 使用データの期間

Event1	Event2	Event3
2009/10/29 16:10~10/30 9:30	2010/2/12 17:40~2/13 14:00	2010/4/27 3:00~4/27 19:40

3.2 比較方法

実測値と FADE による計算結果とを比較し、その誤差が最も小さくなる移流係数(v), 分散

係数(d)および非整数階導関数の階数(α)を求める。各係数は $\alpha \in [1.01, 1.99]$, $v, d \in [0, 1000]$ の範囲で α を0.01ずつ, v, d を1ずつ変更し全ての組み合わせについて計算を行い誤差の最も小さいものを探す。計算結果と実測値との比較方法には平均二乗誤差を用いる。計算において体積含水率の初期条件は, 10cm, 20cm, 30cmの3点での値をもとに線形補間により仮定する。境界条件としては深さ10cmと30cmでの体積含水率の値を用い, 深さ20cmでの体積含水率の値を計算結果との比較に用いる。また $\Delta x = 1$ (cm), $\Delta t = 1/12$ (hour)として計算を行う。

4. 結果

表1に, 各データに対する非整数階微分の階数(α), 移流係数(v), 分散係数(d)および平均二乗誤差を示した。また図1~3に各イベントに対する計算結果と実測値および降雨量の棒グラフを載せた。

表2 各種係数の値および誤差

	階数(α)	移流係数(v)	分散係数(d)	誤差
Event1	1.02	33	43	0.28
Event2	1.97	0	357	0.55
Event3	1.01	808	1000	0.41

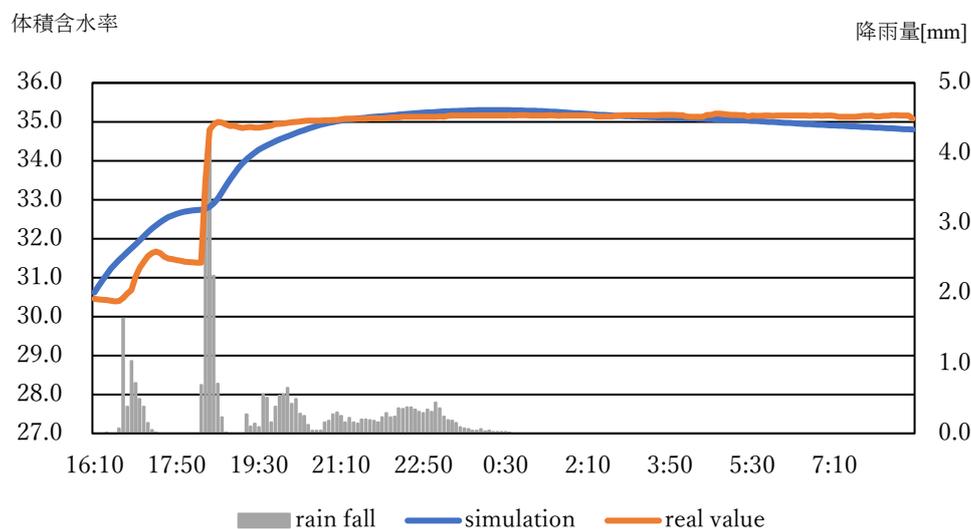


図1 計算結果と実データの比較および降雨量(Event1)

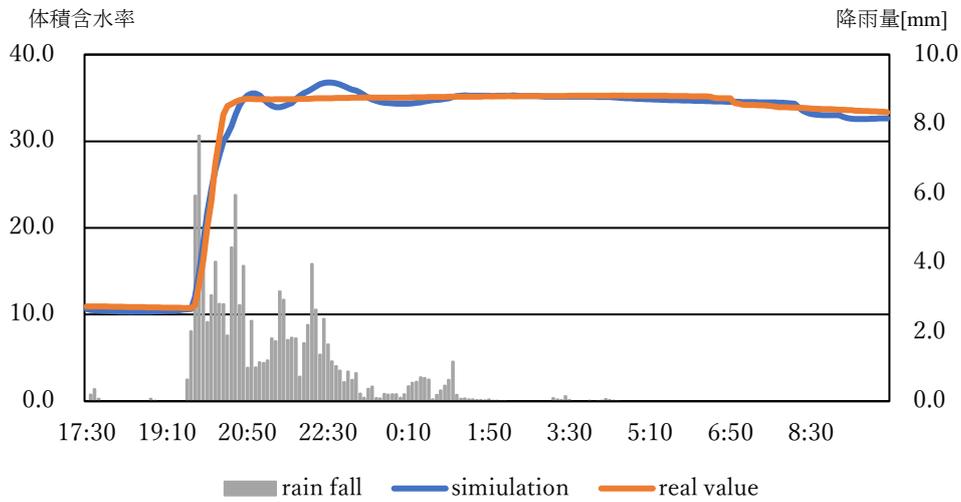


図 2 計算結果と実データの比較および降雨量(Event2)

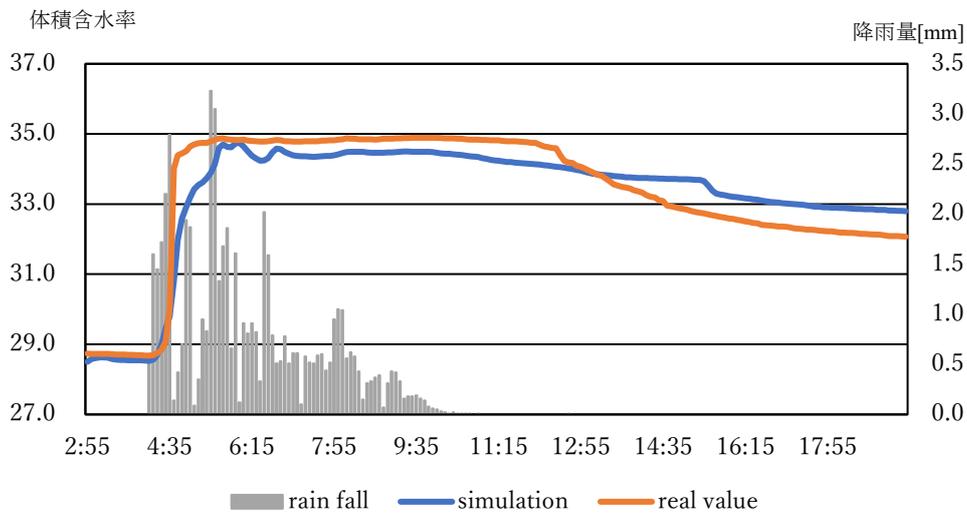


図 3 計算結果と実データの比較および降雨量(Event3)

5. 結論

FADE を用いて土壌中の不飽和浸透流のモデル化を行い，実測値との平均二乗誤差が 1.0 未満となるように数値計算で再現することができた．表 2 の α から分かる通り，FADE の形は Event1 と Event3 では移流方程式に，Event2 では分散方程式に近いものとなった．これは Event1,3 と Event2 の初期条件の違いに起因すると考えられる．Event1,3 の時期は雨季で体積含水率の初期条件が高く，浸潤減少が移流に近い形で起きていたのに対し，Event2 の時

期は乾期であり、体積含水率の初期条件が非常に低く、分散現象に近い形で浸潤が起きていたためと考えられる。今後検討すべき課題としては、表 2 から分かる通り非整数階導関数の次元および各係数の値には一貫性がなく、対象地の自然条件を示す普遍的なモデルを得ることはできなかったことである。この原因として、各項の係数を定数とした線型の FADE を仮定したことがあげられる。この解決のためには、各項の係数を体積含水率に依存させ、かつ、とくに移流項を非線型なものとするのが考えられる。また、対象地の変湿環境では、水平方向が卓越する飽和浸透流が実際には発生していると想定されるので、横流入量を湧出項として考慮することも必要である。

引用文献

- Fomin SA, Chugunov V, Hashida T (2011) Non-Fickian mass transport in fractured porous media. *Advances in Water Resources*, 34, 205-214.
- Freitas AA, Vigo DGA, Teixeira MG (2017) Horizontal water flow in unsaturated porous media using a fractional integral method with an adaptive time step. *Applied Mathematical Modelling*, 48, 584-592.
- Guinot V, Savéan M., Jourde H. Neppel L (2015) Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function. *Hydrological Processes*, 29(22), 4756–4778.
- Meerschaert MM, Tadjeran C (2004) Finite difference approximations for fractional advection-dispersion flow equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 172, 65-77.
- Pachepsky Y, Timlin D, Rawls W (2003) Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, 272, 3-13.
- 島本 (2012) 非整数階微分による異常拡散のモデル化について (その 1). 数理解析研究所講究録, 1810, 59-84.
- Unami K, Fadhil RM, Mohawesh O (2021) Bounding linear rainfall-runoff models with fractional derivatives applied to a barren catchment of the Jordan Rift Valley. *Journal of Hydrology*, 593, 125879.

末端用水路における水位調整施設としての複合セキの適用性に関する 実験的研究

Experimental Study on Water Level Control Method

Using a Check Structure Combining Weir and Orifice in a Farm Ditch

○藤山 宗*・中矢哲郎*・浪平 篤*

FUJIYAMA So, NAKAYA Tetsuo and NAMIHIRA Atsushi

1. はじめに

開水路形式の末端用水路では期別で水路流量が変化の中で水田圃場への均等な給水を行うための水管理操作として、配水ゲートと給水栓の開度調整、および堰板の高さ調整が求められ、これらの操作にかかる労力が課題とされている（図-1）。そのため、灌漑期間をとおして堰板を固定した状態で各給水地点の水位を維持し、給水栓の開度調整を行うことなく必要な給水量を確保できれば、その労力を削減できる。変化する水路流量に対して水位変動を抑制できる従来技術には、一般に幹線用水路で適用されている、越流部を長く確保した斜長堰や duckbill weir が挙げられるが、これらの施設を末端用水路に適用するためには大掛かりな設置工事が伴うため不向きである。そこで、藤山・中矢（2019）が検討しているような、従来の堰板による越流に底流を複合させ流下能力を高めた複合セキであれば設置工事が容易であるため、末端用水路に適用できる可能性がある。しかし、本研究で対象とする末端用水路では潜り流出条件での底流と全幅セキの越流を併用した水理構造となることが多いが、藤山・中矢（2019）の対象は自由流出条件での底流と四角セキの越流を併用した水理構造である。以上のことから本研究では、水理実験により、末端用水路における水位調整施設としての潜り流出条件となる複合セキの適用性を検討することを目的とする。

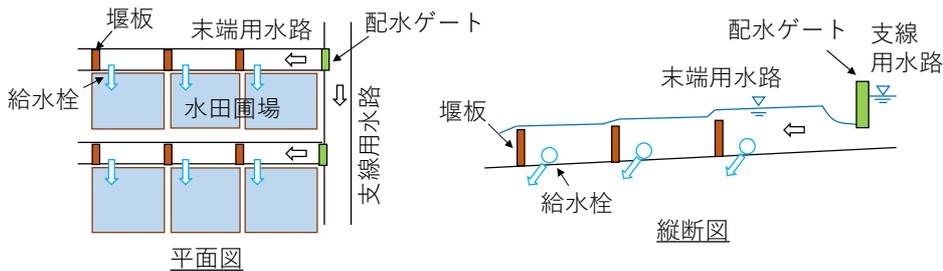


図-1 末端用水路における水管理の概要

2. 研究の方法

2.1 実験方法

図-2 は、実験装置の概要を示す。実験水路は、複合セキの現地導入を予定する、堰板による給水管理の労力が課題とされている A 地区の末端用水路（水路幅 30cm，水路側壁高 30cm）をモデル化した、水路延長 10m，水路幅 25cm，水路側壁高 30cm，水路勾配無し

*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：末端水路，水位調整施設，水理実験

アクリル製の長方形断面開水路である。セキ模型は、上流端から $L_1=7\text{m}$ の位置に配置される。最上流部には流量計測のための直角三角堰、最下流部にはセキ下流水深 h_2 を調整することで潜り流出条件を再現するための転倒ゲートが設置されている。

表-1 は、実験条件を示す。実験条件は、全幅セキを対象とする Case1 と複合セキを対象とする Case2 の 2 ケースとした。Case1 については、A 地区の水路諸元にに基づき現況をモデル化したものであり、セキ高 $H=12\text{cm}$ で完全越流の流況である。Case2 については、水管理労力を軽減するための対策としての、全幅セキに潜り流出の流況となる底流部を設けた複合セキであり（図-2 (c)）、流量 Q を変化させたときにセキ下流水深 h_2 が一定となるよう転倒ゲートの角度調整を行った。このときの h_2 は現地水路で想定される範囲にて、完全越流条件を満足できる最大水深 $h_2=12\text{cm}$ を Case2-1 とし、 h_2 を変化させた条件として Case2-2、Case2-3 を設定した。Case2-2、Case2-3 の Q の最大値についてはセキ下流にて潜り流出条件を満足することができなかった

ことを理由とし Case1 に比べて小さい値となっている。なお、Case1 との比較を行うための Case2-1 で対象とするセキ上流水深 h_1 と h_2 の差は、A 地区の末端用水路（流量 $0.03\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）で計測された 4cm を概ね満足する範囲であり、同条件は複数圃場への給水が行われ水路流量が比較的小さくなる末端水路の中流から下流区間の水理条件に位置付けられる。

h_1 の計測は予備実験にて予め水位の変動傾向を把握した上で上流水深を代表できるものと想定された、セキ設置位置から上流 60cm 地点の水路横断中央部の 1 点、 h_2 の計測は水面変動が比較的小さくなるセキ設置位置から下流 60cm 、 70cm 、 80cm の 3 点とし、両者ともにポイントゲージを使用した。また流量については、最上流に設置されている直角三角堰を用いて計測した。

2.2 流量係数 C の算定方法

Case1 の全幅セキにおける越流の流量係数 C_w は、 h_1 からセキ高 H を減じることにより算出したセキ越流水深 h_0 と、流量 Q の計測結果をもとに、越流セキの流量の関係式 (1) (椿、

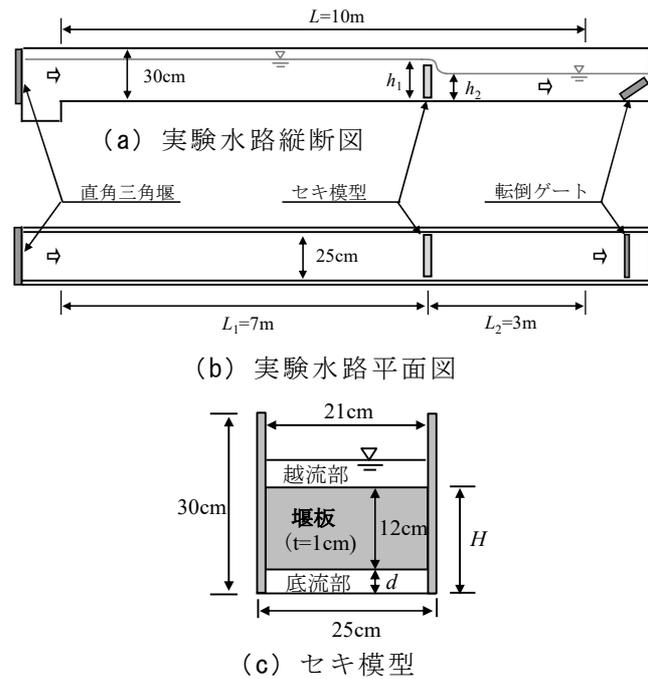


図-2 実験装置の概要

表-1 実験条件

検討ケース	流量 Q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	セキ諸元	底流開度 d (m)	セキ高 H (m)	セキ下流水深 h_2 (m)	h_1-h_2 (m)
Case1	0.0020~0.0404	全幅セキ	-	0.12	-	-
-1	0.0064~0.0396				0.12	0.023~0.084
Case2	0.0096~0.0380	複合セキ	0.02	0.14	0.10	0.046~0.100
-3	0.0108~0.0264				0.08	0.062~0.096

1973) を用いて算出した. また, Case2 の複合セキにおける越流と底流の流量係数 C_w 、 C_o は, 越流セキの流量の関係式 (1) とスルースゲートの流量の関係式 (2) (椿, 1973) を足し合わせた式 (3) に基づき算出した. 本来, C_w は h_0 に, C_o は h_1 , h_2 に応じて変化するものであり, 越流と底流の個別の Q を精度良く計測できれば, C_w と C_o の定量的な評価が可能であるが, 高精度での個別の Q の計測には課題がある. そこで本検討では, 個別の Q を計測しない方法として, C_o を一定と仮定することで C_w を評価する方法を採用し, 一定と仮定する C_o は $H=h_1$ の条件とし実験値から推定することで, $H < h_1$ の条件での C_o の真値との誤差を比較的小さくでき C_w の変化傾向を概ね評価できるものと考えた.

$$\text{Case1 : } Q = C_w \cdot b_1 \cdot h_0^{3/2} \quad (1)$$

$$\text{Case2 (底流のみ, } h_1 < H) : Q = C_o \cdot b_2 \cdot d \cdot (2 \cdot g \cdot h_1)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{Case2 (越流と底流, } H < h_1) : Q = C_w \cdot b_1 \cdot h_0^{3/2} + C_o \cdot b_2 \cdot d \cdot (2 \cdot g \cdot (h_0 + H))^{1/2} \quad (3)$$

ここで, Q : 流量 (m^3/s), C_w : 越流の流量係数, C_o : 底流の流量係数, b_1 : 越流幅 (m) ($=0.21\text{m}$), b_2 : 底流幅 (m) ($=0.21\text{m}$), d : 底流開度 (m) ($=0.02\text{m}$), g : 重力加速度 (m/s^2) ($=9.81\text{m}/\text{s}^2$), h_1 : セキ上流水深 (m), h_0 : セキ越流水深 (m), H : セキ高 (m) ($=0.14\text{m}$) である.

3. 結果と考察

3.1 セキ上流水深 h_1 と流量 Q の関係

図-3 は, Case1 と Case2-1 における h_1 と Q の関係を示す. Case1 の全幅セキの Q は, $h_0 (=h_1-H)$ の $3/2$ 乗に比例し増大する. 一方 Case2-1 のセキ高 $H=0.14\text{m}$ の複合セキの Q は, 式(3)の右辺第 2 項で表現される h_0 の $1/2$ 乗に比例し増大する, 越流とは異なる Q の変化勾配を有する底流を併用することで, Case1 の全幅セキとは異なる h_1-Q 特性が得られている.

h_0 が比較的小さい $h_1 \leq 0.15\text{m}$ の範囲では h_1-Q 特性は底流の Q の変化勾配の影響が強く現れているが, $0.15\text{m} < h_1$ の範囲では次第に底流に対する越流の流量の割合が大きくなることで h_1-Q 特性が全幅セキに近づく.

