

別添 2 旅客船転覆事故に係る川の水面の画像データの取得
についての委託調査

別添2 旅客船転覆事故に係る川の水面の画像データの取得についての 委託調査

| | 頁 |
|-----------------------------|----------|
| 1. 目的 | 1 |
| 2. 調査実施方法 | 2 |
| 2.1 計画準備 | 2 |
| 2.2 現地流況撮影 | 2 |
| 2.3 撮影データの整理 | 2 |
| 2.4 流況撮影データを用いた流速解析 | 2 |
| 2.5 結果の整理 | 3 |
| 2.6 使用機材 | 4 |
| 3. 計測実施結果 | 5 |
| 3.1 基準点の設置 | 5 |
| 3.2 計測結果 | 7 |
| 3.2.1 UAVの撮影経路 | 7 |
| 3.2.2 PIV解析の概要 | 8 |
| 3.2.3 PIV解析条件 | 9 |
| 3.2.4 PIV解析結果 | 10 |
| 3.2.5 PIV解析結果の座標変換と補間 | 12 |
| 3.2.6 ボイルの表現 | 13 |
| 3.3 2次元流況計算の実施 | 15 |
| 3.3.1 計算に使用するモデル | 15 |
| 3.3.2 天竜川河道モデルの作成 | 16 |
| 3.3.3 計算条件 | 20 |
| 3.3.4 計算結果 | 20 |

1. 目的

本件は、平成23年8月17日、天竜川で発生した旅客船転覆事故の調査に資するため、事故発生場所付近の水面流速、流向分布を得るための画像データの取得を目的とする。

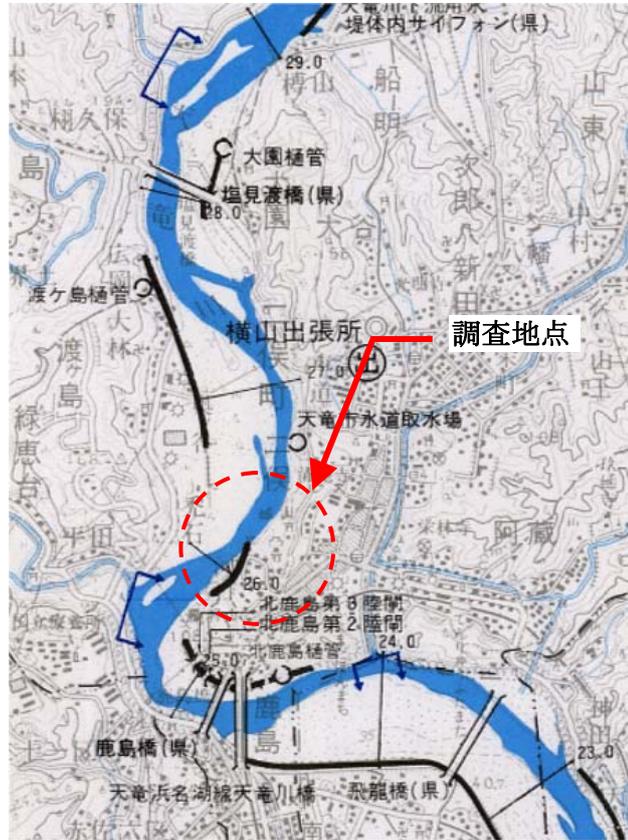


図 1-1 調査位置図

2. 調査実施方法

2.1 計画準備

事前に撮影時の基準となる標定（30cm 四方形のカラー板）を左右岸の水際に設置し、撮影後に撤去する。

2.2 現地流況撮影

発注者の指示する範囲（概ね 100m×50m）の水面の流況撮影を行う。

撮影方法・・・ラジコンヘリに搭載したデジタルビデオカメラによる静止画像の連続撮影

撮影期間・・・0.5 日間の昼間とし、試験撮影、本撮影、画角を変更した追加撮影等を行う。

撮影諸元・・・後の流速解析に処するために 1 秒間に 30 コマの間隔で 10～20 秒間程度連続撮影を行う。

撮影範囲・・・発注者指定の範囲を 1 画角で撮影した場合に、必要な解像度が得られない場合には、複数の画角に分けて撮影を行う。また、発注者の指示する特に重要な範囲については対象物に近寄った画角での撮影を試みる。

その他・・・水際の陸上部に標定点を設置し、長さの基準、画角の補正に使用する。

現地に流速解析のトレーサーとなるべき泡等が少ない場合には、上流の舟上からトレーサー※を投入する。

現地において、トレーサーや水面流下物の撮影状況を見ながら、PIV 解析に供する画像であることを確認する。

※ φ8cm 程度の自然由来（素焼き煎餅等）の円盤状のもの

2.3 撮影データの整理

撮影によって得られたデジタル画像データについて、標定点等を参照して幾何補正（水平、シーン毎の位置の整合等）を行う。

2.4 流況撮影データを用いた流速解析

2.3によって得られた幾何補正された時刻毎の画像データを用いて流速解析を行う。

解析手法・・・粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)

解析格子・・・1 m×1 mの解析格子を基本として指定の範囲を分割し、格子点における流速及び流向を解析する。

解析結果・・・解析格子点における流速と流向について、瞬間値と観測時間内の平均値を算出する。

1 m×1 m格子以下のサイズの流速については、格子点の流速値から内挿によって算出する。なお、1 m×1 m以下の解析格子以下での解析が可能な場合には、内挿を行わず、1 m×1 m以下の格子サイズにより PIV 流速解析を行う。

2.5 結果の整理

時間平均の流速・流向を電子データで整理する。結果の確認を目的に流速分布図を作成する。

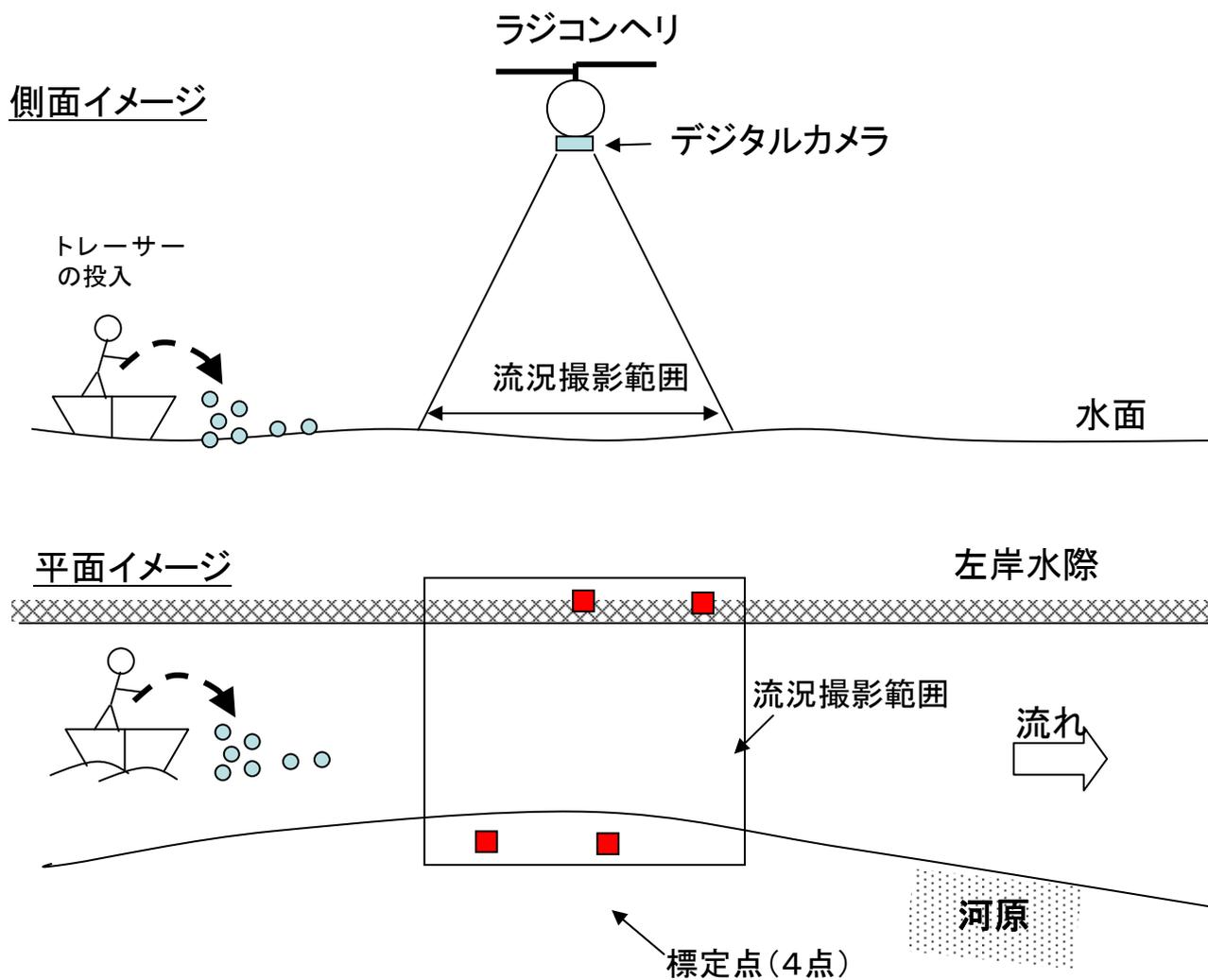


図 2-1 撮影イメージ

2.6 使用機材

| | |
|------|---------------------------------------|
| 作業員数 | 3名（技師1名、操縦員1名、補助1名） |
| 作業時間 | 13：30～14：00（本撮影時間：30秒、予備、追 30秒×3回） |
| 作業方法 | UAVによる定点ビデオ撮影 |

