

## 13. 水難事故発生集中箇所における局所流の検討

赤堀良介

### 1. はじめに

近年、自然との積極的な関わりが重要であると認識される中で、河辺の利用も盛んに行われている。このような状況の中、水難事故件数はこの10年で横ばいであり（公共財団法人河川財団、2015）、その対策は引き続き改善が求められている。中部圏では、長良川（2003年～2013年で66件）をはじめとして、主要な近郊の河川が全国の水難発生件数の上位を占めており（公共財団法人河川財団、2015）、水難事故対策が「安全・安心」を守る重要な要素であることが分かる。水難事故に関する発生箇所に着目した既往研究では、各河川の特定期間内に発生が集中している状況が示されている（長良川の美濃橋周辺など（宮尾ら、2009））。これには利用状況などの社会的な要因も存在するが、流速や流向といった水理的な要因も重要であることが推測される。近年は事故発生箇所における揭示に関し、「どう危ないのか」について積極的に情報を提供する例が見られ（宮尾ら、2009）、水難事故集中箇所における水理的情報の把握は、理由説明および今後の事故防止の重要な情報となる。

河川の地形あるいは水理的要素は固有性が高く、水難事故集中箇所における流況が、事例ごと十分に検討される必要がある。特に橋脚など河道内の構造物周辺に関しては流れの局所性が高く、リーチスケール以下の詳細な空間的特性を見ていく必要があると考えられる。このような局所的な流れの解析に関しては、近年、2次元や3次元モデルによる数値解析が一般化しており、これら数値解析を適切な地形情報を用いて検討することで、事故当時の流況の再現が可能である。上記の理由の元、筆者は木曾川における代表的な水難事故発生箇所である木曾川本線橋（東海北陸自動車道高架橋）付近の流れを対象として、橋脚付近に存在する狭窄部での流れの構造の検討を進めてきた。既報（赤堀、2016）では国土交通省中部地方整備局木曾川上流河川事務所より提供された現地観測データと、汎用の平面2次元解析モデル（iRIC software、2016）により得られた流れ場の状況を比較して検討し、現地観測データで確認された狭窄部で生じた下降流が、非定常性の高い大規模な渦の放出領域と重複していることを確認した。一方で、流速成分のうち流下方向と横断方向の成分のみ検討可能な平面2次元モデルという解析手法の制限から、下降流発生状況を数値解析的に直接に解明することは出来ず、現象のメカニズムを詳細に検討するにあたっては、3次元数値計算モデルの適用が不可欠であった。そこで本研究では、実河川を対象とした3次元数値計算モデルによる検討手法を提案し、上記の既往研究の対象に適用することで、該当箇所における流れの状況を3次元的に再現し、下降流と大規模な渦に代表される流れの非定常な構造との関連性を検討した。またこの際、計算条件設定の煩雑さや過大な計算負荷など理由から一般化が進まない実河川への3次元数値計算モデルの適用に関して、既往の2次元汎用モデルを用いることで作業を省略化することを試みた。

### 2. 対象地域

本研究では既往研究と同様に、木曾川の代表的な水難事故多発箇所である木曾川本線橋（東海北陸自動車道高架橋）付近を対象とした（図-1）。ここでは、2014年6月9日に3名の小中学生が亡くなるという水難事故が発生した。水難事故の様子を記した既往文献（大山ら、2015）の情報をもとに、新たに航空写真と地形情報上（国土交通省木曾川上流河川事務所より提供、後述）に発生地点を示したものが図-2である。当時の状況から、44.6km付近の瀬で遊んでいたところ流れに巻き込まれ、下流の淵でおぼれたと推測されている。水文水質データベース（水文水質データベース、2016）の日流量年表からは、川島大橋観測所流量における流量は当時205m<sup>3</sup>/s

であったと推測される。

この事故後、木曾川上流河川事務所による調査が直ちに実施され、流況が確認された。観測は2014年6月16日に実施されており、同様に水文水質データベース（水文水質データベース、2016）の日流量年表からは、川島大橋観測所流量における流量は当時68m<sup>3</sup>/s程度であったとみられる。観測は事故現場周辺の流速や水深を計測することを目的に実査され、Acoustic Doppler Current Profiler（ADCP）が機材として用いられた。

既報（赤堀、2016）では、このようにして木曾川上流河川事務所の調査により得られた木曾川44.6km付近の流況と測深のデータと、汎用の平面2次元流体解析ソフトウェアであるiRIC（iRIC software、2016）を用いた数値計算を併用し、検討を行った。この数値計算結果より、対象とした事故多発箇所が存在する橋脚による狭窄部からは、非常に高速な流れが生じていること、またその流れは非定常性が強いことがわかった（図-3）。ADCPによる現地観測結果からは、この部分で下降流が生じていることが確認されており（図-4）、このような複雑な流況と下降流が相互に影響を与えることで、水難事故において危険な流況が生じていることが推測された。

