

河川基金助成事業

二ホンウナギ遡上のための潮止め水門 の運用に関する合意形成

助成番号：2024-5211-045

東京都公立大学法人 東京都立大学
教授 横山 勝英

2024 年度

目 次

1. 研究目的	・・・1
2. 研究方法	・・・2
2.1 柳川とニホンウナギ	・・・2
2.2 沖端川と柳川掘割	・・・3
2.3 現地調査方法	・・・5
2.4 塩水遡上の可視化	・・・7
3. 二丁井樋周辺における塩分動態と従来堰運用での生物遡上	・・・9
3.1 沖端川から二丁井樋までの塩水遡上特性	・・・9
3.2 二丁井樋周辺の塩水遡上特性	・・・10
3.3 従来堰運用下における生物遡上	・・・12
4. 三次元流体シミュレーションによる塩水遡上の可視化	・・・13
4.1 Particle Tracking による可視化	・・・13
4.2 計算結果	・・・13
4.3 仮想空間表示システムの構築	・・・16
4.4 仮想空間における塩水遡上の可視化	・・・19
5. 各種材料に基づく合意形成	・・・20
5.1 柳川市民の活動	・・・20
5.2 シラスウナギ遡上システムの設置と堰管理者への説明	・・・20
5.3 市民および堰管理者との合意形成	・・・23
5.4 シラスウナギ遡上の実証	・・・24
5.5 学术界との関わり	・・・27
参考文献	・・・28
謝辞	・・・28

1. 研究目的

ニホンウナギは海で生まれて川を遡り、河川上流域で成長してから海に下り、海で産卵する「降河回遊魚」である。絶滅の危機に瀕している降河回遊魚の資源量を回復させるには、産卵できる親個体を増やすことが必要であり、そのためには、稚魚が河川を遡れるようにすること、河川における生息場を整備することが必要不可欠である。

しかし、河口周辺のクリークでは、海水が農業用水に混入するのを防ぐために、河口堰や水門が設置されている。Kaifuら（2018）は、河口堰を有する岡山県の3つの一級河川において、酸素・炭素安定同位体比を用いてニホンウナギの天然・放流個体を判別したところ、淡水域にはニホンウナギがほとんど遡上していないことを示した。

近年では、こうした影響を軽減するために人工的に魚道を設置し、塩分の流入を抑えながら、回遊魚の往来を可能なものとしている。長良川の河口域では、河口堰によって遡上が妨げられていたアユが、魚道設置後に上流部へ遡上していることが報告されている（住谷ら、2002）。また、農業用の小規模な堰に魚道を設置する方法も提案・実施されている。岡山県総社市の事例では、木板と木炭で作成した可搬魚道システムを使用し、アブラボテなどの小型遊泳魚の遡上が確認されている（高橋ら、2021）。

一方、農業用の堰などの小規模な堰では、魚道設置が費用面や運用面で現実的でないケースもある。そのため、既存の堰の開閉運用を工夫することで回遊魚の往来を可能にできればコスト等の面で有利である。例えば、塩水遡上が発生していないタイミングで堰を操作することが考えられる。ただし、堰の操作には管理者の労力を必要とし、また操作のタイミングを誤ると塩水が河川の上流部に侵入するリスクがある、そのため、現地調査に基づいて適切な運用方法を検討し、さらに堰操作に消極的な管理者や農業者の理解を得る工夫も必要となる。

本研究は、有明海に注ぐ矢部川水系の沖端川と福岡県柳川市の掘割を対象として、シラスウナギが淡水域に遡上できる堰操作を提案することを目的とする。そのため、沖端川と潮止め樋管(二丁井樋)と柳川市内の掘割において、(a) 塩分・水位のモニタリング、(b) モニタリングカメラを利用したシラスウナギの遡上調査、(c) 三次元流体シミュレーションによる塩水遡上の可視化を行い、(d) 堰管理者との合意形成を試みた。

なお、本研究は2022年3月から開始して、試行錯誤を経て一定の成果が得られたので、助成期間よりも前のデータも含めて成果を報告する。

2. 研究方法

2.1 柳川とニホンウナギ

福岡県柳川市は市内に掘割（水路）が張り巡らされており、水郷の街として観光業も盛んである。掘割は沖端川を通じて有明海に接続している。かつてはこの掘割の中でもニホンウナギが多く生息し、現在でも市内にウナギの店舗が22 店舗あり、地元の特産品となっている（図2-1）。

しかし、近年は掘割ではニホンウナギは全く捕れず、「柳川で消費する年間100万尾以上のウナギも鹿児島県や宮崎県などから仕入れている」（木庭，2019）。木庭はその原因として次のように述べている。「私たちは、1980年代に鉄の扉に改修された二丁井樋（にちょういび）などの排水門に注目した。改修前の二丁井樋は江戸時代に製造された木製の堰板で、干満差を利用して干潮時だけ開き排水する構造であった。そのため堰板の隙間からシラスウナギが掘割に入ることができたと考えられる。二丁井樋の改修によって、掘割と海との繋がりが断ち切られたことにより、シラスウナギが柳川掘割に入ってくるができなくなったと見なされる。」

二丁井樋の位置関係や構造は次節で詳述する。



図2-1 柳川うなぎめしマップ
(<https://yanagawa-yeg.net/archives/7950>)

2.2 沖端川と柳川掘割

沖端川は、福岡県柳川市を流れる流路延長14.3 kmの一級河川であり、矢部川の支流の一つである。矢部川の河口から約13.5 km地点で分流し、柳川市中心部を流れ、有明海へ注ぐ。川幅は河口付近で約700 m、3 km地点で約50 m、7 km地点で約20 mと上流に向かって狭まる。

有明海は潮汐変動が最大6 mに達するため、沖端川もその影響を受ける。沖端川の塩水遡上距離（Salinity Intrusion Length、底層塩分10が位置する河口からの距離）は、小潮で約4.5 km、大潮で約7 kmになる。混合状態は、小潮では弱混合、大潮では緩混合に分類される（西野ら、2022）。

柳川市内には掘割が張り巡らされている。その水の供給源は沖端川の河口から約9.6 km地点にあり、取水された水は二ツ川を経由して掘割全体に供給される。掘割は全長約930 kmともいわれており、柳川市街地全域に広がっている（図2-2）。江戸時代初期に筑後国を治めていた田中吉政が城の防御のために整備したものである。この掘割は、もともと湿地帯であった柳川の土地の水はけをよくすることと、農業用水・生活用水を確保することを目的に作られ、現在でも城堀水門や階段状の汲水といった歴史的遺構が残っている。

柳川掘割は沖端川の河口3.5 km地点にある二丁井樋にて接続している（図2-3）。この堰にはフラップゲートがあり（図2-4）、増水時には掘割から沖端川への排水が行われ、沖端川の潮位が上昇した際には、堰に設置されたフラップゲートが塩水の流入を防ぐ役割を果たす。フラップゲートは水圧により自動的に作動し、河川側の水位が高い場合には閉じ、樋管内の水位が高い場合には開く仕組みである（図2-5）。

沖端川の水面標高は、小潮の満潮時でT.P. 1.5 m、大潮の満潮時でT.P. 2.6 mに達する。掘割の水位はT.P. 1.5～2.5 mで変動し、堰の高さはT.P. 2.03 mである。この地形的特性により、二丁井樋は潮位や水圧の変化に応じて、水管理を行っている。



図2-2 柳川掘割、沖端川と二丁井樋の位置関係



図2-3 掘割と二丁井樋



図2-4 二丁井樋の沖端川出口とフラップゲート

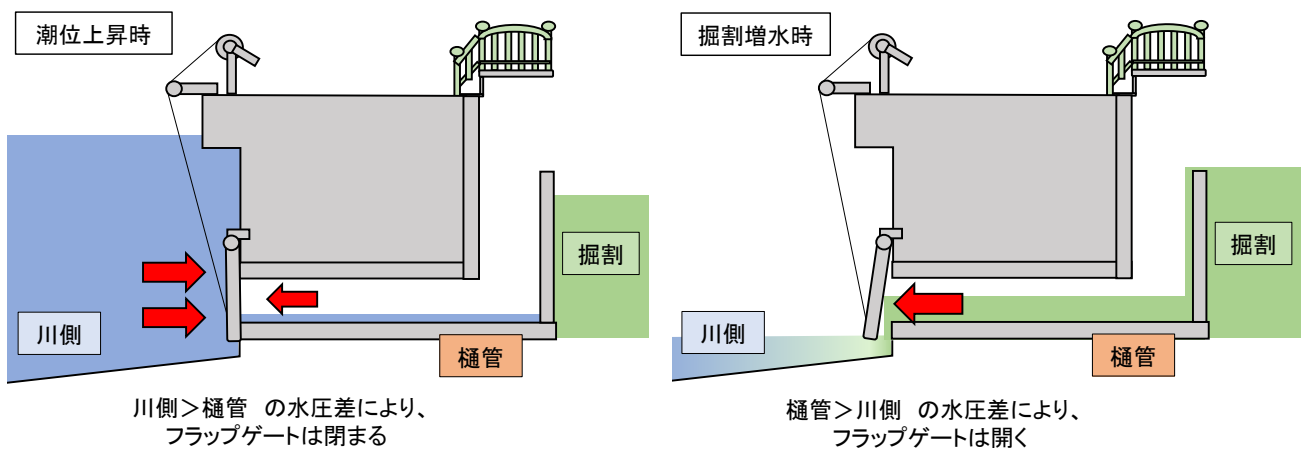


図2-5 二丁井樋の構造

2.3 現地調査方法

沖端川～二丁井樋～掘割の塩水・淡水の流れを把握するために、二丁井樋の出口側（River）、二丁井樋の中（Chamber）、掘割（Canal）において水位と塩分をモニタリングした。水位はHOBO U-20 Water Level Loggerにて、塩分はワイパー式メモリー水温塩分計（JFEアドバンテック、Infinity CLW）もしくは小型水温塩分計（JFEアドバンテック、DEFI2-CT）にて測定した（図2-6）。測定間隔は20分である。

二丁井樋にはシラスウナギの遡上を促す仕掛け（図2-7）と観察カメラシステム（図2-8）を設置した。遡上促進システムは、九州大学望岡典隆特任教授のアドバイスに基づき、麻布（幅30 cm、長さ2.5 m）をコンクリート堰に吊り下げて、水中ポンプで呼び水をかけた。麻布を選定した理由は、表面に凹凸があり、また目合いが1～5 mmの網状になっているため、シラスウナギが突起や隙間を利用して登攀しやすいと考えられるからである。なお、過年度の実験によれば、麻布は水中で劣化しやすく1週間程度で破れたため、裏に農業用の防虫ネット（ナイロン製、目合い5mm）を取り付けて補強した。

観察には市販の屋外用防犯カメラ（Ctronics PTZ防犯カメラ、2023年製造）を用いた。画素数は500万（5MP）で、5倍ズーム機能とパンチルト機能（水平355度、垂直90度）を備えている。シラスウナギは夜間に証明を照らすと集まってくる習性があるため、カメラ照明と集魚灯をかねてLEDライト（防水LEDクリップライト、昼光色6000K、出力7W）を3台設置した。これらのシステムは夕方18時から朝5時まで動作するように設定した。録画ファイルは10分ごとに生成した。



