

11. 矢作川水難事故発生個所における下降流の影響の検討

赤堀良介

1. はじめに

近年のアウトドアブームを受け、キャンプ等での水辺の利用が盛んである。このような社会状況を受け、水辺のレジャーの場における水難事故の発生件数は近年も横ばいの傾向にあり、2019年は国内の河川・湖沼等に限っても248名の死者・行方不明者が発生している(公共財団法人河川財団、2020)。水難事故に関する調査としては、2008年の都賀川における事故を受け、集中豪雨時などの出水時における中小河川での事故発生時の調査が進んだが(例えば、藤田、2010)、静穏な水遊びの場と危険箇所が隣接するレクリエーション下では、事故の発生要因が異なることが推測される。水辺のレクリエーション時の事故発生要因については社会的な要因を除いた物理的機構の面での検討は十分でなく、さらなる知見が必要とされる。このような水難事故に関しては、比較的限られた河川の特定箇所に発生が集中する傾向が知られており(宮尾ら、2009)、筆者のグループでは東海圏の代表的な水難事故発生箇所の検討(例えば、赤堀ら、2021)から、流れの特性について共通する要因を以下のように抽出した。すなわち、「瀬から淵にかけての下降流」、「狭窄部からの蛇行した高速流とその周期性」、および「高速流が接岸する際に生じる循環流とその中の離岸方向の流れ」、以上の要因である。本研究では、事故多発箇所のうちの矢作川池島公園周辺を対象とし、上記特徴のうち下降流の存在に着目して、その遊泳時の危険性に関して検討した。手法としては、高所カメラによる撮影画像に対してStructure from Motion Multi View Trereo (SfM-MVS)の手法を適用し、現地の表面高さモデルであるDigital Surface Model (DSM)を作成した後、同DSMを河道地形として用いた3次元数値解析を実施した。ここで得られた流れの構造を対象として水難事故多発箇所における3次元的な流れの影響について検討し、対策のための基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 対象地域