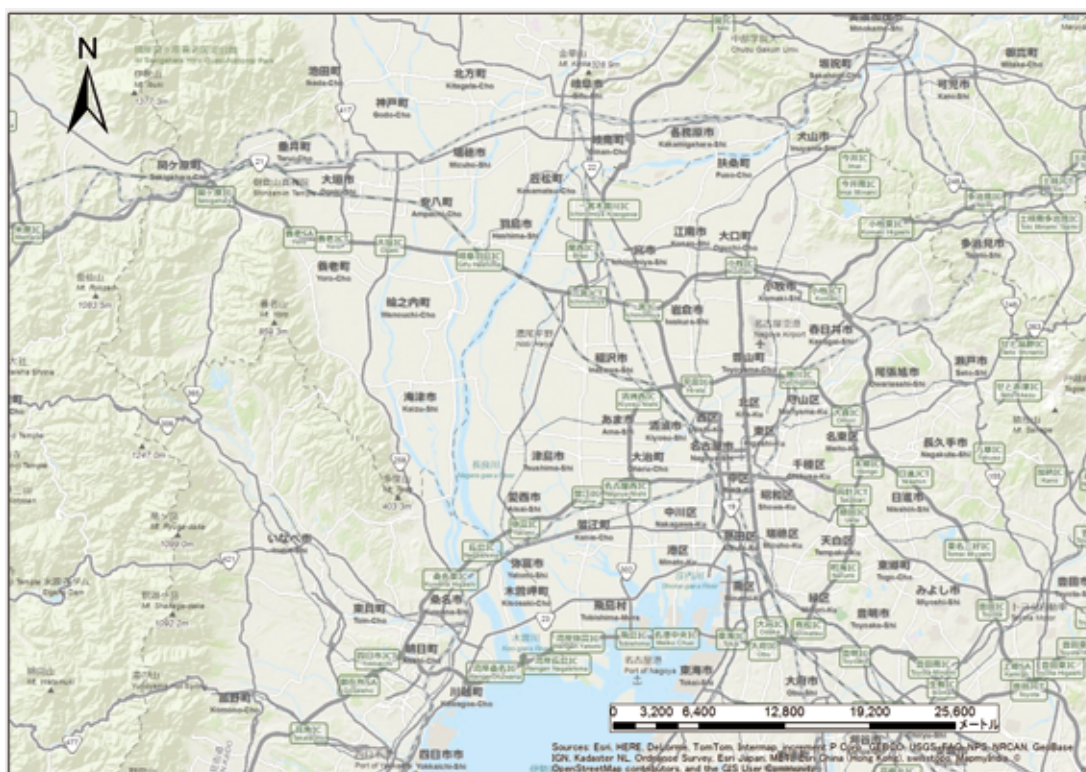


図1：研究対象地域（図中の枠線で示す。木曾川44.6km地点、東海北陸自動車道木曾川本線橋下）

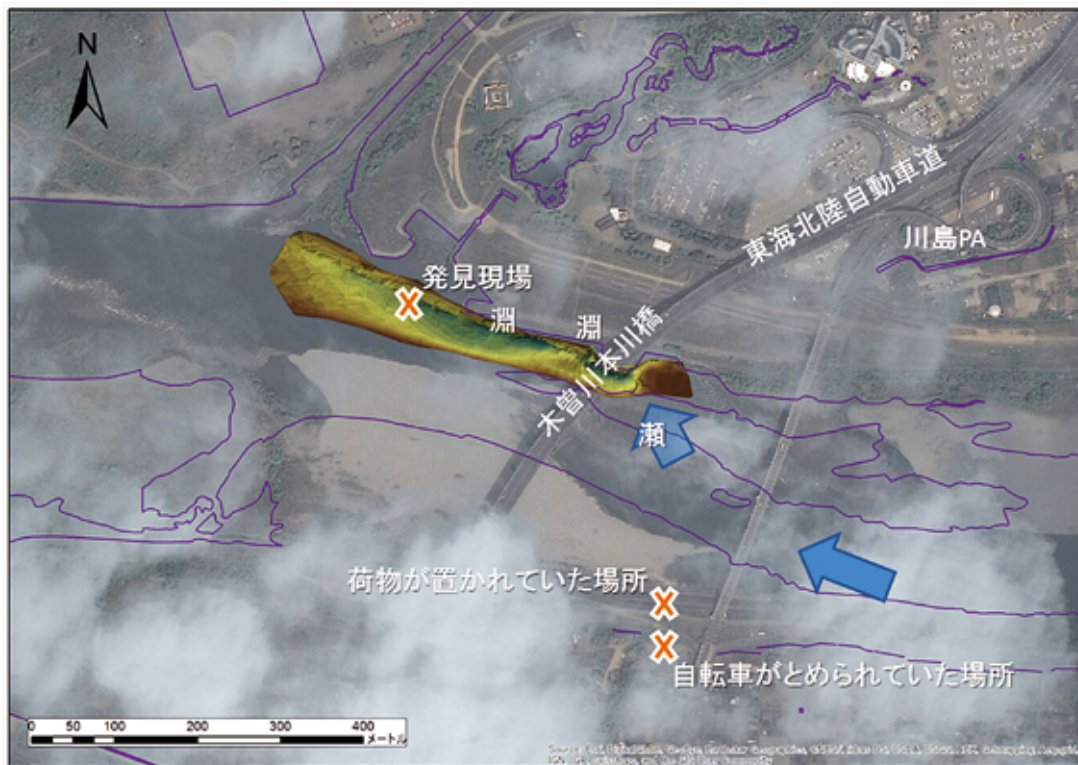


図2：木曽川44.6km付近での2014年6月9日における水難事故の発生状況を示した図。既往文献（大山ら、2015）での考察を基に、後述のADCP観測（木曽川上流河川事務所提供）による水深コンター図と共にGISを用いて再構成した。

### 3. 研究手法

上記の結果においては、数値計算の結果から確認された非定常性の強い流れの構造が、現地観測から確認された下降流の存在と直接的に関連していることは示されていない。本研究では3次元非定常流体解析を実施することで、この非定常性と下降流との関連についてメカニズムを考察した。

一般的に、非定常3次元流体モデルは河道内の物理現象を解明するにあたり非常に有力なツールであるが、実河川の研究に関してはその利用があまり普及していないのが現状である。