図-4 は, Case2 における h_1 と Q の関係を示す. h_2 が大きくなるほど, 少ない Q で h_1 が大きくなるため, Case2-1 が最も少ない Q にて複合セキの流れに移行していることがわかる. また複合セキの流れに移行すると, セキ越流水深 h_0 が比較的小さい 2cm 以下となる $h_1=0.14 \sim 0.16\text{m}$ の範囲では, すべてのケースで一時的に, 増加する Q に対して h_1 が増大しない現象が確認される. 永井 (1957) によると, h_0 が $0.4H$ よりも著しく小さい場合には越流水の水平速度が低下し水脈が堰板に付着して落下する付着水脈が生じ, この水脈では堰

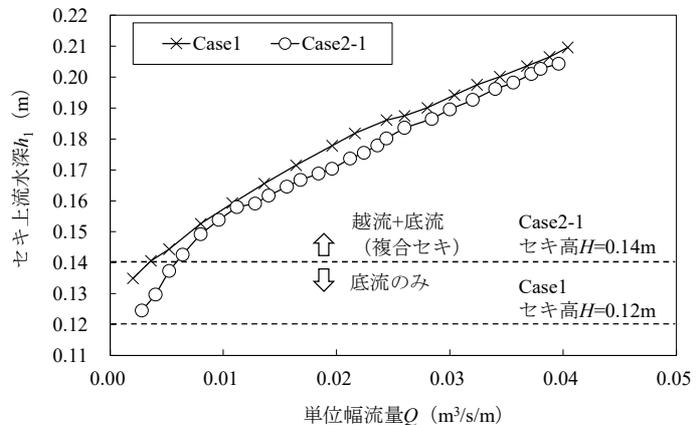


図-3 Case1 と Case2-1 における h_1 と Q の関係

板上部に低圧部を生じさせ、越流水脈の下面が堰板を離れる完全水脈に比べて流量が増大するとされている。Case2における $h_1=0.14\sim 0.16\text{m}$ の範囲は $0.02\text{m} (=h_0) < 0.06\text{m} (=0.4H)$ の条件に該当し、付着水脈の発生が確認されていることから（図-5）、 h_1 の増加につれて完全水脈に移行する過程で増加する Q に対して h_1 が増大しない現象が生じたものと推察される。

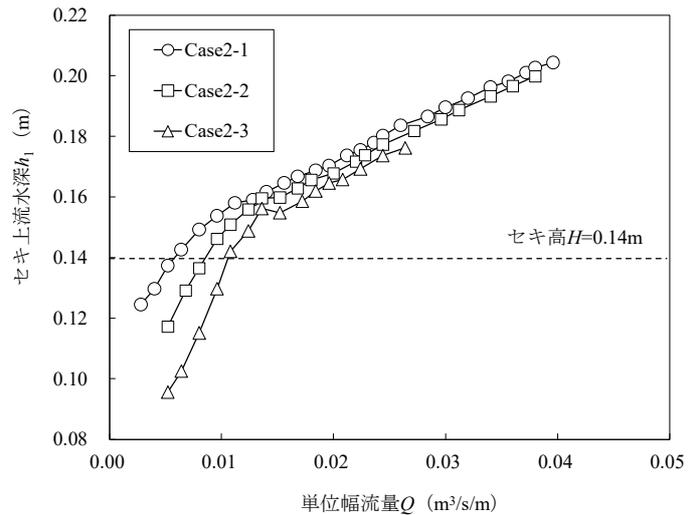


図-4 Case2における h_1 と Q の関係

3.2 流量係数 C の評価

表-2は、各ケースにおける流量係数 C を示す。Case2の複合セキの C_w の評価に際し、一定と仮定した C_0 は、 h_2 がより大きなCase2-1で最小の0.20である。得られた C_0 について椿（1973）に示される潜り流出時のスルースゲートの流量係数との比較を行ったところ、Case2-1、Case2-2、Case2-3の条件ではそれぞれ0.25、0.35、0.45であり、本実験で得られた C_0 の方が小さい。その要因には、椿（1973）のスルースゲートの先端は刃型形状であるのに対し、本実験の堰板下部の先端形状は矩形であり、施設形状の違いが考えられる。

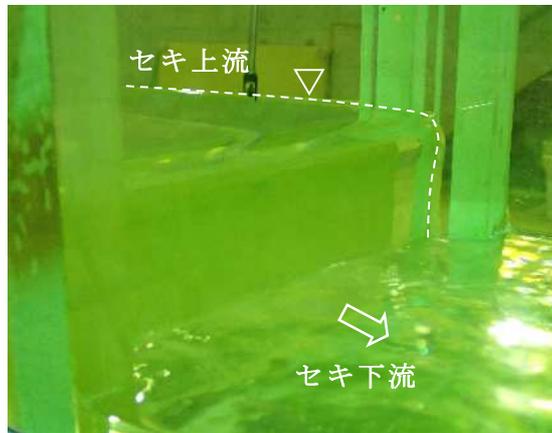


図-5 付着水脈の発生状況（Case2-2）

図-6は、各ケースにおける h_0 と C_w の関係を示す。式(3)より C_0 を一定と仮定して算出したCase2の C_w

表-2 各ケースにおける流量係数 C

検討ケース	流量係数 C		
	越流 C_w	底流 C_0	
Case1	1.75	-	
Case2	-1	2.47	0.20
	-2	2.34	0.30
	-3	2.51	0.37

は、 $0.02\text{m} \leq h_0$ の条件では一定の範囲に漸近し、その分布はCase1よりも上方に位置する。この要因については底流に起因したセキ上流の流速の増加が考えられるが、今後検証する必要がある。一方 $h_0 < 0.02\text{m}$ の条件におけるCase2の C_w は比較的大きなばらつきが生じており、これはセキ越流部における付着水脈の発生によるものと推察される。

図-7は、実験値に対する近似曲線を示す。図-6に示すように h_0 に応じて変化する C_w に対して、実験値による h_0 - Q 曲線を近似できる標準値としての C_w （表-2）をCase1は式(1)、Case2は式(3)より算定した。 C_w は、Case1では1.75、Case2-1では2.47となり、複合セキの方が大きい。またCase2では C_0 には h_2 の違いによる変化傾向が見られるのに対して、 C_w には明らかな変化傾向は無くばらつきがある中で平均値2.44となった。 h_2 の

低下による C_o の増大はセキ上流の流速の増大に起因したものであると考えられるが、この流速の増大による C_w の増大傾向は見られなかった。その理由には、Case2 における h_2 の変化がセキ上流の流速に及ぼす影響はセキ高 H より下方の範囲に限定され、越流部周辺の流速への影響が小さいことなどが考えられ、今後検証する必要がある。

以上のことから、越流部の流下能力は、完全越流を満足する h_2 の条件では全幅セキよりも複合セキの方が高く、複合セキは末端水路において期別で水路流量が変化しても給水地点の水位を一定に維持する性能が高いことを明らかにした。

4. おわりに

本実験結果より、従来の全幅セキ形式の堰板に底流部を設けるだけの極力簡単な施設構造である複合セキは、変化する水路流量に対して水位変動が小さいため、末端水路における水位調整施設として有効である。

また、複合セキの h_0 - Q の関係に基づく流下能力は、従来のスルースゲートと越流堰の流量公式を足し合わせたもので算定が可能であるため、現地の末端水路において想定される複合セキの構造諸元に応じた流量係数 C_w 、 C_o を明らかにすることができれば、設計手法を確立できる可能性がある。なお本研究は、農林水産省「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト（課題番号：土 3B2 地、課題名：通年対応型のスマート水管理による農村地域の減災・生物多様性保全機能向上の実証）」（事業主体：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）の支援を受けて実施したものである。

【参考文献】

- 1) 藤山宗, 中矢哲郎 (2019) : 底流と越流が複合したチェックゲートの水理特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), **75** (2), I_457-I_462.
- 2) 椿東一郎 (1973) : 水理学 I, 森北出版, 193-200.
- 3) 永井荘七郎 (1957) : 水理学, コロナ社, 132-133.

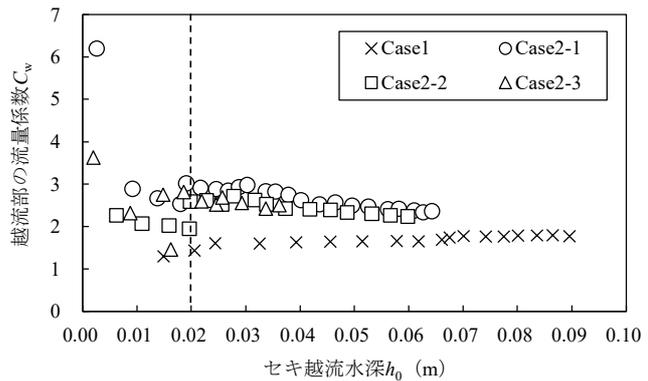


図-6 各ケースにおける h_0 と C_w の関係

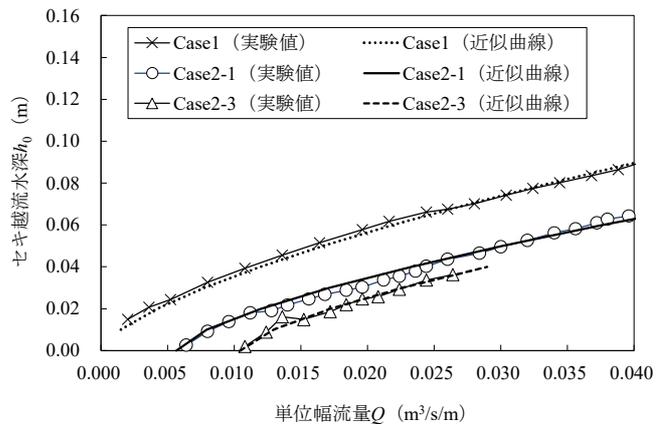


図-7 実験値に対する近似曲線

Regularization method to estimate parameters in a water balance model for an infiltration pit

○Tomoki Izumi* and Koichi Unami**

1. Introduction

Rainwater harvesting techniques have been introduced for a long time to secure water resources in arid and semi-arid areas that have minimal rainfall. There is concern that water shortages have become even more severe because of the recent population increase and the forecast of a precipitation decrease due to climate change.

This study addresses the development of a micro catchment rainwater harvesting (MCRWH) system for practical use in the crop field scale. The authors conducted field experiments to evaluate the collecting runoff performance of an MCRWH system [1]. Here, a regularization method is applied for estimating the parameters in a water balance model for the infiltration pit of the MCRWH system.

2. MCRWH system and water balance model in the infiltration pit

An MCRWH system with V-shaped bunds is developed at the experimental field of Kyoto University in Maizuru, as shown in Fig.1. The land slope is between 14 and 19%. The catchment area is 11,449 cm². The infiltration pit with the dimension of L39cm × W36cm × H18.4cm is filled with gravel. A water level logger (U20, HOBO) is installed at the infiltration pit to measure the water depth every 10 minutes.

The water balance in the infiltration pit is described as follows:

$$\frac{dV}{dt} = Q - kh^p \quad (1)$$

where V (m³) is water volume in the infiltration pit, Q (m³/s) is runoff discharge, h (m) is water depth in infiltration pit, and k and p are parameters. kh^p (m³/s) represents the leakage from infiltration pit. The water volume, V , is also calculated as follows:

$$V = \phi Ah \quad (2)$$

where ϕ (-) is the porosity of the gravel filled in the infiltration pit, and A (m²) is the plane area of the



Fig.1: MCRWH system developed at the experimental field of Kyoto University in Maizuru

infiltration pit. The ordinary differential equation (1) is discretized in the time domain as follows:

$$V_{t+\Delta t} = V_t + Q_t - kh_t^p \quad (3)$$

where t is time, Δt is the time step. ARX (Auto-Regressive with eXogenous) model is employed to represent the relation between rainfall and runoff.

$$Q_t = \sum_{i=0}^{i=n} (K_i r_{t-i} + K_{n+i} Q_{t-i}) + e_t \quad (4)$$

where n is the order of the ARX model, K is the model parameter, e_t is white noise. Substituting eqs.(2) and (4) into (3) results in:

$$\mathbf{h} = X\mathbf{K} + \mathbf{e} \quad (5)$$

where

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} h_{t+1} \\ \vdots \\ h_{T+1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_0 \\ \vdots \\ K_{n-1} \\ K_n \\ \vdots \\ K_{2n-1} \\ K_{2n} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_t \\ \vdots \\ e_T \end{pmatrix} \quad (6)$$

* Graduate School of Agriculture, Ehime University

** Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Keywords: Micro catchment rainwater harvesting, Water balance model, Regularized least squares

$$X = \frac{1}{\phi A} \begin{pmatrix} r_{t-1} & \cdots & r_{t-n} & Q_{t-1} & \cdots & Q_{t-n} & -h_t^p & \phi A h_t \\ \vdots & \vdots \\ r_{T-1} & \cdots & r_{T-n} & Q_{T-1} & \cdots & Q_{T-n} & -h_T^p & \phi A h_T \end{pmatrix} \quad (7)$$

3. Parameter estimation in water balance model

Using the least squares method that minimizes residuals, unknown parameters vector \mathbf{K} is obtained as follows:

$$\mathbf{K} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{h} \quad (8)$$

On the other hand, some regularization methods can prevent overfitting that spoils the model's versatility. The total variation regularization method, which minimizes the total variation of the parameters in addition to the square errors, is one of them and has been applied to image denoising. Recently, the application to regularizing hydrology-related data has been also studied (e.g. [2],[3]). We opt for the total variation regularization method. The minimization problem is described as follows:

$$\text{minimization} \quad \|\mathbf{X}\mathbf{K} - \mathbf{h}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=0}^{2n} |K_{i+1} - K_i| \quad (9)$$

The alternating direction method of multipliers (ADMM) is employed to solve (9). The ADMM is an iteration procedure given as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}[j+1] &= (X^T X + \gamma^{-1} \Psi^T \Psi)^{-1} (X^T \mathbf{h} + \gamma^{-1} \Psi^T (\mathbf{z}[j] - \mathbf{v}[j])) \\ \mathbf{z}[j+1] &= S_{\gamma\lambda} (\Psi \mathbf{K}[j+1] + \mathbf{v}[j]) \\ \mathbf{v}[j+1] &= \mathbf{v}[j] + \Psi \mathbf{K}[j+1] - \mathbf{z}[j+1] \end{aligned} \quad (10)$$

where $S_{\gamma\lambda}$ is soft-thresholding function, and Ψ is a matrix described as follows:

$$\Psi = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

The initial guess for each of the variable vectors \mathbf{z} and \mathbf{v} is set as the zero vector.

4. Results of parameter estimation

The least squares method and total variation

regularization method are applied to the parameter estimation of the water balance model. The reproducibility of the water depth observed at the infiltration pit is investigated for each method, as shown in Fig.2. The reproducibility of the peak is improved by using the total variation regularization method.

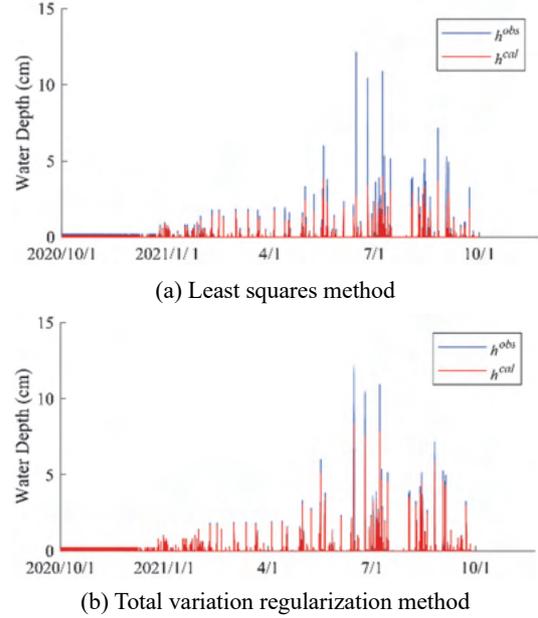


Fig.2: Comparison of reproducibility of the water depth

5. Conclusions

We dealt with the problem of estimating the parameters of the ARX model to represent the water balance in the infiltration pit of the MCRWH system. The total variation regularization turned out effective in improving the model's reproducibility.

Acknowledgment

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 19KK0167.

References

- [1] Izumi, T., Abu-Zreig, M., Unami, K., 2020. Collecting runoff performance of a micro catchment rainwater harvesting system. *Proceedings of the 28th Annual Congress of JRCSA*, 66-67.
- [2] Unami, K., Fadhil, R.M., Rowshon, M.K., 2019. Generalized additive models for water balance in Bukit Merah Reservoir, Perak, Malaysia, 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019), Kuala Lumpur, Malaysia.
- [3] Fadhil, R.M., Unami, K., 2021. A multi-state Markov chain model to assess drought risks in rainfed agriculture: a case study in the Nineveh Plains of Northern Iraq. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 35: 1931–1951. DOI:10.1007/s00477-021-01991-5

スルースゲートからの潜り流出のゲート上・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

羽田野袈裟義* 荒尾慎司** 野田 誠***

* 第一復建株式会社・山口大学名誉教授，〒812-0006 福岡市博多区上牟田 1-17-9

** 松江工業高等専門学校環境・建設工学科，〒690-8518 松江市西生馬町 14-4

*** 第一復建株式会社，〒812-0006 福岡市博多区上牟田 1-17-9

要 旨

ゲートをすぎる流れの既往の水理検討はごく一部を除き流量評価に限られているが，総合的な運用計画策定にあたっては流量のみならずゲート上・下流の水深や流量に加え，設定すべきゲート開度という操作上で関与するすべての水理量について直接の見積もりが得られればきわめて好都合である．本研究では，この目的を達成するため，スルースゲートをすぎる潜り流出に対して，水理学の基礎式に基づいて上流水深，下流水深，流量，ゲート開度の4つの水理量すべてをそれ以外の3つの水理量により表現する式を導き，その計算結果を実験データにより検証した．検証の結果，これら4つの水理量の計算値は実験値と良好に一致し，提案式の妥当性が確認された．

キーワード：スルースゲート，潜り流出，上流水深，下流水深，流量，ゲート開度，相互依存関係

1. はじめに

本川に流入する水路や支川に多く設置されるゲートは流量と水位を制御する構造物であり，その効率的運用への現場の要請がある．この事情からこれまで多くの研究者により活発にゲートの水理が検討され，今なお世界中で熱心に研究が行われている．

しかしながら従来の研究はごく一部を除けば流量評価に終始しており，ゲート運用に関わる現場のさまざまな目的のために必要な水理量を速やかに提供できる状態にはない．本研究ではスルースゲートをすぎる潜り流出を取り扱うが，潜り流出は自由流出と比べ，関与する水理量が流量，上流水深，下流水深そしてゲート開度の4つとより多くより一般的な流れである．そして流量，上流水深，下流水深そしてゲート開度の4つの水理量すべてがそれ自身を除く3つの水理量から決定される．また，潜り流出に関与する水理量を現象面から独立量と従属量の点で見ると，下流水位は独立量，上流水位は従属量，流量は利水面では従属量，治水面では独立量に位置づけられる．ゲートの運用計画の合理化は上記4つの水理量をすべてそれ以外の3つの水理量を用いて表現できて初めて達成される．治水面においてはゲート上流の水深を評価することになるが，現状では自由流出に対して流量係数の評価式を変形して繰返し計算を行う方法が Rajaratnam and Subramanya(1967)や Swamee(1992)により提案された程度であり，自由流出・潜り流出の双方に対して最近の羽田野ら(2021)の研究により流れの基礎式からゲート上流水深の評価式が初めて与えられた．また，ゲート開度の設定では流量係数を上流水深／開度比と下流

水深／開度比の関数として与える Henry(1950)の解から繰返し計算などにより求めねばならない(滝田ら，2012)．

本研究では，スルースゲートをすぎる潜り流出について，Henry(1950)の方法に基づき，流量，上流水深，下流水深そしてゲート開度のすべてを，それ自体を除く3つの水理量により表現する評価式を導き，それら評価式を実験データにより検証する．なお，従来方法では流量評価を流量係数の形で示しているが，ここでは現場での効率的な利用を考慮し，より直接に流量そのものを評価する式を示す．

2. 理論解析

本研究で検討する潜り流出では，流出水の上方に表面渦が形成され，流出水は噴流のように広がる(Fig.1を参照)．

Henry(1950)にならい，Fig.1の設定で，ゲート上流の流水断面①では静水圧分布で流れは流速 v_0 の一樣流速と仮定する(椿，1973)．ゲート直下流の縮流断面を断面②とし，そこでは流出水が厚さ Ca の流動部を一樣流速 v で流れ，その上方の表面渦の領域では水は近似的に静止状態にあり，圧力は静水圧分布にしたがうものと仮定する(椿，1973)．なお，表面渦の領域では鉛直方向の加速度の成分がゼロでないため圧力分布は厳密には静水圧的ではないが，この領域では流速自体の絶対値が小さいため，鉛直加速度による静水圧分布からの偏差は有意でないとみなされる．断面②と①の間のエネルギー損失は小さく，したがってこれら2断面に次のベルヌーイの定理が適用される．単位幅流量を q ，ゲートの上流水深を h_0 ，縮流断面の水深を h ，ゲート開度を a ，縮流係数を C_c とすると，断面②と①に適用したべ

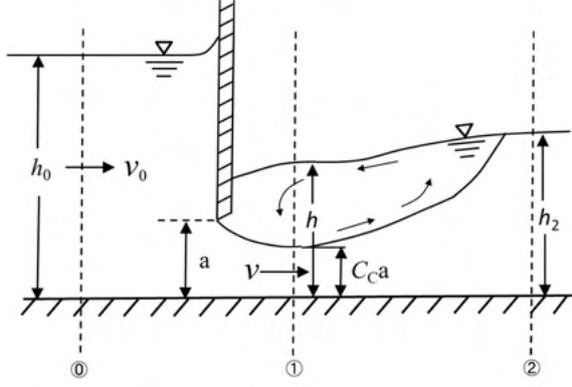


Fig. 1 流れ解析の模式図

ルヌーイの式は次式で表される.

$$h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} = h + \frac{q^2}{2g(C_c a)^2} \quad (1)$$

断面②では表面渦が消失して一様流速で流れ, そして静水圧分布が成立するものとする. 断面①と②の間ではエネルギー損失が生じるが, 流れを阻害するものが存在しないから比力保存則が成立する. すなわち次式が成り立つ.

$$\rho q^2 \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a} \right) = \frac{1}{2} \rho g (h^2 - h_2^2) \quad (2)$$

式 (1) と (2) を連立させると, 流量, ゲートの上流水深, 下流水深, そしてゲート開度を求める式が得られる.

流量評価式: 式 (1) と (2) から単位幅流量の平方 q^2 に関する次の 2 次方程式が得られる.

$$q^4 + 2 \left[\frac{h_0}{\frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2}} - \frac{1}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a} \right) \frac{1}{\left\{ \frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2} \right\}^2} \right] q^2 + \frac{h_0^2 - h_2^2}{\left\{ \frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2} \right\}^2} = 0 \quad (3)$$

ここで B および C を次式

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

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

のように置くと, q が次のように求められる.

$$q^2 = -B - (B^2 - C)^{1/2}, \quad q = \{-B - (B^2 - C)^{1/2}\}^{1/2} \quad (4)$$

安田ら (2003) は等価な結果を流量係数で示している.