本研究では矢作川の愛知県内の区間である池島公園付近を対象とした(図-1)。

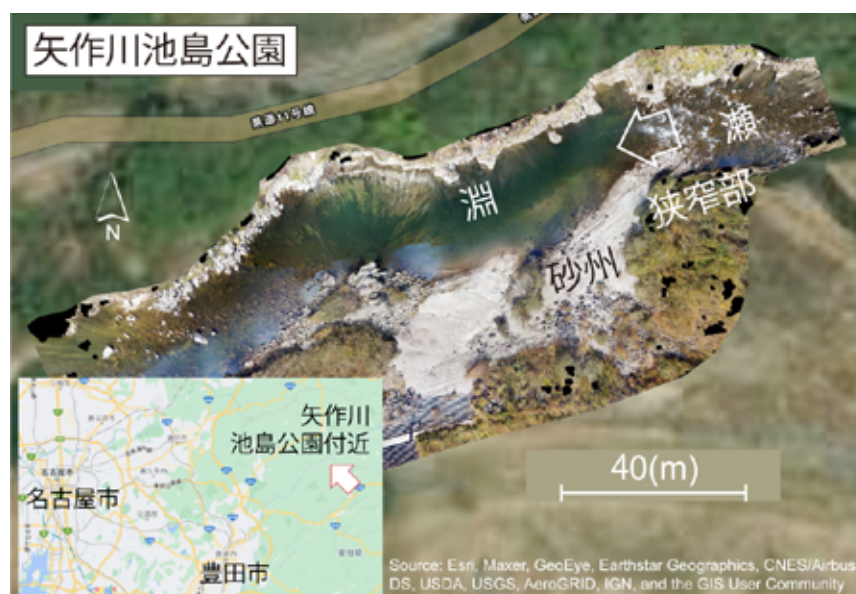


図-1：研究対象地域(矢作川池島公園周辺)の観測領域のオルソ画像、ポールカメラ画像にSfM-MVSを適用して作成

池島公園は百月ダムの下流に位置し、豊田市街地からもアクセスが容易であり、ゴールデンウィークから夏休みにかけてバーベキューや水遊びに訪れる人の多い公園であった。一方で近年は毎年連続して水難事故が発生しており、豊田市のWeb上の報告では、管理上の理由として2020年4月より公園自体が廃止されたことが示されている（豊田市、2020）。池島公園は矢作川左岸側に位置していたが、公園跡地から川に向かうと、左岸側に湾曲部下流側に砂で構成された砂州による河岸が存在し、対岸である右岸側は山付きとなっている。左岸の砂州を挟んで、他の水難事故多発箇所と同様（赤堀ら、2021）、上流側に瀬、下流側に淵が存在する瀬淵の構造を有しており、砂州の上流側には突出部による狭窄部が併存している。ここでは2019年にも水難事故が発生したが、その後に水難学会の事故調査委員による現場検証が実施されており（Yahooニュース記事、2020）、流れの有する特徴に関して考察がなされた。その際に、事故を誘発する要因の一つとして、狭窄部下流に存在する循環流（狭窄部を形成する突出部からの剥離流が接岸することで形成）によって、行楽客がレクリエーション時に利用する箇所（左岸の砂州）から生じる離岸方向の流れを形成している点が挙げられた。

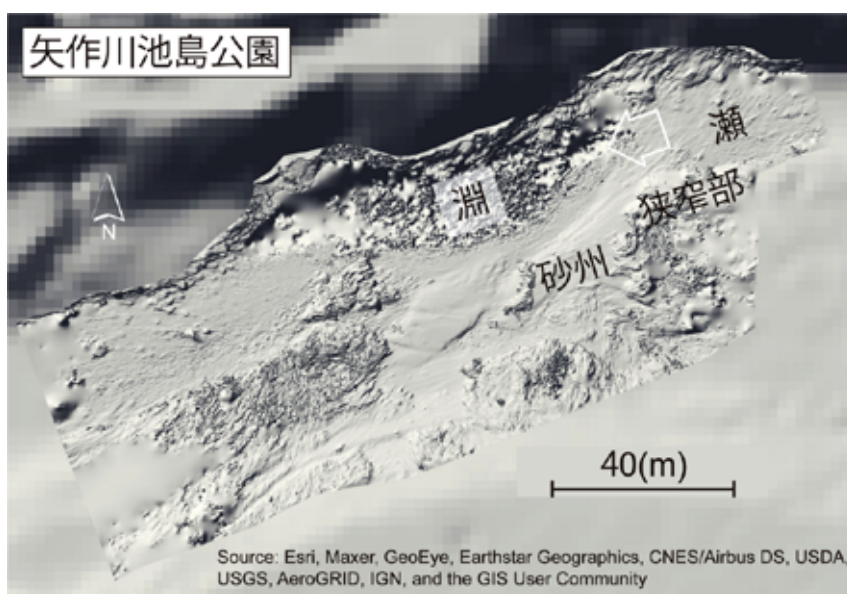


図-2：矢作川池島公園付近の観測領域のDSMデータ（2cm解像度）に基づく陰影図を基盤地図情報5mDEMによる陰影図に重ねたもの、DSMはポールカメラ画像にSfM-MVSを適用して作成（後述）

3. 研究手法

本研究は、河道地形を把握するための現地観測と、得られた地形によって実施された数値解析との、2段の構成によって実施された。以下にそれぞれの手法について詳細を示す。

3.1 現地観測

現地観測は2020年11月17日と、2021年11月21日の2回実施された。前者の2020年11月の観測では、河道形状の把握と、目視による循環流付近の流況の観測を目的とした。近年ではUnmanned Aerial Vehicle (UAV) を利用した高所撮影が一般的に実施されているが、本研究では観測の高解像度化、簡易化のため、7mの高所作業用のカーボン製収縮ポールに、レンズとセンサー部のみで構成されたタイプの遠隔操作型カメラ（Sony、QX-1）を取り付けたもので代用した（後藤、2015）。このカメラによる高所撮影は二人で実施した。まずカメラ保持担当となる一名がカメラのついたポール（プロメイト、E-4867）を持ち、同じ位置を保ちながら少しずつ回転した。このとき、360度を20等分ほどした角度ごとに立ち止まり、シャッター担当の一名がリモコン（Sony、RM-LVR1）でその都度シャッターを押した。シャッター担当は、その際にリモコンの画面で1枚前の画像とのオーバー