これは、計算領域、あるいは初期条件の設定の煩雑さや、計算負荷の増加などがその理由として考えられる。このような問題に対処するにあたり、本研究では、3次元解析の省略化を目的として、前述のiRIC（iRIC software、2016）による平面2次元解析と3次元解析を運用上併用するという手段を用いた。具体的には、平面2次元での解析実施後に、その際に作成した格子データ、水理量データを3次的に拡張して初期条件として設定することで、物理的に妥当な入力条件を設定した。以下に具体的な手順に関し、項目ごとに順を追って詳細を述べる。

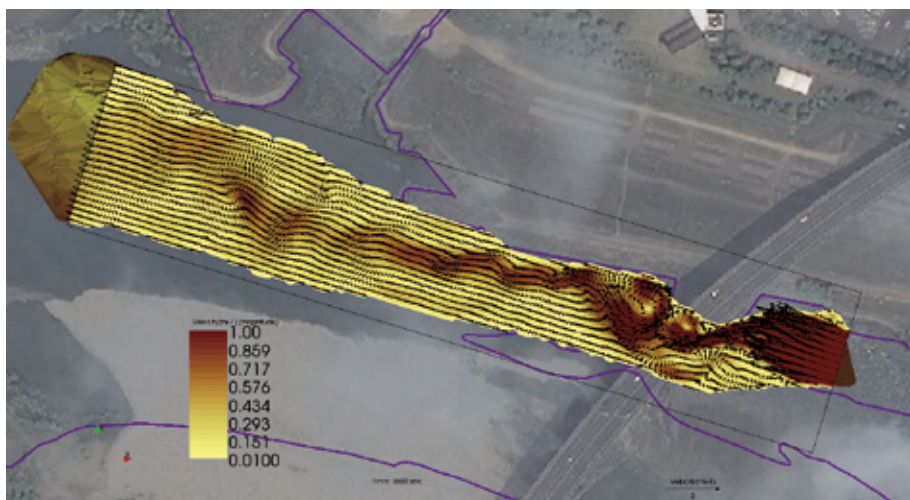


図3：水深データを基に再構成した河床地形データを用いて、木曽川44.6km付近での2014年6月16日における流況を平面2次元流況解析モデル（Nays2Dソルバー（iRIC software、2016））により計算した結果。流速絶対値のコンター図とベクトル図として、結果の瞬間値を示す（既報（赤堀、2016）より転載）