図2-6 塩分・水温・水位のモニタリング装置と二丁井樋前面への設置状況



図2-7 シラスウナギ遡上促進システムの麻布と呼び水ポンプ

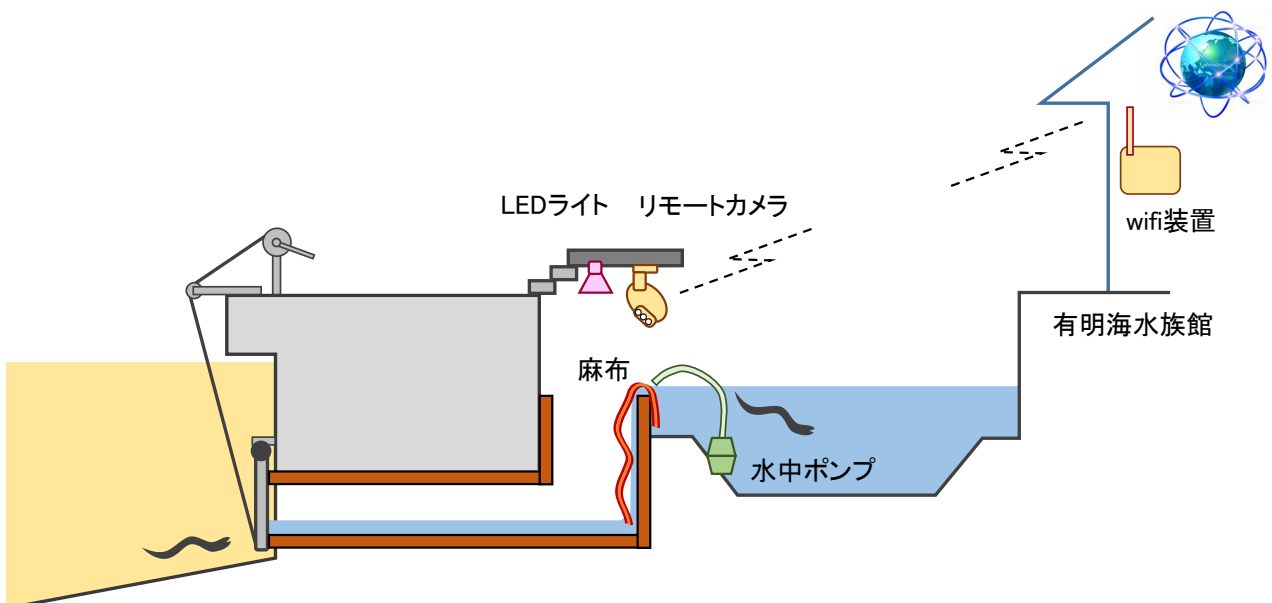


図2-8 シラスウナギ観察観察システム

2.4 塩水遡上の可視化

本研究で提案するシラスウナギ遡上システムは、基本的に塩水の掘割への浸入を許容しない。しかし、掘割を管理する柳川みやま土木組合は、堰の閉操作が上手くゆかずに二丁井樋を塩水が乗り越えた場合に、農業者からクレームが出ることを想定している。そのため、不測の事態による塩水の挙動や拡散範囲を明らかにして、本システムの安全性を理解していただく必要がある。

当初計画では小型水槽を作成して、塩水の挙動を可視化表示するつもりであったが、ベニヤ板1枚程度の比較的大きな模型でも、対象領域を表現するには水路幅が狭く、塩水を流してみても迫力のある表現が難しかった。そこで方針を変更して、数値計算に基づいて2つの方法により掘割における塩水遡上を可視化表現した。

まず、三次元流体シミュレーションFantom Refinedにより二丁井樋をオーバーフローした塩分の掘割における拡散計算を行い、その計算結果を用いて粒子法 (Particle Tracking) により塩水の挙動を可視化表現した。さらに、ゲームエンジンにより仮想空間を構築し、掘割を遡上する塩水の様子を道ばたから疑似観察できるようにした。粒子法による動画は塩水の詳細な挙動を理解できるが、3D動画の見方が分からない一般の方には理解が追いつきにくいかもしれない。一方、仮想空間の映像は塩水挙動の解像度は低いものの、風景がリアルであるために体感しやすい。

(1) Fantom Refined

基礎方程式は、連続式と非圧縮とブジネスク近似を施した3次元Navier-Stokes式、塩分濃度の輸送方程式である。離散化手法は、コロケート格子有限体積法であり、時間進行は2次精度、移流項は3次精度で離散化している。地形表現には構造格子を用いているが、格子サイズを可変とする局所高解像度化手法 (local mesh refinement : LMR) を用いている。

柳川の掘割では地形測量データが無いため、独自にカヌーを利用した横断測量を実施した (図2-9)。掘割の右岸と左岸に1人ずつ配置し、掘割を横断する形でメジャーを張り渡した。その間をカヌーで移動しながら、2 m間隔でスタッフを垂直に挿入し水深を測定した。さらに、左岸側の位置情報をGPSで取得し、地図上に横断図を挿入した。地図上に反映した横断図を基に、柳川掘割の形状を抽出し、その内部を2 m間隔で補間した。その上で、可変格子に成形し (図2-10)、格子サイズの最小は2m×2m、最大は4m×12mと設定した。また、鉛直方向の格子サイズは0.2mとした。



図2-9 掘割の簡易水深測量

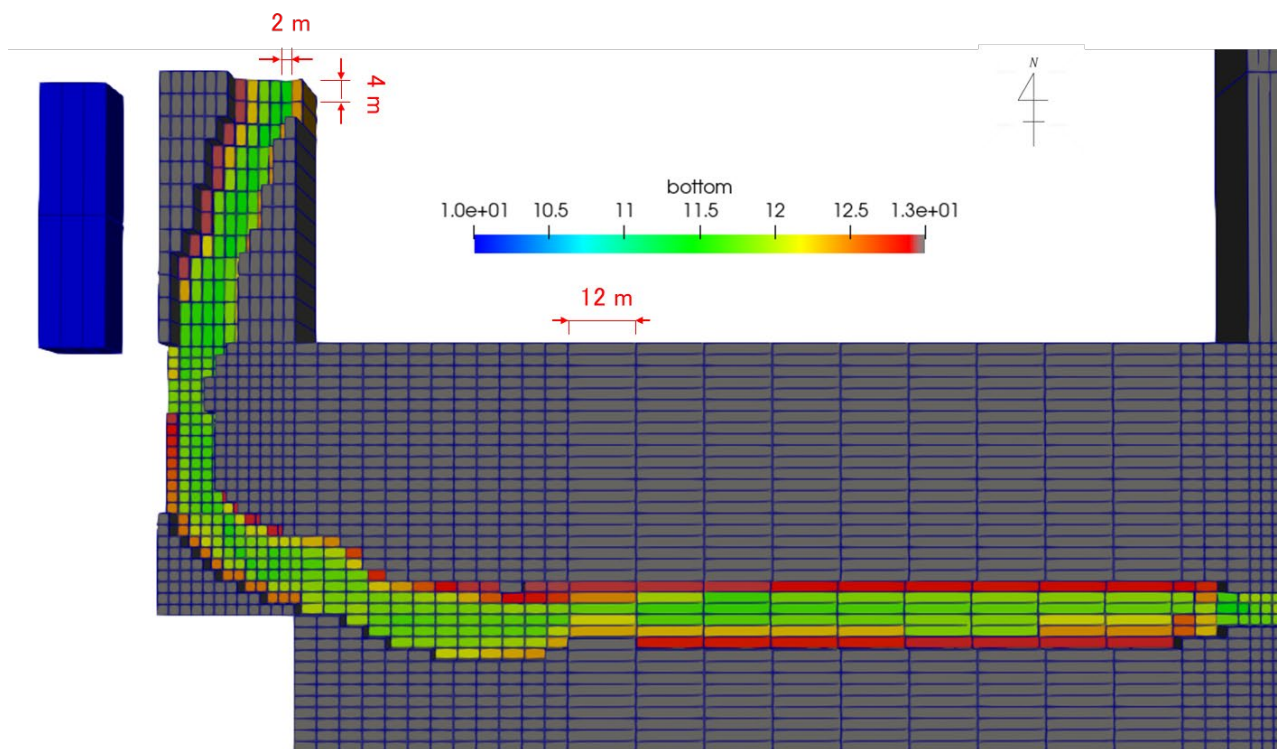


図2-10 PhantomのLMR地形例

(2) Particle Tracking

粒子追跡モデルはラグランジュ法であり，流動モデルによって出力された計算結果の流速をもとに4次精度Runge-Kutta法を用いて軌跡を逐次計算した．通常，追跡計算の時間ステップは流動計算の出力間隔よりも短いため，流動計算の値は出力間隔の中で補間計算された値を使用する．また，計算セルの間の値においても空間的に補間計算された値を使用するため，追跡モデルで使用する流動は時空間的に補間された値を使用することができる．

この方法は塩分を表現しているのではなく，二丁井樋をオーバーフローした塩水の流速を追跡しているので，粒子の移動範囲は塩分の拡散範囲よりも狭くなる．そのため，塩分の挙動としては厳密性を欠くが，市民にも分かりやすいという点を重視した．

(3) 仮想空間

仮想空間モデルの構築にはEpic Games社の「Unreal Engine」を用いた．Unreal Engineは高度なグラフィックス描写と物理演算の精度が特徴であり，水理学の知識のない一般の方への複雑な水理現象の説明が可能である．Unreal Engineは広範なアセットライブラリを有しており，これにより多彩な素材を利用して高品質なモデルや環境を迅速に構築できる．

地形は実際に現地で撮影した写真や動画に加え，Google street viewの風景画を使用し，建物や手すりなどは必要に応じて，Blenderにて作成した．仮想空間上に表す範囲は二丁井樋から275 mまでの狭路までの区間である．仮想空間内に2週間分の水位グラフを表示し，該当する日にカーソルを動かすことで，その時の水位を再現できるようにした．

流動モデルの格子と仮想空間上でのボックスを連携させることで，塩分の出力値を仮想空間で表現できるようにした．

3. 二丁井樋周辺における塩分動態と従来堰運用での生物遡上

3.1 沖端川から二丁井樋までの塩水遡上特性

小潮（9月4日）、中潮（9月9日）、大潮（9月11日）の満潮時の塩分縦断分布（図3-1）によれば、小潮時は緩混合型の塩水楔が発生し、塩水遡上距離（河床で塩分10になる位置）は3.8 kmであった。中潮から大潮にかけて徐々に鉛直混合が強まるが、大潮でも緩混合であり、塩水遡上距離は5.6 kmであった。

既往の研究によれば、隣接する筑後川では平均潮位差が小さい小潮時に弱混合型の塩水楔が発生し、塩水遡上距離は17 km以上になる。一方、中潮の後半から強混合型に変化し、全体としては強混合型の塩水遡上が支配的になり、塩水遡上距離は8～10 kmである。よって、沖端川の状態とはかなり異なる。

塩水遡上は潮汐、淡水流量、地形的要因の3つの要因を受ける。潮汐に関しては両河川とも有明海に接続しているため違いはない。淡水流量に関しては、正確な値がわかっていないが、沖端川は農業用水を取水するために矢部川から分流させているので、集水域によって生ずる自然の流量より多いと考えられる。地形的要因に関しては、筑後川の河床標高が-10 m～-3 mであるのに対して、沖端川では-2 m～-1 mと沖端川の方が少し高い。以上より、沖端川は淡水流量が多く、河床が高いために潮汐が影響しにくい地形であるといえる。そのため、潮汐流量が淡水流量に対して相対的に少なくなり、鉛直の混合がおこりにくく、緩混合が維持される状態になるといえる。