使用するUAV ファルコン



| | |
|-------|-------------------|
| サイズ | 85cm×85cm×15cm |
| 本体重量 | 1.8kg |
| ペイロード | 500g |
| 耐風性能 | 10m/s |
| 飛行時間 | 20分（バッテリー交換で継続可能） |

使用する仕様ビデオ パナソニック TM30



| | |
|-------|---------------------|
| 品番 | HDC-TM30 |
| 記録画素数 | 2.1M(16：9) |
| 外形寸法 | 幅47.5×高63×奥行114.5mm |
| 本体質量 | 約227g |

3. 計測実施結果

3.1 基準点の設置

撮影範囲の右岸水際沿いに基準点（標定点）を設置した。基準点は、約 30cm 角の白色平板である。

基準点は 7 箇所を設置し、撮影時に GPS によって座標値を計測した。下表にその結果を示す。

表 3-1 基準点の座標

| id | X(m) | Y(m) | Z(m) |
|-----|-------------|--------------|---------|
| L-1 | -63205.0590 | -125934.9890 | 33.5210 |
| L-2 | -63367.4500 | -126039.3600 | 38.8210 |
| R-1 | -63259.8570 | -125897.4370 | 33.5390 |
| R-2 | -63271.1970 | -125919.9080 | 33.4340 |
| R-3 | -63286.9710 | -125941.2900 | 33.6330 |
| R-4 | -63304.2890 | -125957.2270 | 33.5270 |
| R-5 | -63323.8490 | -125964.9990 | 33.5990 |
| R-6 | -63347.5100 | -125970.7810 | 33.5470 |
| R-7 | -63381.4850 | -125976.5160 | 33.5400 |

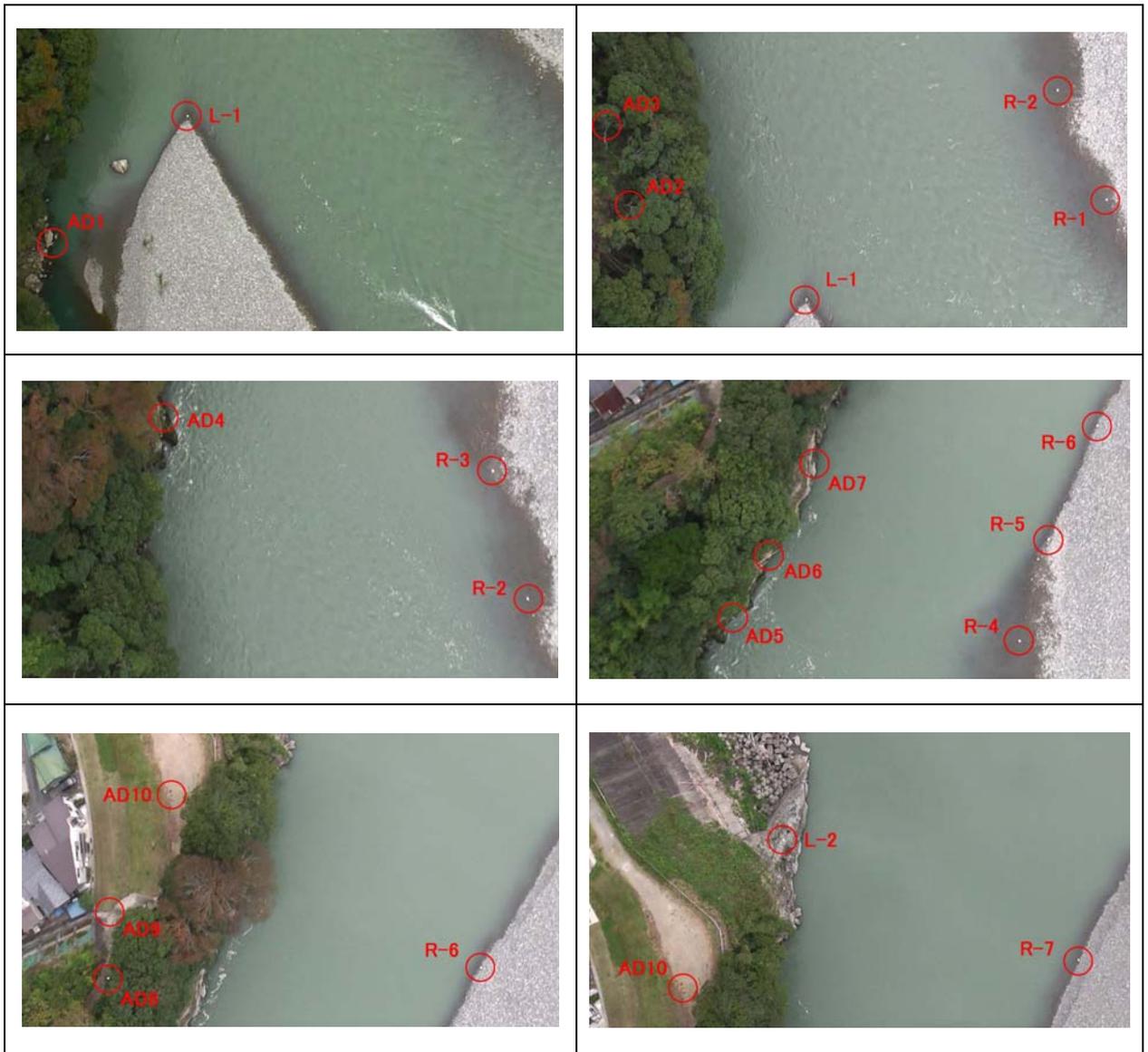


図 3-1 基準点位置の画像

3.2 計測結果

3.2.1 UAV の撮影経路

UAVは、図 3-2に示すとおり砂州上から発信し、高度 120m の上空 5 箇所 (Way Point1~5) において約 20 秒間定位置で滞空し撮影を行った。

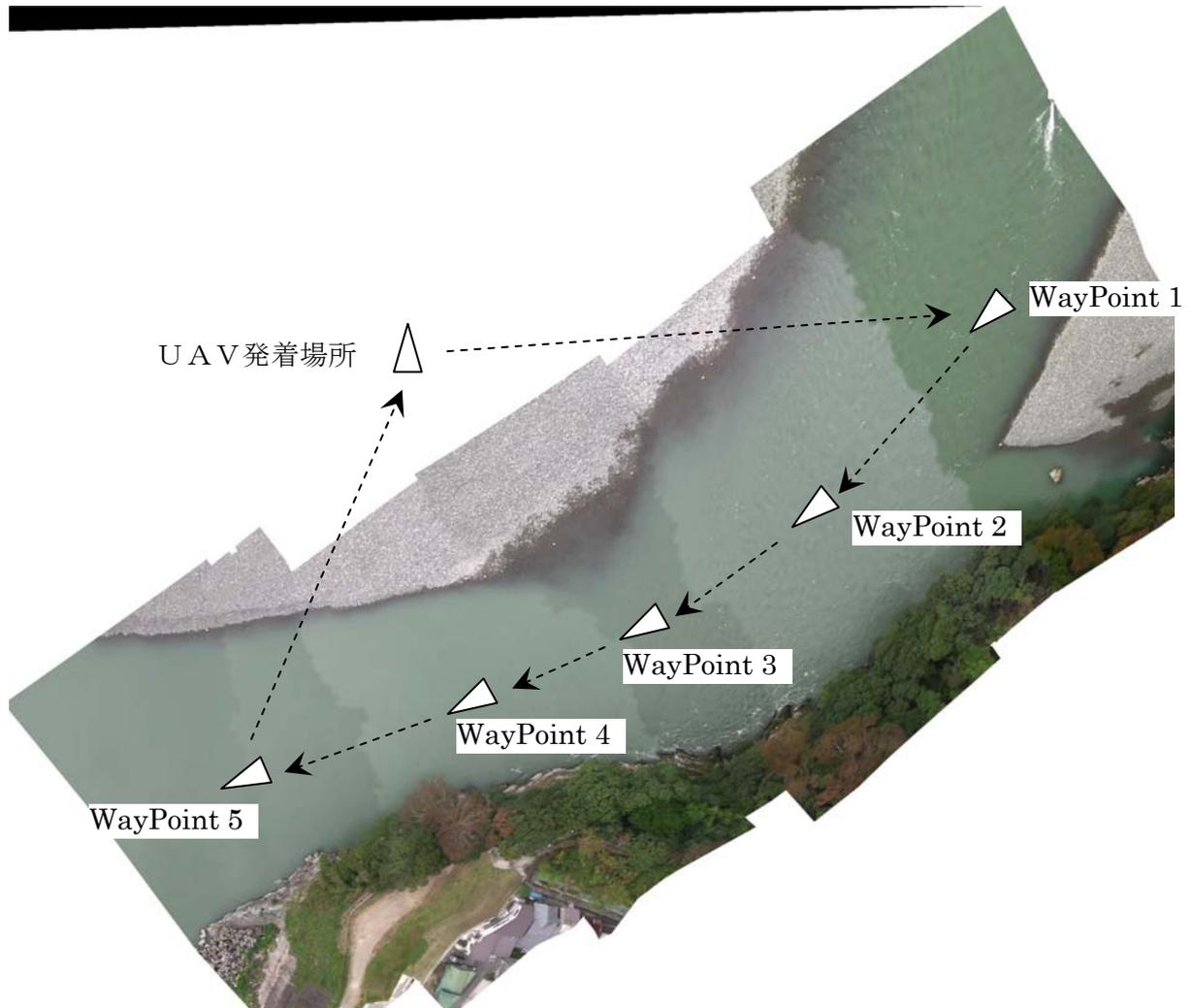


図 3-2 計測時のオルソー画像 (UAV による撮影画像 5 シーンを合成)