ラップが十分であることを確認しながら撮影した。画像には、予めRTK-GNSS測量で座標値を取得した標定点の標識を撮影画像内に含むよう意識した。この現地観測では少なくとも1か所あたり20枚以上(360度を20等分)の撮影を20か所以上で実施し、延べの撮影枚数は560枚程度となった。撮影した画像はSfM-MVSによって処理され、その際には市販のアプリケーション(Agisoft社、PhotoScan Professional edition Ver.1.2.6)を用いてオルソ画像(図-1)および表面高さモデルであるDSM(図-2)を作成した。DSMは可視光で撮影した写真からのモデル作成である特性上、実際には植生高さなどを含んだ値として標高が表示される。これに関し、対象地点では計算時の水面下に植生域が入る状況とはならず、流れの解析上の影響は無視できるとした。また透視度が十分であれば河床形状の取得も可能である。水面下の形状の精度に対しては透視度および水深の影響が大きく、浅瀬では詳細な河床形状が反映されているが、図-2に示す通り、淵の滯筋最深部ではノイズ的な振動を含んだ地形となった。

2021年11月21日の観測では、このノイズを含んだ淵部の形状を検証するために以下の観測が実施された。この観測では、市販の投げ込み型の魚探(Deeper Smart Sonar PRO+, 以下Deeper)を使用することで、淵部の形状の概略の把握を試みた。Deeperは浮き型の機材で、釣り竿でキャストする方式の市販の魚群探知機であり、本体内部に測深機能とGPSを内蔵している。同時に無線接続の機能を有しており、スマートフォンとWiFiで接続することで測深情報をスマートフォン内のアプリで記録することが可能である。現地では、まずDeeperのGPS時刻と、写真撮影に使用したカメラ(Olympus, TG-5)のGPS時刻を同期させた。次に該当のカメラ(TG-5)で作業中の水面などを撮影すると同時に、手持ちの撮影でSfM用の画像を数百枚撮影した。この間、Deeperの操作者はスマートフォンにより水深情報の記録を継続した。その後、上記画像で簡易にSfM解析を実施し、新たに当日(2021年11月21日)のオルソ画像を作成した。その際、個々の撮影画像に残されたDeeperの位置を判別し、SfM解析時に撮影画像内にマーカーを打つことで、解析結果であるオルソ画像中にDeeper位置を示すマーカーが平面上の座標値と共に示されるように操作した。最後に、マーカーを打った際に用いた画像のGPS撮影時刻を確認し、スマートフォンに残された同時刻の水深情報を参照することで、平面上の座標値に対応した観測時の水深を得た。この結果からは、淵部のDSMでノイズを含む箇所では魚探による測深結果が異なることが示されたが、ノイズ部の周辺部の水深はDSMモデルの標高値に対して妥当な結果を示していた。

上記の2021年11月の観測結果を踏まえて、ノイズ部の精度が十分でないことが示されたが、その他の淵部領域では妥当なDSM形状を有していることが確認されたこと、またノイズ部の面積が計算領域とした河道の全体と比較して比較的限られた範囲にとどまることなどを考慮し、2020年11月の観測結果に基づくDSMを河道の地形として用いることとした。なお数値解析の際には40cmの格子解像度に変換され地形情報が平滑化されることから、計算時のノイズ箇所の影響はさらに緩和されると考えられる。