また、二丁井樋は河口から3.5 kmの地点にあるため、年間を通じて常に塩水が到達する場所であると言える。

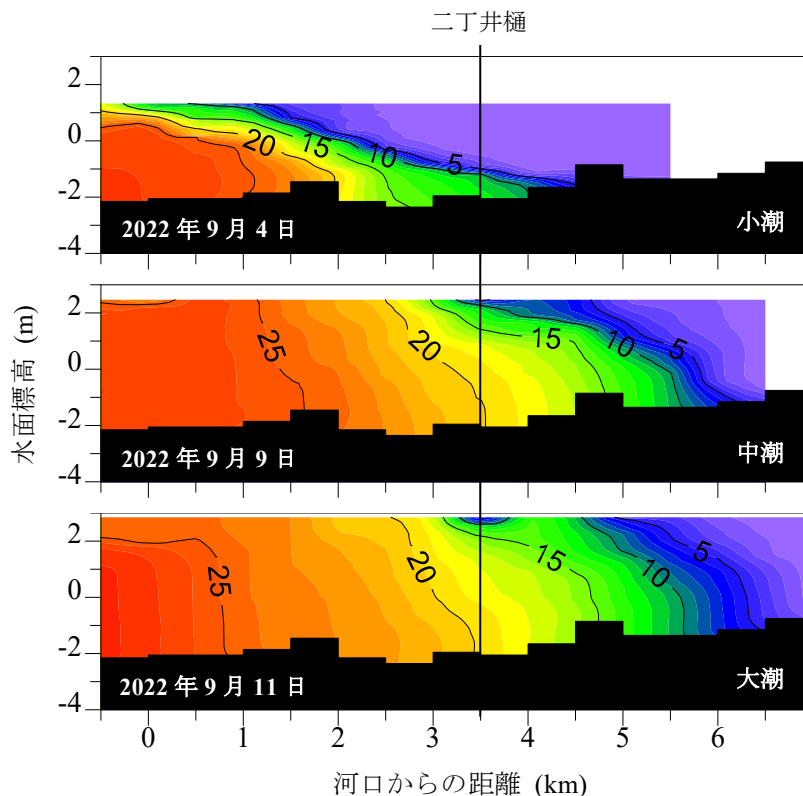


図3-1 沖端川の塩分分布

3.2 二丁井樋周辺の塩水遡上特性

二丁井樋の川側フラップゲートでの水位塩分（River地点）、樋管内の水位塩分（Chamber）、二丁井樋前面の掘割での水位塩分（Canal）を図3-2に示す。

River（青）の水位は小潮～大潮の半月周期潮汐および、満潮～干潮の半日周期潮汐の変動を示しており、塩分は小潮から大潮にかけて高くなる様子が見て取れる。またまとまった降雨があると（4月6日、14日、15日）、河川塩分が低下するため、淡水によって海水が押し出されていることが分かる。

樋管内の水位（赤）は河川と同じ挙動を示す時と、低い水位で一定しているときに分類される。例えば4月4日朝から6日夕方にかけて、水位は赤と青がほとんど同じである。この間、河川の塩分は12～15で、掘割の塩分は最大で5まで達しているため、何らかの理由でフラップゲートが完全に閉じておらず、海水が二丁井樋を通じて掘割に逆流したと推測される。

これに対して、4月19日の朝は河川と樋管内の水位が同じ変動を示しており、河川の塩分が満潮時には8まで上昇しているにもかかわらず、掘割の塩分には変化が見られない。4月4日～6日と19日の違いは、掘割水位（緑）にある。前者は掘割の水位が越流堰の高さ（標高2.03m）よりも低く、後者は掘割の水位が越流堰よりも高い。したがって、4月19日の状況は逆流現象ではなく、フラップゲートは閉じているものの掘割からの落水が樋管内に充満して水位が上昇している現象と推測される。

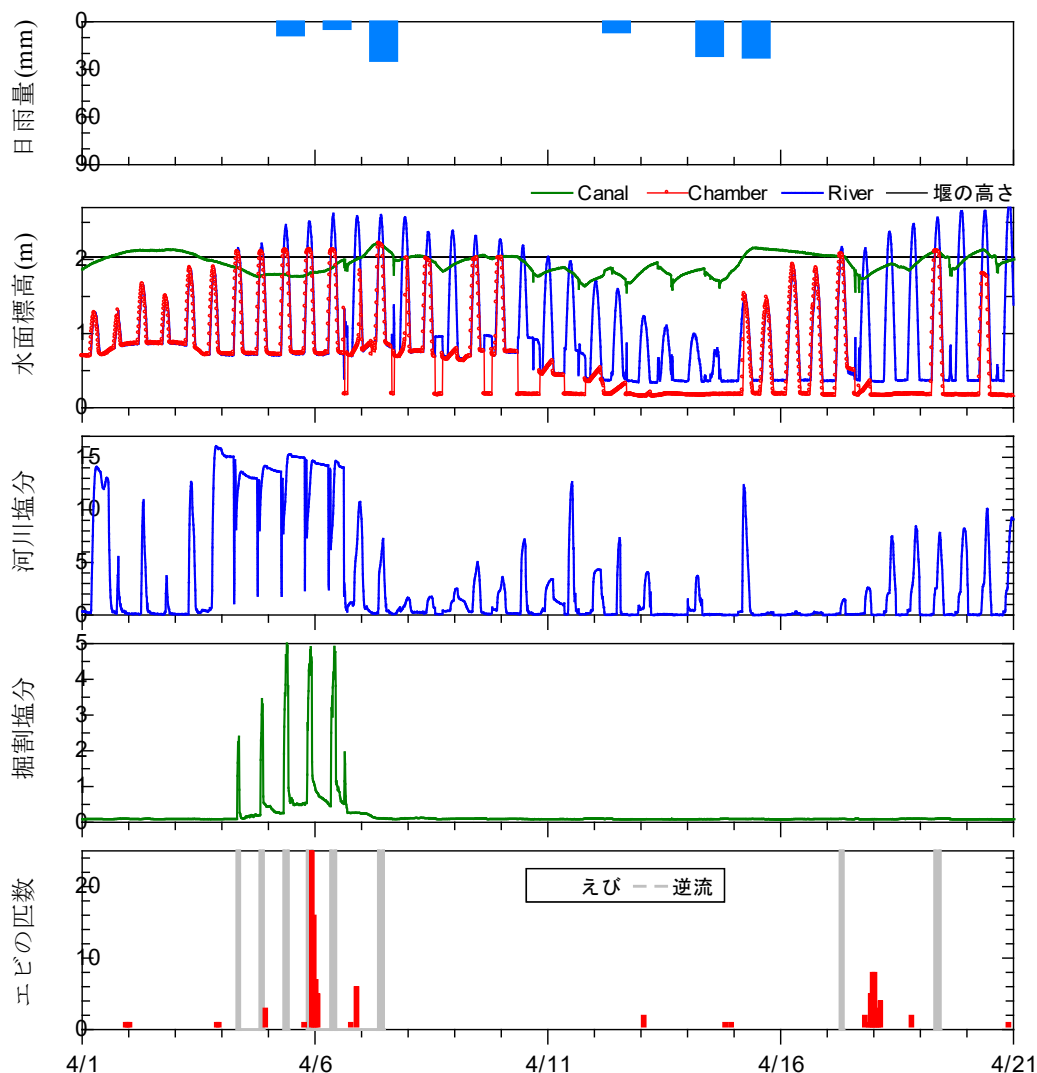
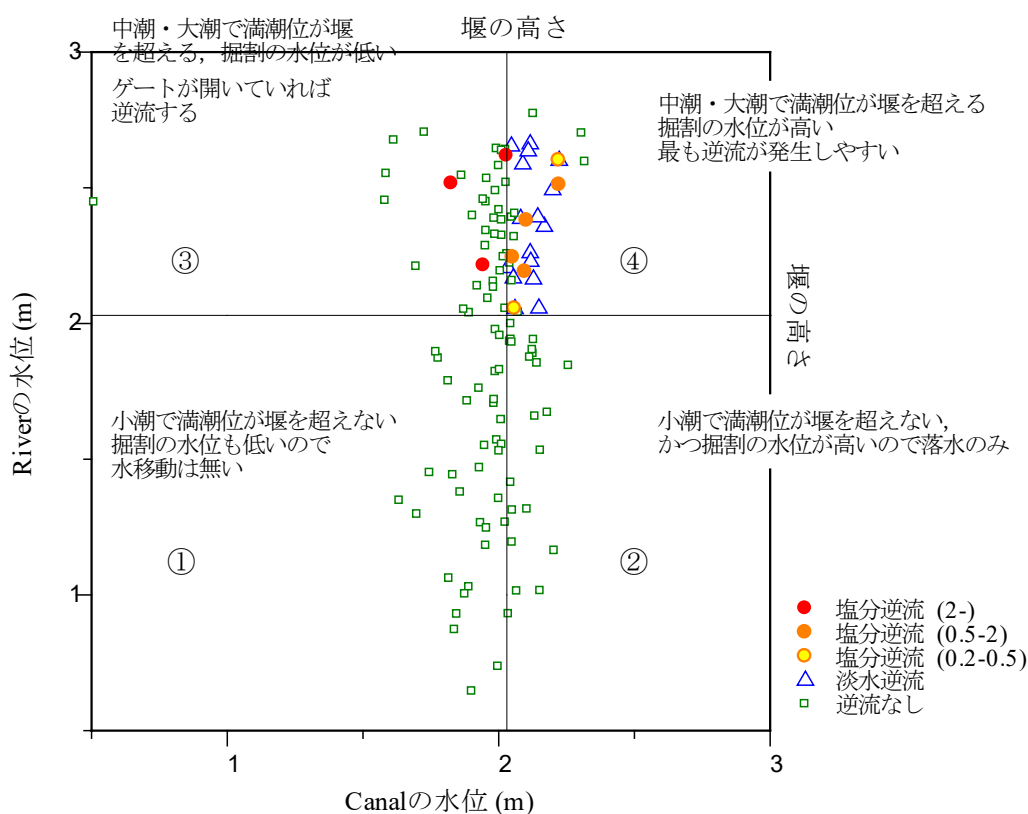


図3-2 二丁井樋周辺3地点での水位塩分時系列およびエビの遡上数（2023年）

図3-3に満潮時の河川水位および掘割水位の関係をプロットし、プロットを塩分で場合分けした。図は4つの象限に分けられ、以下のように考えられた。

- ①小潮で満潮位が堰を超えない，掘割の水位も低いので水移動は無い。
- ②小潮で満潮位が堰を超えない，かつ掘割の水位が高いので落水のみ。
- ③中潮・大潮で満潮位が堰を超え，掘割の水位が低い．ゴミ等がフラップゲートに引っかかって完全に閉じていない場合は海水が勢いよく逆流し，高塩分になりやすい。
- ④中潮・大潮で満潮位が堰を超え，掘割の水位も高い．掘割からの落水で樋管内が満たされるので，ゲートの内外水圧が等しくなり，ゲートが閉じにくくなる．その結果，河川水の逆流が発生しやすくなるが，掘割から淡水が供給されながら海水が遡上するので，塩分は低い。



④の概念図

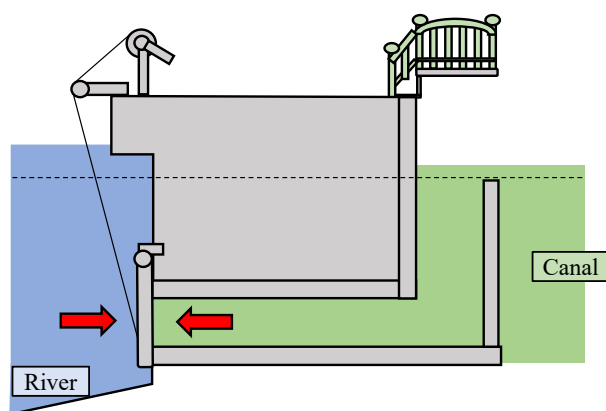


図3-3 河川水位と掘割水位と掘割塩分の関係

3.3 従来堰運用下における生物遡上

2023年3月29日～5月9日のモニタリングカメラの映像を分析した結果、4月19日20時にシラスウナギが1尾確認された（図3-4）。これは、図3-3の④象限に相当し、不安定なフラップゲートの隙間からシラスウナギが遡上した可能性が考えられる。また、九州大学望岡典隆特任教授の2022年6月のメール私信によれば「6/18の二丁井樋の石倉カゴモニタリングで176mmと566mmのニホンウナギが採れました。両個体とも、マイクロワイヤータグは検知されず、伝習館高校が汲み上げ放流した個体ではありませんでした。二丁井樋の石倉カゴで遡上期のウナギ（176 mm）が採れたのは初めてです。」とのことであった。さらにその後も継続的にウナギが掘割で確認されるようになった。