3.2.2 P I V解析の概要

PIVとは、粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry）の略です。気体や液体の流れ場に粒子を混入し、粒子が流れに追従することを前提に、粒子の移動から流れの速度分布を定量計測する技術である¹。

研究室内ではない、実河川における水面の流速測定は、トレーサー（本業務では素焼き煎餅）の投入や波紋や水の濃淡の移動追跡によって行う。

図 3-3は、パターン追跡のイメージを示したものであり、以下の方法で流速計測を行う。

- ① ビデオ撮影等により、二つの時刻の静止画を用意する。通常ビデオ画像は、1秒間に30コマの静止画を有しているため、これを利用する。
- ② 時刻 $t=t_0$ の画像において流速を求めたい位置周辺（相関テンプレート）のパターン（輝度分布）を計算する。
- ③ 時刻 $t=t_0 + \Delta t$ において、②の相関テンプレートの輝度分布と最も相関が高い領域を走査領域内で検索する。
- ④ ②と③で求められた相関の高いテンプレートの距離を求め、移動距離とする。
- ⑤ ④の移動距離と二枚の画像の時間間隔 Δt より流速を算出する。

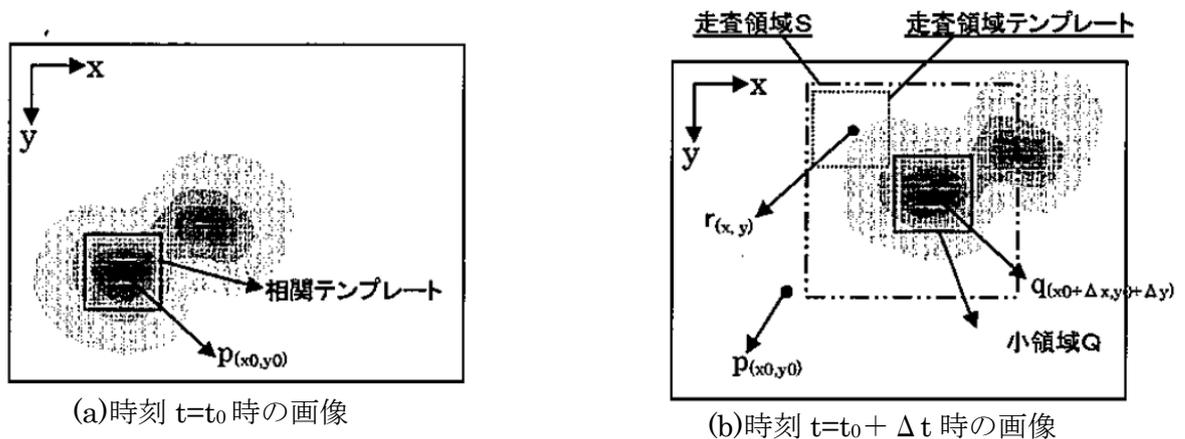


図 3-3 パターン追跡のイメージ

¹ 社団法人可視化情報学会 http://www.visualization.jp/consultancy/q_a/post.html

3.2.3 P I V解析条件

前節の WayPoint3~5 の画像を用いて添付地点周辺における水面流況の PIV 解析を行った。

- 解析範囲内の解析格子の間隔は、約 1.0m 四方である。
- 解析に使用する画像は、ビデオ画像から 0.2 秒毎の静止画像を抽出し（5 フレーム/秒）、25 フレームの静止画像により 5 秒間の平均流速を求めた。

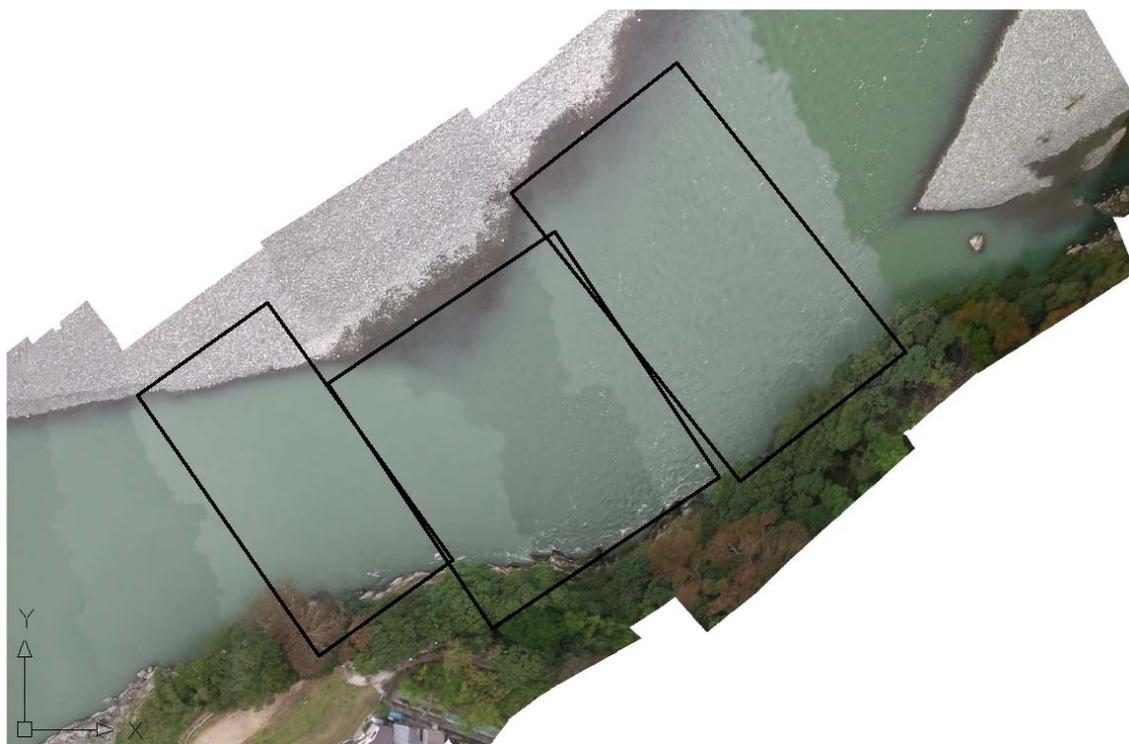


図 3-4 PIV 解析の範囲（□囲い内：PIV 解析範囲）

3.2.4 P I V 解析結果

(1)解析結果の概要

転覆地点の上流側の流速は、高流速部と低流速部が斑に分布した結果となり、現地において目視した流れのイメージと異なる結果と成った（参照：図 3-5）。現地では、早瀬部で相対的に流速の早い主流が存在するように見られた。これは、P I V解析が水面の波紋の移動を追跡しており、水面下の一様な流れを捉えきれなかった結果と思われる。

図 3-7は、転覆地点下流側のボイルが発生している淵の解析結果であるが、P I V解析ではボイルをとらえる事が出来なかった。これは、画像撮影時にトレーサーの投入を試みたが、流れの影響で作業船を所定の位置にもっていかず、淵全面にトレーサーを投入できなかった。このため、水面の濃淡や波紋によるP I V解析となったが、淵水面の変化が少なく解析条件が厳しかったためである。

一方、図 3-6の中央部分には早瀬と淵の接する部分の高流速や左岸沿いの高流速部等、相対的に流速の早い位置は計測されており、次節の流況解析における流速分布検証の参考となるものである。