ゲート上流水深の評価式: 同様にしてゲート上流の水深 h_0 を求める式が次のように与えられる (羽田野ら(2021)).

$$h_0^3 - \left[\left\{ 2 \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a} \right) + h_2^2 \right\}^{1/2} + \frac{q^2}{2g(C_c a)^2} \right] h_0^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (5)$$

この式は, ゲート開度, 流量そしてゲート下流水深の値に対してゲート上流水深を与えるため, ゲート上流の水路の兩岸の必要な高さの目安を与える. 羽田野ら(2021)は h_0 に加えゲート開度で無次元化された上流水深 h_0/a の変化特性についても検討している.

ゲート下流水深の評価式: 同様にしてゲート下流の水深 h_2 の評価式が次のように与えられる.

$$h_2^3 - \left[\frac{2q^2}{gC_c a} + \left\{ h_0 + \left\{ \frac{1}{2gh_0^2} - \frac{1}{2g(C_c a)^2} \right\} q^2 \right\}^2 \right] h_2 + \frac{2q^2}{g} = 0 \quad (6)$$

この式は, 流量, ゲート開度そしてゲート上流の水深の値に対してゲート下流の水深を与えるため, 上記の水理諸量の想定される値に対して許容されるゲート下流の水深, したがって本川の水位の目安を与える.

ゲート開度の評価式: 同様にしてゲート開度 a の評価式が次のように与えられる.

$$a^4 - \frac{\frac{2q^2}{gC_c}}{\left[\frac{2q^2}{gh_2} - \left(h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \right)^2 + h_2^2 \right]} a^3 + \frac{\left(h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \right) \frac{q^2}{gC_c^2}}{\left[\frac{2q^2}{gh_2} - \left(h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \right)^2 + h_2^2 \right]} a^2 - \frac{\left\{ \frac{q^2}{2gC_c^2} \right\}^2}{\left[\frac{2q^2}{gh_2} - \left(h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \right)^2 + h_2^2 \right]} = 0 \quad (7)$$

これは, 流量, ゲートの上下流の水深の値が与えられたとき, しかるべきゲート開度を与える. 上記の 3 つの水理量に対応するゲート開度をリアルタイムで与えるもので, ゲート操作に直結する情報となり現場運用で特に有用となる.

3. 実験による理論の検証

3.1 実験の概要

上で得られた式 (4), (5), (6) そして (7) の適合性を調べるため室内実験を行った. 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. 実験水路は長さ 10.3m×30cm の長方形断面の可変勾配水路で, 実験は水路床を水平にして行った. 模型ゲートは厚さ 1cm のアクリル板で下端を刃形に成型したものでこれを水路上流端から 4.5m の位置に設置して実験を行った. 実験の詳細は羽田野ら (2018) と同様である. 実験はゲート開度 a を 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, そして 6cm の条件で変化させて行った. 実験によるとゲートより 0.5m 以上の下流においては水深 (水位) がほぼ一様であった (亀井ら, 2019). そこでゲート下流の水深はゲートの下流 1m の位置の水深とした.

3.2 検証の結果

水理実験によるモデル検証の結果の例をゲート開度 $a = 2\text{cm}$, 4cm および 6cm のケースについて図に示す. 流量の検証結果を Fig.2, 流量ゲート上流水深の検証結果を Fig.3, ゲート下流の水深の検証結果を Fig.4, ゲート開度の検証結果を Fig.5 に示す. これらの図によると, 本論文の提案式は $h_2/h_c \geq 2.5$ の範囲で実験結果を良好に再現している. ゆえに, スルースゲートからの潜り流出に関わる水理諸量の間の相互依存関係に関する本理論は妥当とみなされる.

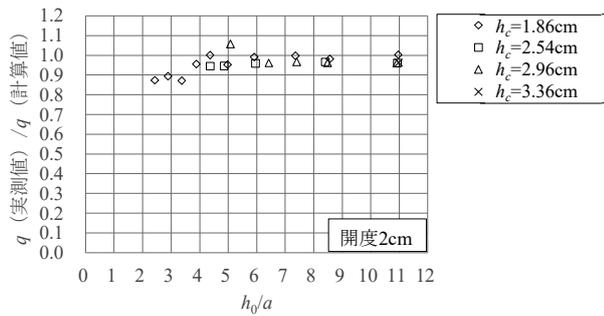
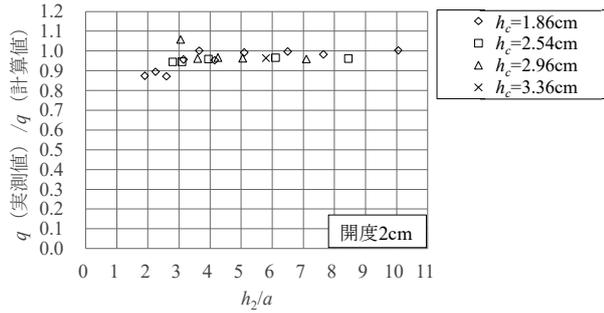
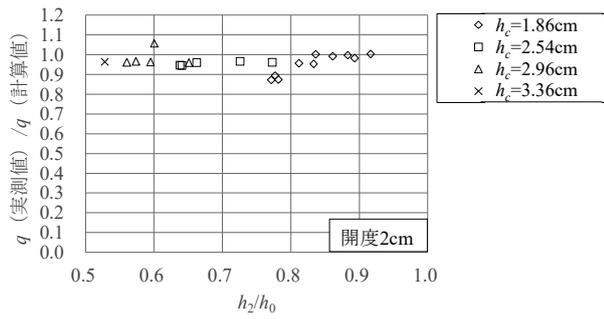
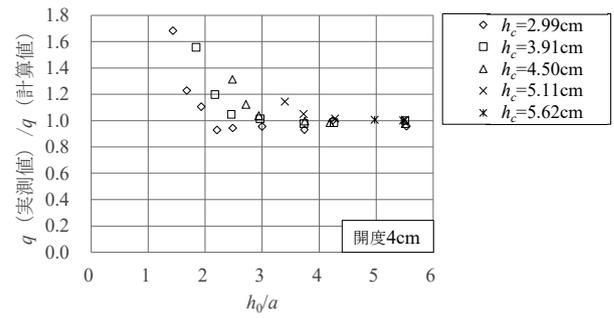
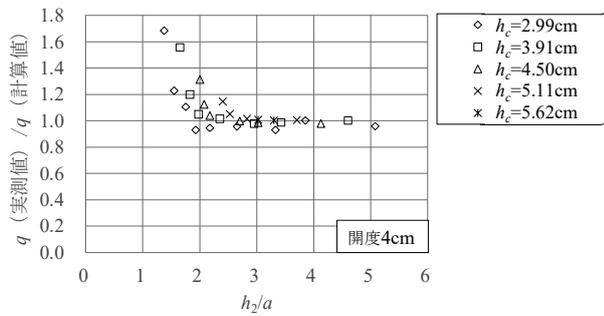
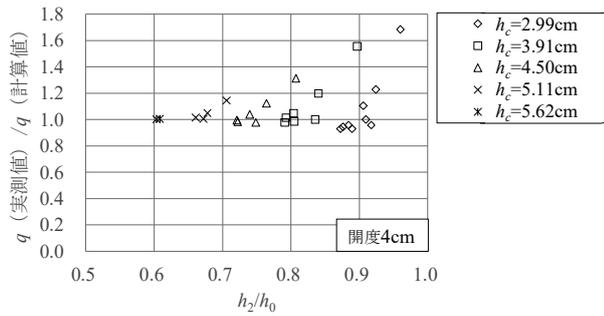
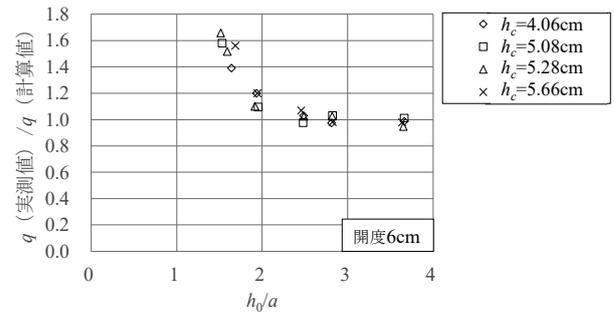
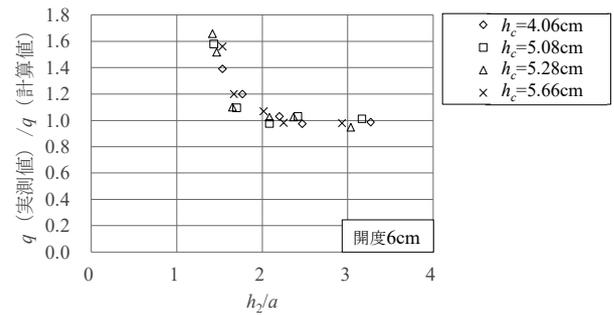
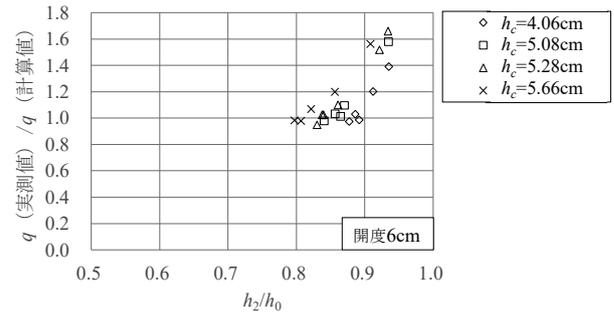
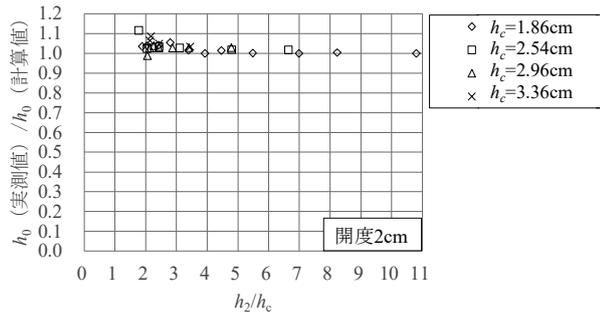
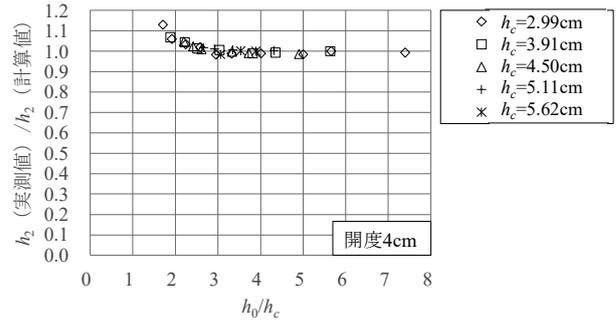
(a) $a=2\text{cm}$ (b) $a=4\text{cm}$ (c) $a=6\text{cm}$

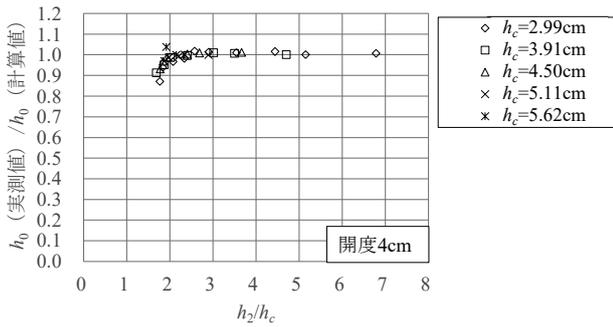
Fig.2 流量計算の検証結果



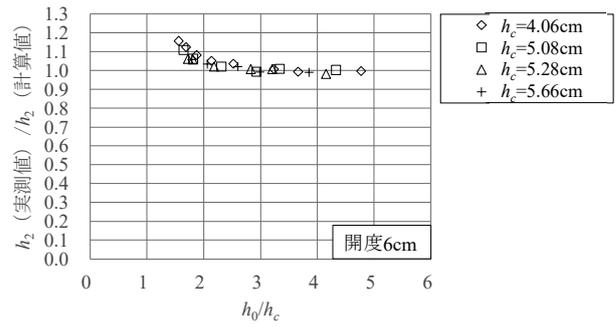
a) $a=2\text{cm}$



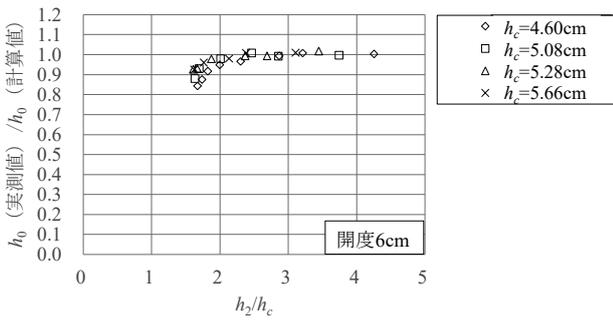
(b) $a=4\text{cm}$



(b) $a=4\text{cm}$

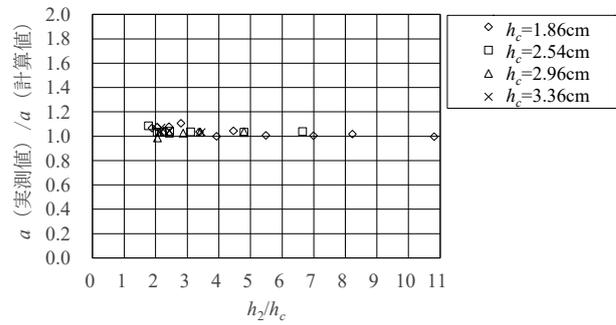


(c) $a=6\text{cm}$



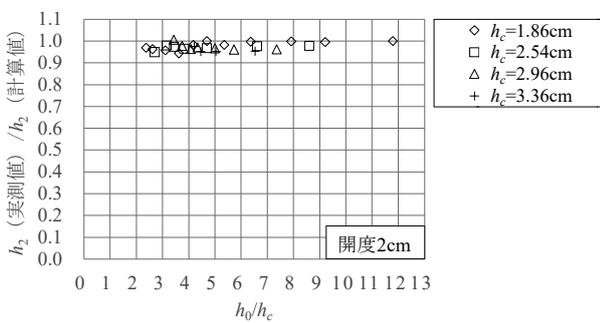
(c) $a=6\text{cm}$

Fig.4 ゲート下流水深計算の検証結果

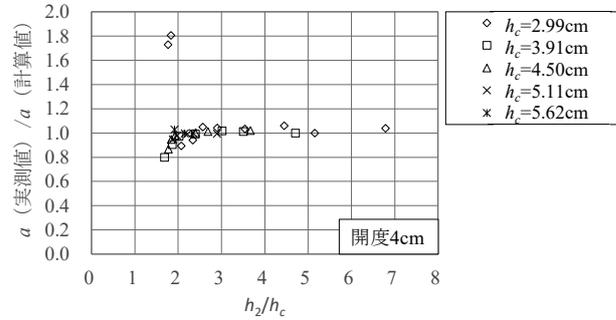


(a) $a=2\text{cm}$

Fig.3 ゲート上流水深計算の検証結果



(a) $a=2\text{cm}$



(b) $a=4\text{cm}$

Fig.5 ゲート開度計算の検証結果

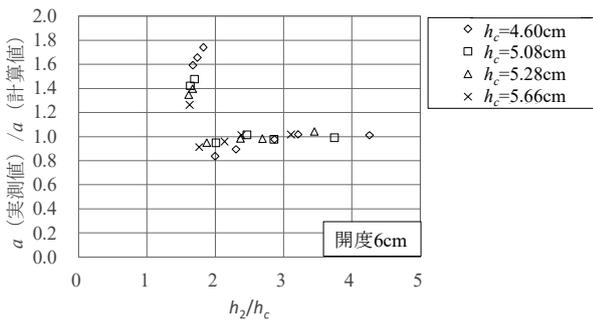
(c) $a=6\text{cm}$

Fig.5 ゲート開度計算の検証結果（続き）

4. 結語

以上、本研究ではスルースゲートをすぎる潜り流出について、流量、ゲート上流の水深、ゲート下流の水深およびゲート開度を自身以外の3つの水理量を用いて表現する式を導き、それらの関係式の妥当性を室内水路実験により検証した。その結果、 $h_2/h_c \geq 2.5$ の範囲で実験値と良好な一致を示した。これら4つの量はゲートをすぎる潜り流出の現象を規定する水理量で相互依存関係にあると論理的に考えてきたが、本研究によりそのことを定量的に与えることができた。今後において、本研究の成果がゲート建設の総合的設計に活用されることを期待している。

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として在籍された桑山なるみ、安井美沙希、亀井悠喜信の各氏には実験で熱心な協力をいただいた。記して深甚の謝意を表す次第である。

引用文献

- 羽田野袈裟義, 荒尾慎司, 李 洪源, 天野卓三 (2017) : 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, **68**(2), 33-40.
- 羽田野袈裟義, 荒尾慎司, 金守幸吉 (2021) : 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, **312**, I_111-I_118.
- Henry, R. (1950) : Discussion to "On submerged jets", Trans. ASCE, **115**, 687-694.
- 亀井悠喜信, 荒尾慎司, 羽田野袈裟義 : 縮流係数と縮流断面の流速非一様性を評価したゲートからの流出の水理特性, 土木学会中国支部第71回研究発表会講演概要集, 103-106.
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1967) : Flow equation for the sluice gate, *Jour. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, **93**(3), 167-186.
- Swamee, P.K. (1992) : Sluice-gate discharge equations, *Jour. of Irrigation and Drainage Engineering*, **118**(1), 56-60.
- 滝田茂雄, 沼野研一郎, 篠田哲平 (2012) : ゲートによる流量制御方法及び流量制御装置, 特開 2012-225049.
- 椿東一郎 (1973) : 水理学 I, 森北出版, 199.

安田浩保, 山田 正, 後藤智明 (2003) : 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, **733**, 89-105.