別途、堰の上を移動するエビを、複数日確認できた（図3-2）。逆流発生日と比較すると、逆流の直後や数日後にエビが発見されやすかった。さらに、樋管内の塩分に注目すると、逆流によって塩分が上昇した際にエビの量が増えている。種類は不明だが、仮に両側回遊型のヌマエビ科の1種だとするなら、海から川を遡上する様子を捉えている可能性がある（東京農業大学、千葉晋教授私信）。

以上より、シラスウナギの遡上がカメラで明確に確認出来たのは3年間で1尾だけとは言え、その他の情報も総合的に判断すると、フラップゲートの操作と麻布の設置でシラスウナギや汽水性の生物の遡上を促進できる可能性があると言える。

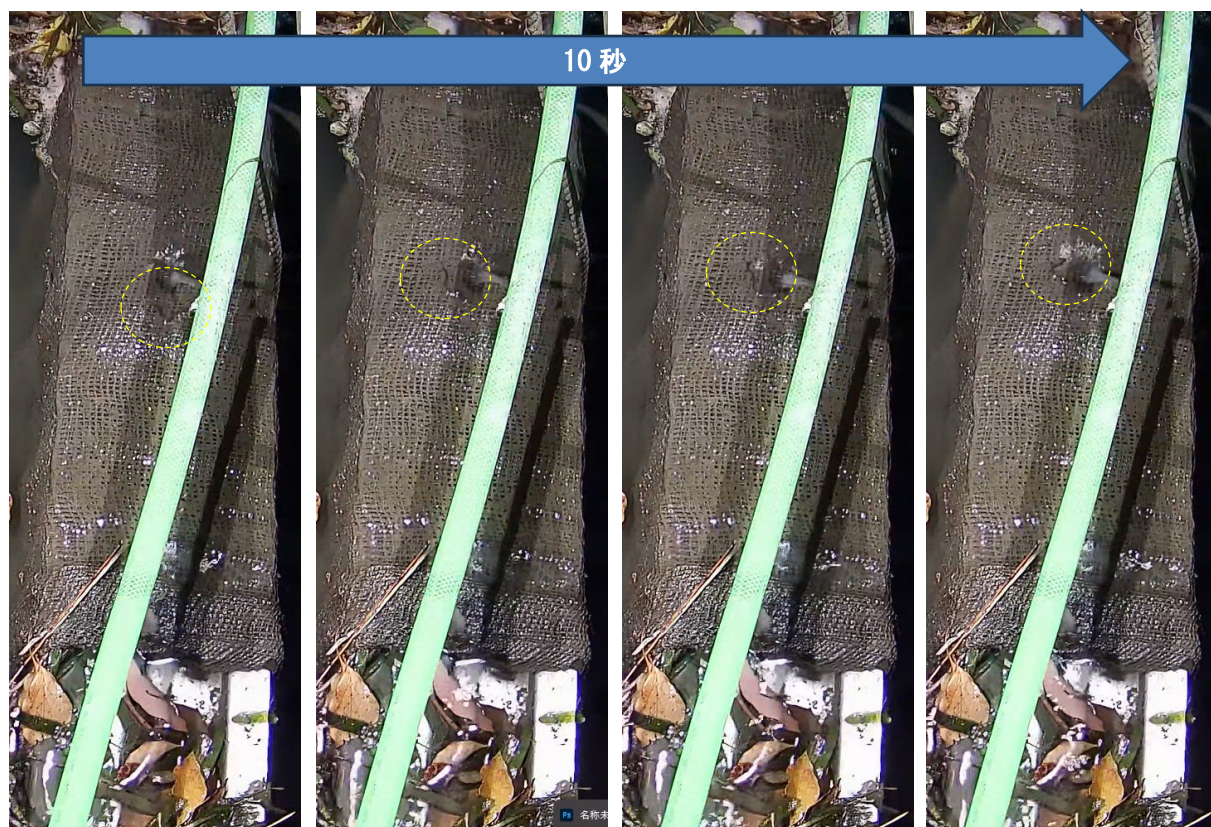


図3-4 2023年4月19日20時に確認されたシラスウナギ

4. 三次元流体シミュレーションによる塩水遡上の可視化

4.1 Particle Trackingによる可視化

ここでは、二丁井樋のゲート操作に何らかの不具合が生じて塩水が逆流した場合に、農業用水に被害が出るかどうかという観点で、掘割における塩分拡散を可視化した。イチゴ畑の取水地点は二丁井樋から750 mにある。

計算領域の下流端から実測塩分と推定流入量を与えた。推定流入量は、河川水位と掘割水位の差からオリフィスの公式で流速を算定し、それをカメラ映像から推定した流速によって補正して、越流断面積を乗じて求めた。

計算ケースは表4-1のとおりであり、逆流が確認された際のデータを用いた。

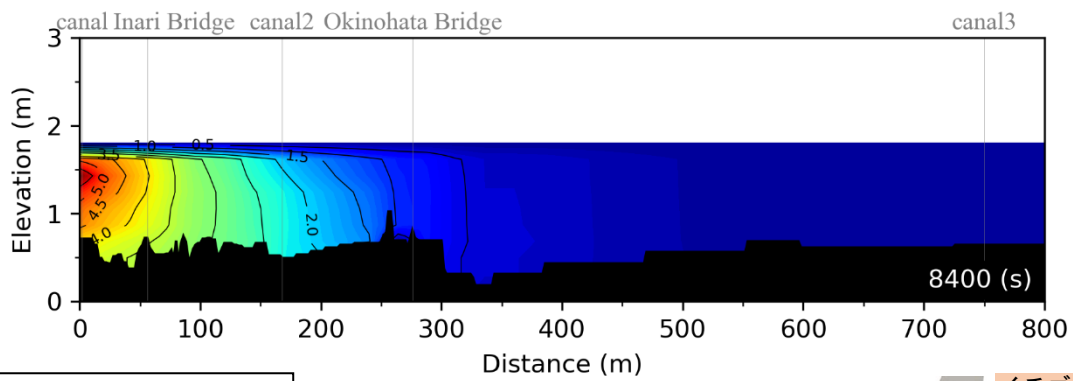
表4-1 掘割における塩分拡散の計算ケース

Case	日時	総時間	沖端川塩分	掘割実測塩分	発生頻度
1	2024年4月12日20時38分 ～4月14日8時38分	36時間	平均1.6 (0.6～1.8)	0.7	
2	2024年5月24日20時39分 ～5月26日8時39分	36時間	平均8 (3.5～12)	2	3年間で5回
3	2024年4月5日7時33分 ～4月6日19時33分	36時間	平均12.3 (8.6～15.2)	5	3年間で1回
4	2024年5月24日7時48分 ～5月27日7時48分	72時間	平均10.4 (3.6～16.3)	2	

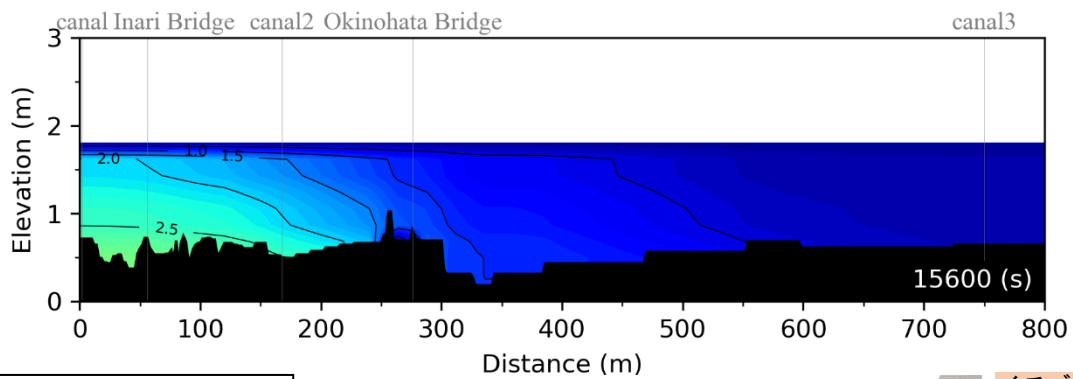
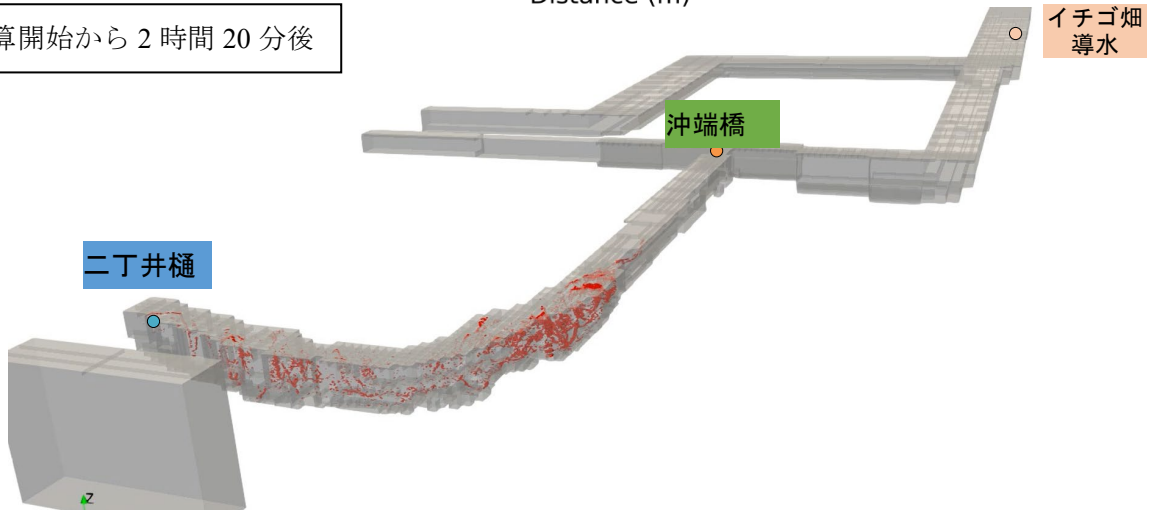
4.2 計算結果

代表例としてケース3を図4-1、図4-2に示す。二丁井樋の前面で塩分が最大となるのは、流入開始から2時間20分後であり、その2時間後には270m付近の沖端橋まで到達した。その後は大きな変化を示さなかった。粒子は沖端橋（270 m）までしか到達していないが、塩分はピークから12時間後に濃度0.5が800 mまで到達しており、取水地点まで拡散している。

ケース3は2022年～2024年の3年間に1度だけ発生した頻度の低い高塩分流入現象であり、ごくまれにイチゴ畑取水地点まで塩分が到達する可能性があることが分かった。なお、市民説明という点では粒子の動画の方が格段にわかりやすいため、「塩水遡上は概ね沖端橋で停止するが、塩分は若干上流まで拡散してゆく」という説明になる。