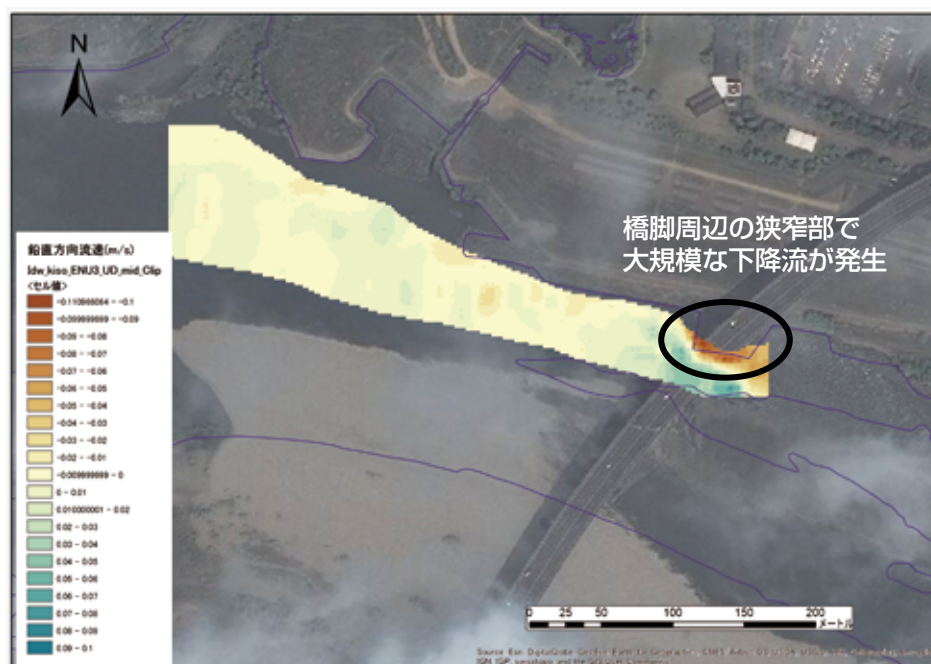


図4：木曽川44.6km付近での2014年6月16日 ADCP観測による3次元流速計測結果（木曽川上流河川事務所提供）における中層での鉛直方向流速成分をコンター図として示したもの（既報（赤堀、2016）より転載）

### 3.1 平面2次元数値解析

この項目に関しては既報（赤堀、2016）に詳細を記述しているため、以下は概略の説明に留める。まずADCP計測の際に測深データとして得られた水深をGIS（ESRI、ARC GIS for Desktop）上に読み込み、Triangulated Irregular Network（TIN）による補間を行うことで、水深の平面的な分布を算出した。このようにしてTINにより水深を補間した後、河床の横断標高のデータから周辺の河床勾配を推測し、先に得られた水深データに対して勾配による補正を行うことで、おおよその河床標高を得た（図-5）。これを元に汎用モデル（iRIC software、2016）による平面2次元での流況解析を実施し、この際にはiRIC softwareに含まれるNays2D系ソルバーを解析のモデルとして使用した。計算格子は、河床地形を示すポイントデータ上に正方格子として構築し、水域と非水域の境界について後者を障害物として計算領域外に設定することで、河道の平面形状を記述した

(図-6)。また、流量については、先に述べた2014年6月16日の日流量年表から得た68m<sup>3</sup>/sを計算領域の上流側から与えた(水文水質データベース、2016)。計算時間終了後の結果を数値データとして別ファイルに出力し、構造格子状のデータとして、平面座標、標高、計算領域内外の設定、流速各成分、水深などを得た。

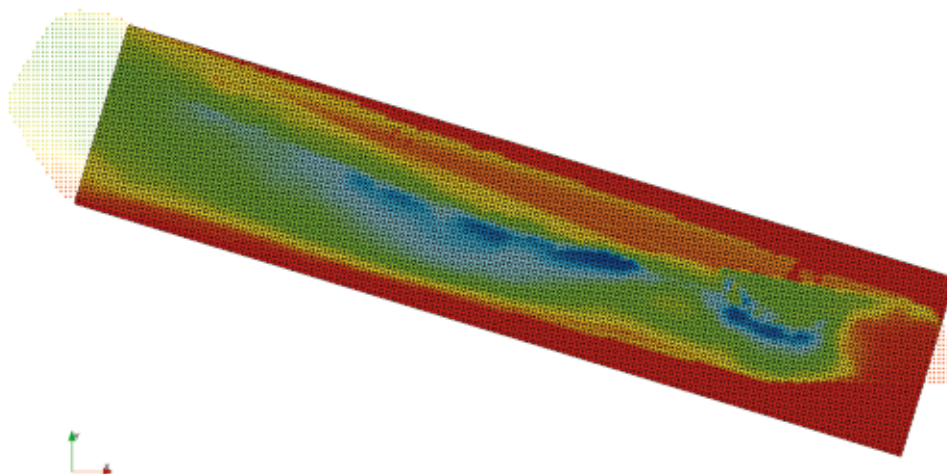


図5：平面2次元数値解析に用いた計算格子を河床の標高により色分けしたもの(矩形領域外の点はADCP測深により得られた河床標高のうち計算領域外にあったもの)

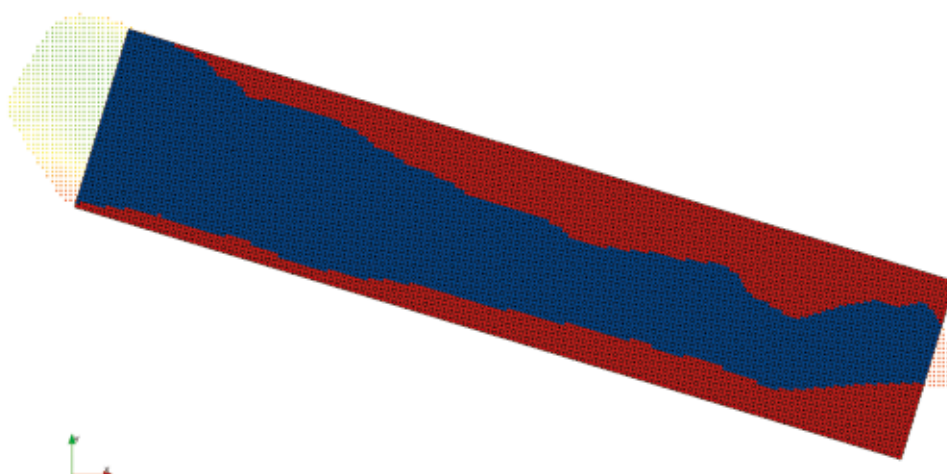


図6：平面2次元数値解析に用いた計算格子を水域(青)と非水域(赤)で色分けしたもの(矩形領域外の点はADCP測深により得られた河床標高のうち計算領域外にあったもの)