(2)P I V解析結果

UAV 撮影において、滞空位置 3～5 の画像が転覆地点周辺に相当するための、これらの画像を PIV 解析した。

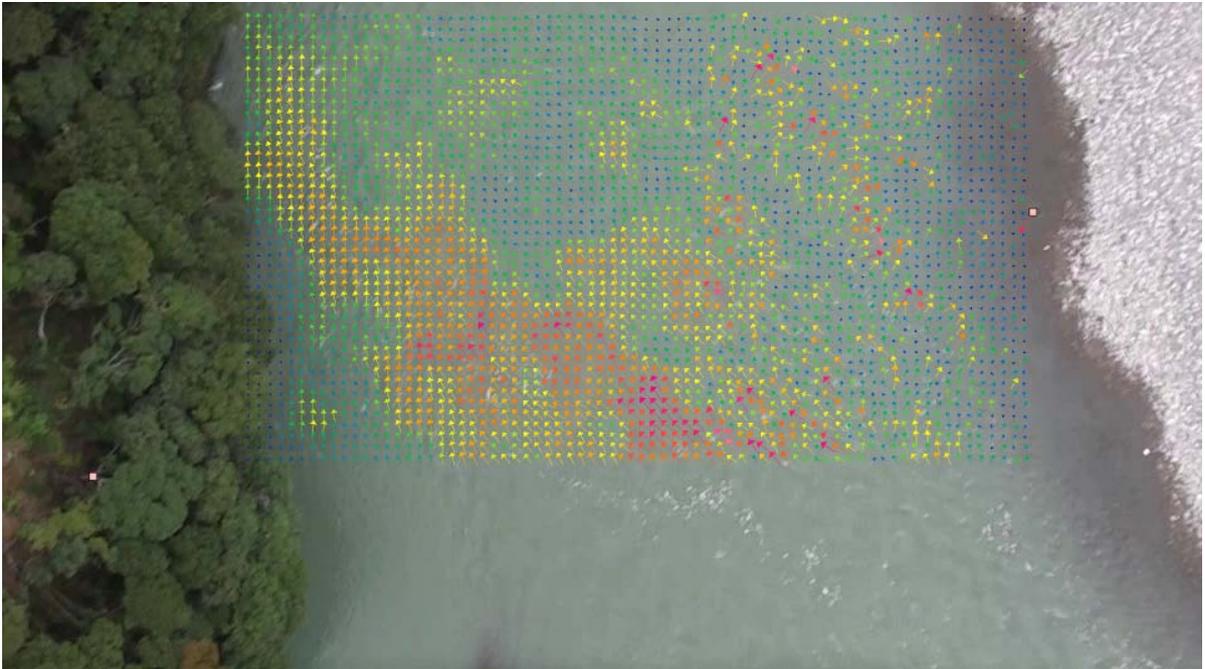


図 3-5 Way Point3 の解析結果のベクトル図（世界測地系への座標変換前）

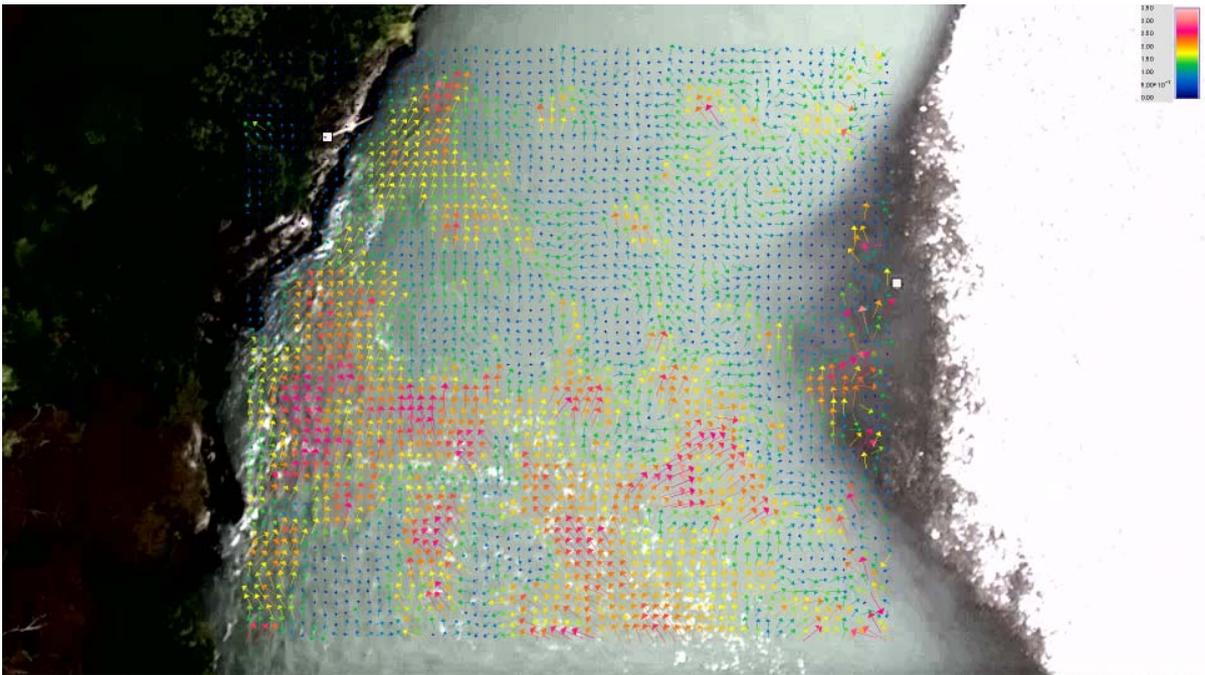


図 3-6 Way Point4 の解析結果のベクトル図（世界測地系への座標変換前）

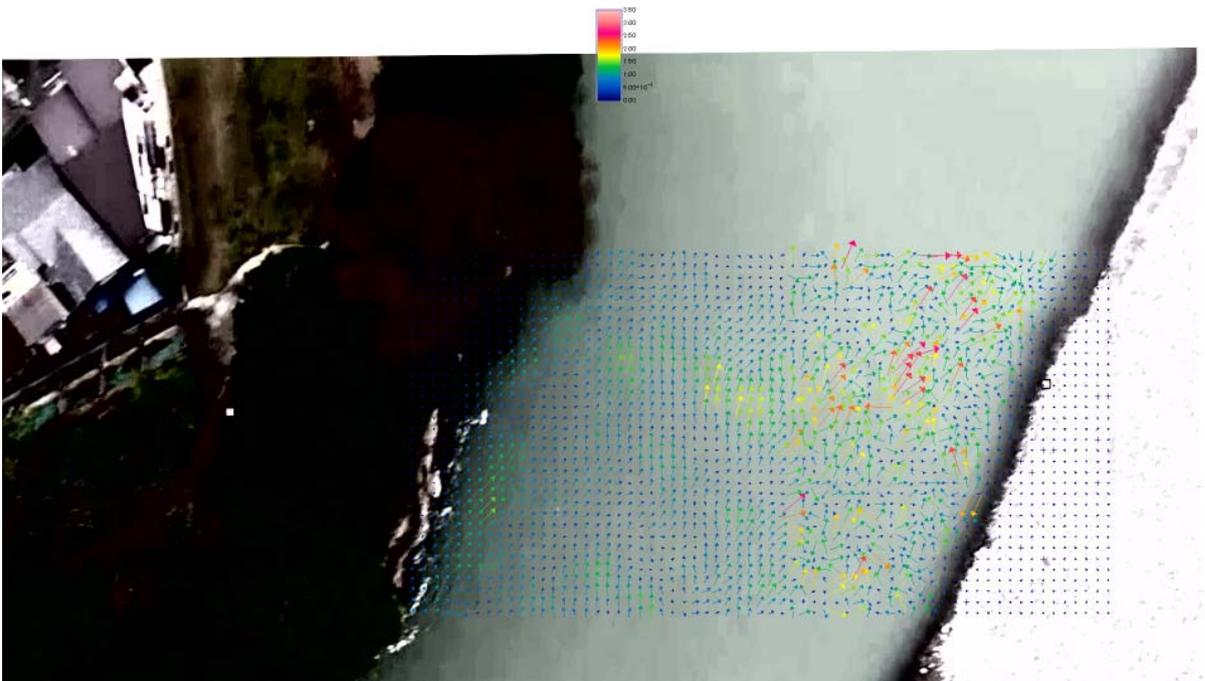


図 3-7 Way Point5 の解析結果のベクトル図（世界測地系への座標変換前）

3.2.5 P I V解析結果の座標変換と補間

3.2.4に示すように、PIV解析は撮影シーンの上下方向（Y軸）と左右方向（X軸）をそれぞれ約1mの解析格子に分割して実施している。

解析結果は、現地に設置した基準点（標定点）の座標を基に世界測地系に座標変換し、更に南北、東西方向それぞれ1mの格子に流速成分を補間した。

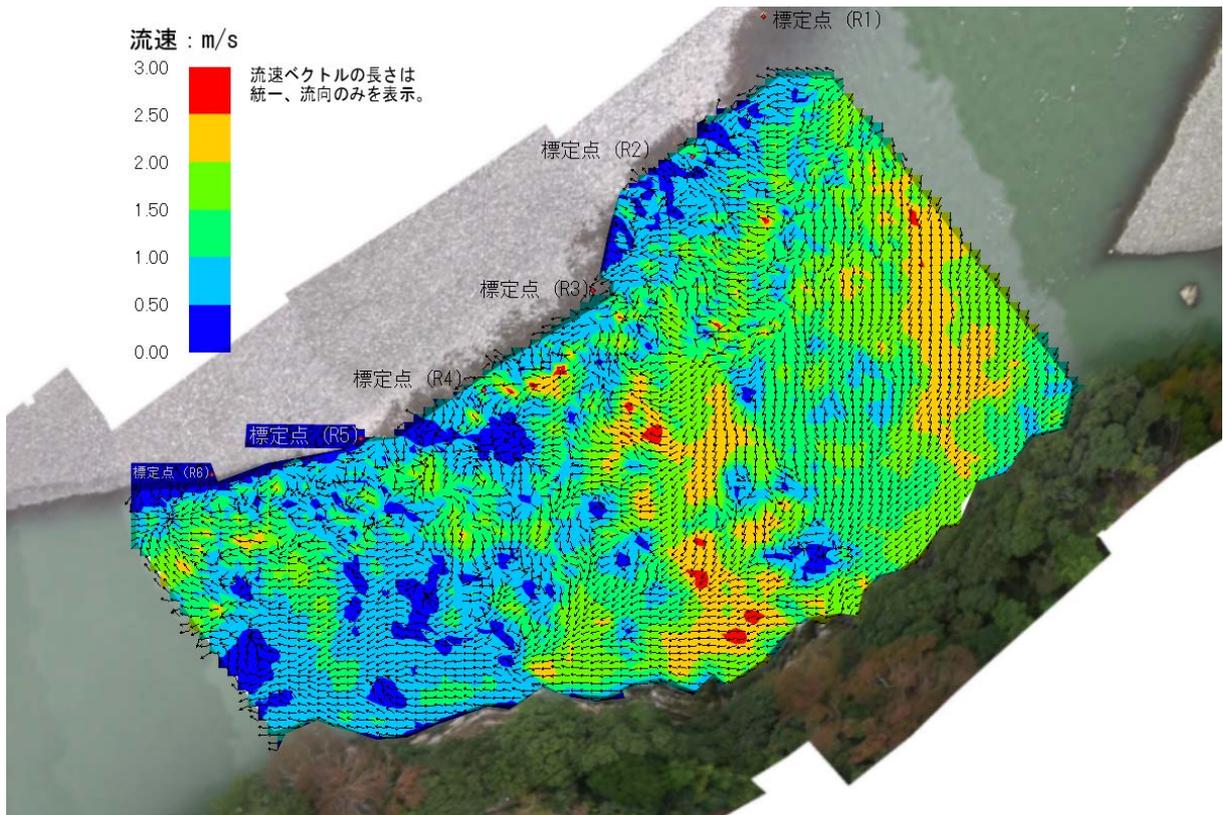


図 3-8 世界測地系への座標変換した流速ベクトル

3.2.6 ボイルの表現

図 3-8に示すように淵部分では複雑な流速ベクトルとなっているが、現地で観察されるようなボイルを計測することはできなかった。これは、ボイルが間欠的に発生していること、詳細な流速分布を捉えるためのトレーサーの投入が十分できなかった事等の原因が考えられる。そこで、以下に示すような放射状の流れを擬似的なボイルとしてP I V解析による流速分布に加えることによって、計測時の流況に極力近づける方法を試みた。