計算開始から 2 時間 20 分後



計算開始から 4 時間 20 分後

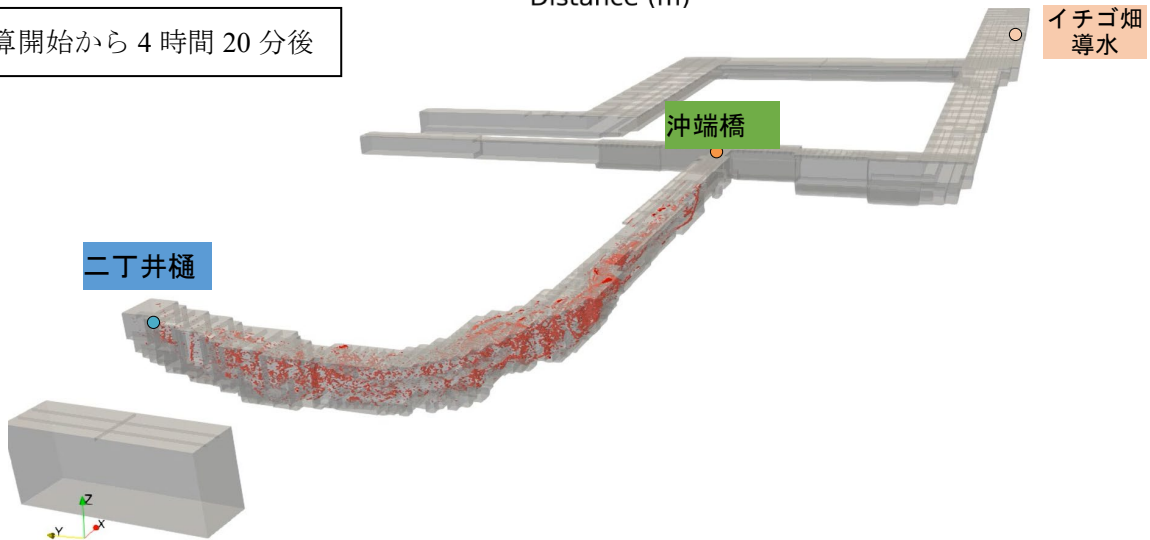
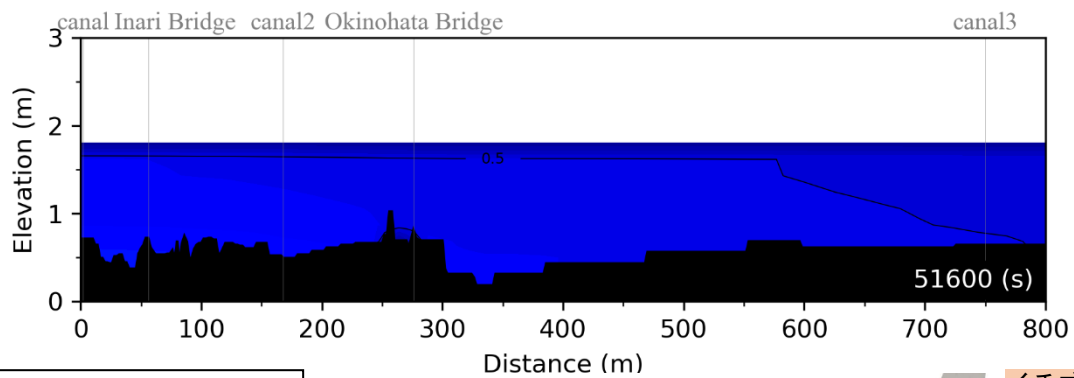
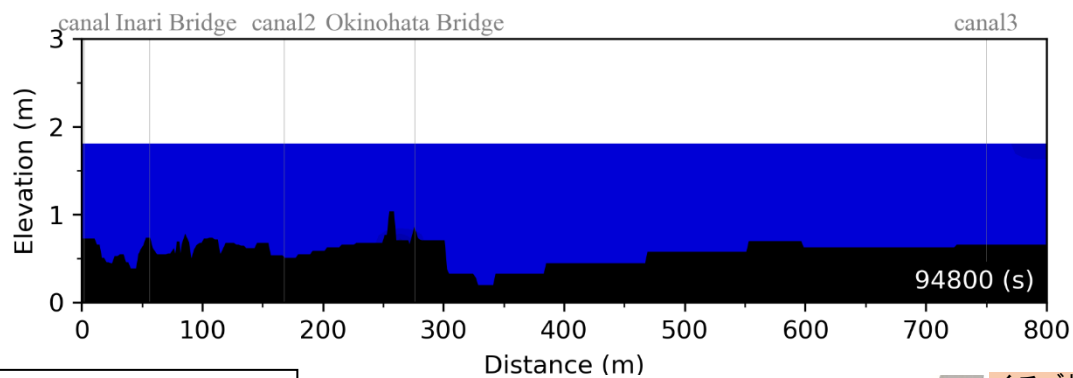
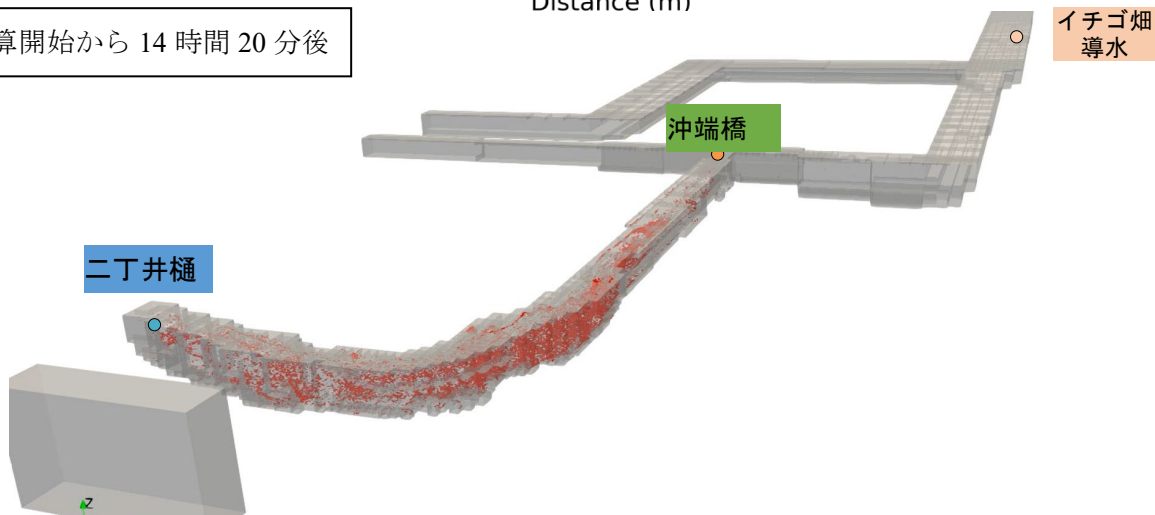


図4-1 塩分と粒子の分布（上段は塩分ピーク時，下段はピークから2時間後）



計算開始から 14 時間 20 分後



計算開始から 26 時間 20 分後

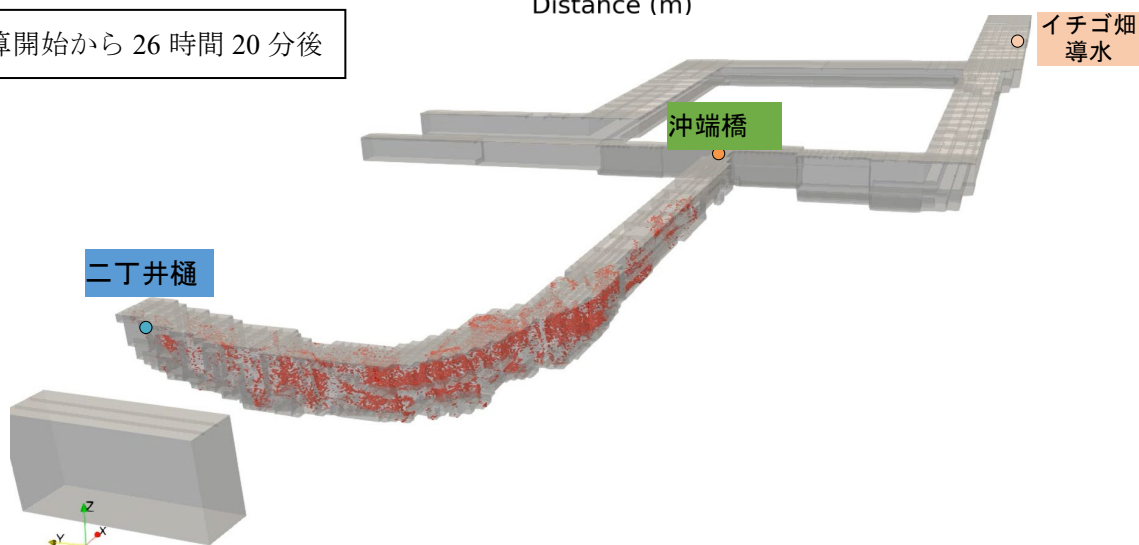


図4-2 塩分と粒子の分布（上段はピークから12時間後，下段はピークから24時間後）

4.3 仮想空間表示システムの構築

デジタルツインの作成範囲は二丁井樋周辺から堰から275 m地点にある沖端橋までの範囲に限定した。この範囲外の広域地図については、Cesium For Unrealを使用した。Cesium for Unrealは、Unreal Engineにリアルな3D地理空間データを統合するためのプラグインであり、地形や衛星画像、都市の3Dモデルなどをリアルタイムでレンダリングできる。このプラグインの主な利点として、1つ1つのオブジェクトを手作業で作成する必要がなく、広範囲の地理空間を迅速に可視化できる点が挙げられる。一方で、近距離での使用時にはオブジェクトの形状や色が不正確になるため、詳細な地形再現には適さないという問題点もある。

そこで広域地形の一部を切り取り、詳細な地形を再現するための基盤を作成した。切り取った部分には、そこにBlenderで作成した建築物や構造物を配置した。Blenderによるモデリングでは、Google street viewの画像および現地で撮影した映像を参照した。また、電柱やはしご、植生などの細部についても現地の構造物を忠実に再現した（図4-3）。



図4-3 デジタルツイン内の二丁井樋周りの景色

河川の仮想空間の作成においてゲームエンジンを用いるメリットは仮想空間内に機能を追加できることである。本研究では塩水流入をわかりやすく表現するために複数の機能を実装した（図 4-4）。

(1) 河川水位の調整（2 週間単位）

仮想空間内では事前に挿入したタイドグラフに沿って、潮汐を変更できるように設定した。潮汐は 2 週間規模で表示をし、ユーザーが潮汐変化を視覚的に理解できるように設定した。また、任意の日時に水位バーを合わせることでユーザーが確認したい河川水位に変更できる。本研究では、2024 年 5 月の潮汐に限定したが、データを挿入すれば、いつでも再現は可能である。

(2) 河川水位の調整（1 日単位）

河川水位の詳細な変動を再現するため、1 日単位の水位調整機能を実装した。この機能では、1 日規模のタイドグラフを小窓に表示し、1 日の中で発生する細かな潮汐変化を視覚的に確認・調整可能とした。これにより、短期間における潮汐変動の影響を詳細に再現し、ユーザーが特定の時間帯における水位変化を精確に把握できる環境を提供している。

(3) 掘割の水位の調整

柳川掘割の水位は天候や流量により、大きく変化する。本研究では、塩水流入時の掘割の状況をより正確に再現することを目的として、掘割内の水位を表示した。現段階は 0.6 m と固定にしているが、将来的には掘割内の水位を調整可能とし、より精密な再現が可能となることを目指している。

(4) フラップゲートの開閉の表示

逆流の有無はフラップゲートの開閉によって決まる。本研究では、仮想空間内で潮汐とフラップゲートの開閉状態を一致させる機能を実装した。これにより、各時点でのフラップゲートの状態を視覚的に確認できるようにした。フラップゲートの開閉判断は Canal の塩分推移データを基に手動で実施した。また、掘割の水位を高めることでフラップゲートを開放状態に設定することが可能である。

(5) 流れの向きの表示

堰周辺における水の流れの向き視覚化する機能を実装した。通常、堰周りでは掘割から沖端川への流れが生じるが、逆流が発生した場合には流れの向きが変化する。このような逆流は一見して分かりにくいいため、フラップゲートの開閉状態や河川の水位と連動させることで、流れの向きを直感的に理解できるよう工夫した。

(6) 掘割内の塩分状況の表示

掘割内への塩分流入を視覚的に把握するための表示機能を開発した。通常時は掘割内の塩分状況を「低」と表示し、塩分が流入した際には「高」と表示することで、掘割内の環境変化を明確に認識できるようにした。この機能により、掘割内の塩分動態をリアルタイムで把握可能となる。