### 3.2 非定常3次元数値解析

前述の2次元解析により得られた結果を、下記の手順で3次元化し、解析の初期条件とした。

まずiRIC (iRIC software、2016)により作成された平面2次元格子上の結果データを、自作Fortranコードを用いてメモリに読み込ませた。その後、3次元での座標系のx、y、z軸方向(それぞれ流下方向、横断方向、鉛直方向)のうち、x、y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。iRICでの解析においては河道幅の急変から格子が過大に変形することを避けるため、前述のように直交座標系で水域と非水域セルを指定して河道形状の平面形を考慮した。3次元格子においてもこの方針を引きつぎ、x軸、y軸方向の水平面では、直交座標を作成し、その中で水域、非水域の設定を2次元解析結果データから取り込んだ。なお、z軸方向に関しては2次元データには直接の値が含まれないため、あるx、y座標値におけるz軸方向の値の最大値を2次元解析の水位の値から、最小値を同2次元解析に使用した河床位置から与えた。またz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分割した。この際に、極端に水位と河床高の差、すなわち水深が小さい場合に、鉛直方向の格子変形が過大になる場合が生じる。このような格子形状を避けるため、水深がある一定の値（ここでは2 mとした）よりも小さい場合は、仮想的な河床高を水位から2 m下方の位置に与え、仮想の河床から実際の河床標高に至るまでの格子については障害物設定を行なった。このため、河床形状を格子に反映するにあたっては、水深が十分である箇所については滑らかな変形による境界適合座標的な格子で対応し、そうでない箇所については階段状に設定された障害物セルによって対応した。この様にして作成された実際の河道の形状について、河床の形状として図-7に示した。

また、3次元格子上の物理量の設定に関しては、平面2次元解析で得られた平均流速の各成分を格子の座標と同様に自作コードで読み込んだ後、作成された3次元格子状に展開した。その際、2次元解析により得られた結果が水深平均値であるという前提に基き、対数側分布に則って鉛直方向に配分し、領域全体の初期条件として与えた。

3次元計算の概要であるが、流体解析としては筆者の作成したLarge Eddy Simulation (LES) 3次元乱流モデルを用いた(赤堀ら、2008および赤堀ら、2013)。また格子作成や初期条件以外の基本的な計算条件について、格子数が流下方向、横断方向、鉛直方向にそれぞれ $464 \times 100 \times 30$ 、格子サイズが水平方向に1 m、鉛直方向に0.1 m~0.25m、流量が $66.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、計算時間刻みが0.002s、計算総ステップ数が250,000ステップであった。