3.2 非定常3次元数値解析

本研究の数値解析では、平面2次元流れのモデルによる予備計算を実施した後、筆者らの作成した3次元LESモデルを使用して対象地点周辺の流れの3次元構造を解析した。

平面2次元流れ解析においては、汎用の解析パッケージであるiRICに含まれるNays2Dソルバーを利用した(iRIC software, 2022)。地形情報としては3.1.1で得られたDSMを使用し、矩形の格子状に河床標高を設定し、さらに左右岸に障害物のマスキングを設定することで河道の平面形状を表現した。また流量に関しては上流の百月ダムと発電所からの放流量について、事故発生時の合計値を13.5m³/s程度として与えた。

3次元計算の解析モデルとしては筆者の作成した3次元LES乱流モデルを用いた(Akahori et al., 2009)。実際の手順では、前述の平面2次元格子状の計算結果データを3次元での座標系に拡張し、計算格子および初期条件設定の基礎データとした。この際、流下方向、横断方向、鉛直方向のうち、流下方向、横断方向座標値に関し

て、2次元解析データの座標値を基とした値を与えた。このため2次元解析と同様に、3次元格子においても流下方向軸と横断方向軸の方向の水平面では直交座標が形成されており、その中で障害物のマスキングにより水域、非水域の設定を行った。鉛直方向に関しては以下の手順で座標値を与えた。まず、ある平面上の座標値における鉛直方向の座標値について、その最大値を前述の2次元解析の水面の標高の値から、最小値を同河床標高の位置から与えた。また鉛直軸の値の最大値から最小値までは、設定された格子数に則り等分割した。ただし、水深の急変部での格子の極端な鉛直方向の歪曲を避けるため以下の対応を行った。まず、水深が一定値より浅くなる（ここでは4mとして設定）箇所では、一旦実際の河床高よりも低い位置に仮想的な河床高を与え（水面位置から4m下方）、この間を設定格子数で分割した。次に、仮想の河床である最下端の格子から実際の河床高に該当する位置の格子に至るまでの部分について格子セル内を障害物として設定した。対象とした河道は、水深4mを境に、その値が大きい部分でなめらかに形状が変化し、そうでない箇所については階段状に設定された障害物格子によって対応する形となった。物理量の初期条件の設定に関しては、平面2次元解析で得られた平均流速の各成分を上記の3次元格子に展開した。その際、流速については対数側分布に則って鉛直方向に配分し、その水深平均値が2次元解析の結果と同様になるよう調整し、初期条件として与えた。また格子数が流下方向、横断方向、鉛直方向にそれぞれ448×152×26、格子サイズは水平方向に0.4m程度とした。流量に関しては、2次元解析と同様に13.5m³/s程度として与え、計算時間刻みを0.0005sとした。本計算では水面の時間的変動は考慮せず、rigid-lid型の近似を用いており、個体壁との境界ではnon-slip型で境界条件を設定した。

4. 結果

3次元解析の結果はvtk形式のファイルとして時系列的に出力し、vtk描画システムであるMayaviを用いて可視化した。図-3は解析結果の瞬間値について、水面近傍の水平面における流速ベクトルを示したものである。図中の瀬、淵、砂州の位置関係は、図-1および図-2に示されたものと対応する。ここで特徴として挙げられる要素を示すと、まず^{a)} 早瀬部分からの高速流が存在し、これが左岸の突出部で構成された狭窄部を経て^{c)} で示した岩と突出部による狭窄部から生じる蛇行した縮流となった。また、この縮流が狭窄部下流で左岸に向かい接岸し、接岸点と狭窄部の間で、^{b)} 狭窄部の下流の循環流を形成した。これら^{a)} から^{c)} の要素は筆者らの既往研究（例えば、赤堀ら、2021）で示された木曽川本川橋や長良川美濃橋付近における流れの特徴と概ね一致する。また水遊び時のエントリー箇所であったと想定される左岸砂州から生じる離岸方向の流れが存在しており、^{b)} の循環流が^{c)} の縮流に還流する付近で明瞭に観察することが出来た。