ヘーゼン・ウィリアムズ式の一般化と流速係数の再評価

宮崎大学農学部 稲垣仁根

要旨:管路の摩擦損失を記述するヘーゼン・ウィリアムズ式では、摩擦損失係数 f とレイノルズ数 Re が指数関数 $f=aRe^{-b}$ の関係にあり、 $b=0.15$ と設定して、レイノルズ数の影響を消去している。本来、流量係数 C はレイノルズ数の関数とならないことに利点があり、現状での流速係数 C の設定は、水理実験結果からヘーゼン・ウィリアムズ式 ($b=0.15$) を用いて行っている。しかし、一部の管種を除き、 $f\sim Re$ 関数は、 $b>0.15$ であるので、流速係数 C は、同じ管を使用して実験した場合でも、流速が増加すると、連動して増加する傾向になる。その結果、流速係数 C はの値は、流速により、最大と最小の間の幅を生じる結果となる。各種の内面ライニング毎に a 、 b を水理実験結果に基づいて、設定した結果を示す。

さらに、ヘーゼン・ウィリアムズ式と水理実験による $f\sim Re$ 関数を一致させ、流速係数 C を固定値として設定するためには、ヘーゼン・ウィリアムズ式を定数 a 、 b を取り込んだ形で一般化する必要がある。本報告では、ヘーゼン・ウィリアムズ式の一般式を導出し、さらに、水理実験より求めた定数 a 、 b を一般化式に適用して、ライニング毎に流速係数 C を求め、レイノルズ数に関係なく一定値となることを示した。また、各内面ライニングによる定数 a 、 b の2次曲線と流速係数 C の関係を示し、粘性と口径の影響があることを確認した。

1 はじめに

管路の摩擦損失を記述するヘーゼン・ウィリアムズ式では、摩擦損失係数 f とレイノルズ数 Re が指数表示 $f=aRe^{-b}$ の関係にあり、 $b=0.15$ と設定して、レイノルズ数の影響を消去している(稲垣・日吉, 2021a; 2021b)。

現在使用されている各種の内面塗装や樹脂管については、水理実験が行われており、レイノルズ数の変化による摩擦損失係数の増減の傾向が得られている。

本来、流量係数 C はレイノルズ数の関数とならないことに利点があり、現状での流速係数 C の設定は、水理実験結果からヘーゼン・ウィリアムズ式 ($b=0.15$) を用いて行っている。しかし、一部の管種を除き、 $f\sim Re$ 関数は、 $b>0.15$ であるので、流速係数 C は、同じ管を使用して実験した場合でも、流速が増加すると、連動して増加する傾向になる。その結果、流速係数 C は流速により、値に最大と最小の幅を生じる結果となり、設計基準(農林水産省, 2021)においても、同一内面

ライニングのバラツキも考慮して、最大値、標準値、最小値という取り扱いがされている。

従って、ヘーゼン・ウィリアムズ式と水理実験による $f\sim Re$ 関数を一致させ、流速係数 C を固定値として設定するためには、ライニング毎に水理実験より求めた a 、 b を用いることができるように、ヘーゼン・ウィリアムズ式を一般化する必要がある。

本報では、表 1に示す流速係数測定実験の結果に基づいて、鋼管 (SP)、ダクタイル鋳鉄管 (DCIP)、強化プラスチック複合管 (FRPM)、塩化ビニル管 (VP) の各種の内面ライニング毎に a 、 b を設定した。

さらに、摩擦損失係数 f とレイノルズ数 Re の曲線を表す $f=aRe^{-b}$ の定数 a 、 b を用いるために、ヘーゼン・ウィリアムズ式の一般化を行った。一般式による流速係数 C を求め、レイノルズ数に関係なく一定値となることを示した。

表 1: 流速係数測定実験一覧表

試験番号	管種	塗装	年.月	現地施設	屋外実験	口径 (呼び径) m	延長 m	流速 m/s	文献
1	SP	液状エポキシ樹脂	2018.6		○	0.3	11	0.5~4.0	8,20
2			2019.5	○		1.1	265	0.7~1.3	15
3	DCIP	粉体エポキシ樹脂	2016.1		○	0.3	10	0.5~4.0	16
4	SP	タールエポキシ樹脂	1985.9	○		1.8	782	0.4~0.8	13
5			1984.6						
			2003.9~1983.7	○		1.5	555	0.4~1.1	14
6	DCIP	液体シリカエポキシ樹脂	2016.12		○	0.3	10	0.5~4.0	17
7			2016.1		○**	0.3	10	0.5~4.0	16
8			2014.9		○*	0.3	12	0.5~3.0	4
9			2018.5	○		0.6	167	0.92	6,19
10			2016.5~2017.7	○		0.35	185	1.0~1.4	5,9,2
11		モルタルライニング	2016.1		○	0.3	10	0.5~4.0	16
12			2016.1		○	0.3	10	0.5~4.0	16
13	FRPM		1976.9	○		0.7 1.2	396 350	1.0~1.2	7
14	VP		2016.1		○	0.3	10	0.5~4.0	16
15			2016.12		○	0.3	10	0.5~4.0	11

*日本ダクタイル鋳鉄管協会, 2017

**日本ダクタイル鋳鉄管協会, 2019

粉体シリカエポキシ樹脂塗装については、実験7と8では、エポキシ樹脂粉体塗装に混合した無機材料の割合が、質量比で 1:2 と 1:1 の割合で異なっている。シリカの混入割合による内面粗度の増減の影響が認められる。

タールエポキシ 5 については、計測が供用地点において、1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 2003と長期間にわたっており、管種4,5については、図2で年次別に直線で結んでいる。

モルタルライニングについては、圧力測定の穿孔時に内面のライニングが一部微小に剥がれて、内面近傍での流れが乱れることにより、圧力自体の計測値に影響が認められる。

2 水理実験結果と流速係数C

2.1 水理実験

本報における流速係数Cの計算には、ヘーゼン・ウィリアムズ式を用い、レイノルズ数Reを基準として、比較するため、実内径を使用して、再計算した。

$$V = 0.84935CR^{0.63}I^{0.54} = 0.35464CD^{0.63}I^{0.54}$$

$$Q = 0.27853CD^{2.63}I^{0.54}$$

$$h_f = \frac{10.666}{C^{1.85}} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.87}} L \quad (1)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2)$$

ここに、Q=流量、D=内径、L=長さ、V=断面平均流速、R=径深、C=流速係数、 h_f =摩擦損失水頭、Re=レイノルズ数、 ν =動粘性係数である。

2.2 流速係数Cと流速の関係

各内面ライニングの水理実験の結果について、流速係数Cと流速の関係を、内面塗装の6種類について図 1に、樹脂管の2種類について、図 2に示した。

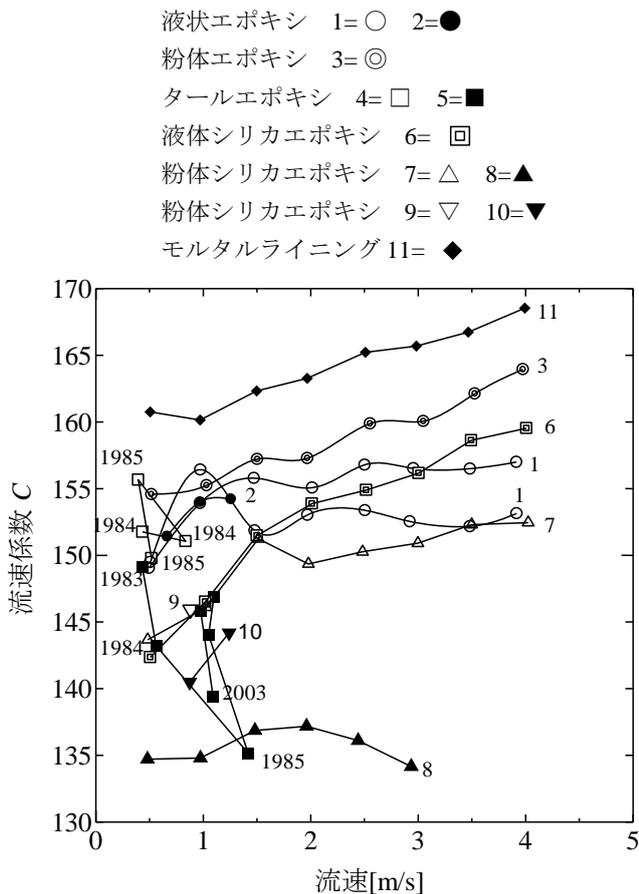


図 1: 流速係数と流速 (内面塗装)

流量係数Cはレイノルズ数の関数とならないことに利点があるが、流速係数Cは、実験条件が同じ場合でも、流速が増加すると、連動して増加する傾向になる場合がある。その結果、流速係数Cは、最大と最小の値の間で幅を生じる結果となっている。

タールエポキシ

タールエポキシ4, 5については、直期間にわたる流速係数のCの経年低下が認められる。

モルタルライニング

モルタルライニングについては、計測状況に問題があったため、設計基準の範囲を大きく逸脱しており、160を超える流速係数Cが求められている。

シリカエポキシ樹脂

実験8の方が、シリカの混入割合が多く、内面粗度に影響を与え、流速係数Cが低くなったものと考えられる。粉体シリカ8については、流速係数Cが流速の増加に対して、ほぼ一定値を保っている。また、シリカ7については、流速の増加に対する流速係数の変化は、直線的な増加傾向を示している。シリカ9, 10については、現地における試験であり、流速の幅が小さく、ほぼ固定した状態での流速係数となっている。

液状エポキシ・FRPM・VP

液状エポキシ樹脂1, 2, FRPM 12, VP 14については、流速の増加に対する流速係数の変化は、緩やかな増加傾向を示している。VP 15については、やや流速係数の増加が大きくなっている。なお、FRPM 13については、現地計測のため、流速の幅は小さく、流速係数の値も、やや逸脱気味である。

粉体エポキシ・液状シリカエポキシ

粉体エポキシ樹脂3と液状シリカエポキシ6については、流速の増加に対する流速係数の変化は、直線的な増加傾向を示している。

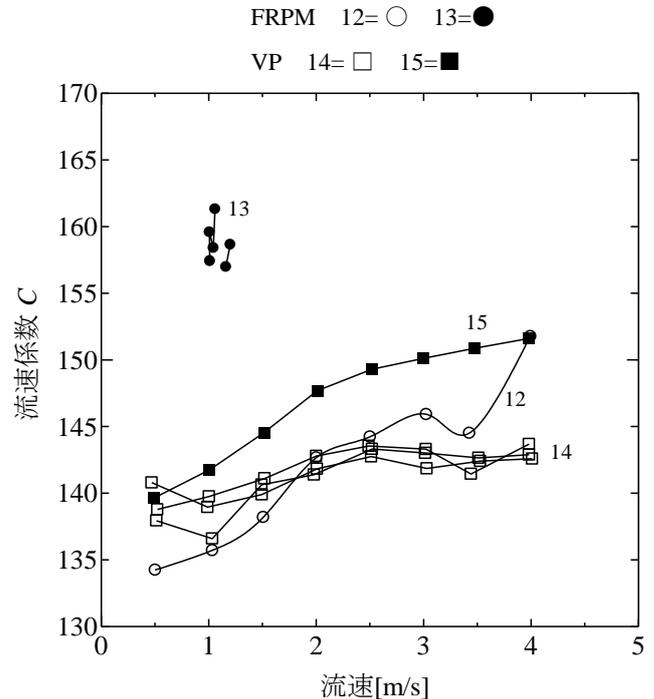


図 2: 流速係数と流速 (樹脂管)

2.3 流速係数Cとレイノルズ数の関係

流速係数Cについて、レイノルズ数Reを基準にして、図 3に内面塗装、図 4に樹脂管の結果を示した。さらに、ブラジウスの1/4乗則とプラントル・カルマンの式のC~Re線に合わせて示した。

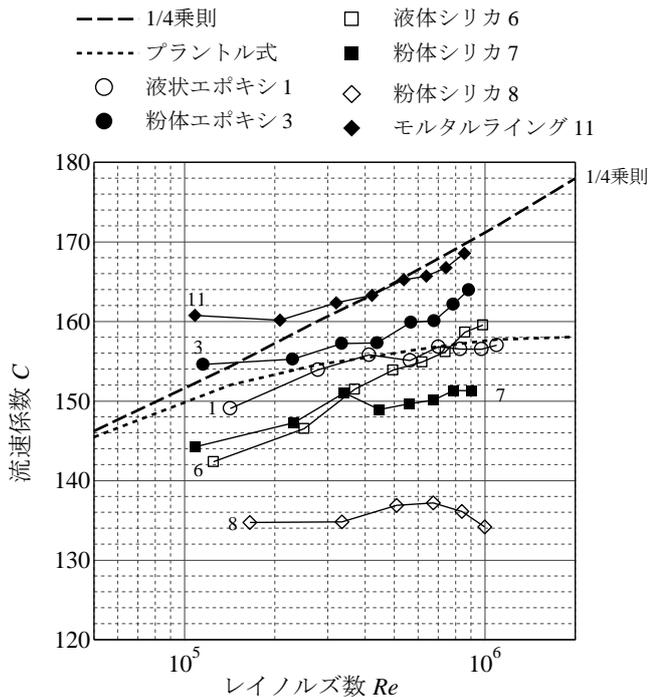


図 3: レイノルズ数と流速係数 (内面塗装)

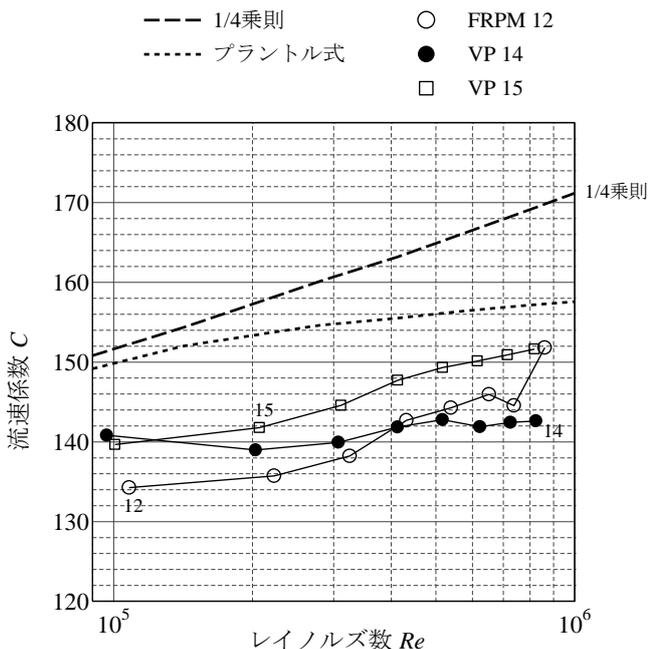


図 4: レイノルズ数と流速係数 (樹脂管)

レイノルズ数 Re が 2000 を越すと遷移区間を経て、滑面乱流では、式(3)のブラジウスの 1/4 乗則に従う。

$$f = 0.3164Re^{-0.25} \quad (3)$$

さらに、レイノルズ数 Re が 10^5 を越すと、摩擦損失係数 f は底層の粘性のために、式(4)に示す対数抵抗則 (プラントル・カルマンの式) に従う。本式は、滑面と不完全粗面の境界線を示す。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad (4)$$

式(4)のプラントル・カルマンの式を回帰計算により指数形式 $f = aRe^{-b}$ で表すと、式(5)のようになる。

$$f = 0.1785Re^{-0.1965} \quad (5)$$

摩擦損失係数 f を用いて、流速係数 C を表すと、式(6)で与えられる (稲垣, 2021)。

$$C = \left(\frac{133.7}{fD^{0.17}V^{0.15}} \right)^{1/1.85} \quad (6)$$

液状エポキシ1, 粉体シリカ6, 7, FRPM 12, VP 14, 15は、レイノルズ数 Re の増加に比例して、流速係数 C が増加傾向にあり、レイノルズ数の関数となっている。

6,7,12,14については、 $C \sim Re$ 曲線は、滑面と不完全粗面の境界線を示すプラントル・カルマン式から、少し離れた不完全粗面で、粘性と粗度の影響がともに効くような遷移区間に位置している。また、1の $C \sim Re$ 曲線は、表面粗度を考慮していないプラントル・カルマン式に接近している。

また、粉体シリカ8については、 $C \sim Re$ 曲線は、 $C=130 \sim 140$ の範囲に収まっており、レイノルズ数の増減による影響を受けていない。

なお、モルタルライニング11と粉体エポキシ3については、ブラジウスの1/4乗則とプラントル・カルマン式に挟まれた領域に入っており、測定上の誤差が影響していると考えられる。

通常のパイプライン設計で対象とする流れの状態は、下限は表面粗度を考慮していないプラントル・カルマン式の近傍から、プラントル・カルマン式の滑面から離れて、不完全粗面で、粘性と粗度の影響がともに効くようなコールブルック式が適用される領域が、対象になる。

3 摩擦損失係数 f とレイノルズ数の関係

3.1 ダルシー・ワイスバッハ式と摩擦損失係数

ダルシー・ワイスバッハ式の摩擦損失係数 f は、式(7)で与えられる。水理実験の結果から、摩擦損失水頭 h_f 、平均流速 V を用いて、摩擦損失係数 f が求められる。

$$f = h_f \frac{D}{L} \frac{2g}{V^2} \quad (7)$$

3.2 内面ライニングの $f \sim Re$ 曲線

管の内面ライニングの摩擦損失係数 f をレイノルズ数 Re を用いて、ブラジウスの 1/4 乗則、プラントル・カルマン式の回帰式と同様の形式で、式(8)のように表す。なお、ヘーゼン・ウィリアムス式では、 $a=0.1 \pm 0.03$ 、 $b=0.15$ である (稲垣, 2021)。

$$f = aRe^{-b} \quad (8)$$

3.3 水理実験結果による $f \sim Re$ 曲線

水理実験は、内面ライニングについて、内面塗装11種類、樹脂管4種類の合計15種類の水理実験を行っている。図5に内面塗装、図6に樹脂管の $f \sim Re$ 曲線を示した。

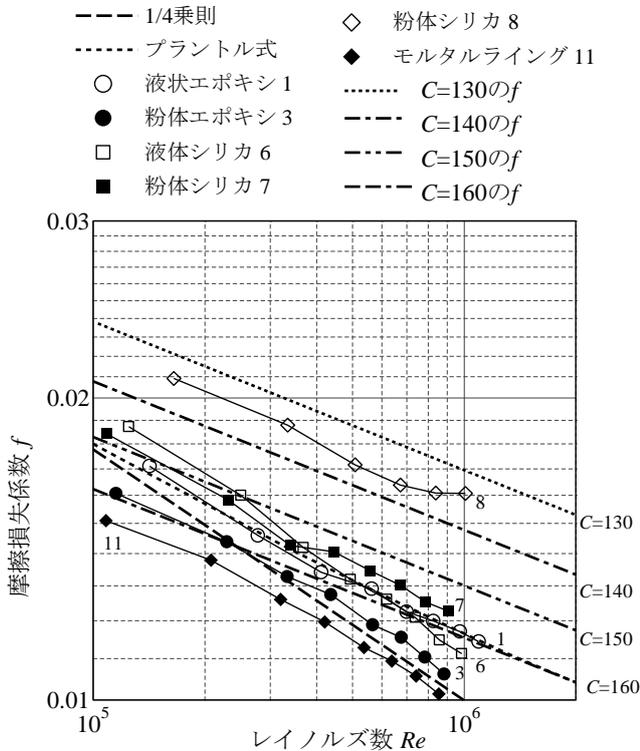


図5: レイノルズ数と摩擦損失係数 (内面塗装)

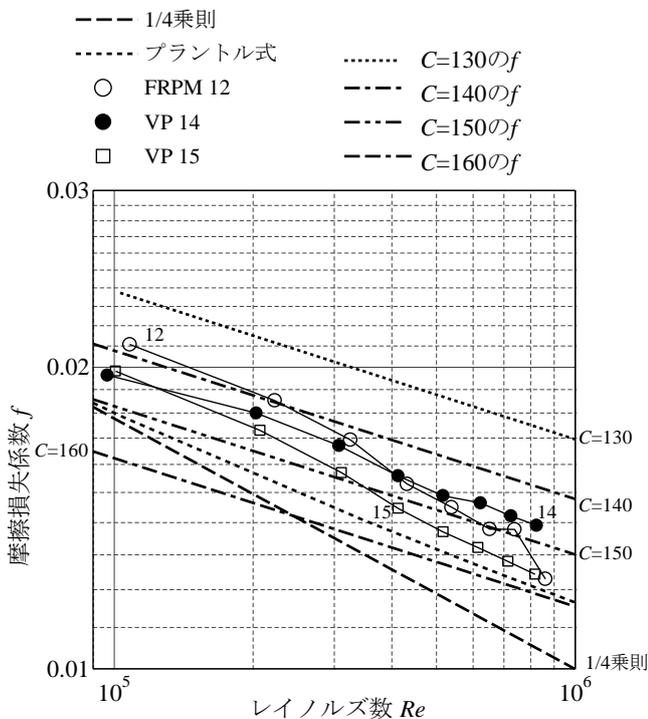


図6: レイノルズ数と摩擦損失係数 (樹脂管)

粉体シリカ8については、 $f \sim Re$ 曲線が流速係数 $C=130 \sim$

140の中間に、VP14についても流速係数 $C=140 \sim 150$ の中間に位置しており、ほぼ平行な $f \sim Re$ 曲線が得られている。

液状エポキシ1については、プラントル・カルマン式に近接した $f \sim Re$ 曲線となっている。

図5の粉体エポキシ3、液体シリカ6、粉体シリカ7、モルタルライニング11、図6のFRPM 12、VP 15については、 $f \sim Re$ 曲線が流速係数 $C=140 \sim 160$ のラインを斜めに横切っており、勾配が急になっている。これにより、 $f \sim Re$ 曲線が複数の流速係数のラインを跨いでいるために、同一の実験であっても、実測による流速係数 C が、最大と最小の間で値に幅を生じる結果となる現象を生じている。

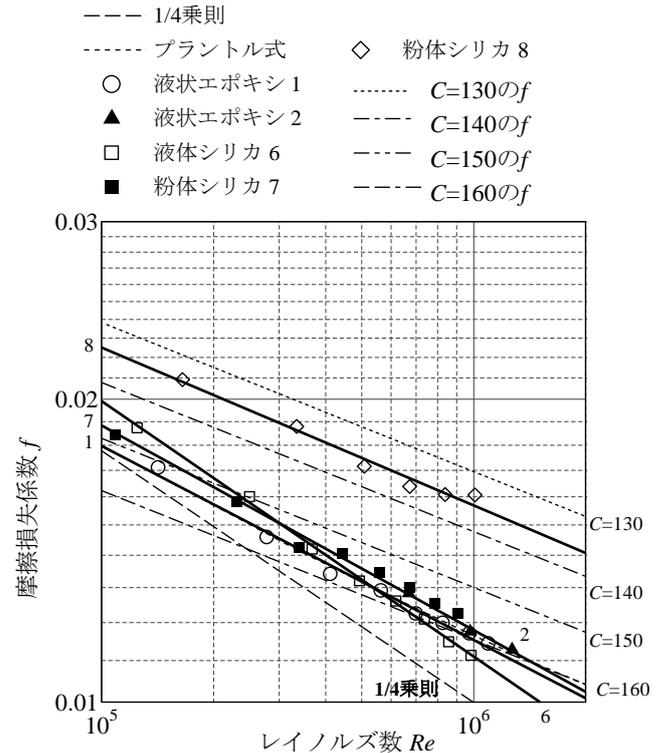


図7: 摩擦損失係数の回帰直線 (内面塗装)