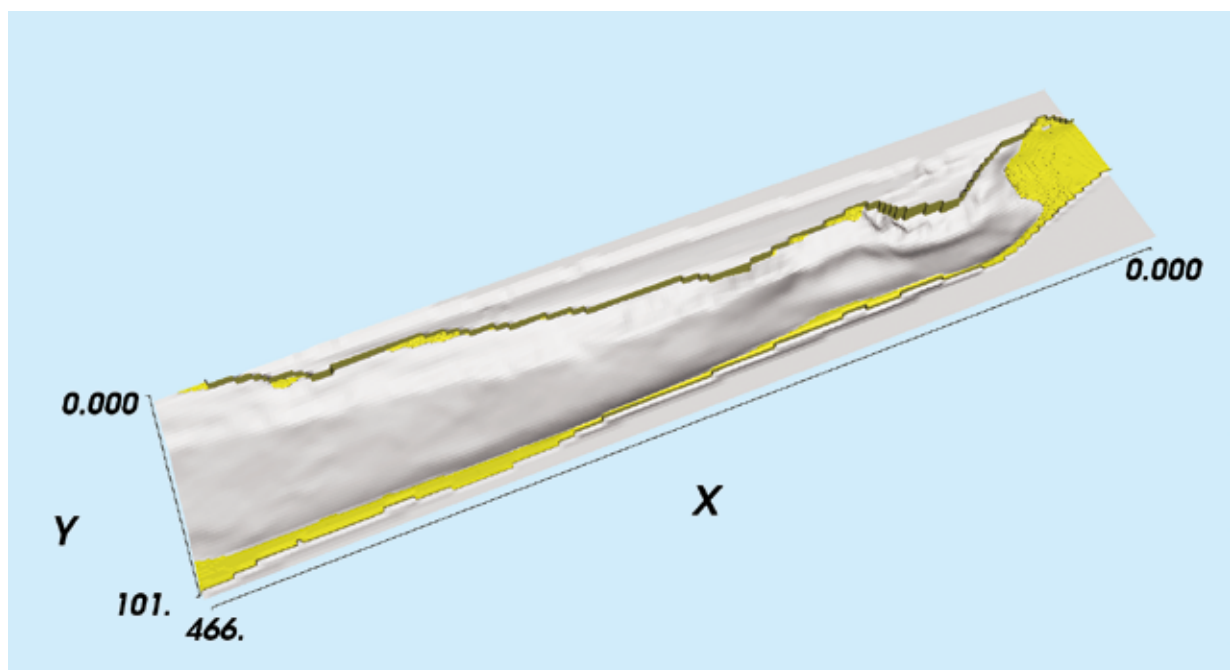


図7：平面2次元数値解析用の計算格子を元に、3次元数値解析のために作成した計算格子の河床形状を示したものである。水深が2 m以上である場合は境界適合座標として最下層の格子を滑らかに変化させ（白い面で表示）、それより浅い領域では格子の最下端の標高を一定とし、そこからセルのうち実際の河床標高に相当する部分までを障害物として階段状に設定（黄色の面で表示）

#### 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-8は、橋脚周辺での狭窄部からやや下流までを含む全体的領域において、鉛直方向の流速成分が $0.1 \text{ m/s}$ 以下を赤い当値面で、 $0.1 \text{ m/s}$ 以上を緑色の当値面で示したものである。図-3に示したADCPの観測結果における中層での流速分布の鉛直方向成分のうち、下降流として認識された領域と、赤い当値面が多数発生

している領域がほぼ一致することがわかる。また図-4との比較では、この同じ領域が、平面2次元解析の結果から示された高速でかつ非定常性の強い水平渦の発生領域と重なることも確認された。

また図-9は水と同じ比重であると仮定したトレーサー粒子の動きを周囲の流速の値から計算し、時系列的に表示したものである。狭窄部直下流の横断面に一樣に散布された粒子は、30s後には大きく位置を変え、主流域に近い右岸よりの領域では高速な流れで水面下のはるか下流側に輸送されているのに対し、わずかに左岸よりの領域では流れ自体が停滞し、ほとんど先の時間ステップから位置を変えていないということがわかる。この領域に関して、横断面上の流速成分からベクトルを作成し、近傍の複数の断面での結果として示したものが図-10である。図-10からは、高速流の生じる領域付近で横断方向の流速が左岸から右岸へと離岸する方向に転じており、その先ではさらに下降する方向に旋回していることが示されている。主流の流下方向を軸としてらせん状に旋回する流れを2次流と呼ぶが、この箇所ではちょうど大きな構造の2次流が生じていることがわかった。このようならせん状の動きは追跡粒子を動画にした結果にも示されており、事故発生時にも類似の流れが生じていたことが推測される。

これらの結果から考えられることとして、瀬の部分からわずかに右岸に寄った場所では横断方向の表面流速が離岸する方向に転じていること、その先では流下方向に流速の大きい高速な流れとなっていること、この高速流は非定常性の強い渦の放出領域と重なっていること、同じ領域では下降流が生じていること、この下降流はらせん状に回転する2次流と併存あるいは由来していること、などが挙げられる。このような場所においては、流速が遅く水深の浅い左岸よりの部分からわずかに右岸に寄ってしまった場合に、らせん状に下降する高速流に乗り、離岸する方向に運ばれたのちに鉛直下向きに流れの力を受けてしまうことが予想され、水難事故を誘発するような危険な水理的な状況となっていたことが想像される。