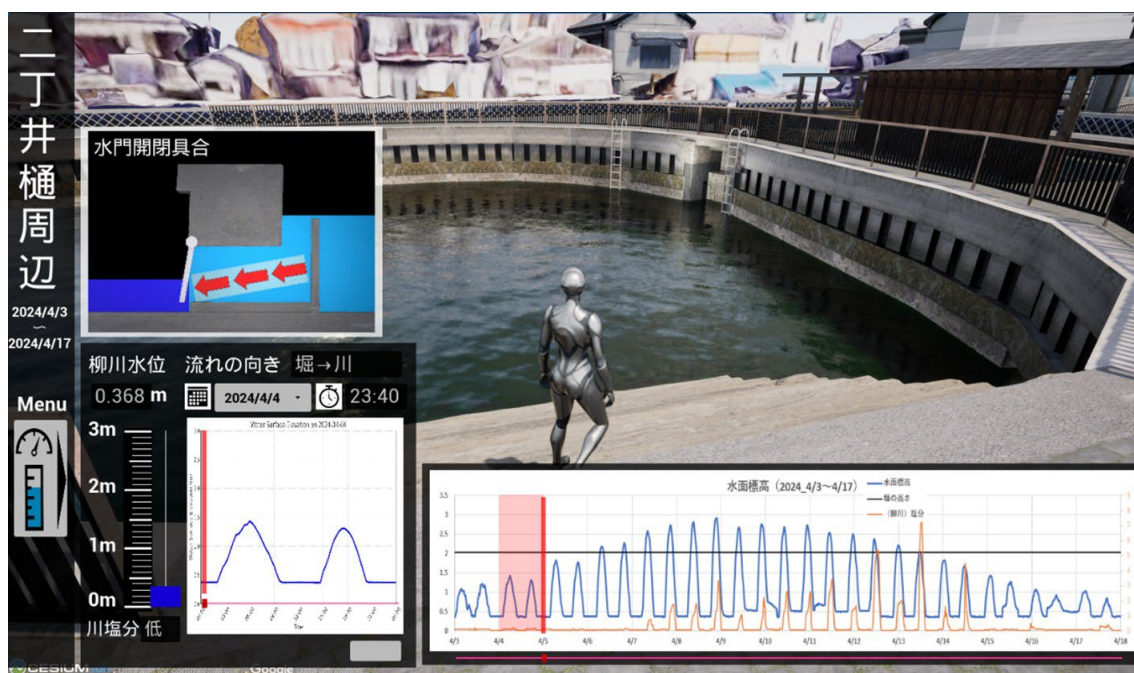
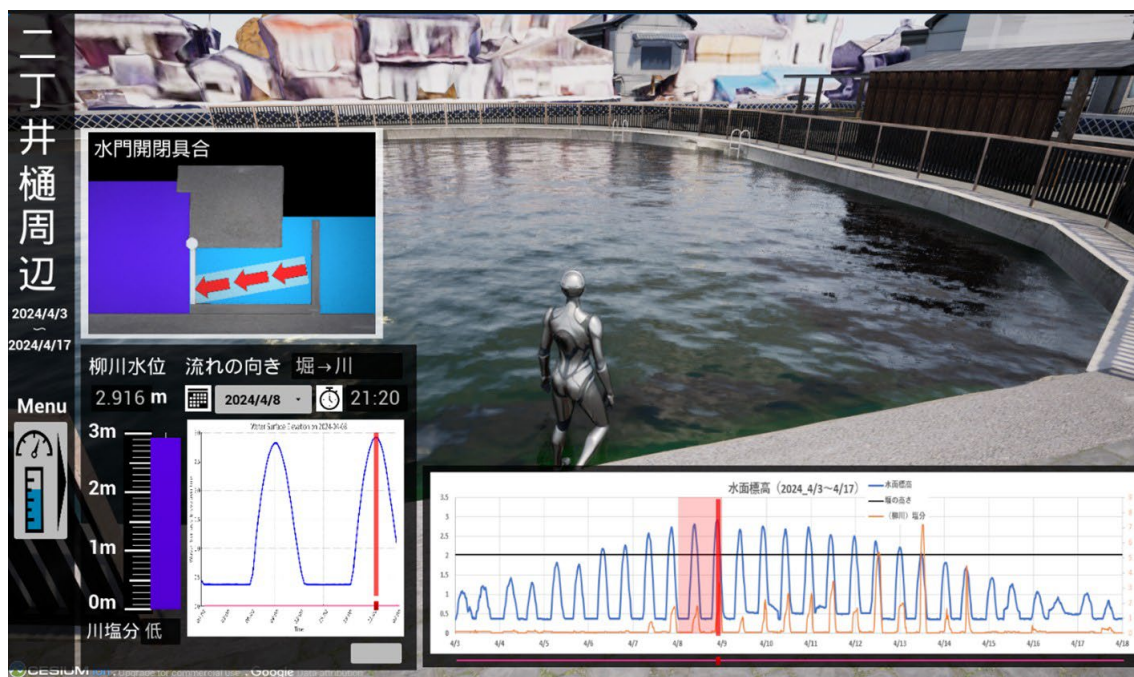


図 4-4 ゲームエンジン内での水位の変化
(上：大潮満潮，下：小潮干潮)

4.4 仮想空間における塩水遡上の可視化

掘割における塩水流入の挙動を可視化するため、仮想空間内に透明なキューブを配置し、塩水流入に応じてキューブの色を変化させる手法を採用した。これにより、塩水流入の再現を視覚的に行うことを可能とした。配置したキューブは合計3000個であり、川幅方向に6個、鉛直方向に3層の構成とした。

塩分データは、Fantom Refinedによる計算結果を利用した。各格子データと仮想空間内のキューブを連動させるプログラムを作成することで、多様な塩水流入のシナリオを再現可能な設計とした。また、塩分の拡散挙動を10分ごとに変化させることで、時間的変動を伴う塩分動態の可視化を実現した。

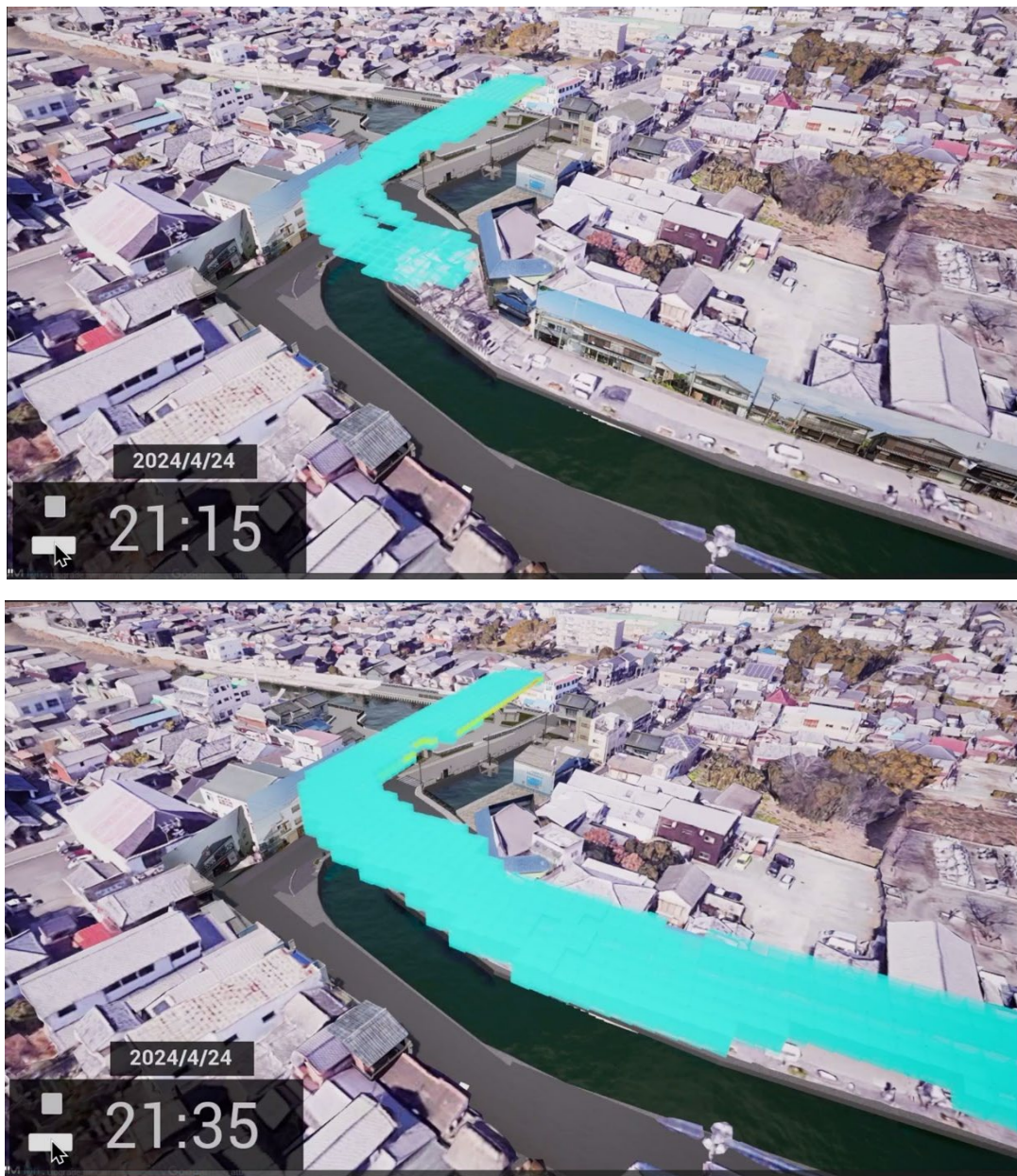


図4-5 仮想空間上での塩水遡上

※ここでは塩水層を空中に浮かせて分離表示しているが、動画では結合している

5. 各種材料に基づく合意形成

5.1 柳川市民の活動

柳川市内では2つのグループがニホンウナギの復活を目指して活動している。一つはNPO法人SPERA 森里海・時代を拓く（理事長：内山里海氏）であり、その前身のメカジャ倶楽部を2010年に設立して、京都大学田中克名誉教授や九州大学望岡典隆特任教授と共にウナギの各種調査や石倉かごの設置を進めている。もう一つは伝習館高校自然科学部（顧問：木庭慎治教諭，現・福岡県立山門高等学校）であり、2014年からシラスウナギを採捕して育成し、ワイヤ標識を取り付けて掘割に放流している。

これらの活動により、掘割最下流にある二丁井樋を開門してシラスウナギを通過させれば、掘割でニホンウナギが育つという見通しが立っていた。しかし、二丁井樋を管理する柳川みやま土木組合は、塩水混入について農業者の理解が得られないとして、管理者と自然活動団体との間に認識の大きな隔たりがあった。

本研究の代表者（横山）は、2021年3月に伝習館高校自然科学部より掘割の塩分調査について相談を受けたことで、当地におけるニホンウナギ復活活動を知った。その後、2022年3月4日に現地を訪問して九州大学望岡教授にから二丁井樋の構造について説明を受け、堰に麻布をかければシラスウナギが遡上できる可能性が高いという提案を頂いた。また同時に、SPERA森里海の内山氏より堰の管理を巡る意見対立について教えていただいた。

5.2 シラスウナギ遡上システムの設置と堰管理者への説明

2022年3月22日にシラスウナギ遡上・観察システムの企画書（図5-1）を内山氏を通じて柳川みやま土木組合に提出したところ、「梅雨時期に入る前（5月の連休明け）にはシステムを撤去すること」という条件で、実施許可を得ることが出来た。設置作業は4月1日に実施した。この時点では、「麻布を堰にかければシラスウナギが遡上できる」という単純な期待であったため、カメラ録画しか行っていなかった。しかし、膨大な映像を確認してもシラスウナギは全く見当たらず、改めて塩水遡上調査を踏まえて、シラスウナギの遡上可能性について検討することとした。