3.4 $f \sim Re$ 回帰式

$f \sim Re$ 曲線の特性を評価するために、回帰を行い、定数 a 、 b を特定した。式(7)で与えられる内面ライニングの $f \sim Re$ 曲線を表す $f = aRe^{-b}$ の定数 a 、 b について、表2に内面塗装、表3に樹脂管、表4に公式を示す。現地の供用中の施設の計測で、 $f \sim Re$ 曲線を回帰できないデータについては、定数 a 、 b は求めている。

表2: $f \sim Re$ 回帰式の定数 a 、 b (内面塗装)

管種番号	1	2	3	6	7	8	11
内面塗装	液状エポキシ	液状エポキシ	粉体エポキシ	液状シリカ	粉体シリカ	粉体シリカ	モルタルライニング
a	0.165	0.196	0.171	0.369	0.163	0.137	0.145
b	0.193	0.203	0.201	0.254	0.189	0.157	0.194

表3: $f \sim Re$ 回帰式の定数 a 、 b (樹脂管)

管種番号	12	14	15
管種	FRPM	VP	VP
a	0.399	0.137	0.281
b	0.251	0.168	0.229

表 4: $f \sim Re$ 回帰式の定数a, b (公式)

$f \sim Re$ 公式	ヘーゼン・ウィリアムズ式	プラントル・カルマン式	ブラジウスの1/4乗則
a	0.1 ± 0.03	0.1785	0.3164
b	0.15	0.1965	0.25

3.5 $f \sim Re$ 回帰直線

図7, 8に実験値の $f \sim Re$ データとデータによる回帰式を用いた $f \sim Re$ 回帰線を示す。

液状エポキシ1, 2の $f \sim Re$ 回帰線は、プラントル・カルマン式に接近している。また、粉体シリカ8の $f \sim Re$ 回帰線は、ヘーゼン・ウィリアムズ式の $C=130 \sim 140$ の間で、流速係数のラインに沿っている。

粉体シリカ6, 7, FRPM, VPについては、 $f \sim Re$ 回帰線は、 f が Re の増加に対して、流速係数のラインを跨ぐような勾配で低下している。

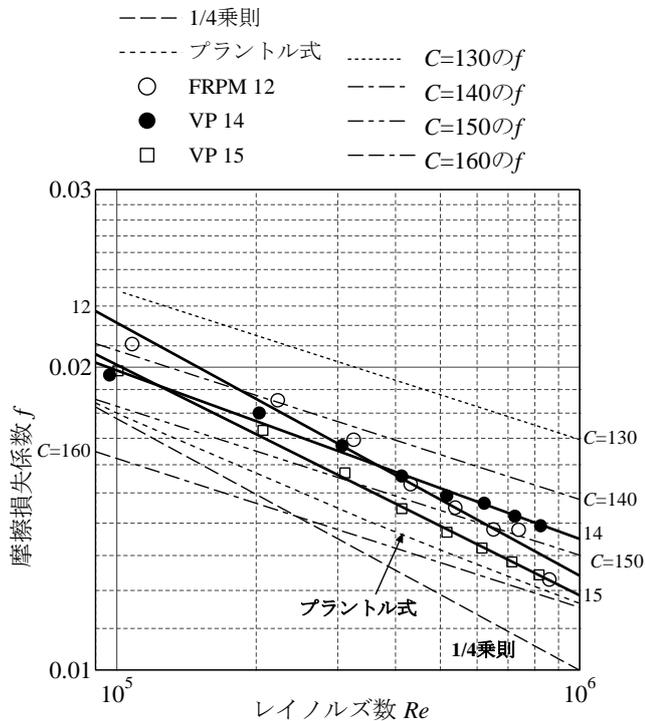


図 8: 摩擦損失係数の回帰直線 (樹脂管)

3.6 定数a, bの関係式

水理実験データとして用いた液状エポキシ, 液状シリカ, 粉体シリカの内面塗装の3種類, RPM, VPの2種類の樹脂管における合計8ケースの水理実験結果を対象として, 各内面ライニングによる定数aを変数とし, 定数bの2次曲線を, 式(9)で表現する(稲垣・日吉, 2021b).

$$b = 0.0509 + 1.0309a - 1.3238a^2 \quad (9)$$

また, 定数bを変数とし, 定数aの2次曲線を, 式(10)で与える。

$$a = 0.7882 - 8.3858b + 26.8758b^2 \quad (10)$$

式(9)の定数a, bについて, ヘーゼン・ウィリアムズ式, ブラジウスの1/4乗則, プラントル・カルマン式も合わせて, 図9に示した。定数bは、 $f \sim Re$ 曲線の勾配を示しており、b

が大きくなるほど、 $f \sim Re$ 曲線が急であることを示している。

ヘーゼン・ウィリアムズ式によるポイント

ヘーゼン・ウィリアムズ式では、 $a=0.1 \pm 0.03$, $b=0.15$ である(稲垣, 2021)。従って, ヘーゼン・ウィリアムズ式によるポイント○は, 水理実験を行った各内面ライニングの中で最も定数a, bが小さくなる「粉体シリカ8」に近接している。ヘーゼン・ウィリアムズ式が想定する内面ライニングの状態は、「粉体シリカ8」に相当するレベルであると考えられる。

ブラジウスの1/4乗則によるポイント

ブラジウスの1/4乗則の定数a, bは、 $a=0.3164$, $b=0.25$ であり, ブラジウスの1/4乗則によるポイント◇は、「液状シリカ6, FRPM 12」の近傍である。実測結果の中では、 $f \sim Re$ 線が、最も急勾配となっている。

プラントル・カルマン式によるポイント

プラントル・カルマン式の定数a, bは、 $a=0.1785$, $b=0.1965$ である。プラントル・カルマン式によるポイント□は、「液状エポキシ12 粉体シリカ7」の近傍であり, 滑面と不完全粗面の境界線を示すプラントル・カルマン式に近接している。

aが小さい方から大きい方に異動するとして, 式(9)の曲線は, 流れの形態は, 粗面における十分に発達した乱流から滑面と粗面の間における十分に発達した乱流を経て, 滑面における乱流に至る変化を示している。

これは, 管の内面ライニングの状況が, 完全粗面→不完全粗面→滑面へ移行していることを示している。

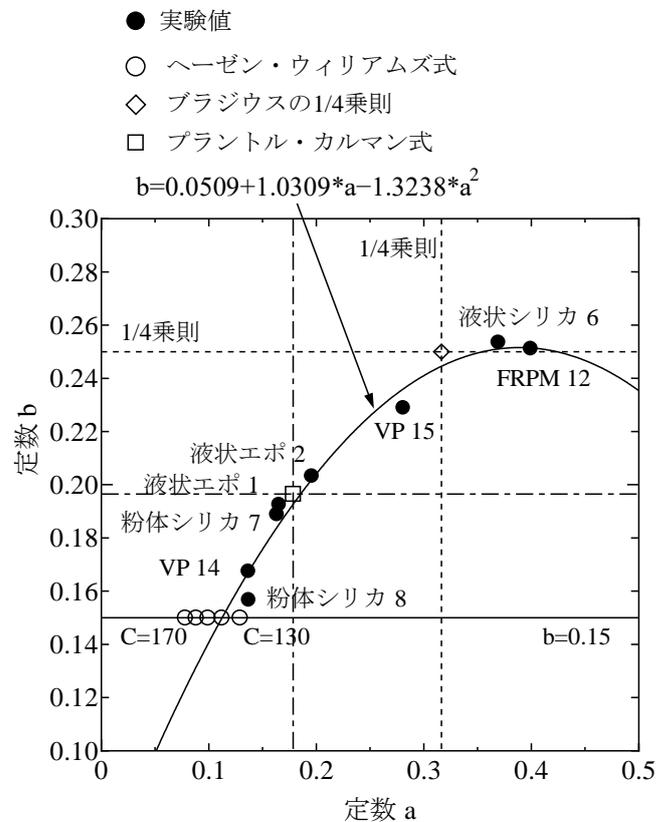


図 9: $f \sim Re$ 回帰式の定数a, b

定数aとbの関係については, 図10に示すが, x軸は, 式(9)では, 定数aであり, 式(10)では, 定数bである。各ライ

ニングのaとbについてはマークで示し、式(9)、(10)は回帰線 で示した。

式(9)のa~b曲線と式(10)のb~a曲線のx軸は、同じであるが、表 2, 3の実験結果による定数a, bのポイントと定数a, bの回帰線は、よく一致している。

a~b曲線では、bは、aの増加に対応して、一定勾配で増加するが、a=0.4付近で最大となる。b~a曲線では、定数bが増加すると、定数aは2次関数的に増加する傾向にある。

ヘーゼン・ウィリアムス式のa, bの値は、図 10の実験値の領域から外れたa~b線の左端、b~a線の底の位置しており、実験結果より求められた最低値付近に当たっている。

これについては、ヘーゼン・ウィリアムス式が、1900年代の初頭に提案された式であり、当時のライニングが施されていない鑄鉄管を対象としていることが影響している。現在は、鉄さびコブが発生する鑄鉄管から高品質な内面ライニングを有する管に進化しており、a, bの値は、ヘーゼン・ウィリアムス式の値より、a~b線の右端、b~a線の上側に移動している。

従って、ヘーゼン・ウィリアムス式を現在の管の水理実験結果に適用した場合、両者のf~Re線は、摩擦損失係数へのレイノルズ数の影響が異なる状況となっているので、実験値から流速係数を求めた場合に、一定値にならず、流速の影響を受けるような結果になる。

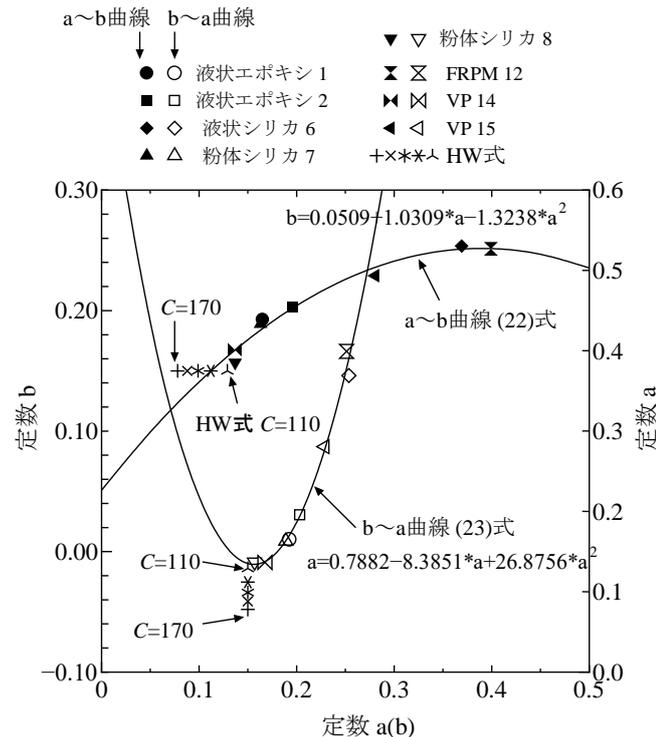


図 10: 定数a, bの関係式

3.7 定数a, bによるf~Re回帰線

f=aRe^{-b}の回帰線については、a=0.05~0.5まで、0.5ピッチで式(9)により、bを求め、さらに、式(8)により摩擦損失係数fを求めた。

a=0.05~0.5の範囲のf~Reの回帰線を、図 11に示すが、a=0.05からaが増加するのに対応して、a=0.30までは勾配が増加し、a=0.35~0.45では、勾配はほぼ同一で有

り、a=0.5において、勾配が減少している。

f=aRe^{-b}の回帰線の変化傾向は、a=0.05~0.5の範囲において、図 10の定数a, bの2次曲線の傾向に合致している。

また、ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数C毎の摩擦損失係数fを点線で示しているが、a=0.1±0.03, b=0.15であるため、f=aRe^{-b}の回帰線のa=0.1に近似した直線が、勾配を一定として、平行移動する直線を描いている。

このようなf=aRe^{-b}の回帰線の変化傾向が、広範囲な内面ライニングに適用できるかどうかの評価については、今後の、実験データの集積が必要になる。

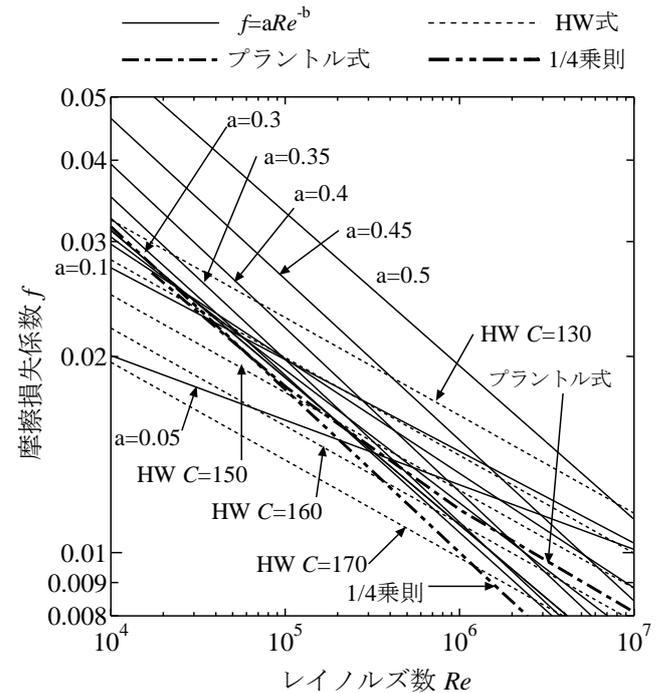


図 11: 定数aによるf~Re回帰線

4 ヘーゼン・ウィリアムス式の一般化

管路の摩擦損失を記述するヘーゼン・ウィリアムス式では、摩擦損失係数fとレイノルズ数Reが指数表示 f=aRe^{-b}の関係にある。ヘーゼン・ウィリアムス式では、a=0.1±0.03, b=0.15であるが、f=aRe^{-b}の一般的な関係をヘーゼン・ウィリアムス式に導入して、管内面ライニング毎に、摩擦損失を求めることが出来る汎用化を行う。

動水勾配Iについて、ヘーゼン・ウィリアムス式では、0.54乗であるが、1/(2-b)乗と一般化する。

ヘーゼン・ウィリアムス式の流速は式(11)、流量は式(12)に、摩擦損失水頭は式(13)に変換される。また、水理実験などから得られる摩擦損失水頭h_fを用いて、流速係数Cは、式(14)で求められる。

流速係数Cを与える式(14)は、ヘーゼン・ウィリアムス式から逆算して、直接的に導いたものであり、水理実験や管路の水頭配分等で、摩擦損失水頭を把握しているか、想定する場合など、水理・管路の諸元が与えられている場合に使用する式である。

$$V = 0.84935C \left(\frac{D}{4} \right)^{0.63} I^{1/(2-b)} = 0.35464CD^{0.63} I^{1/(2-b)} \quad (11)$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} 0.35464CD^{0.63} I^{1/(2-b)} = 0.27853CD^{2.63} I^{1/(2-b)} \quad (12)$$

$$D^{2.63} = \frac{Q}{0.27853C} I^{-1/(2-b)}$$

$$D = \frac{Q^{1/2.63}}{(0.27853C)^{1/2.63}} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{-1/((2-b)*2.63)}$$

$$= 1.62583 \frac{Q^{1/2.63}}{C^{1/2.63}} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{-1/((2-b)*2.63)}$$

$$\left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/((2-b)*2.63)} = 1.62583 \frac{Q^{1/2.63}}{C^{1/2.63} D}$$

$$\left(\frac{h_f}{L} \right) = 1.62583^{(2-b)*2.63} \frac{Q^{2-b}}{C^{2-b} D^{(2-b)*2.63}}$$

$$h_f = \frac{1.62583^{(2-b)*2.63}}{C^{2-b}} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \quad (13)$$

$$C^{2-b} = 1.62583^{(2-b)*2.63} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} \frac{L}{h_f}$$

$$C = \left(1.62583^{(2-b)*2.63} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} \frac{L}{h_f} \right)^{1/(2-b)} \quad (14)$$

5 流速係数Cの定義

ダルシー・ワイスバッハ式は、式(7)で与えられる。流量Qを用いて、流速Vを書き直すと、ヘーゼン・ウィリアムス式の原型となる式(15)が得られる。

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L}{2gD} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 L = \frac{f}{g} \frac{8}{\pi^2} \frac{Q^2}{D^5} L \quad (15)$$

式(15)のダルシー・ワイスバッハ式から、ヘーゼン・ウィリアムス式への変形は、

$$Q^2 \text{を } Q^b Q^{2-b}, \\ D^5 \text{を } D^{5-(2-b)*2.63} D^{(2-b)*2.63}$$

に置き換え、式(16)のように変形する。

$$\begin{aligned} h_f &= \frac{f}{g} \frac{8}{\pi^2} \frac{Q^b}{D^{5-(2-b)*2.63}} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \\ &= \frac{f}{g} \frac{8}{\pi^2} \frac{A^b V^b}{D^{-0.26*2.63b}} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \\ &= \frac{f}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^b \frac{V^b}{D^{-0.26*2.63b}} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \\ &= \frac{f}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^b \frac{D^{2b} V^b}{D^{-0.26*2.63b}} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \end{aligned} \quad (16)$$

さらに、式(16)の中にレイノルズ数Reを捻出して、式(17)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{D^{2b} V^b}{D^{-0.26+2.63b}} &= D^{0.26-0.63b} V^b = D^b V^b D^{0.26-1.63b} \\ &= \left(\frac{DV}{\nu} \right)^b \nu^b D^{0.26-1.63b} = Re^b \nu^b D^{0.26-1.63b} \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、Re=レイノルズ数(DV/ν)，ν=動粘性係数である。式(17)を式(16)に戻すと、式(18)が得られる。

$$h_f = \frac{1}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^b f Re^b \nu^b D^{0.26-1.63b} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \quad (18)$$

ここで、摩擦損失係数fをレイノルズ数Reで、式(8)のように表す。

$$f = a Re^{-b} \quad (8)$$

式(8)にRe^bを乗じることにより、Reの影響を消し去り、式(19)式のようになる。

$$f Re^b = a Re^{-b} Re^b = a \quad (19)$$

式(19)を式(18)に代入して、式(20)が得られる。

$$h_f = \frac{1}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^b a \nu^b D^{0.26-1.63b} \frac{Q^{2-b}}{D^{(2-b)*2.63}} L \quad (20)$$

また、ヘーゼン・ウィリアムス式は、式(13)、(20)で与えられるので、両式を用いて、流速係数Cは式(21)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^b a \nu^b D^{0.26-1.63b} &= \frac{1.62583^{(2-b)*2.63}}{C^{2-b}} \\ C^{2-b} &= \frac{1.62583^{(2-b)*2.63}}{\frac{1}{g} \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^b a \nu^b D^{0.26-1.63b}} \\ &= \frac{12.090 \times 1.62583^{(2-b)*2.63}}{0.78534^b a \nu^b D^{0.26-1.63b}} \\ C &= \left(\frac{12.090 \times 1.62583^{(2-b)*2.63}}{0.78534^b a \nu^b D^{0.26-1.63b}} \right)^{1/(2-b)} \end{aligned} \quad (21)$$

流速係数Cを与える式(21)は、摩擦損失係数fとレイノルズ数Reの関係を基に、流速係数Cの内部構造を表したものである。

流速係数Cは、式(21)で示すように、動粘性係数νと内径Dの関数になるが、ヘーゼン・ウィリアムス式においては、D=1.1では、D^{0.015~0.020}≒1.001~1.002、D=0.3では、D^{0.015~0.020}≒0.982~0.976であり、1/D^{0.015~0.020}で約3%の差を生じる。

また、20℃の動粘性係数は、0.000001m²/sなので、水温10~30℃の範囲でν^{0.15}≒0.122~0.131であり、1/ν^{0.15}≒8.197~7.634となるので、約8%の差を生じる。

従って、管の内面粗さに依存する摩擦損失係数fとレイノルズ数Reの関係式である式(8)の定数a、bの値により、流速係数Cが既定されるが、管の内径と水の粘性の要因も、流速係数Cの値に10%程度は影響することになる。

ヘーゼン・ウィリアムス式は、式(14)においては、水温や粘性についても考慮していないが、この式は、実測値から流速係数 C を求める場合に用いる式であることによる。その結果、実測値から流速係数 C を導出すると、粘性等の影響が実測値に内包されているので、流速係数の数値に幅を生じることになる。

6 流速係数 C の再評価

6.1 実験結果による $C \sim Re$ 回帰線

表2, 3の定数 b を用いて、実験結果に対応する流速係数 C を、式(14)から求め、 $C \sim Re$ をマークで図12に示した。さらに、表2, 3の定数 a, b を用いて、流速係数 C を、式(21)から求め、 $C \sim Re$ を、直線で図12に示した。

通常の水理計算で用いている式(9)のヘーゼン・ウィリアムス式により、流速係数 C を求めた結果を、図3に示している。 $C \sim Re$ を図12と図3で比較した場合、図3では、レイノルズ数 Re の増加に連動して、流速係数 C は、増加する傾向にある。