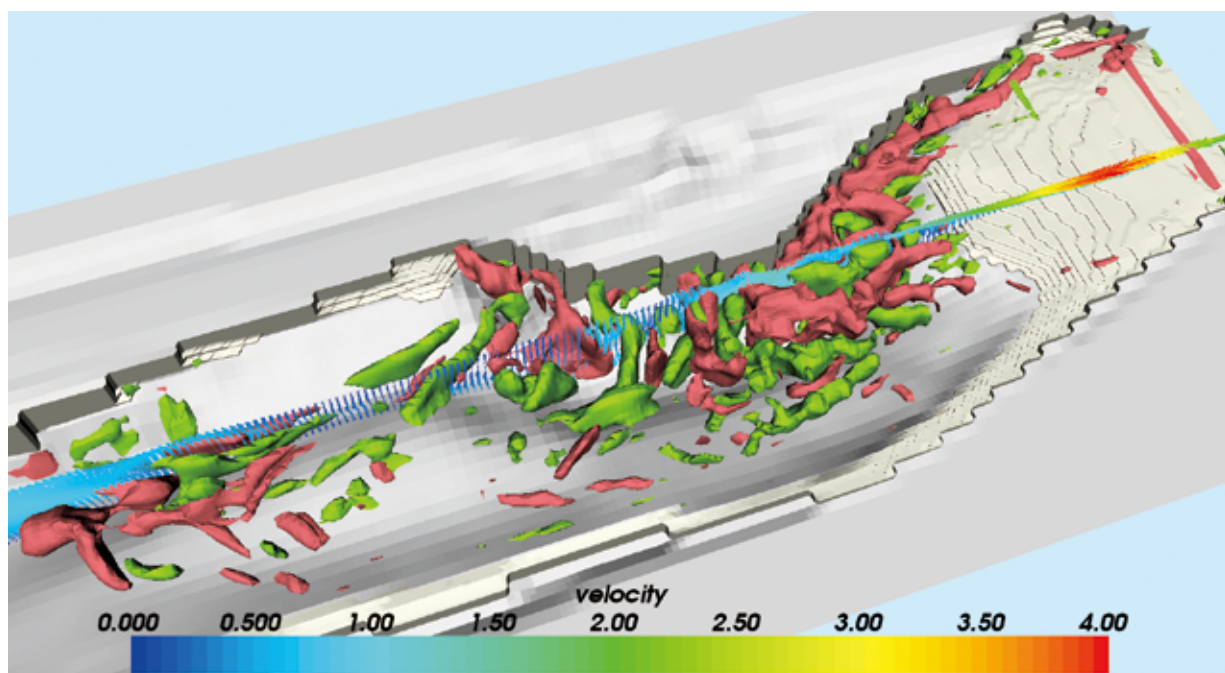


図8：3次元数値解析の結果について流下方向断面のベクトルと鉛直方向流速成分の瞬間値を等値面で示したものの（鉛直方向の流速成分が0.1m/s以下を赤い当値面で、0.1m/s以上を緑色の当値面で示した）

## 5. まとめ

本研究では、木曾川の水難事故多発箇所を対象として、水難事故が発生した状況における水理的な特性について3次元数値計算による検討を行った。結果から、対象とした事故多発箇所に存在する橋脚による狭窄部から生じた高速な流れは、左岸から右岸へと離岸する方向の横断方向成分を有しており、なおかつらせん状に旋回する下降流を生じさせていることが確認された。わずかな位置の違いで、流れの停滞した個所からこのような高速で複雑な流れの生じている箇所に足を踏み入れてしまうことが想像され、上記の流れの構造により危険性の高い領域となっていることが推測された。