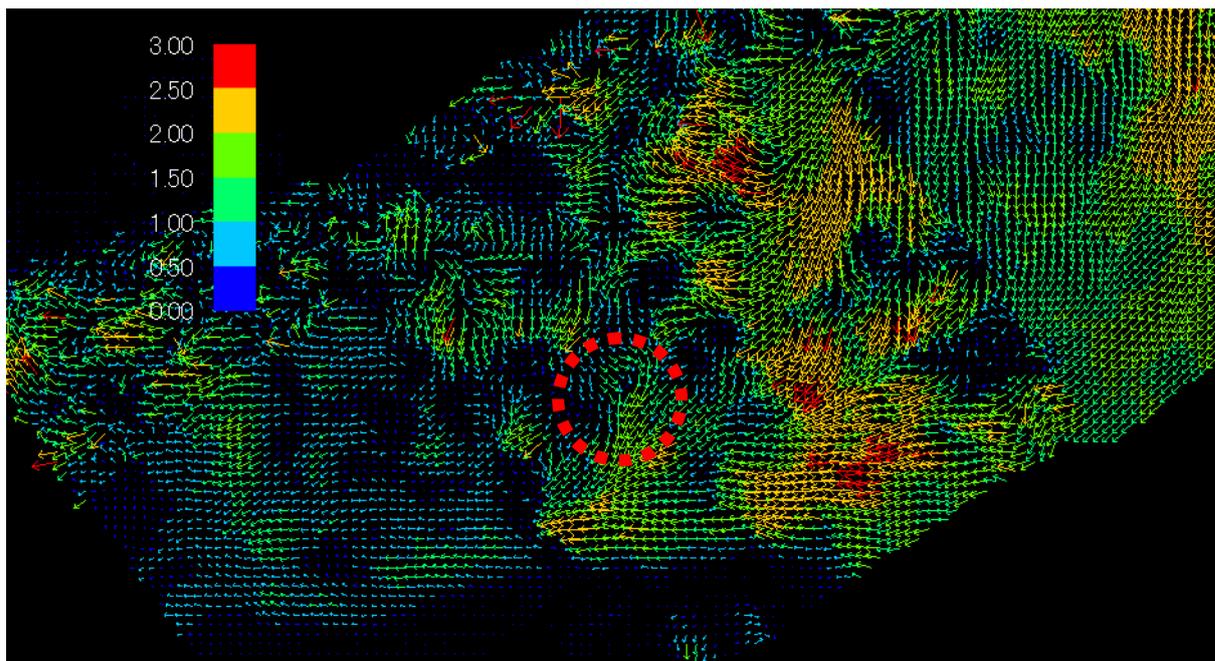


図 3-9 0.5m 格子の流速分布 (ボイル無し)

(1) 擬似的なボイルのモデル

ボイルの中心座標、ボイルの半径 r を与える。ボイル中心での流速を与え、半径 r だけ離れた位置で流速を 0.1m/s ($=0.0\text{m/s}$) とする。ボイルは中心から放射状に広がるものとし、中心位置から半径 r 間のボイルは指数的に現象させる。

$$U_x' = U_{\text{boil}} \times \cos \theta + U_x \quad , \quad U_y' = U_{\text{boil}} \times \sin \theta + U_y$$

U_x' , U_y : ボイルを考慮した流速

U_{boil} : ボイルの流速

U_x , U_y : ボイルの半径内に在る格子点における PIV 解析流速

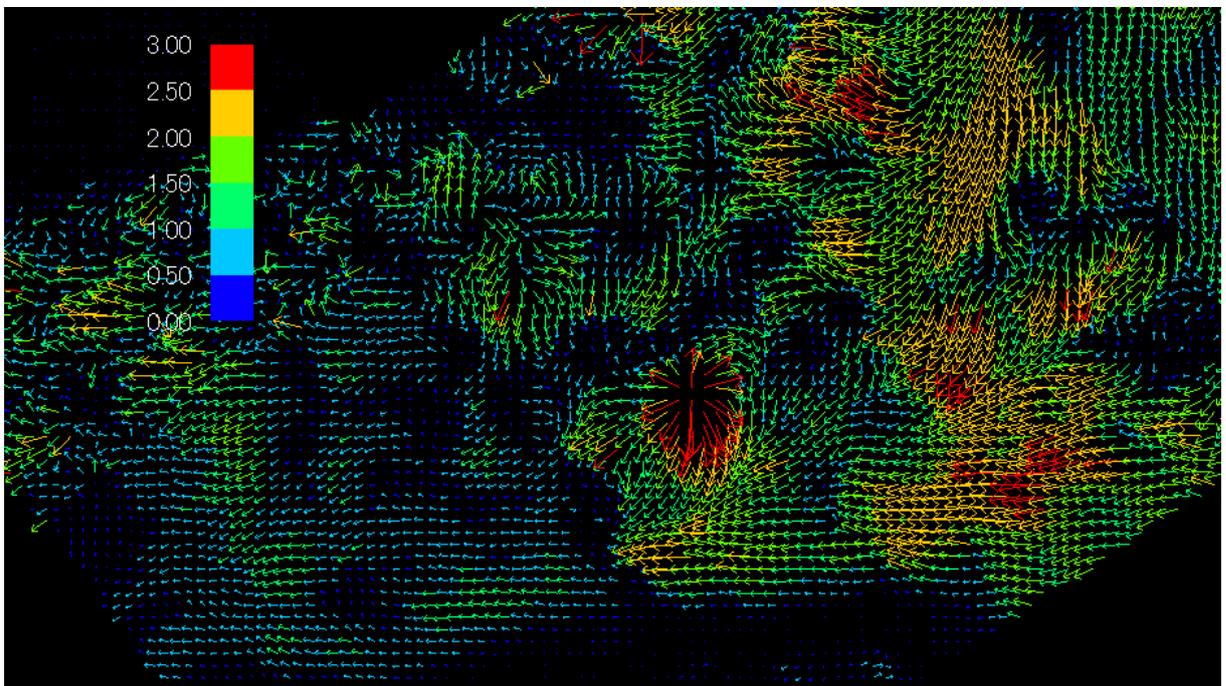


図 3-10 0.5m 格子の流速分布 (ボイル有り)

3.3 2次元流況計算の実施

3.3.1 計算に使用するモデル

転覆事故周辺の流れの計算には、(財)北海道河川財団²から公開されている Nays-2D と呼ばれる平面2次元流況計算モデルを使用した。このモデルの概要は、以下のとおりである。