2022年9月4日に沖端川および二丁井樋周辺に水位計および塩分計を設置して、モニタリング調査を開始し、図3-1や図3-2に示す塩水の挙動実態を把握することが出来た。また、塩分・水位の変動とカメラ映像を比較することで、逆流の実態やフラップゲートの動き（図3-3）について理解することが出来た。

調査結果を整理して、2023年3月27日に柳川みやま土木組合ならびにNPO法人SPERA森里海の内山氏に現地で報告した（図5-2）。土木組合は「フラップゲートが完全に閉じずに逆流することがあるというのは、異物が挟まってそのような状況がまれに生ずることは認識していたが、映像およびデータとして確認したのは今回が初めてであり、参考になる。」とのことであった。

続けて、フラップゲートの操作について提案した（図5-3）。それは、①シラスウナギが遡上してくる上げ潮の時間帯はゲートを開けてシラスウナギを樋管内に誘導し、②海水位が掘割の水位に達したらフラップゲートを閉じて塩水遡上を防止する、③シラスウナギは麻布を利用して掘割に移動できる、という内容であった。これを見た堰管理者の反応は、「塩水が掘割に混入する可能性を排除できず、農業者からクレームが来ることが予想される」というものであった。そこで、問題となる取水口の位置と農業（稲作とイチゴ）への塩分の影響についてヒアリングし、今後の調査解析に反映させることを述べ

た。このやりとりを見ていた内山氏は「農業も大切だが、ウナギのことをもっと考えてほしい」と述べ、引き続き実験を継続して様子を見ることとなった。実験期間は2023年3月末から5月連休明けまでである。

シラスウナギ遡上観察システム企画書

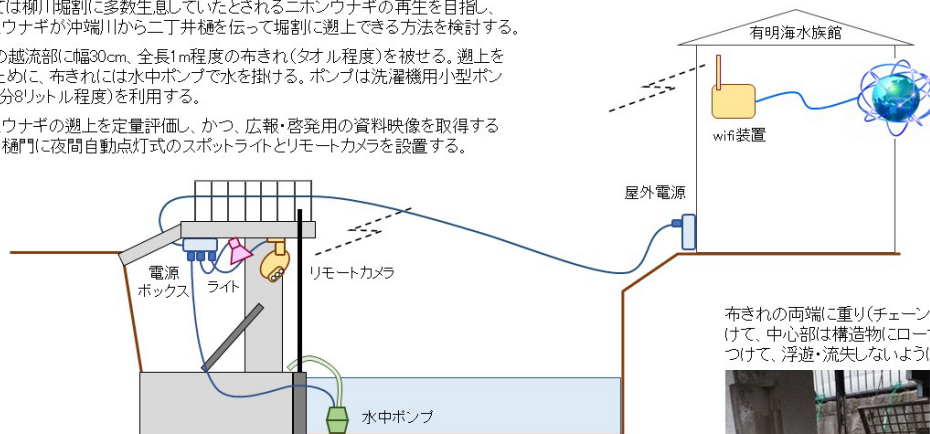
NPO法人SPERA森里海・時代を拓く 内山里美
 県立佐賀高等学校 木庭慎治
 九州大学 特任教授 望岡典隆
 東京都立大学 教授 横山勝英

【概要】

かつては柳川堀割に多数生息していたとされるニホンウナギの再生を目指し、シラスウナギが沖端川から二丁井樋を伝って堀割に遡上できる方法を検討する。

樋門の越流部に幅30cm、全長1m程度の布きれ(タオル程度)を被せる。遡上を促すために、布きれには水中ポンプで水を掛ける。ポンプは洗濯機用小型ポンプ(毎分8リットル程度)を利用する。

シラスウナギの遡上を定量評価し、かつ、広報・啓発用の資料映像を取得するため、樋門に夜間自動点灯式のスポットライトとリモートカメラを設置する。



布きれの両端に重り(チェーン等)を縫い付けて、中心部は構造物にロープ等で結びつけて、浮遊・流失しないようにする。



H網への挟み込みやタイロック等を使用して、構造物に傷を付けないで設置

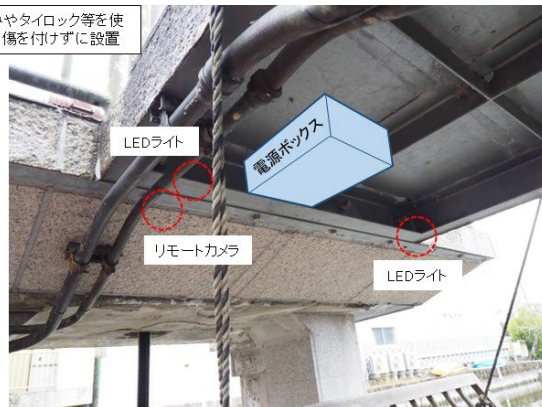


図5-1 シラスウナギ遡上・観察システムの企画書



図5-2 柳川みやま土木組合ならびにNP0法人SPERA森里海の内山氏への報告(2023年3月27日)

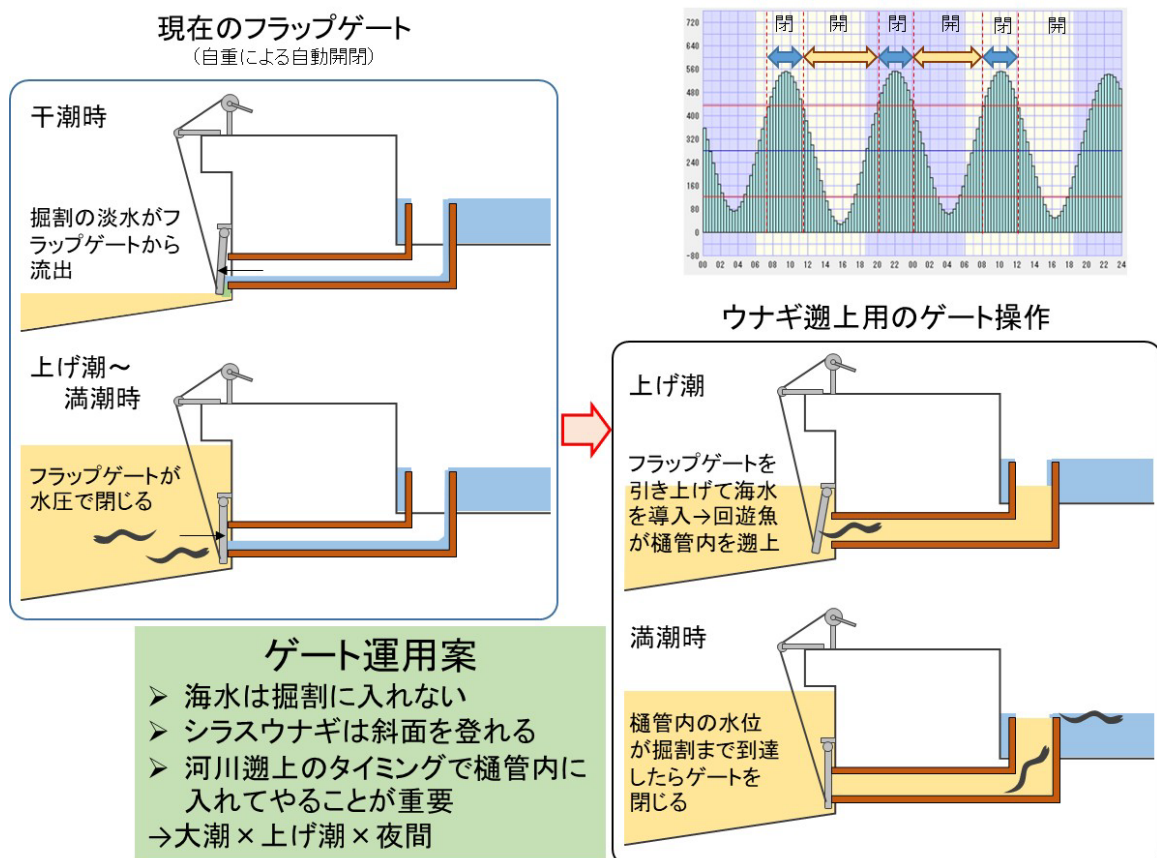


図5-3 フラップゲート操作の提案(2023年3月27日)

5.3 市民および堰管理者との合意形成

シラスウナギ遡上システムの設置・撤去、塩分・水位計のメンテナンス、数値シミュレーション・仮想空間モデルに必要な地形測量を行うために、およそ3ヶ月おきに柳川を訪問し、その都度、関係者に状況を説明した。また、現場は観光地であるために人通りが多く、作業に興味を持って下さる地元の方に内容を説明すると、特に老人は「昔はウナギを捕って遊んだものだ」と口を揃えて思い出話をしてくれた。

2024年3月18日に再びシステムを設置し、5月中旬に撤去したが、2022年からの3年間で確認されたシラスウナギは1尾のみであった(図3-4)。しかし、掘割に設置した石倉かごから、放流固体ではなく天然のウナギが発見されていることから、シラスウナギ遡上システムは機能していると判断し、さらに、堰管理者および農業者の理解を得るための研究材料を調べていった。

2024年10月30日に塩分・水位計のメンテナンスのために柳川を訪問し、柳川みやま土木組合の事務局長、職員およびNPO法人SPERA森里海の内山氏に集まっていただき、3年間の取り組み状況を報告した(図5-4)。

- (1) 二丁井樋および周辺での塩分の挙動特性
- (2) フラップゲートから逆流するタイミングについての考察
- (3) シラスウナギは1尾しか確認できなかったが、エビを多数確認できたこと
- (4) 塩水遡上を防止しつつ、シラスウナギを遡上させるゲート操作方法の提案
- (5) 塩水が掘割に浸入した際の三次元塩水遡上シミュレーションの動画
- (6) 塩水が掘割に浸入した際の仮想空間の動画

本テーマを担当している大学院生が説明したところ、土木組合事務局長から「ゲート操作提案は合理的であり、また、3年間にわたって熱心に取り組んでくれた熱意を評価し、2025年3月・4月に実験的にゲートを開けてもよい」という言葉を頂くことができた。



図5-4 大学院生による柳川みやま土木組合・NPO法人SPERA森里海の内山氏への報告(2024年10月30日)

5.4 シラスウナギ遡上の実証

シラスウナギ遡上システムを2025年3月27日に設置し、ゲート開閉実験を3月27日～29日の3日間にわたって実施した(図5-5)。この日は大潮の上げ潮が夕方から夜間に生ずるという条件で選定された。さらに、30日以降はゲートを閉じた通常運用においてデータを取得した。

上げ潮が二丁井樋に到達したタイミングでゲートを引き上げ、堰の天端から50 cmまで水位が上昇したタイミングでゲートを閉鎖した。ゲートを開けていた時間は約90分である。掘割の水位が高い状態であったため、淡水の落水が樋管内に満たされて、最終的には堰の内外水位差は無い状態になった。

操作実験の結果、シラスウナギが実験ごとに20～120尾遡上する様子が確認され(図5-6)、かつ、ゲートを閉じた30日以降は遡上が途絶えたことから、フラップゲートを1日に90分程度開けておくだけでも大きな効果があることが証明された(図5-7)。ただし、樋管の外水位差が無い状態であったため、シラスウナギが麻布を登攀することについての確認は出来なかった。この点については、引き続き研究を進める必要がある。



図5-5 フラップゲート操作実験(2025年3月27日～29日)