また、図12では、レイノルズ数 Re が増加しても、流速係数 C が一定値を維持しており、本来のヘーゼン・ウィリアムス式の目指すところが成立している。図12において、粉体シリカ8とVP14については、ヘーゼン・ウィリアムス式の範囲($C=133 \sim 154$)に入っている図3においても、 $C \sim Re$ の関係は、ほぼ平行になっている。

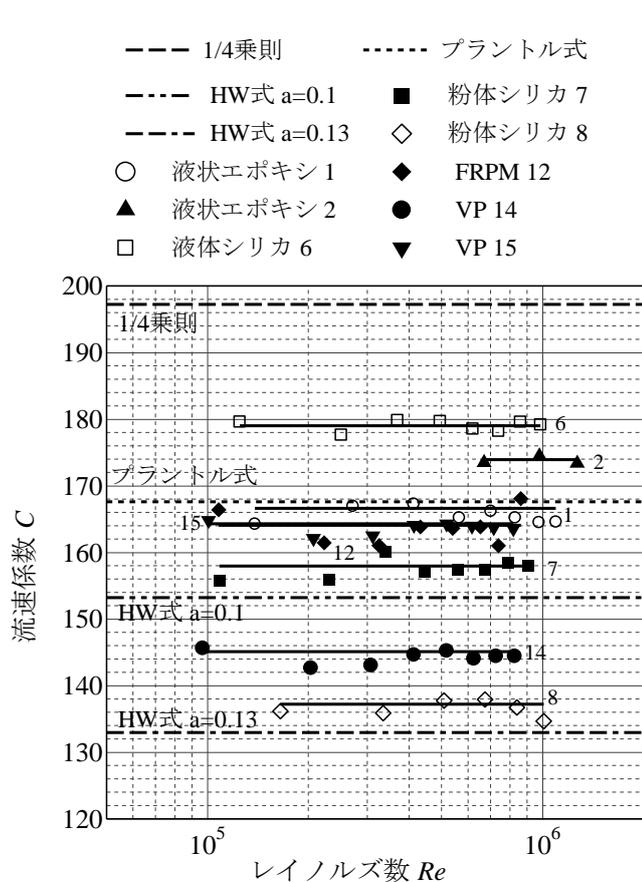


図12: レイノルズ数と流速係数 C (一般式)

6.2 定数 $b \sim C$ 回帰線

各内面ライニングによる定数 a, b について、式(10)に示す2次曲線より、定数 b に対応する定数 a を求めた。この定数 a, b の組み合わせを用いて、ヘーゼン・ウィリアムス式を一般化した式(21)より、流速係数 C の曲線を求めて、図13に示した。さらに、水理実験データとして用いた8ケースの水理実験結果に基づいた定数 a, b を用いて、一般式の式(21)より流速係数 C を求めて、図13に、マークで示した。

式(10)により求めた定数 a, b を式(21)に代入して求めた $b \sim C$ 曲線と表2, 3の各ライニングの定数 a, b を式(21)に代入して、求めた流速係数 C は、概ね一致しているが、FRPM12と液状シリカ6では、乖離が認められる。これについては、定数 a, b が式(9)から僅かでも外れると、式(21)では、大きな差になって現れると考えられる。

また、 $b \sim C$ 曲線については、液状エポキシ1については粘性、液状エポキシ2については、粘性と口径の影響を生じている。定数 $b > 0.2$ 付近から、 $b \sim C$ 曲線への粘性と口径の影響が顕著になる傾向にある。一方、定数 $b < 1.6$ であれば、粘性と口径の影響は、かなり小さくなっている。定数 b が最小値になっているヘーゼン・ウィリアムス式において、流速係数 C が、粘性と内径の影響を10%程度受けるので、定数 b が2を超えるような領域では、それ以上の影響を受けることになる。

定数 a, b と流速係数 C の関係については、今後、実験データの蓄積とより深い考察が必要になると考えられる。

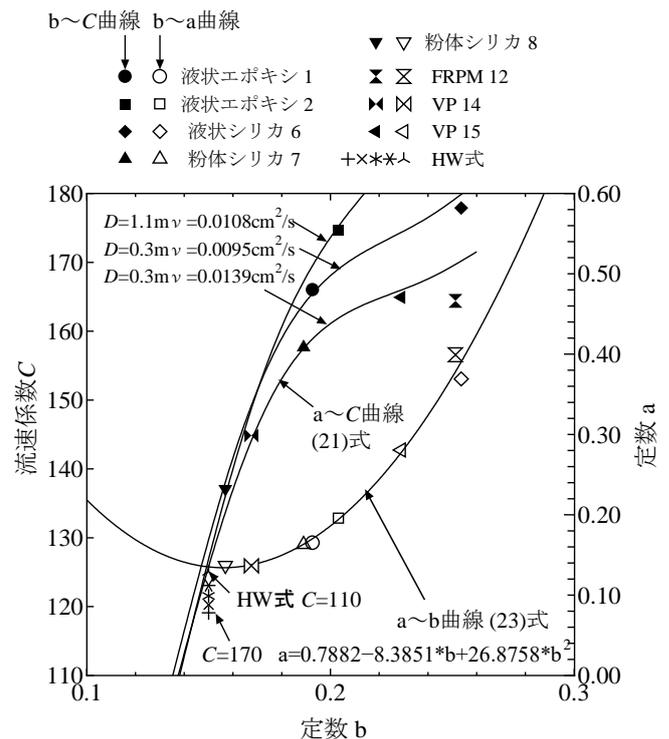


図13: 定数 a, b の関係式と定数 $b \sim C$ 回帰線

7 おわりに

管路の流速係数 C の再評価を行う過程の中で、以下のような知見を得た。

各種の内面塗装および樹脂管における内面ライニングの $f \sim Re$ 曲線を表す $f = aRe^{-b}$ の定数 a, b について、内面ライニング毎に a, b を水理実験結果に基づいて、設定した。

また、定数 a , b については、管の内面ライニングの状況が、完全粗面、不完全粗面、滑面を概ね表すヘーゼン・ウィリアムス式、プラントル・カルマン式、ブラジウスの1/4乗則に合わせて、2次曲線に変化することを明らかにした。

本報文においては、管のライニング毎に水理実験より求めた $f \sim Re$ 関数の a , b を用いることができるように、ヘーゼン・ウィリアムス式の一般式を導出した。さらに、各種の内面ライニング毎に a , b を水理実験結果に基づいて算出し、一般式による流速係数 C を求め、レイノルズ数に関係なく一定値となることを示した。また、各内面ライニングによる定数 a , b の2次曲線と流速係数 C の関係を示し、粘性と口径の影響があることを確認した。

これまで、水理実験の結果による流速係数 C の値に幅があるのは、流速、口径などの実験条件の違いによるものと考えられていたが、内面ライニングや粘性の違いによる多様性のある流れに、想定した流れを固定した従来のヘーゼン・ウィリアムス式を適用することに原因があると考えられる。

ヘーゼン・ウィリアムス式を一般化することにより、実験結果を直接ヘーゼン・ウィリアムス式に反映させることが可能になる。

今後、内面ライニングの違いによる実験結果を集積し、 $f = aRe^{-b}$ の定数 a , b を求め、内面ライニング毎にデータ数を積み重ねることにより、定数 a , b と流速係数 C の関係について、より深い検証が期待できる。

引用文献

- [1] 土木学会(1963): 水理公式集 昭和 38 年増補改訂版, pp.326-327.
- [2] 本田弘司・松原茂樹ら(2016): ALW 形ダクタイル鋳鉄管の埋設実験および流速係数試験, 農業農村工学会誌, 84(12), pp.19-23.
- [3] 稲垣仁根・日吉健二(2021a): ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数 C とは何なのか?, 第 29 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.42-47.
- [4] 稲垣仁根・日吉健二(2021b): 管路の流速係数 C の再評価(I)-レイノルズ数 Re , 摩擦損失係数 f と流速係数 C の関係-, 日本雨水資源化システム学会誌, 査読中
- [5] 稲垣仁根・日吉健二(2021c): 管路の流速係数 C の再評価(II)-水理実験結果に基づいた流速係数 C の再定義-, 日本雨水資源化システム学会誌, 査読中
- [6] 稲垣仁根・日吉健二(2021d): 管路の流速係数 C の再評価(III)-ヘーゼン・ウィリアムス式の一般化-, 日本雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [7] クボタ(2014): ALW型ダクタイル鉄管流速係数測定試験報告書
- [8] クボタ(2017): ALW型ダクタイル鉄管管路における供用後の流速係数測定結果報告書
- [9] クボタ(2018): 笠野原地区ALW形ダクタイル鉄管管路の流速係数測定結果報告書
- [10] 強化プラスチック複合管協会(1976): 内径700および1200mm強化プラスチック複合管流速係数測定実験結果
- [11] 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 鋼管 ϕ 300
- [12] 浪平 篤・前泊あゆみら(2017): 内面がエポキシ樹脂で塗装されたダクタイル鋳鉄管の流速係数, 平成 29 年度 農業農村工学会関東支部講演会概要集, pp.54-55.
- [13] 日本ダクタイル鋳鉄管協会(2015), ALW 型ダクタイル鋳鉄管, T 60, pp.5-6.
- [14] 日本ダクタイル鉄管協会(2016): 樹脂系塗装ダクタイル鉄管 流速係数測定計画書
- [15] 日本ダクタイル鋳鉄管協会(2019), ALW 型ダクタイル鋳鉄管(追補 1), JDPAG 1053, pp.6-8.
- [16] 日本水道鋼管協会(1985): 一ツ瀬川農業水利事業 茶臼原幹線水路における摩擦損失係数の計測報告書
- [17] 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
- [18] 日本水道鋼管協会(2021): 塗覆装鋼管(STW)における流速係数 C 値に関する実験・調査
- [19] 農村工学研究所(2016): 樹脂系塗装ダクタイル鉄管 流速係数測定報告書
- [20] 農村工学研究所(2017): 樹脂系塗装ダクタイル鉄管 流速係数測定報告書
- [21] 農林水産省(2021): 土地改良事業計画設計基準設計パイプライン <https://www.maff.go.jp/j/nousin/pipeline/pipeline.html> ,(参照2021-10-04)
- [22] 竹谷和志・前泊あゆみら(2018): 呼び径600ALW形ダクタイル鉄管管路における流速係数の測定, 平成30年度 農業農村工学会九州支部講演会概要集, pp.2-3.
- [23] 藪口貴啓・笠原一朗ら(2018): 鋼管内面塗装の流速係数確認実験, 平成30年度 農業農村工学会関東支部講演会概要集, pp.118-119.

氏 名：中村 和正

年	月	学歴・職歴
昭和 35	10	京都府京都市に生まれる。現在 61 歳。
昭和 59	3	北海道大学 農学部 林産学科 卒業
昭和 62	3	北海道大学大学院 農学研究科 農業工学専攻 修士課程修了
昭和 62	4	北海道開発局に就職し、土木試験所 農業土木研究室に研究員として配属。 フィルダム材料のせん断強度試験等に携わった。
平成 3	4	農林水産省 農業工学研究所に、水路工水理研究室 研究員として出向した。 用水路の不定流シミュレーションやごみ除けスクリーンの損失水頭に関する研究を行った。
平成 6	4	北海道開発局 開発土木研究所の農業土木研究室 研究員に戻った。研究員・主任研究員（平成 8 年 4 月～）として、水田灌漑・畑地灌漑の水需要特性と配水管理、乳牛ふん尿スラリーの流体特性、泥炭農地の暗渠排水、ポリエチレン管で発生する水撃圧の特性、農業用貯水池の濁りに関する調査・研究、に携わった。 （平成 8 年 3 月に、「石狩川流域の水田の水管理に関する研究」で北海道大学から博士（農学）を授与された）
平成 15	4	職場が独法化され、独立行政法人北海道開発土木研究所 農業土木研究室 副室長になった。 湧別町・別海町に設置した試験研究施設であるバイオガスプラントを用いて、酪農地帯における共同利用型バイオガスシステムのエネルギー収支・経済性・設計技術に関する研究に携わった。
平成 18	4	職場が土木研究所と統合され、独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チームの上席研究員になった（=10 名程度の研究室の室長といった役割）。研究チームの総括的業務を行うとともに、北海道開発局が実施する農業農村整備への技術的支援や災害・突発事象時の技術的支援を行った。
平成 30	4	土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループグループ長になった。 上席研究員とグループ長に在職中は、国の用水計画基礎諸元調査や土地改良事業計画設計基準等の改定に、意見聴取者等として参画した。
令和 2	4	土木研究所を辞職
令和 2	7	～現在、株式会社イーエス総合研究所特別顧問ならびに学校法人常松学園札幌工科専門学校理事

1. はじめに

このたび、特別講演の機会をいただいた。これまで、主に寒地土木研究所（以下、寒地土研）で行ってきた多様な調査・研究のうち、水理学に関係する事柄をお話ししたい。前段では経歴を述べつつ、数年ずつ取り組んだ課題でなおかつ面白く感じた研究を紹介し、後段では研究の柱であった水田地帯の水需要特性と送配水管理の研究について説明する。この後段の水管理の研究は、大学院や寒地土研で行った水田の水利の研究と農業工学研究所（以下、農工研）で学んだ基礎的な水理学が混じり合ったものである。たくさんの方にご指導いただいたこと、様々な研究対象に出会えたことの幸運に感謝している。

2. 経歴の振り返りと水理学に関係のある研究事例の紹介

私にとって農業土木の研究は北大の修士課程での研究が始まりである。修士課程では、石狩川流域の水田の水管理をテーマとして、空知地域の北部・中部の各1地区において、圃場の湛水深や用排水量、地区全体の水収支を調べた。両地区とも用水路は開水路形式であった。調査を通じてわかったことは、北海道の水田圃場では冷害対策として夜間取水が励行されているということであった¹⁾。

修士課程修了後の1987年に北海道開発局土木試験所に就職し、それから4年間はフィルダムの築堤材料の調査・研究に携わった。この4年間の中で、1988年の秋に農業工学研究所のシステム上級研修を受ける機会に恵まれた。研修期間は2か月であった。ハーディ・クロス法の管網計算プログラムを応用して、樹枝状配管のパイプラインの配水の均等性を検討するという内容であった。

1991年に農工研へ出向し、水路工水理研究室に3年間お世話になった。この研究室では、水撃圧のシミュレーションや開水路の不定流解析の基本を学ぶとともに、ごみ除けスクリーンについての研究を行った。スクリーンの研究は、ある用水機場でのトラブルへの対応がきっかけであった。スクリーン全面で止められるごみは除塵機でかきあげることができるが、除塵機のレーキが届かない部分に汚れが残ってスクリーンの損失水頭を増大させていた。その後スクリーン・除塵機への興味が深まり、損失水頭の計算方法の検討や緩勾配のスクリーンによるごみの押上効果の検証^{2,3,4)}、効率的にごみをかきあげる除塵機の現地情報収集などに展開できた。

1994年に寒地土研（当時の北海道開発局開発土木研究所）に戻った。今度は築堤材料ではなく、主に水田灌漑・畑地灌漑の水需要特性と配水管理の研究に携わった。農業水利学と水理学が混ざり合ったような研究内容である。この水田地帯の水管理に関する研究の内容は後で述べることにして、寒地土研で取り組んだ研究のうち、応用水理研究部会に関連するものをいくつかご紹介する。

第一は、電話回線を用いたファームポンド（FP）の遠方監視である⁵⁾。当時、私は同僚研究員とともに北海道内の樹園地帯での灌漑水量の調査をしていた。調査対象のうちのあるFPにおいて、水の使い過ぎが原因で貯留量がゼロになるということがたびたび発生した。晴天がつづく、そのFPについては早朝の貯留量確認が必要になり、管理者である役場職員に大きな負担となっていた。この対策として電話回線を用いた遠方監視システムを試作した。最大の特徴は、管理者や農家がこのシステムに電話をかけると、FPの水位を聞けるという機能であった。農家の誰もがFP水位を監視できる状態になったため、

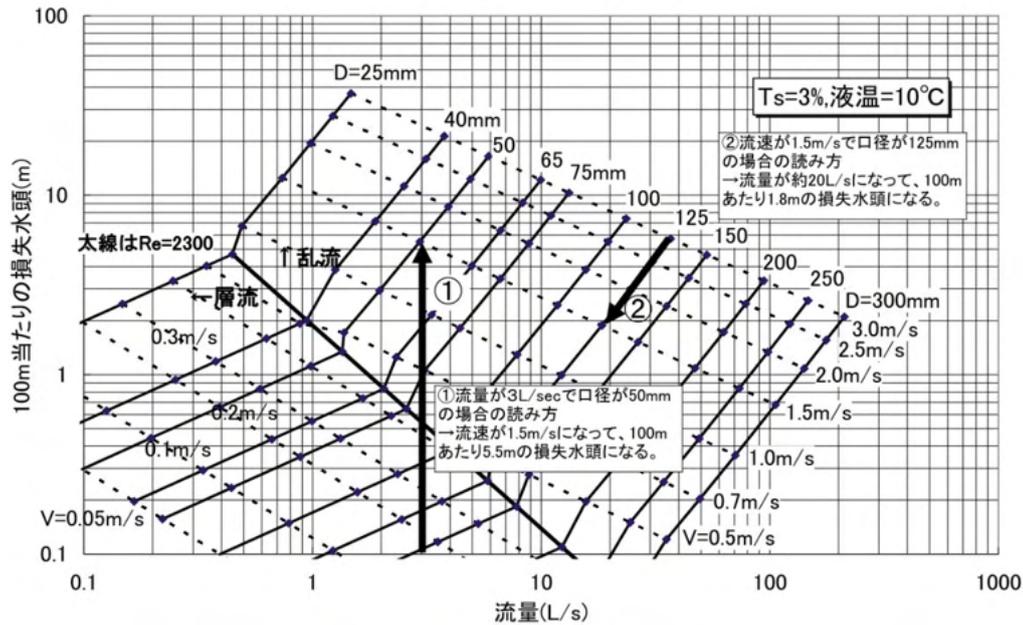


図-1 乳牛ふん尿スラリーの摩擦損失水頭早見図の事例

水の使い過ぎを防ぐことができるようになり、FPの管理が楽になった。

第二は、乳牛ふん尿スラリーの管路輸送特性の研究である。北海道の酪農地帯には肥培灌漑が行われている地域がある。乳牛ふん尿に水を加えて曝気処理、つまり好気性発酵させて草地に還元するものである。牛舎で発生したふん尿は希釈倍率によって管路輸送特性が異なる。また、ふん尿スラリーは擬塑性流体なので損失水頭の計算方法が複雑である。そのため、農家の管理を用いた輸送実験⁶⁾や室内での粘度試験を行って、図-1のような摩擦損失水頭を読み取ることができるグラフを作った⁷⁾。

第三は、水撃圧現象の見える化である。北海道内の畑地灌漑用パイプラインでポリエチレン管を用いた路線があった。ポリエチレン管の路線で発生する水撃圧の大きさを調べてほしいという北海道開発局からの依頼への対応として現地観測と解析を行った。結果として、水撃圧の解析は実測値によく合うこと、ポリエチレン管で発生する水撃圧は他の管種と同様の計算手法で求められることなどがわかった。また、解析結果を表計算ソフトの3Dグラフで表示すると圧力の変化が理解しやすくなることに気づき、北海道開発局への報告に利用した⁸⁾。

第四は、パイプラインで発生する地震時動水圧の観測と解析である⁹⁾。これについては、最近の応用水理研究会や論文集で発表しているので内容の説明は割愛する。北海道胆振東部地震でパイプラインの曲管部の離脱が多数発生し、その原因の一つに地震時動水圧があると考察された。そのため、最近のパイプラインの設計事例において、曲管部の箇所数の減を図るものも出てきている¹⁰⁾。

3. 水田地帯の水需要特性と送配水管理の研究

(1) 水田パイプラインにおける流量の日内変動の研究

農工研に在籍したころ、水田パイプラインの不均衡配水に苦慮している地区が少ないことを知った。府県の場合には、兼業農家の生活のパターンに起因して取水時間帯が集中することが多いようであった。このことを知ってから、北海道の水田パイプラインでも取水時間帯の集中による不均衡配水が起きているのではないかと考えた。ただし、府県のように兼業に起因する現象ではなく、冷害対策として農家が励行している夜間取水に起因する現象として起きているだろうと考えた。

北海道開発局の先輩技術者から調査に適する地区があるとの助言を受けて、1994年から上川地域のパイプライン（灌漑面積は約390ha）の流量調査を行った¹¹⁾。この地区は、幹線用水路が開水路であり、支線用水路がパイプラインであった。調査の結果、活着期から幼穂形成期までの時期において、水田への取水が早朝に著しく集中し、夜間は比較的取水量が小さいことがわかった（図-2）。このことの原因として、もし夕方に水田への取水を始めた場合には、適当な水深になる時刻が夜間になるため、農家にとっては取水を停止する作業が困難であるからだろうと考えた。また、活着期から幼穂形成期までの時期というのは用水利用における普通期であるにもかかわらず、早朝の水利用のピーク時のパイプラインの流量は代かき期に匹敵するものであることもデータで実証できた。