I. 概要

I.1 Nays-2D とは

Nays2d は一般曲線座標で境界適合座標^{*1}を用いた非定常平面2次元流れと河床変動計算の解析用ソルバであり、その原型は1990年代より北海道大学の清水康行によって開発が開始され、数々の改良の後、2004年に(財)北海道河川防災研究センターの河床変動計算用プリポストソフトウェア-RIC-Nays^{*2}に最初に搭載された計算ソルバです(Version 1.0)。

※Nays 2D Solver Manual からの抜粋

² 一般財団法人 北海道河川財団 ホームページ : <http://i-ric.org/ja/index.html>

3.3.2 天竜川河道モデルの作成

解析モデルの河床形状の再現は、河川管理者による既存定期横断測量成果（図 3-11 中の 26.0k、26.25k、26.5k）と別途ラジコンボートによる測深結果（図 3-11中の No.1～5）を用いた。図 3-13は、その最深河床高を連ねた縦断面図であり、No.1～5 周辺が急激に深くなった地形となっている。

解析モデルは、図 3-14に示すように河道を計算格子に分割し、格子点に上述の河床高を与える。測量成果や測深結果の測線間にある計算格子点の河床高は、その上下流の測量成果や測深結果から内挿して設定した。

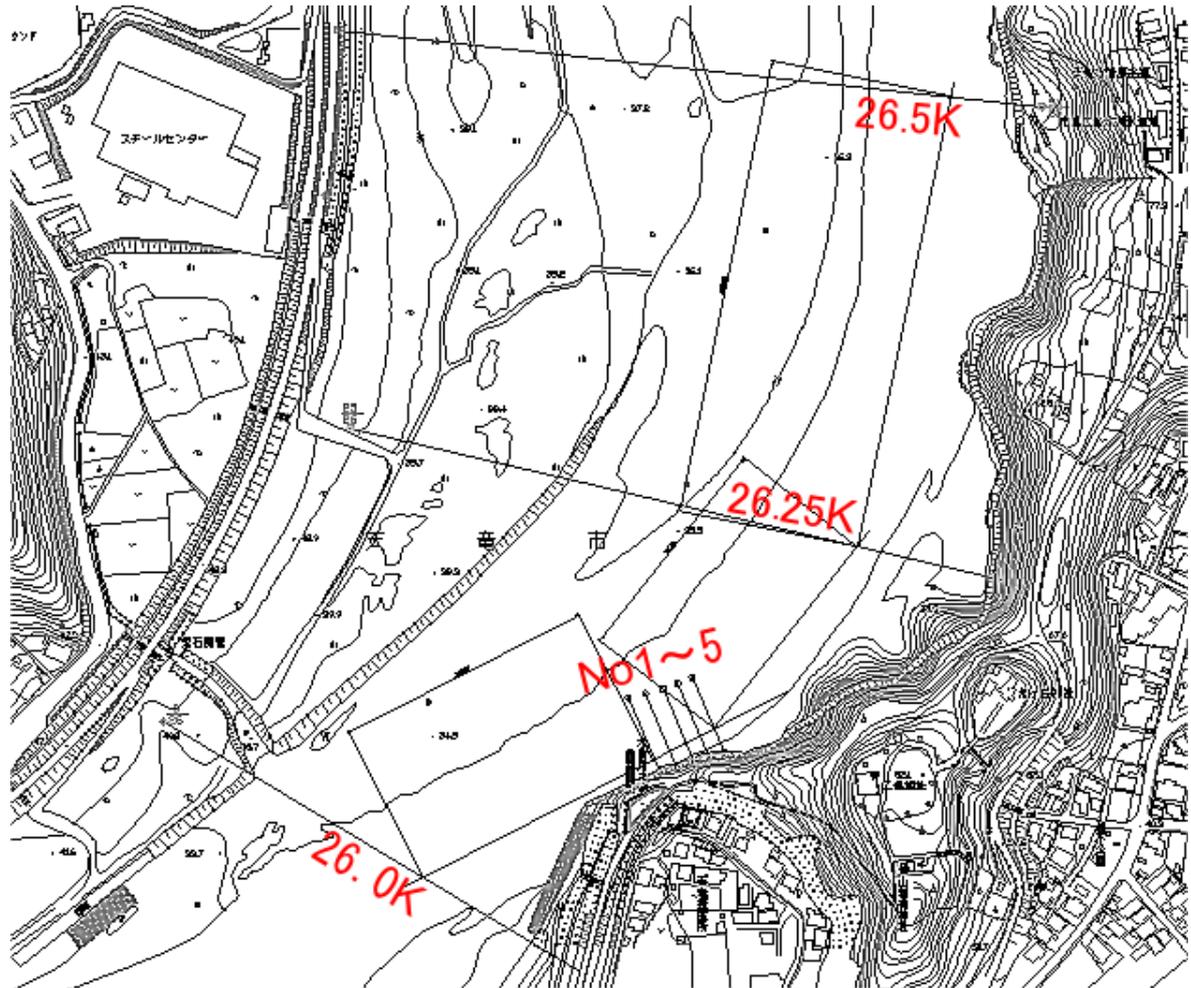


図 3-11 流況解析モデルの地形モデルに用いた横断測線の位置

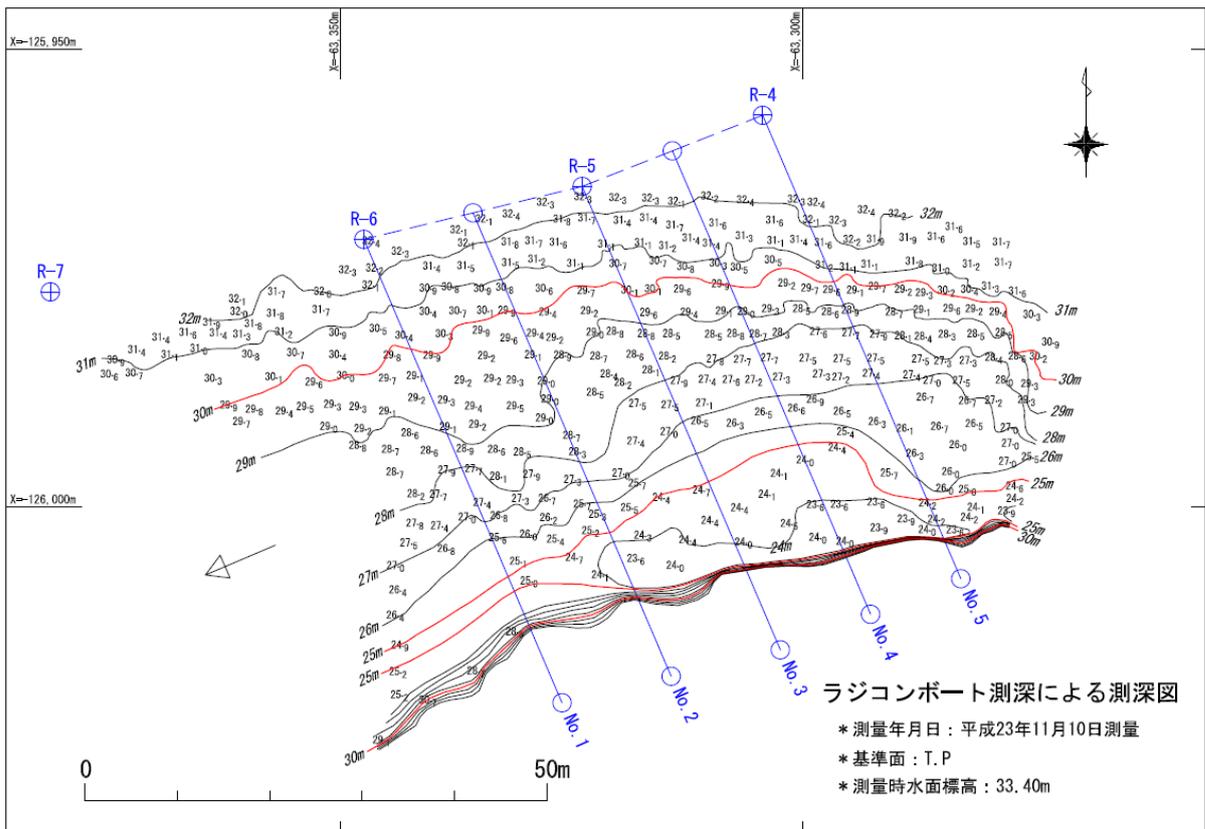


図 3-12 ラジコンボートによる測深結果と横断測線位置

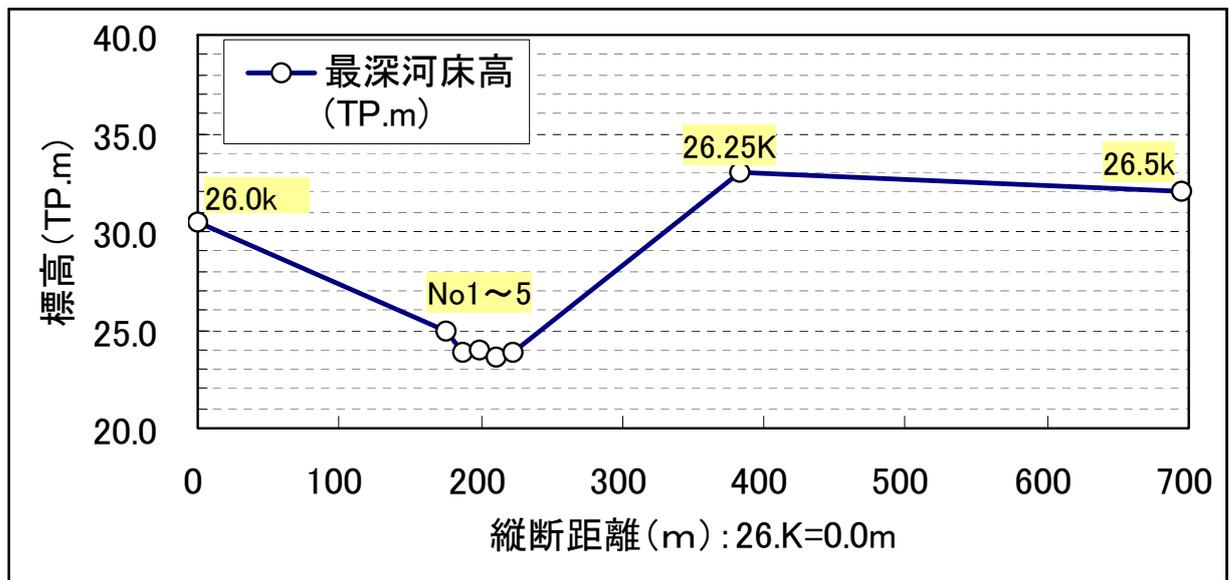


図 3-13 最深河床高の縦断図 (既存測量成果、ラジコンボート測深結果)

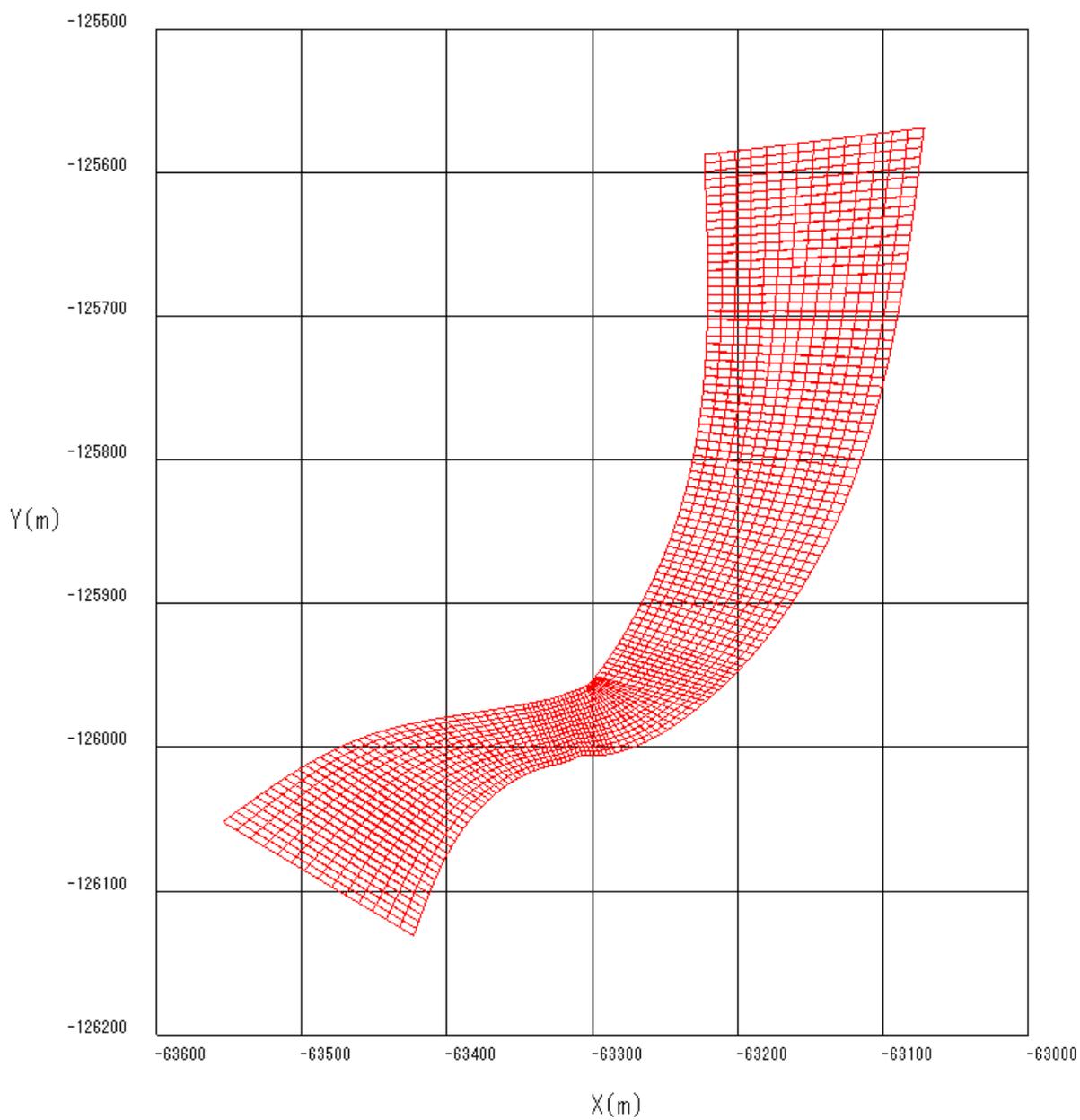


图 3-14 计算格子图 (格子分割数 15×137)

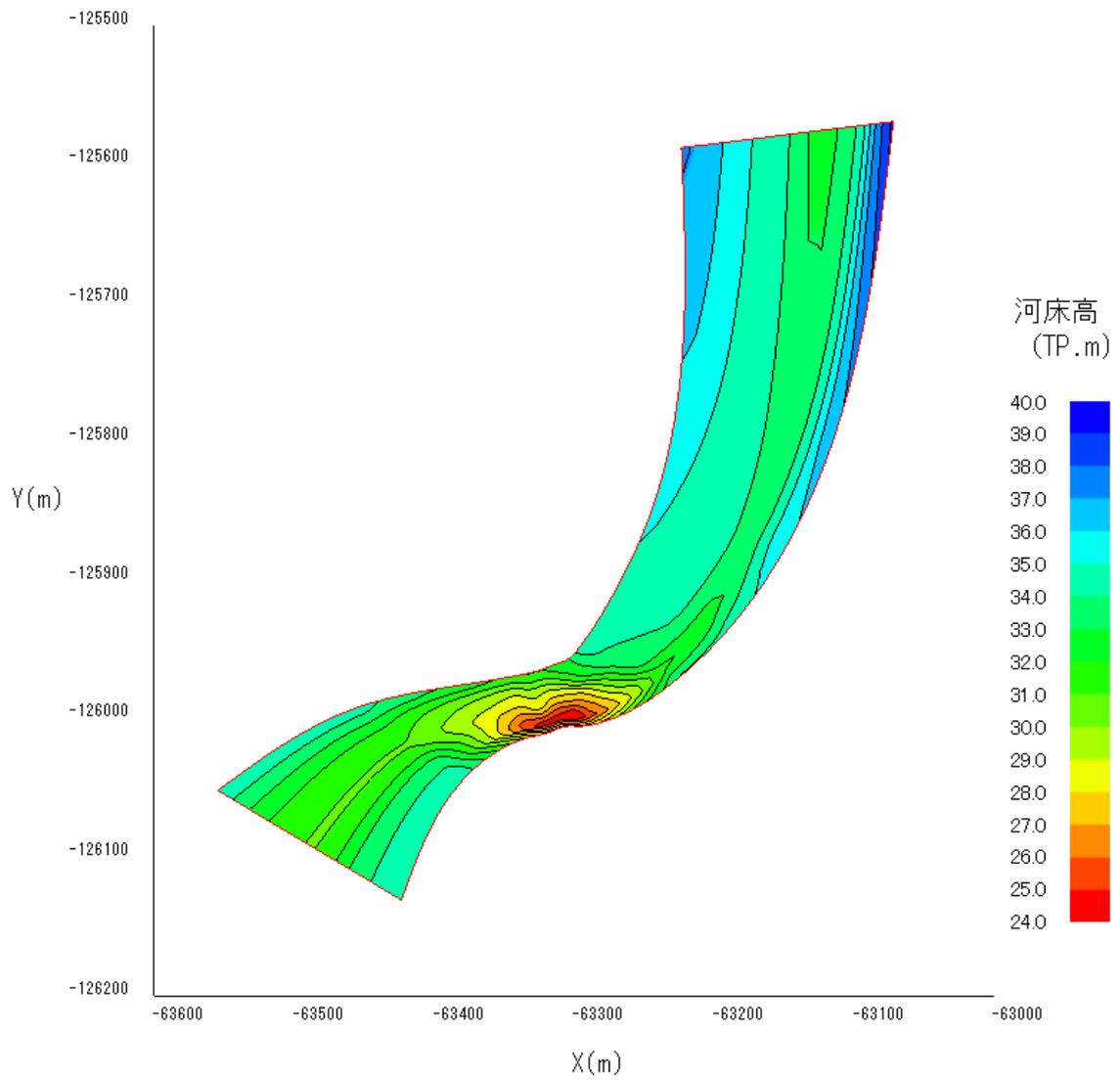


図 3-15 計算モデルの河床高コンター図

3.3.3 計算条件

以下の水理条件で計算を実行した。

なお、流量 Q は、転覆事故発生時の推定流量として発注者の指示によるもの、下流端水位は、現地流速観測において計測された転覆事故発生地点の下流側の比較的水面勾配緩くなった場所の水位とした。