次に鉛直方向流速成分の値について等値面で示した図を図-4に示す（同時に図に該当する流速ベクトルを白の実線で示した）。目視による可視化画像の検討から、早瀬から狭窄部下流の淵に落ち込む流れが、^{d)} の下降流の水塊を発生させる動きが見られた。この下降流の水塊は、周期的に発生しながら下流側へと移流する。流速ベクトルと対比させながら観察したところ、この下降流塊は、離岸方向の流れが本流に接続する領域で周期的に発生していた。先行する検討では離岸方向の流れを事故発生の要因として挙げているが、それが接続する領域に見られた下降流塊自体についても、その遊泳者に対する危険性は指摘されており（例えば中部地方整備局による木曽川を対象とする観測結果など、大山ら、2015）、池島公園周辺では、これらが複合して水難事故発生の危険性を増加させた可能性が推測される。また、目視の限りでは、離岸方向の流れの強弱が下降流塊の発生の周期と連動しているように見受けられたが、これについては現状では十分な定量的な評価は進んでおらず、明確な結論を得るためには今後の十分な検討が必須である。

5. まとめ

本研究では、矢作川の水難事故多発箇所である池島公園周辺を対象として、水難事故が発生した状況における水理的な特性、特に下降流の挙動について3次元数値計算による検討を行った。結果から、瀬から淵に掛けて、左岸の突出部で構成された狭窄部から生じた蛇行した縮流は、狭窄部下流で左岸に向かい接岸し、接岸点と狭窄部の間で循環流を発生させることが示された。また、この循環流が滞筋部の本流に還流する際に、離岸方向の流れが生じていることが示された。さらに鉛直下向きの流れを等値面で可視化した結果から、瀬から淵に掛けて下降流塊が周期的に発生しており、先に示した離岸方向の流れが滞筋に向かう位置と、その発生領域が重なることが示された。