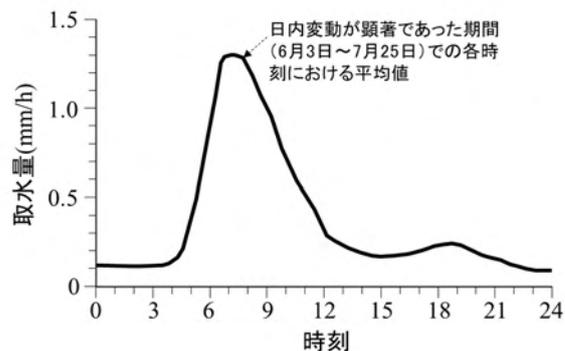


図-2 管水路からの取水量の日内変動
(1996年の事例)

水田への取水が集中する早朝におけるパイプライン灌漑区域内での配水状況を推察するために、配水シミュレーションを行った（図-3）¹²⁾。その方法は、パイプラインの定常流解析を反復するというものである。その結果、幹線用水路から支線用水路への分水量の日内変動は、実測値と計算値がよく一致した。また、給水栓によって取水しやすさがことなること、つまり早朝に取水したくてもできない給水栓があることも再現された。

この配水シミュレーション手法を用いて、自動給水栓の導入による不均等配水の改善の可否を検討した¹³⁾。ここで想定した自動給水栓の操作・動作は、開栓を夕方に手動で行い、湛水が適当な深さになったらフロートの上昇によって自動的に閉栓するというものである。当時市販されていた自動給水栓で可能な動作である。シミュレーションによって示したことは、取水しやすさの劣っていた水田で夜間取水ができるようになること、支線用水路への分水量にみられた早朝の大きなピークを緩和できること、である。

(2) さらさらポンドのイメージづくり

開水路形式の幹線用水路からパイプライン形式の支線用水路に分水する場合、本来は調整容量を持た

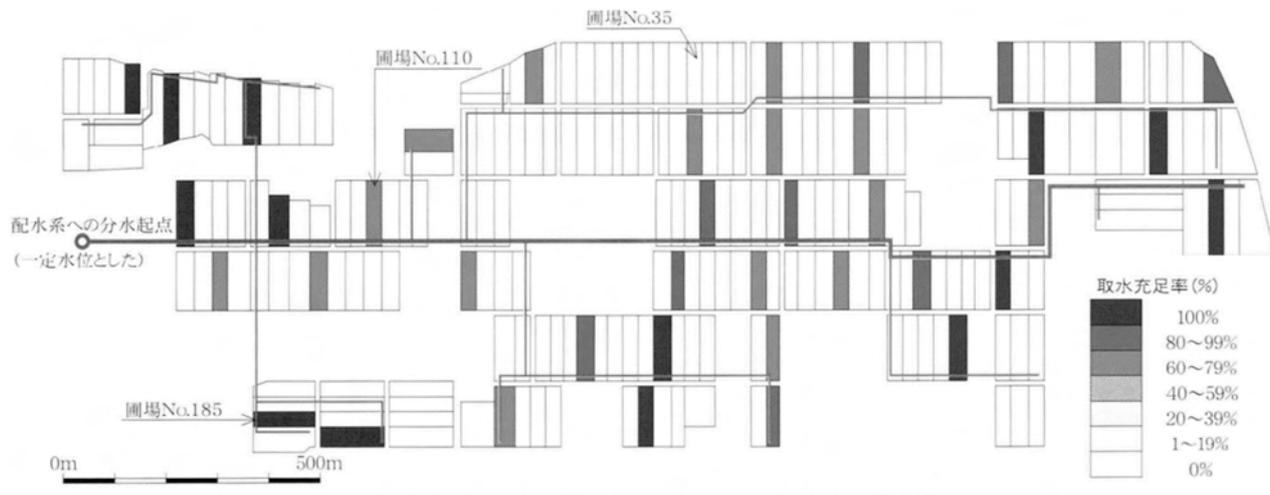


図-3 水田パイプラインのシミュレーション結果の事例

(午前4時に水田圃場の20%で給水栓を全開にした場合の午前7時30分時点の取水充足率)

せるべきである。上川地域で得られた水田パイプラインでの流量の日内変動データを用いて、必要な調整容量を試算した¹¹⁾。また、北海道開発局の技術者とともに、砺波地方の調整池灌漑システム¹⁴⁾の情報収集や見学を行った。砺波地方のシステムは、水田用水の日内変動を調整する国内で数少ない事例であった。さららポンドと命名して関係者で必要性を議論したが実現までには至らなかった。

(3) 大区画水田における移植栽培・直播栽培での水管理調査

寒地土研では、北海道開発局と連携して、2011年から空知地域北部の妹背牛地区で大区画水田における水管理調査に取り組んだ¹⁵⁾。この大区画水田はパイプライン形式の用水路であり、通常の水田のように地表に灌漑できるほか、用水路から暗渠排水管に用水を供給することで地下からの灌漑が可能である。この機能を活かして、この地区では水稻の直播栽培への取り組みが始まっていた。

水田の一般的な水管理調査では、湛水深、取水量、排水量、降水量、減水深などを観測して水収支を計算し、日ごとや半旬ごとの用水量として取りまとめることが多い。また、このような水管理調査は、上記のように観測項目が多いため、1地区で多数の調査圃場を設けることが少ない。

私たちの関心は、圃場条件や栽培方式による用水量の違い¹⁶⁾だけでなく、従来よりも水需要が集中する時期が出てくるのか、栽培方式が変化することで配水管理に困難が生じないか、などの点にもあった。そのため、観測データを用いて、代かき用水や直播栽培の初期入水などのような1回当たりの取水量の大きい時期(月日)や毎回の取水の時間帯(時刻、継続時間)を分析した。また、圃場給水栓の同時開栓率の調査も行った¹⁷⁾。

妹背牛地区の調査で明らかになった水需要特性を用いて、配水シミュレーションを行った。シミュレーションの目的は、直播栽培の普及が配水管理に与える影響を明らかにすることであった。調査対象区域(同一の支線パイプラインで灌漑されている)では、現状(当時)の直播栽培面積の割合(24%)であれば、水管理に支障は生じないと推察された¹⁸⁾。

妹背牛地区の調査で行ったような、水需要特性の分析と配水シミュレーションの組み合わせは、地域の営農の変化を考慮した配水管理方法の検討に有効な方法だと感じている。

4. これから考えたいこと

図-4は、北海道開発局の調査計画担当者や寒地土研の仲間で議論した、北海道の水田地帯における水利用パターンの将来像である¹⁹⁾。水稻の直播栽培面積が拡大すると、従来の代かき期よりも少し遅くまで比較的大きな用水が必要になるだろう。また野菜の育苗に対する水需要なども出てくるだろう。将来の灌漑施設には、図-4のような多段階の水需要に対応した送配水を求められるかも知れない。

図-5は、水田灌漑施設を取り巻く条件の変化を、私なりに考えてみたものである²⁰⁾。この図の右端の枠に記したのが、北海道内の水田灌漑施設にとって今後対応を必要になると考えられることである。気候変動による積雪量(水資源)の変化や、水田面積の変化による水需要の変化、作付け作物の変化による水利用期間の変化などによって、いまよりも多様な流量での送水が求められるだろう。その場合、北海道の水田灌漑施設では、今よりも水位調整施設の役割が大きくなるだろう。

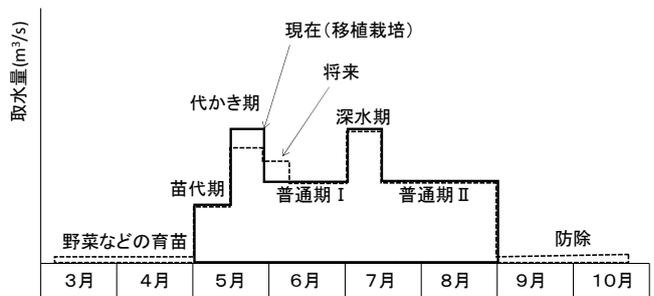


図-4 水稻の直播栽培面積の拡大などを考慮した将来の水利用パターン

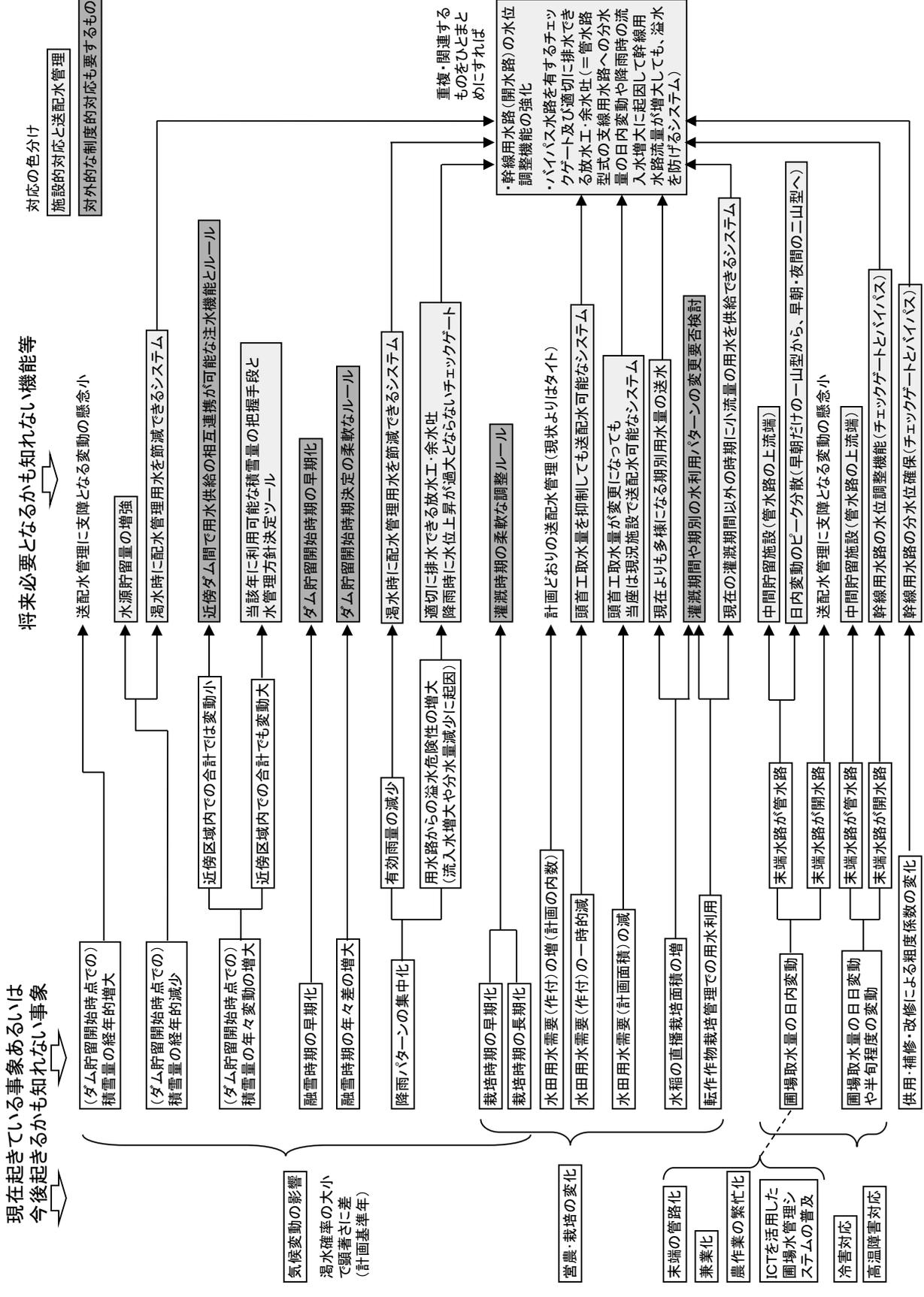


図-5 北海道の水田灌漑システムがこれから対応を求められるかも知れないこと

私は、2020年に土木研究所寒地土木研究所を退職し、現在はコンサルタント会社に勤務している。今後は、現在の立場で続けられる、日内変動をはじめとする水需要の変動を反映させた不定流シミュレーションを行い、これからの水田灌漑施設を考えていきたい。

参考文献

- 1) 梅田安治, 中村和正, 田村孝六, 佐藤嵩登, 横山慎司: 水田の水管理と配水管理用水量—石狩川流域の調査事例から—, 農土誌 56(7), pp. 659~664 (1988)
- 2) 中村和正, 島崎昌彦, 吉野秀雄: スクリーンの損失水頭の設計値と実態の相違について—ディスタンスピースの影響の算定と汚れ係数の導入—, 農業工学研究所技報 189, pp.45~54 (1994)
- 3) 中村和正, 吉野秀雄, 島崎昌彦, 櫻井實: 開水路中の除塵施設の水力計算の留意事項と維持管理, 農業土木学会誌 61(2), pp.107~112 (1993)
- 4) 中村和正, 島崎昌彦, 吉野秀雄: スクリーンの傾斜角とゴミ付着時の損失水頭の関係について, 平成6年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.258~259 (1994)
- 5) 児玉正俊, 中村和正, 秀島好昭, 大野隆: 電話回線を用いたファームポンドの遠方監視—FAXと音声応答による簡易な水位情報の把握—, 開発土木研究所月報 521, pp.19~23 (1996)
- 6) 中村和正, 宮崎健次, 門間 修: 牛ふん尿スラリーの管路輸送に関する基礎的実験, 開発土木研究所月報 532, pp.12~20, (1997)
- 7) 中村和正: 乳牛ふん尿スラリー管路輸送時の摩擦損失水頭早見図、北海道開発土木研究所月報 628, pp.44~52 (2005)
- 8) 中村和正, 土肥諭志: 水撃圧を視覚的にとらえる, 開発土木研究所月報 562, pp.25-28 (2000)
- 9) 大久保 天, 中村和正, 今泉祐治, 寺田健司, 川口清美: 農業用管水路で生じる地震時動水圧, 農業農村工学会論文集 88(1), pp. I_135~I_144 (2020)
- 10) 清野尚之, 疋田雅秀, 高谷誉将: 網走川中央地区における畑地灌漑施設の設計について—高圧パイプラインの設計—, 第64回(2020年度)北海道開発技術研究発表会論文, pp.898~901 (2021)
- 11) 中村和正, 九本康嗣, 沢口芳範, 島崎昌彦: 水田配水管路の水需要のモデル化, 農土誌 65(3), pp.43-48 (1997)
- 12) 中村和正, 長谷川和彦: 水田パイプラインにおける配水管理の課題と対策, 農土誌 70(4), pp.20-22 (1988)
- 13) 長谷川和彦, 中村和正, 秀島好昭: 水田パイプラインの配水計算手法と取水充足度評価, 第45回北海道開発局技術研究発表会, 農-8 (2002)
- 14) 広瀬慎一: 調整池灌漑システムの計画手法と実施例, 農土誌 66(10), pp.39-45 (1998)
- 15) 古檜山雅之, 中村和正, 鶴木啓二, 石田哲也: 地下灌漑が可能な大区画水田における圃場水管理, 農業農村工学会論文集 82(2), pp.81~90 (2014)
- 16) 越山直子, 酒井美樹, 伊藤暢男, 中村和正: 大区画水田における移植栽培と直播栽培の用水量の比較, 農業農村工学会論文集 85(1), pp.I_7~I_14 (2017)
- 17) 中村和正, 酒井美樹, 越山直子, 伊藤暢男: 水田パイプラインで同時に取水する圃場の割合, 平成27年度応用水理研究部会講演集, pp.31~38 (2015)
- 18) 中村和正, 古檜山雅之, 酒井美樹: 地下灌漑が可能な大区画水田整備地域を対象とした配水シミュレーション, 寒地土木研究所月報 737, pp.10-18 (2014)
- 19) 越山直子, 中村和正, 大津武士: 北海道の水田地帯における今後の農業水利に求められる条件, 水土の知 86(1), pp.7-10 (2018)
- 19) 中村和正: 水田灌漑システムの将来像, 農業土木北海道 43, pp.3-8 (2021)

氏名：玉井 信行
たまい のぶゆき

生年月日：昭和 16（1941）年 11 月 6 日

現職：東京大学名誉教授（2002）、中国水利水電科学研究院名誉教授（2008）、NPO 法人
辰巳用水にまなぶ会理事長（2015）

略歴：

1964 東京大学工学部土木工学科卒業

1966 東京大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了

1983 東京大学大学院工学系研究科教授、2002年60歳で退職

2002 金沢大学教授（工学部）

2007 金沢学院大学大学院特任教授（経営情報学研究科）

学位 1972 工学博士（東京大学）

海外出張と国際活動：

カリフォルニア大学バークレイ校（研究助手1967、13ヶ月）

シュトゥットガルト大学（客員研究員1989、2ヶ月；客員教授2002、1ヶ月）

カールスルーエ大学（客員研究員1989、1ヶ月）

西オーストラリア大学（グレッテン上級研究員1990、4ヶ月）

スイス連邦工科大学ローザンヌ校（客員教授1997、1ヶ月；客員研究員2002、1ヶ月）

ミシシッピ大学（USA）（客員研究員2007、2ヶ月）

国際水圏環境工学会（IAHR）：第 25 回 IAHR 東京大会国内組織委員会実行委員会幹事長
（1993）、副会長（2003-2007）、会長（2007-2011）

アジア河川・流域再生ネットワーク（ARRN）：会長（2006-2013）

第 3 回世界水フォーラム、国土交通省河川局、川の自然再生セッション、委員長（2003）

第 4 回世界水フォーラム、日韓中共同セッション、国土交通省河川局、アジアモンsoon
ン地域における川の再生セッション、委員長（2006）

河川の自然復元国際シンポジウム、(財)リバーフロント整備センター、共同代表（1998）

歴史的用水国際シンポジウム、金沢市、実行委員長（2010）など

表彰：

土木学会：論文奨励賞（1974）、国際貢献賞（2010）、功績賞（2012）、名誉会員（2014）

応用生態工学会：名誉会員（2015）

東京都：東京都功労者（科学技術）（2000）

IAHR（国際水圏環境工学会）：アジア・太平洋地区最優秀論文賞（1986）、名誉会員（2013）

IWHR（中国水利水電科学研究院）：国際交流貢献賞（2018）など

著作：

密度流の水理：技報堂出版（1980）、河川生態環境工学：東大出版会（1993）、洪水とアメリカ

カ：山海堂（1994）、河川計画論：東大出版会（2004）、水理学改訂 2 版：オーム社（2014）

河川工学改訂 2 版：オーム社（2014）など

社会活動：

土木学会水理委員会・北京水利学会共同長江洪水調査団長（1998）、都市型河川災害緊急検
討委員会（委員長、建設省河川局・都市局）（2000）、犀川水系河川整備検討委員会委員
長（2002）、土木学会平成 16 年北陸豪雨災害緊急調査団長（2004）など

辰巳用水の逆サイフォン送水量から見た建設目的への一考察

東京大学名誉教授
NPO 法人辰巳用水にまなぶ会理事長
玉井 信行

1. 辰巳用水の概要

辰巳用水は加賀藩三代藩主前田利常が江戸幕府から許可を得て、1632（寛永9）年に完成させたものである。金沢ではその前年に犀川橋附近法船寺から燃え上がった火事は城の本丸迄類焼した¹⁾ので、このような大火に対する水利の不便さを解消するために建設されたと言われている。建設当時に編纂された文書がないので確定されてはいないが、小松の住人板屋兵四郎が工事の指揮に当たり、約9か月で完成させたと伝わっている²⁾。