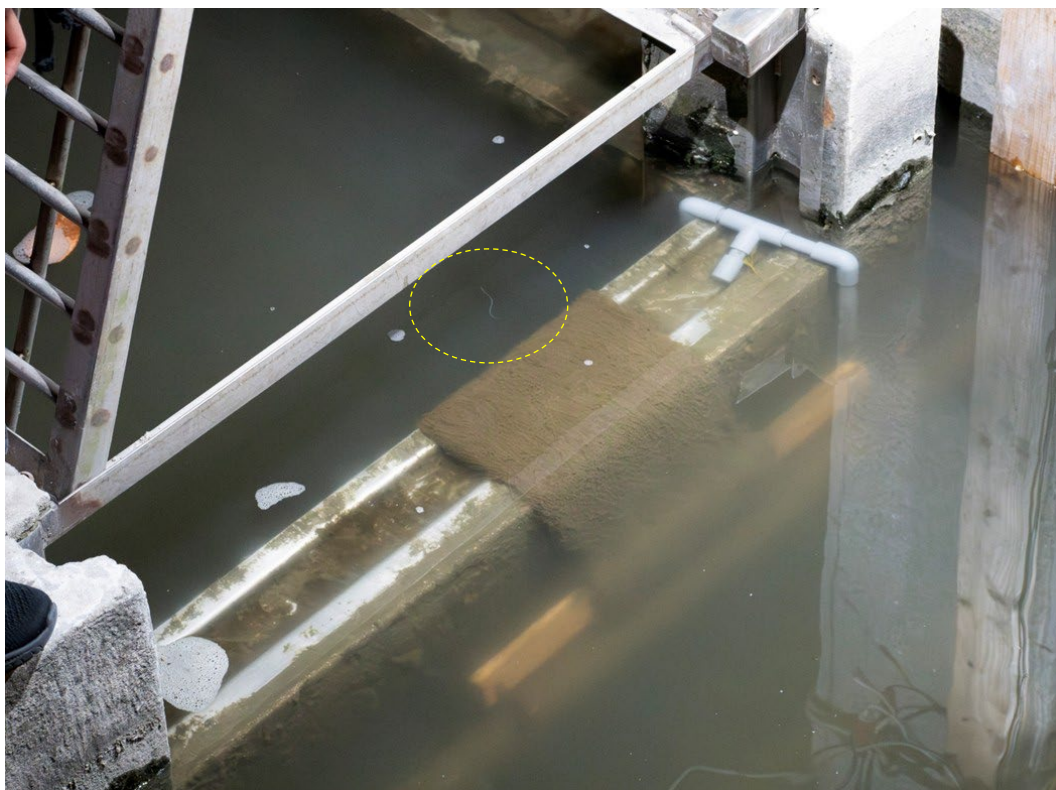
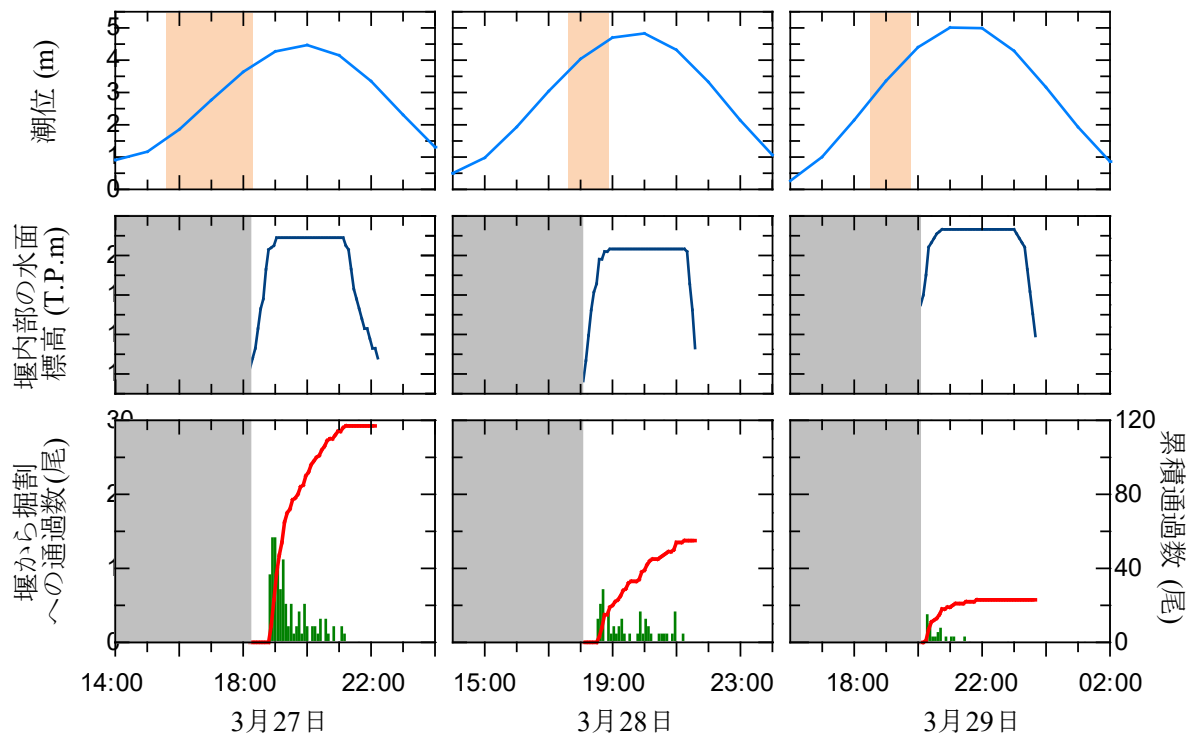


図 5-6 視認されたシラスウナギ

<フラップゲートを上げ潮で開けた場合>



<フラップゲートが常時閉の場合>

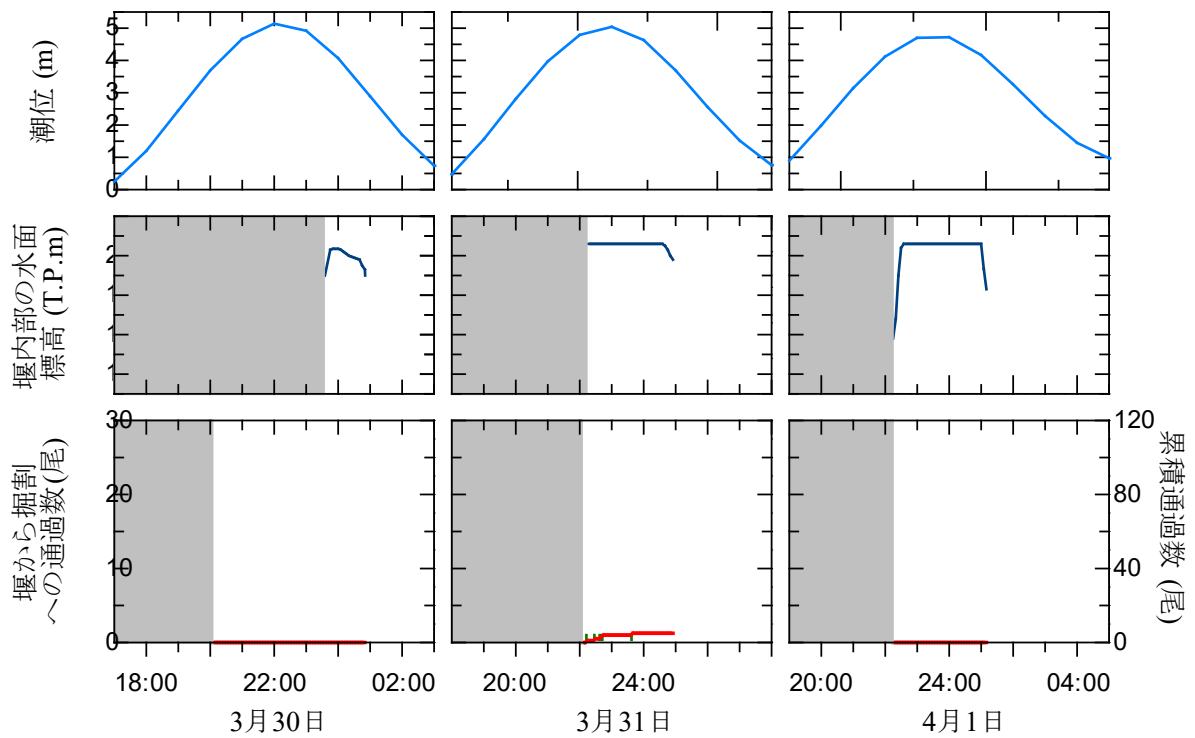


図 5-7 シラスウナギの確認数

5.5 学術界との関わり

この取り組みを推進するために、2022年9月に文部科学省科学研究費（2023年4月開始）に応募したが、採択には至らなかった。科学研究費という観点で、本研究の学術的新規性が乏しいのは確かである。研究手法は既存のものを組み合わせており、現象に関する理解についても、水理学の知識があれば容易に予想できるものである。ゲート操作といっても、ウインチを手で巻くだけの話で、何ら技術的困難さはない。ただ、科学者から見て当たり前の事項であっても、それを市民や行政に理解していただくことには相当のデータの蓄積と労力が必要であり、合意形成の取り組みを科学研究として実施することの難しさがあった。

また、この取り組みの有用性を学術論文にて認めていただくことで、市民活動や堰管理者の意思決定の一助となることを期待し、2024年5月に土木学会水工学論文集に途中経過を投稿した。本報告書の3章までの内容である。しかし、論文も不採択となった。その理由の一部は、シラスウナギの1尾のみで十分に確認されていない、シラスウナギの樋管から掘割への鉛直壁の登攀は確認されていない、シラスウナギの遡上環境に関して新規性が認められないというものであった。

査読者の講評は適切である。しかし、シラスウナギが多数確認されてから論文を投稿する場合、今後、同様の取り組みを推進したい読者の参考にはなっても、現在進行形の取り組みを後押しすることはできない。本研究の手法は水理学的（学術的）な新規性は乏しいが、むしろ、地元関係者にとっては学術的に最先端であるか否かよりも、実現可能性の方が重要であった。塩水遡上現象は淡水と塩水の相互作用があり、河川流量と海域潮汐のバランスで運動が左右されるため、一般の方には理解しにくい。そこで、本研究では多様な関係者が理解しやすく、かつ、提案内容は双方にとってメリットがあるものを目指した。このような場合は学術的に評価されにくく、合意形成の一助とするための論文出版は困難を伴う。

柳川市民がこの問題に取り組みだしてから15年が経ってようやく解決策が見いだされ、堰管理者の理解も得られつつある。今後、合意形成における研究者や科学の役割、あるいは合意形成のための研究的取り組みの評価について、新たな視点に基づく議論が行われることを期待したい。

参考文献

- Kaifu, K., Yokouchi, K., Higuchi, T. et al., (2018) Depletion of naturally recruited wild Japanese eels in Okayama, Japan, revealed by otolith stable isotope ratios and abundance indices. *Fish Sci* 84, 757–763.
<https://doi.org/10.1007/s12562-018-1225-2>
- 住谷昌宏, 長瀬 修, 木下昌樹 (2002) 長良川河口堰における魚道と魚類の遡上・降下調査について, 応用生態工学 5(1), 23-40.
- 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, 2021, 89(1), p. I_29-I_35,
https://doi.org/10.11408/jsidre.89.I_29
- 木庭慎治, 柳川掘割をニホンウナギの郷にする取り組み, 笹川平和財団 Ocean Newsletter, 第 450 号, 2019, https://www.spf.org/opri/newsletter/450_3.html

謝 辞

本研究を実施するにあたり, NPO 法人 SPERA 森里海・時代を拓く内山里海氏および内山耕蔵氏, 福岡県立山門高等学校の木庭慎治教諭 (当時・伝習館高校自然科学部顧問), 京都大学田中克名誉教授, 九州大学望岡典隆特任教授, 柳川みやま土木組合の皆様, 東京都立大学大学院の西野廉氏 (当時) および環境水理学研究室の学生の皆様には大変お世話になりました.ここに記して謝意を表します.

助成事業者紹介

横山勝英（研究代表者）

現 職：東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 教授，博士（工学）

主な著書：日本の河口、25 章「筑後川」を分担（古今書院、2010）

環境水理学、4 章「土砂・懸濁物質の動態」を分担（土木学会、2015）