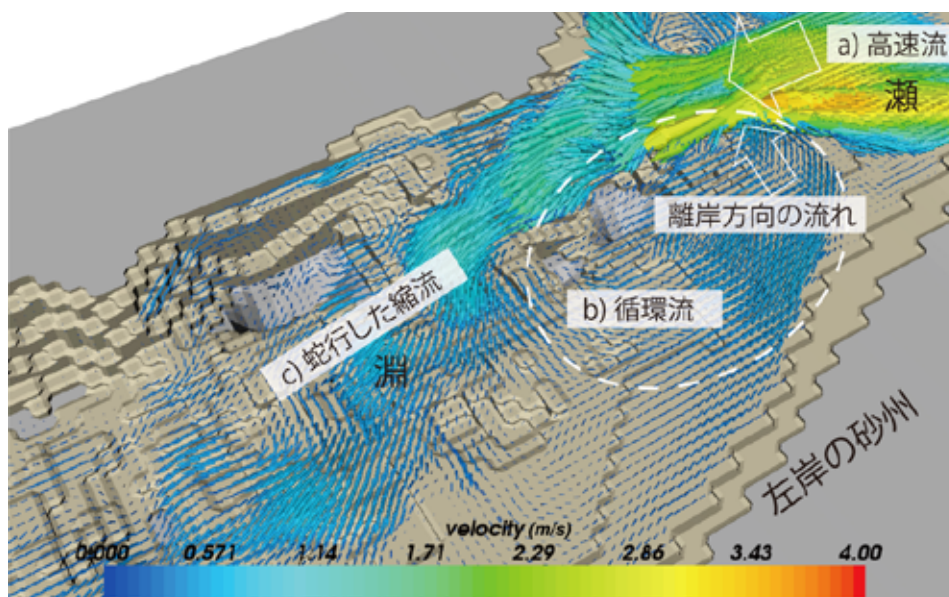


図-3：3次元数値解析の結果について水面近傍の流速ベクトルを示したもの

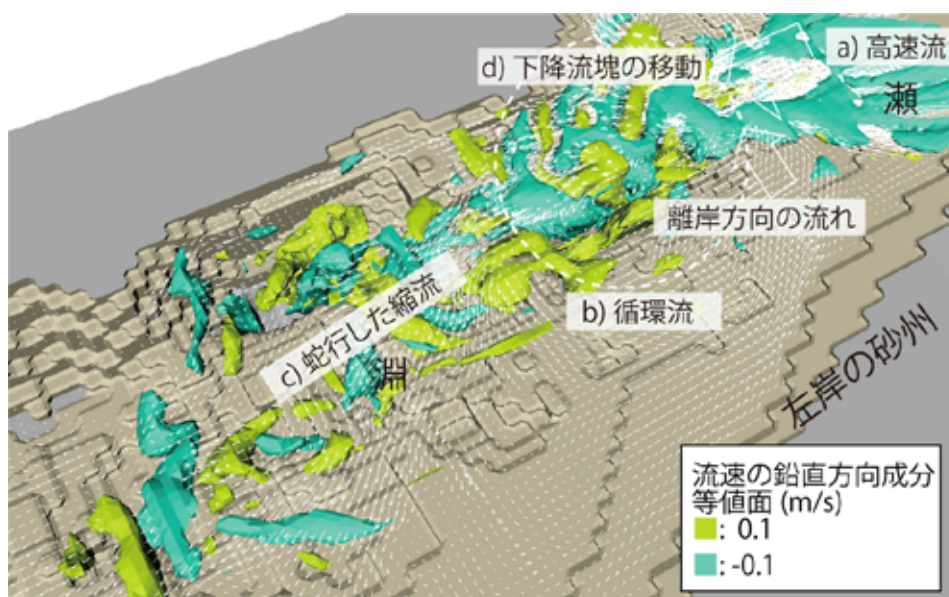


図-4：3次元数値解析の結果について水面近傍の流速ベクトルと鉛直方向流速成分の瞬間値を等値面で示したもの

参考文献

- 赤堀良介, 岡田拓巳, 久志本陸: 水難事故発生箇所における特徴的な流れの周期性について, 土木学会論文集A 2 (応用力学), 77巻 (2号), I_433-I_440, 2021.
- Akahori, R., Matsuo, Y. and Ikeda, S.: Study on open channel flow with a submerged structure, Proceedings of the 6th IAHR Symposium on River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics (RCEM2009), Santa Fe, Argentina, pp.263-270, 2009.
- iRIC software <http://i-ric.org/ja/> (最終閲覧日: 2022年4月27日).
- 大山璃久, 河邊宏, 鈴木高: 行政的課題に対するADCPの活用方策について, 平成27年度中部地方整備局管内事業研究発表会, 2015.
- 公益財団法人河川財団: No more 水難事故2020, https://www.kasen.or.jp/Portals/0/pdf_mizube/suinan_2020.pdf (最終閲覧日2021年6月8日)
- 豊田市Web (矢作川池島公園・矢作川時瀬公園の廃止について), <https://www.city.toyota.aichi.jp/shisetsu/sports/kouen/1036893.html>, 2020 (最終閲覧日2022年4月27日)
- 後藤秀昭: SFM (Structure from Motion) -MVS (Multi-Video Stereo) 技術を用いた変位地形の数値表層モデルの形成と変位量の計測 - 1970年代撮影の空中写真およびボールカメラの写真を用いた検討 -, 活断層研究, 42号, pp.73-83, 2015.
- 藤田一郎: 局地的集中豪雨の実態と避難対策 - 都賀川水難事故を例として, 水工学に関する夏期研修会講義集, 46, A-1_1-20, 2010.
- 宮尾博一, 清水晃, 吉野英夫, 並木和弘, 土井康義: 水難事故防止策に関する研究~最新の動向を踏まえた手法と対策例~, 河川環境総合研究所報告, 第15号, pp.13-23, 2009.
- Yahooニュース記事 (幼い女の子2人の命を奪った水難事故 原因はまさかの現象だった 水難事故調レポート), <https://news.yahoo.co.jp/byline/saitohidetoshi/20200501-00176326/>, 2020 (最終閲覧日2022年4月27日)