そのルート（図1）は、金沢城から見て辰巳（東南）の方向にある取水口から、犀川に沿う小立野台地の山腹斜面近くの隧道を経て犀川浄水場付近にまで至る。そこから

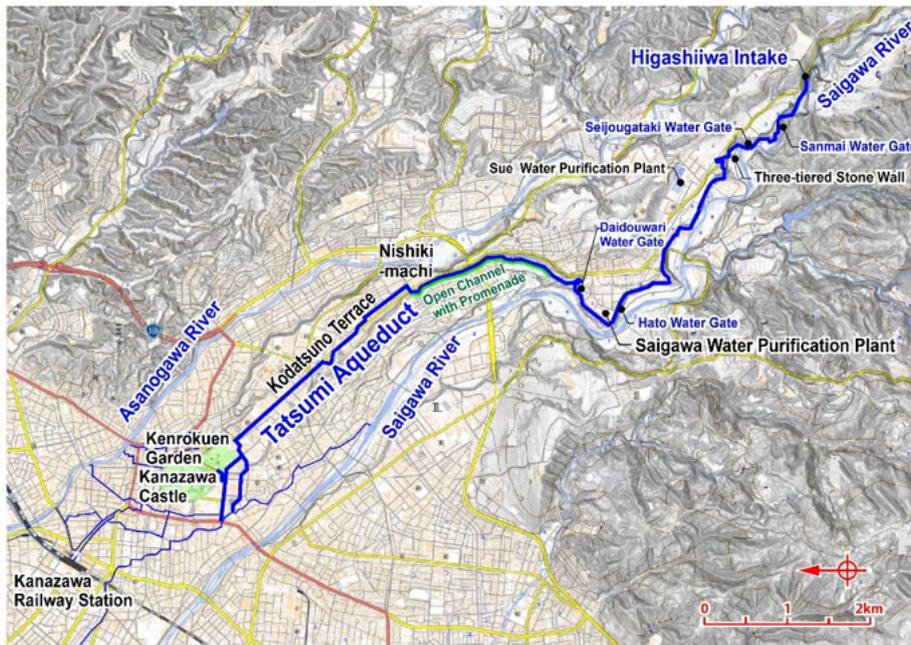


図1 辰巳用水の流路（国土地理院地図から作成）

涌波付近までは犀川に近い台地の崖沿いを流れ、その後、小立野台地面を流れて金沢城へ至っている。建設当初の水路長は開渠が約7.3 km、隧道の延長が3.3 km程度であり、全長は10.6 kmと推定されている。その後、河床低下のために取水口が上流へ移されたり、1799（寛政11）年の大震災後に斜面崩壊の土砂が開渠部を閉塞することを防ぐため隧道に変更した部分が有り、現在の姿になっている。現在の兼六園部分から金沢城に至る区間は逆サイフォンとなっており、開通時の1632年には金沢城三の丸まで導水され、2年後にはさらに標高の高い二の丸まで水を導いた。

辰巳用水は防火や飲用水、堀への注水、農業用水など多面的に使われ、今も兼六園を

始め、他の用水や中小河川、排水路を通じて金沢のまちなかに潤いを与え、にぎわいを創生している。

2. 逆サイフォンの概要

逆サイフォンの管路は厚板 4 枚を舟釘で緊結した外形が 0.24 m の寄せ木方式であり、通水断面は 0.08 m の方形であった³⁾。長さは最も長い木樋で約 1.8 m あり、継手木は横置きされていた。寛永期には兼六園は未だなく、1632 年に三の丸へ揚水した当時の管路上流端の井戸は奥村屋敷の北に設置され、石川門前土手を経て、三の丸へ通じていた。2 年後に二の丸まで導水した時には、木樋の形状は変わらないが、標高の高い二の丸まで揚水するため管路を上流側に延長し、上流端井戸を石引水門地点に設置した。石引水門を x 座標の基点とした各場所の水平位置と標高を表-1 に示す。

表-1 石引水門から二の丸に至る主要地点の位置³⁾ (1630 年代)

場所 (ローマ字は本論文で使用している記号)	距離 (x 座標, m)	標高 (y 座標, m)	区間距離 (m)
石引水門 (A)	0	55.4	0
現兼六園小立野口 (B)	1020	53.5	1020
上坂口 (C)	1170	52.5	150
奥村屋敷北の方 (D)	1370	48.0	200
石川門前土手 (E)	1560	34.0	190
三の丸 (F)	1710	44.6	150
二の丸 (G)	2010	50.2	300

3. 水理計算

(3.1) 奥村屋敷北の方から三の丸への送水量

この節の送水量は、辰巳用水完成時 (1632 年) の金沢城内への送水量である。表-1 においては D 点から F 点への送水である。詳しく見ると管路は D 点から最低点石川門前土手 (E 点) まで下り、そこから F 点までは高度を上げて行く。従って、管の実際の長さは水平距離よりも僅かに長くなる。奥村屋敷北の方と石川門前土手の間は水平距離 190 m に対して管路長は 190.5 m、石川門前土手から三の丸の間は水平距離 150 m に対して管路長は 150.4 m となる。また、石川門前土手で管は鉛直面内で方向が変わり折れ曲がっているため、管の屈折による損失は考慮している。しかし、城内における管路の屈折は水平面内を含めて考慮していない。これらの屈折を考慮すれば、送水量は更に小さくなる。

木樋を流れる水量は、管路の流れに用いられる水理学の解析法を用いて、次のように算定される。水頭差を H とすると

$$H = \left\{ f_o + f_e + f_{be} + f \left(\frac{l}{d} \right) \right\} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

最低部での圧力は次式となる。

$$\left(\frac{p}{\rho g} \right)_e = (z_f - z_e) + f \left(\frac{l_{ef}}{d} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2)$$

ここで、 v : 管内の平均流速、 f : ダルシー・ワイズバッハの摩擦抵抗係数、 f_e : 入口の損失係数、 f_{be} : 管の屈折による損失係数、 f_o : 出口の損失係数である。 l : 点 D から点

F に至る管の全長であり、 l_{ef} : 点 E と点 F の間の管長である。今回の場合、 $f = 0.04$ 、 $f_e = 0.5$ 、 $f_o = a = 1.1$ 、 $f_{be} = 0.012$ である。

直線 AB が直線 BC へ向きを変える角度は 8.3° である。屈折による管の損失係数は屈折角が 15° のとき 0.022 である。屈折角と損失係数の関係を図化してみると、屈折角度が 15° 以下の時は、損失係数と屈折角度は線形の関係で近似できると考えられる。このように考えて損失係数を選定した⁴⁾。

摩擦抵抗係数の選定は以下の考察による。従来解析による平均流速により推定値を定める。 $v = 0.70\text{m/s}$ である。レイノルズ数を計算すると、

$$Re = 5.6 \times 10^4 \quad (3)$$

一辺 b の正方形断面では、動水半径 R は $R = b/4$ である。直径 d の円管での関係は $R = d/4$ である。したがって、動水半径を通して考えると、円管直径と正方形の辺長とは等価な関係にある。等価粗度 k_s と管径 d (正方形辺長) との比は

$$k_s/d = 0.012 \quad (4)$$

となる。

この木管の代表的等価粗度は $k_s = 0.00018 \sim 0.00092$ m である⁴⁾。このレイノルズ数と相当粗度の値に対する摩擦抵抗係数をムーディ図によって読み取ると、 0.041 となる。この推定値により計算を行い、速度が算出された後に確認を行う。

$$v = 0.6147 = 0.61\text{m s}^{-1} \quad (5)$$

得られた新しい平均流速に対してレイノルズ数を計算すると $Re = 4.9 \times 10^4$ である。ムーディ図表によれば、新しいレイノルズ数と相当粗度に対する摩擦抵抗係数の値は 0.041 としてよく、さらに計算を繰り返す必要はない。

よって、奥村屋敷北の方地点から三の丸への送水量は

$$Q = A v = 0.0039 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

となる。

また、石川門前土手 (点 E) において掛かる水圧の強さは、式(2)を適用し、

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_e = 12.09 \text{ m} \quad (7)$$

と計算される。

(3.2) 石引水門から二ノ丸への送水量

この節の送水量は、二ノ丸への送水を可能にするために 1634 年までの 2 年間に逆サイフォン部分に改良を加え、上流端井戸の標高が十分に高くなる位置まで管路を延伸した後の結果を示している。

城内へ送水された流量は式(1)を用いて計算を行うが、条件や係数値は以下の通りである (表-1 参照)。取入口は石引水門で標高は 55.4 m、終点は二の丸で水平距離 2010 m、標高 50.2 m である。全エネルギー水頭差は 5.2 m である。管路は緩やかな勾配を持っているが、勾配が一番大きな点 D と点 F の区間 340 m においても水平距離と管路に沿って測った長さとの差は 1 m 以下であった。その他の部分の勾配は非常に小さく、水平距離と管路長には差がないとみなしてよい。今回は全長が 2010 m と長いので、 1 m 程度の差は無視できると考えられるので、式(1)において $l = 2010$ とする。

管路の屈折による損失係数は、点 D、点 E、点 F における合計で 0.0207 であった。その他の地点では屈折角が 1° 以下であり、直線とみなした。その他の条件は前節と同様である。流速の計算結果は次式となる。

$$v = 0.314\text{m s}^{-1} \quad (8)$$

この流速に対するレイノルズ数は $R_e = 2.51 \times 10^4$ となる。該当する R_e と相当粗度に対する摩擦抵抗係数をムーディ図で選ぶと、0.042が適当であると思われる。流れの状態に適した新しい係数値を用いて計算をやり直す。

$$v = 0.311 \text{ m s}^{-1} \quad (9)$$

式(9)で得られた流速に対してレイノルズ数を計算すると $R_e = 2.49 \times 10^4$ である。したがって、実際に出現する流れに対する摩擦抵抗係数の値は、仮定したものと極めて近くなり、計算をこれ以上繰り返す必要はない。

よって、石引水門から二の丸に至る管路系によって城内に送水される水量は

$$Q = Av = 0.00199 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

となる。また、石川門前土手（点 E）において掛かる水圧の強さは、式(2)の関係を新しい出口である二の丸との間に適用すると、

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_e = 17.37 \text{ m} \quad (11)$$

を得る。

辰巳用水では大変大きな圧力に耐えられる逆サイフォンを建設して金沢城内に送水が行われており、こうした技術力は他の施設には見られない高度なものである。

(3.3) 石管に取替えられた時代の送水量

加賀藩第 13 代藩主前田斎泰（ナリヤス）は、1842（天保 13）年江戸からの参勤交代の帰途に竜の口用水の石管を用いた逆サイフォンを巡覧し、辰巳用水においても木樋を石管に替えようと考えたといわれている⁵⁾。このようにして辰巳用水の管路は、1843（天保 14）年以降順次石管に取替えられていった。この節の話題は、辰巳用水が建設された寛永時代からは約 200 年後の出来事であるが、この遺構は現在に繋がるものであるので、参考のために記して置くものである。

石管には富山県庄川上流の金屋町の石、金屋石が使用された。運搬ルートは、主に千保川、庄川、小矢部の長舟持ちによって川舟で戸出まで下し、そこから伏木へ運び、外海船によって能登半島を回り、宮腰浦（金石港）に運ぶというルートであった⁶⁾。石管の大きさは竜の口用水の石管より一回り小さく、内径は 0.18m、外径は 0.40m 角に統一されている。この石管敷設の時代には兼六園の整備も行われており、霞ヶ池をはじめとする曲水が流れるようになり、取入口も石引水門から霞ヶ池畔に移設された。

これらの資料をもとに、取入口から終点の二の丸に至る主要地点の水平距離、標高を取りまとめたものが表-2である。

表-2 逆サイフォン取入口から二ノ丸に至る主要地点の位置（天保の改修後）

場所（本論文での記号）	距離（x 座標, m）	標高（y 座標, m）	区間距離（m）
兼六園霞ヶ池 (DT)	0	53.6	
石川門前土手 (ET)	190	42.2	190
三の丸 (F)	340	46.2	150
二の丸 (G)	640	50.2	300

表-2の中で DT と ET は表-1における表記と異なっている。これは兼六園地域や金沢城周辺の整備が進み、逆サイフォンの取入口井戸の位置や石川門前土手が変化したことを示すためである。逆サイフォン取入口井戸の変遷については文献⁷⁾に詳しく述べられている。

石管が導入されてからの流量の計算は以下のように行う。管の屈折による屈折損失

係数は点 ET において 0.00733 であり、三の丸から二の丸に至る屈折角度は一度以下なので損失は無視する。

摩擦抵抗係数を選定するには、まず、石管の等価粗度 k_s を知る必要がある。参考になる資料としては、コンクリート管の k_s は 0.0003~0.003 m、リベット継の鋼の k_s は 0.00091~0.0091 m という値がある⁴⁾。また、金沢大学工学部秀峯会館脇（現在は、移転した金沢大学自然科学本館玄関脇に展示）の掘り出された石管の視認によれば、突起の広がり約 0.02 m、突起の高さは 0.005 m 程度である。したがって、石管の等価粗度 k_s を 0.005 m とする。したがって、石管の相当粗度は

$$k_s/d = 0.0278 \quad (12)$$

となる。木樋に比べて断面が大きく、流速は大きくなりレイノルズ数は 10^5 に達すると予測される。この相当粗度、レイノルズ数の値に対して、ムーディ図から摩擦抵抗係数を読み取り、 $f = 0.054$ を選定した。

霞が池水面と二の丸吐出し口との水頭差は 3.4 m であり、流速は次のように計算される。

$$v = 0.587 \text{ m s}^{-1} \quad (13)$$

得られた流速に対して、摩擦抵抗係数の選択が適切であったか否かを確認する。得られた流速に対するレイノルズ数は $Re = 1.05 \times 10^5$ である。レイノルズ数が 10^5 を超える領域では、 k_s/d が 0.028 と大きいと、摩擦抵抗係数はほぼ一定となる。したがって、摩擦抵抗係数の値は最初の予測と変化しないことが確認できた。

したがって、二の丸への送水量は

$$Q = Av = 0.0149 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

となる。

最低点石川門土手地点における圧力水頭は、

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_e = 10.37 \text{ m} \quad (15)$$

となる。

4. 逆サイフォン送水量と防火対策に関する検討

逆サイフォンを通して金沢城内へどの程度の水量が送られていたかを算定してきた。寛永期の木樋を用いた時代の送水量は小さなものであったことが分かる。辰巳用水完成当初の三の丸への送水量は $0.0039 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であり、この量であると通常のバケツを満たすのに 2.5 秒程度の時間を要する。辰巳用水は法船寺大火を機に城の防火用水として整備されたと言われている⁸⁾が、水量から判断すると防火用水としては殆んど役に立たなかったと考えられる。特に、標高が高い二の丸への送水は大変であったと考えられ、 $0.0020 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ という水量しか送ることができなかった。

石管に取替えられた 1843 年（天保時代）以降は二の丸への送水量は $0.015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ となり、それまでの約 7 倍となった。防火用水としての役割はどの程度であったのかを検討するため、手押しポンプ（竜吐水、18 世紀中頃からは江戸で使われたと言われる）が使えるとして簡単な算定を試みる。直径 0.03 m の円管の先から噴出させると考える。消火のためには少なくとも二方向から水脈を掛ける必要があると思われるので、二本のホースからの噴出を考える。ホース出口の円管断面積は石管の 1/36 である。これが 2 本あるから、ホース出口の断面積は石管の 1/18 であり、噴出速度は石管内の流速の 18 倍で $v_0 = 0.56 \text{ m s}^{-1}$ となる。

この噴出速度を持つ水脈の速度水頭は $v_0^2/2g = 5.7 \text{ m}$ となり、2 階の屋根程度までは届く水脈となる。したがって、手押しポンプ 2 台相当の水量とはなるが、大規模な火災

に対しては不十分である。また、竜吐水について江戸三火消図鑑⁹⁾では、放水能力は貧弱で、且つ連続して放水することが出来ず、消火能力はゼロに近いと評価されている。主な使用方法は、火事現場の最前線の屋根に消し口を取った纏持ちを火の粉から守るための注水に用いられた。

ここまでは木樋や石管一本による送水量を考えてきた。こうした管路が何本もあれば送水量はそれだけ増加する。この点はどういう状態であったのか、と言う疑問も当然である。これについては以下の文献に答えを見出すことが出来るであろう。写真-1と写真-2は現在の兼六園で筆者が撮影した写真である。写真-2の二条の石管が霞ヶ池の取入口から城内へ繋がる最上流の部分である。加賀辰巳用水¹⁰⁾には「その一条は城中への逆サイフォン管であり、他の一条は白鳥堀・百間堀および園北境の水路に落とし、瓢池からの水をあわせて、いもり堀と町中の水路へ流す、水压を必要としないものに使われたのであろう」という記述がある。



写真-1 兼六園虹橋付近の説明板
(撮影：玉井信行，2005.4.9)



写真-2 兼六園内虹橋付近の二条の石管
(撮影：玉井信行，2005.4.9)

辰巳用水の完成を機に、堀に水が満たされた記述には次の例がある。「其の比（藩祖利家金沢城築城当時）は蓮池（現百間堀）は空濠也と云う。有沢武貞言う。辰巳用水出来してより水かゝるなりと。」¹¹⁾ このように辰巳用水建設目的の一つには、堀への注水があったであろう。

本稿は土木史研究会講演会で発表した論文¹²⁾を骨格とし、最近の知見を加えて一部修正、加筆を行ったものである。

5. まとめ

辰巳用水の最終目的地である金沢城内へは、逆サイフォンによって送水されている。その送水量を算定するという水理学的な解析を行い、古文書に謳われている辰巳用水の建設目的の妥当性を検討した。その結果金沢城への送水量は消火目的には役に立たない水準であることが判明した。

辰巳用水が建設されたのは、1631年に発生し、金沢城本丸も類焼した、いわゆる法船寺大火が引き金である。しかし、完成後にも金沢では数度にわたり大きな火災が生じ¹³⁾、中でも1759(宝暦9)年の火災では金沢城も焼失している¹³⁾。また、辰巳用水が防火の面で貢献したという記事は見当たらない。つまり辰巳用水の防火用水としての機能はあまり良かったとは言えず、防火・消火のために水利の便を図るという目的は対外的な説明のために使われていた可能性が高い。

参考文献

- 1) 加賀藩資料第二編：著作権者 財団法人前田育徳会，清文堂出版株式会社，復刻版，pp. 641-646, 1980.
- 2) 文献1) に同じ、pp. 692-696, 1980.
- 3) 青木治夫：辰巳用水に見る近世初期の先端技術，金沢大学平成12年度博士論文，130pp.，2001.
- 4) 玉井信行・有田正光共編：大学土木 水理学，改訂2版第7刷，オーム社，pp. 126-136, 2021.
- 5) 兼六園全史編纂委員会：兼六園全史，pp. 151-162, 1976.
- 6) 高堀勝喜編：加賀辰巳用水－辰巳ダム関係文化財等調査報告書－，辰巳ダム関係文化財等調査団，pp. 432-435, 1983.
- 7) Tamai, N., Todo, H. & Ikemoto, T.: Changes of a route and an upstream well for an inverted siphon of Tatsumi Canal in the City of Kanazawa, Proc. of the 21st IAHR-APD Congress, Yogyakarta, pp. 1145-1152, 2018.
- 8) 文献6) に同じ、p. 247, 1983.
- 9) 東京連合防火協会編：『江戸三火消図鑑』，岩崎美術社，pp. 199-200, 1988.
- 10) 文献6) に同じ、p. 428, 1983.
- 11) 文献6) に同じ、p. 244, 1983.
- 12) 玉井信行・山田朋彦：辰巳用水の建設目的に関する逆サイフォン送水量から見た検討，土木学会土木史研究講演集，Vol. 26, pp. 153-159, 2006.
- 13) 文献1) の第二編付録年表、第参編付録年表、第四編付録年表、及び文献6) の辰巳用水関係年表.

粘性解の概念を用いた一次元定常開水路流れに関する研究の梗概

ミエン ソワンナー¹, ○宇波 耕一¹, 岡本 久², 藤原 正幸¹
¹京都大学農学研究科, ²学習院大学数学科

本特別講演では, 下記拙稿について梗概を解説する。

—記—

A thorough description of one-dimensional steady open channel flows using the notion of viscosity solution

Sovanna Mean, Koichi Unami, Hisashi Okamoto, Masayuki Fujihara
Applied Mathematics and Computation, 415, 126730, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126730> (CC BY 4.0)

Abstract

Determining water surface profiles of steady open channel flows in a one-dimensional bounded domain is one of the well-trodden topics in conventional hydraulic engineering. However, it involves Dirichlet problems of scalar first-order quasilinear ordinary differential equations, which are of mathematical interest. We show that the notion of viscosity solution is useful in thoroughly describing the characteristics of possibly non-smooth and discontinuous solutions to such problems, achieving the conservation of momentum and the entropy condition. Those viscosity solutions are the generalized solutions in the space of bounded measurable functions. Generalized solutions to some Dirichlet problems are not always unique, and a necessary condition for the non-uniqueness is derived. A concrete example illustrates the non-uniqueness of discontinuous viscosity solutions in a channel of a particular cross-sectional shape.

Keywords

Open channel flow; Viscosity solution; Generalized solution; Hydraulic jump; Gradually varied flow

概要

一次元の有界領域における定常開水路流れについて水面形状を決定することは, 従来の水理学においてもすでによく調べられている課題である。しかしながら, これには, 数学的に興味深い, 未知変数がスカラーである一階準線型常微分方程式のディリクレ問題が関わっている。粘性解の概念は, そのような問題に対し, 運動量保存とエントロピー条件を満たしつつ, 滑らさや連続性を失いうる解の特性を完全に記述するのに有用であることを示す。また, そのような粘性解は, 有界可測関数の空間における一般化解である。一方, 一部のディリクレ問題に対する一般化解は, 必ずしも一意であるとは限らないので, 非一意性に対する必要条件を導出する。そして, 具体例として, ある特定の断面形状を有する水路において, 不連続な粘性解が一意でないことを示す。

キーワード

開水路流れ; 粘性解; 一般化解; 跳水; 漸変流

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）