- モデル上流端からの流量 $Q = 150.0 \text{ m}^3 / \text{s}$
- モデル下流端の水位 $H = \text{TP.} + 33.400 \text{ m}$
- 河床の粗度係数（摩擦抵抗） $n = 0.036$

3.3.4 計算結果

(1) オリジナル計算格子の結果

以下は、計算結果をそのまま表示したものである。計算は曲線座標系を用いているために流れにそったベクトルの表示になっている。

図 3-16は、流速の絶対値を 0.5m/s 間隔のコンターの色で示し、流向を矢印で示したものである。

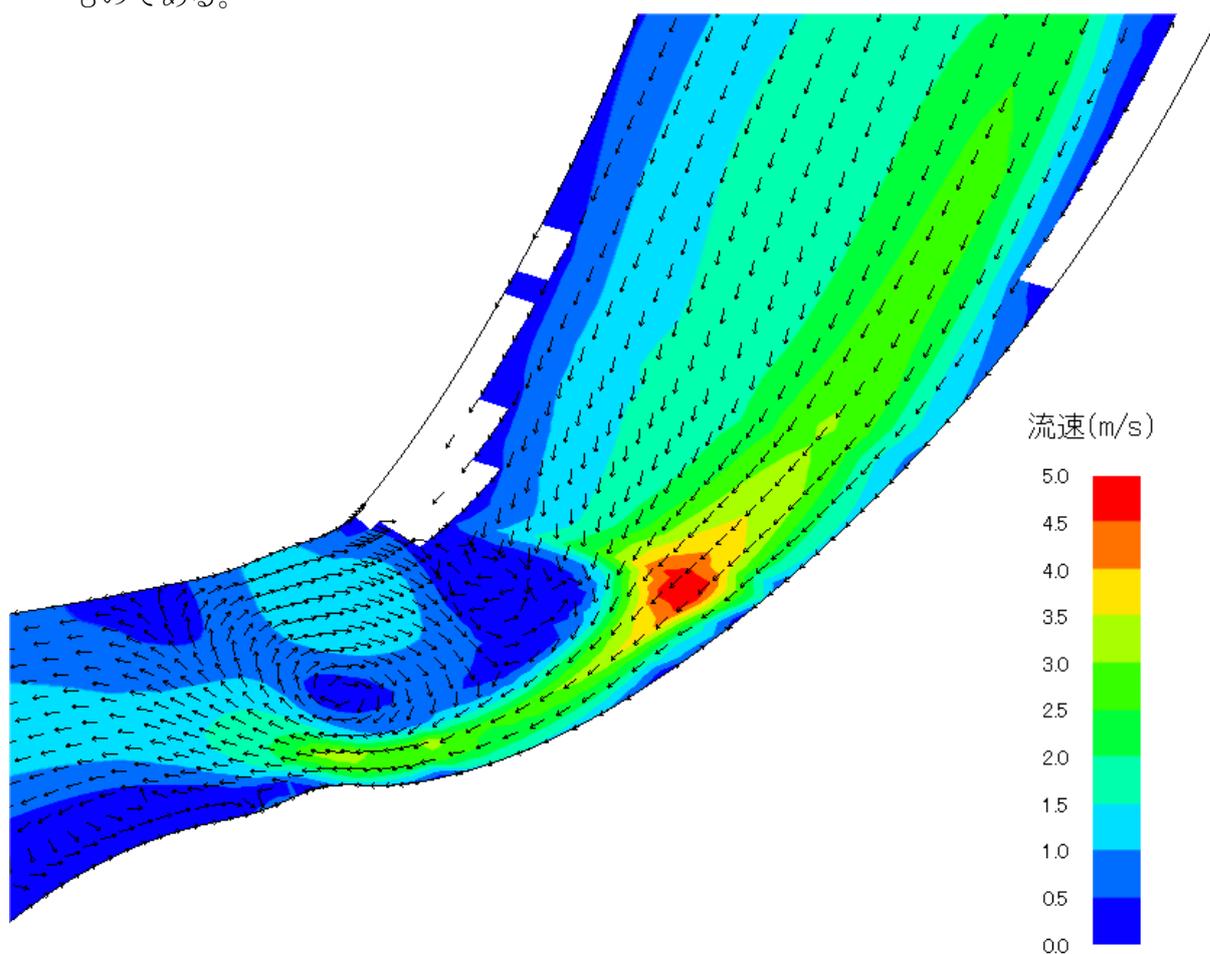


図 3-16 流速値コンター、流向図
計算オリジナルの格子

(2)流速の東西南北の直角座標系へ変換

他業務で計算結果を利用しやすいように、東西が X 方向、南北が Y 方向の流速成分 U_x, U_y に計算結果を補間した。

補間する格子の間隔は、X 方向、Y 方向共に 0.5m とした。図 3-17は、その結果を流速ベクトル図に示したものである。なお、格子間隔が小さいためベクトルが密となり過ぎるため、ベクトル矢印の表示間隔は、10 箇所おきとして間引いて表示している。

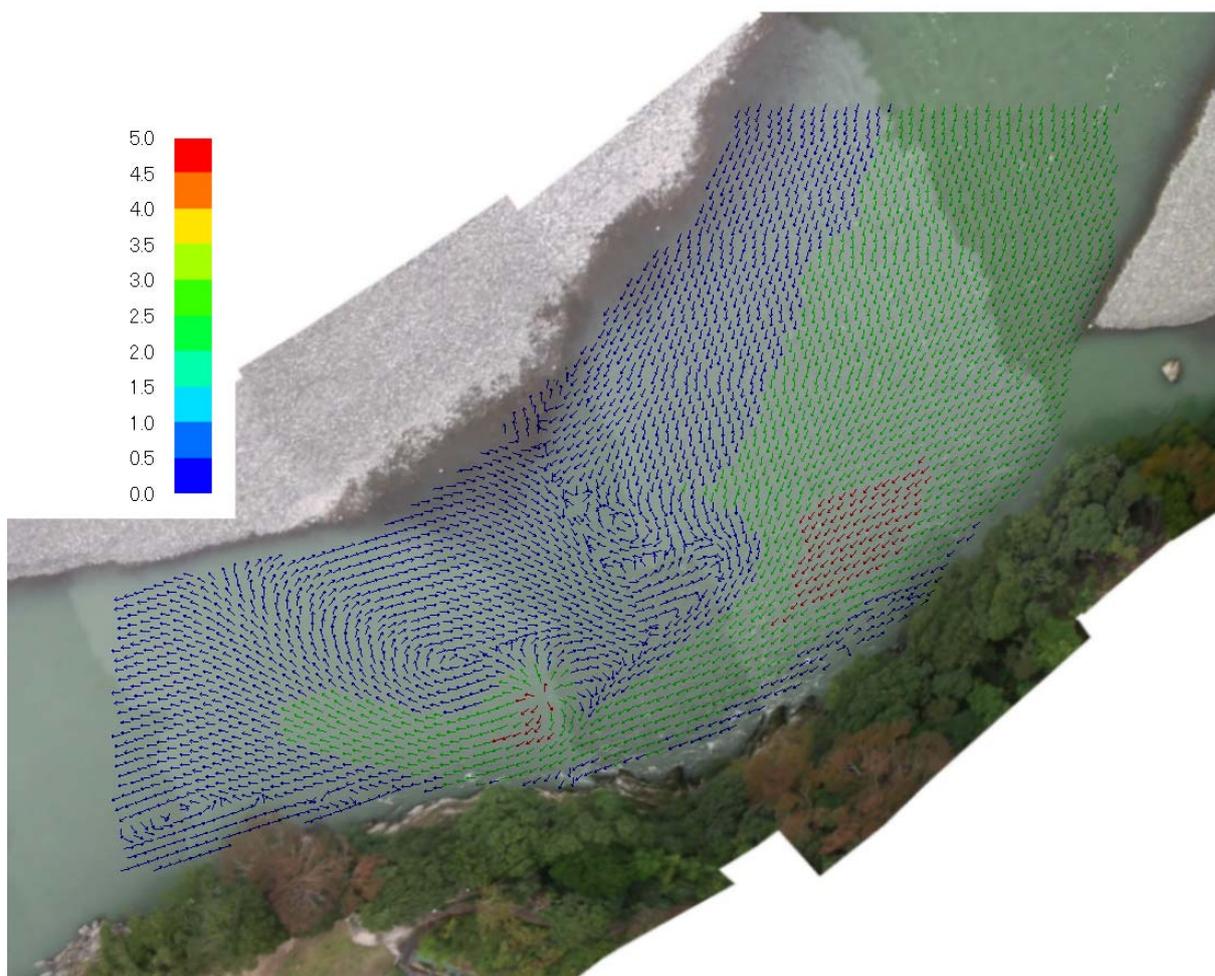


図 3-17 50cm 格子に補完した計算結果
流速値をカラーで表示