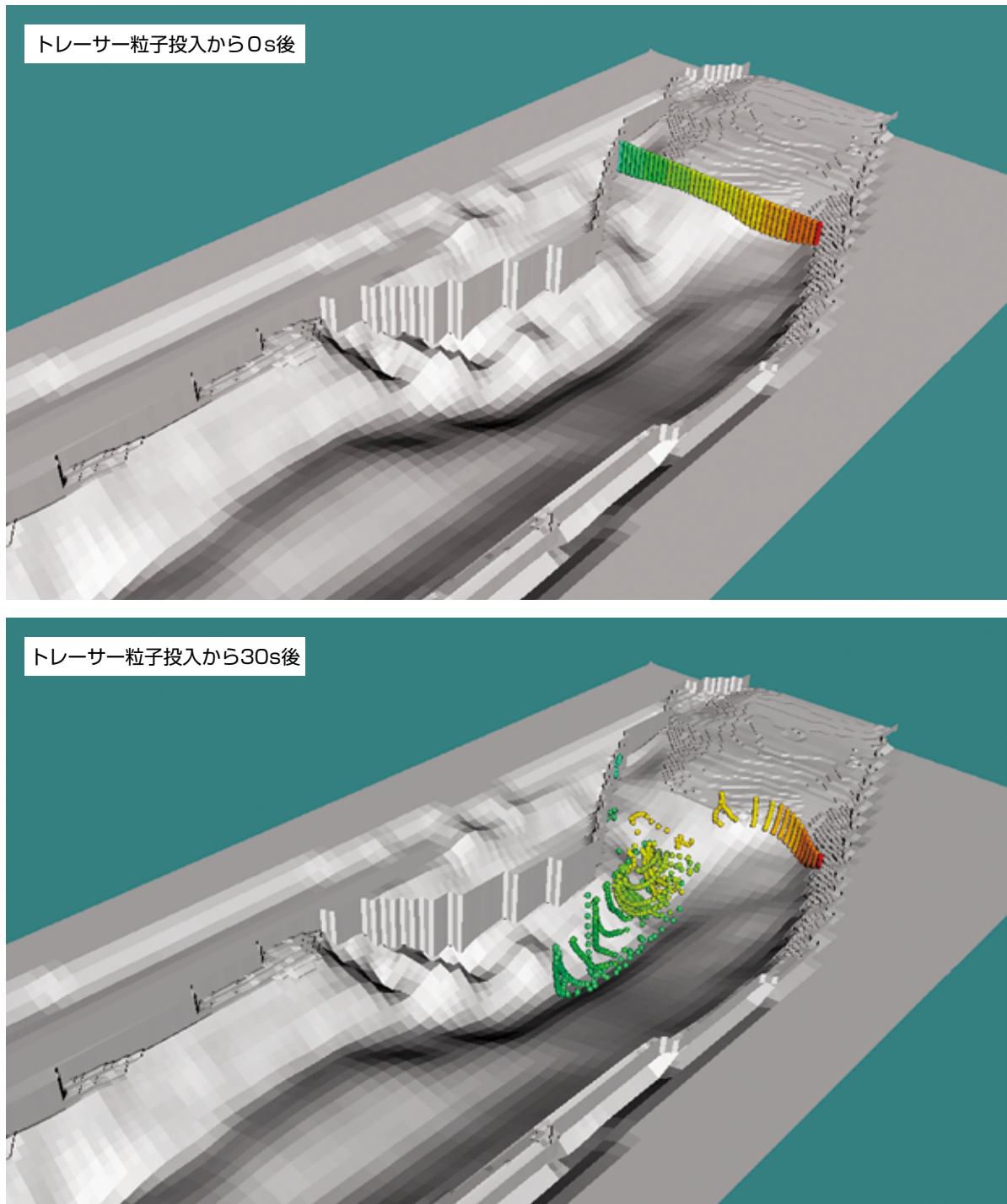


図9：トレーサー粒子の動きを異なる時間ステップで示したもの(上：投入直後、下：投入から30s経過したもの)



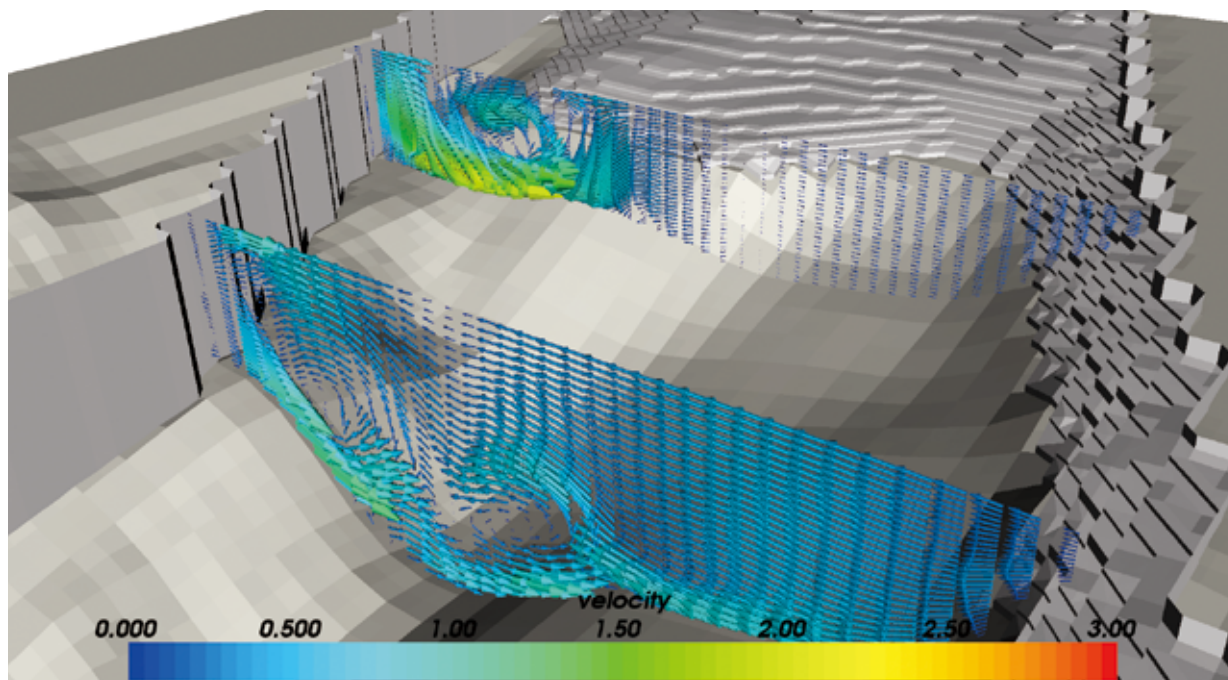


図10：横断面上での流速方向成分（横断方向成分および鉛直方向成分）ベクトルで示した流れの様子

#### 参考文献

- 赤堀良介：水難事故発生集中箇所における水理的状況の検討，愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書，vol.12 平成27年度，pp.77-80，2016.
- 赤堀良介，道奥康治：非ダルシー型抵抗則を用いた捨石水制内部流れおよび3次元LESによる水制周辺流れの数値計算，水工学論文集，土木学会，第52巻，pp1045-1050，2008.
- 赤堀良介，柿沼孝治：千代田実験水路における通水実験に対する3次元数値解析による検討，平成25年度全国大会第68回 年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.195-196，2013.
- iRIC software, <http://i-ric.org/ja/>（最終閲覧日：2016年4月29日）公益財団法人河川財団：No more 水難事故，河川財団News, No.46, pp.4-9, 2015.
- 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，河川財団News, No.46, pp.4-9, 2015.
- 水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>（最終閲覧日：2016年4月29日）
- 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.