

河川基金助成事業

「ラジコンボート搭載型ADCPをベースとした
河川橋脚周辺の流動・局所洗掘・流砂量
同時観測システムの開発」

助成番号：2022 - 5211 - 023

東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科
助教 柏田仁

2022 年度

1. はじめに

近年の豪雨災害の激甚化により、堤防越水や溢水、堤防決壊による大規模な浸水被害は枚挙に暇がない。河道内においても護岸や取水施設の被災に加え、河川橋梁被害が増大している^{1)~3)}。橋梁は、河川によって分断される地域を結ぶ極めて重要な交通インフラであるとともに、水道管等が合わせて添架されているなど、周辺住民の生活基盤として多様な役割を果たす。橋梁被害は、①橋脚周辺の局所洗掘、②橋桁への流体力の作用、③橋台侵食に大別されるが、豪雨時に①橋脚周辺の局所洗掘が生じて橋脚基礎部が晒されることによる橋脚の沈下・転倒が主たる要因となっている^{4) 5)}。このようなことから、河川橋梁被害を考える上で、一般に行われている洪水前後における河床計測だけでなく、洪水中における橋脚周辺の洗掘発達過程を把握することは極めて重要である。

橋脚周辺の局所洗掘は、数多くの研究者により古くから研究されている。局所洗掘の基本メカニズムとしては、橋脚周辺に形成される3次元らせん渦構造が橋脚前面の洗掘を引き起こしていることが、室内実験や数値解析により明らかにされている^{6)~13)}。また、橋脚周辺の洗掘深は、一般的には等流水深や橋脚幅との関係性があることが知られている¹³⁾。しかしながら、最大洗掘深/橋脚幅と等流水深/橋脚幅の関係にはばらつきが非常に大きく、最大洗掘深の評価は容易ではない。

現地河川の橋脚洗掘現象を考えると、①洪水時には流量増減に伴い洗掘深も時間的に大きく変化すると共に、②橋脚周囲の中・小規模河床変動の影響を受け、かつ、河床材料は非一様であり、橋脚周辺の洗掘現象は非定常性や非平衡性が極めて強い複雑現象である。このような複雑現象を数値シミュレーションや縮尺のかかった水理模型実験で評価することには自ずと限界がある。そのため、洪水時用の流速・河床変動モニタリング手法の開発と共に、洪水流及び非平衡性を考慮した河床変動の一体解析法の構築が必要不可欠である。前者として流速鉛直分布と河床変動（水深）計測に超音波ドップラー流速分布計（ADCP）^{14)~16)}が有用である。しかしながら、洪水時の高流速条件下でのADCPの位置制御が容易でないことや、橋梁直下では構造物の影響によりGPS計測が困難であり位置同定できないことが課題となる。

そこで本研究では、ADCP搭載ラジコンボートと位置同定手法に基づく橋脚周辺の流況・河床変動計測システムを新たに開発する。このうち、位置同定には、レーザー光測距による3次元点群データを取得するLiDAR（Laser Imaging Detection And Ranging）¹⁷⁾をベースとし、DV（Digital Video）カメラ画像と組み合わせた効率的手法とする。本システムの基本性能を検証するため、本システムを江戸川野田橋における橋脚周辺の流速鉛直分布・河床高計測に適用した。本研究では、2021年度に取得した平常時観測データの分析を行うとともに、2022年台風15号他の洪水観測とその解析を実施した。

キーワード：flow measurement, scour measurement, pier, river bridge, turbulence, ADCP

2. 現地観測方法

2.1 本システムの概要

本モニタリングシステムの全体像は、図 1に示すように、流速鉛直分布・河床変動計測用のADCPと、その位置制御用ラジコンボート、ADCP位置計測用のLiDARとDVカメラ、から構成される。ADCPには一般的なWorkhorse1200kHz (Teledyne RDI製)を用い、4方向のビームから求められる流速鉛直分布及びビーム毎の水深(河床高)が得られる。位置制御用ラジコンボートとしては、既存のADCP搭載用ボート(Riverboat, Teledyne RDI製)にスラスタ2台(着脱式RCユニット, ㈱ハイドロシステム開発製)を取り付け、橋上からラジコン操作を行う。スラスタの出力最大の場合には、流速2.0m/sでも対応可能であるが、スラスタのプロペラ部分にごみが引っかかると出力が落ちる。そのため、洪水時に流されてしまわないように、ADCPを橋上からロープで繋いだ状態としている。

ADCPの位置計測には、自動車の自動運転技術や、近年では土木現場の測量業務にも活用され始めているLiDAR(Livox Mid-70, Livox製)を鉛直下向きに固定設置し、橋上からADCPの水平・鉛直位置を計測する。ただし、LiDARにより膨大な点群の時系列データが得られるため、ADCP位置を知る上では無駄も多い。そこで、LiDARの脇に設置するDVカメラ(HC-WX990M, Panasonic製)により水表面の撮影も並行して行う。代表的な画像を用いて動画上のADCP位置とLiDAR計測値の相関関係を求め、動画データから時々刻々のADCP位置を効率的に算出する。ADCPの位置算出のための画像解析に、スポーツ用動作解析ソフトkinovea¹⁸⁾を用いる。

なお、ADCP観測時ではボートの揺動は避けられないため、本論文では、一般とは異なり、ADCP搭載の傾斜センサを用いて水深補正などを行っている。岡田ら¹⁹⁾の実験結果より、ADCPの傾斜角が15度以下ならば水深計測の誤差は5%以内に収まるが、洪水時や揺動周期が短い場合には水深計測精度が悪化するため、洪水観測時には留意する必要がある。また、上述したようにADCPから発信される4本のビーム上の流速計測値から、ADCP直下の流速に直される。そのため、水深が大きくなるほど、底面付近の空間解像度が大きくなり、その影響は流速計測精度に見られる可能性があることに注意を要する。

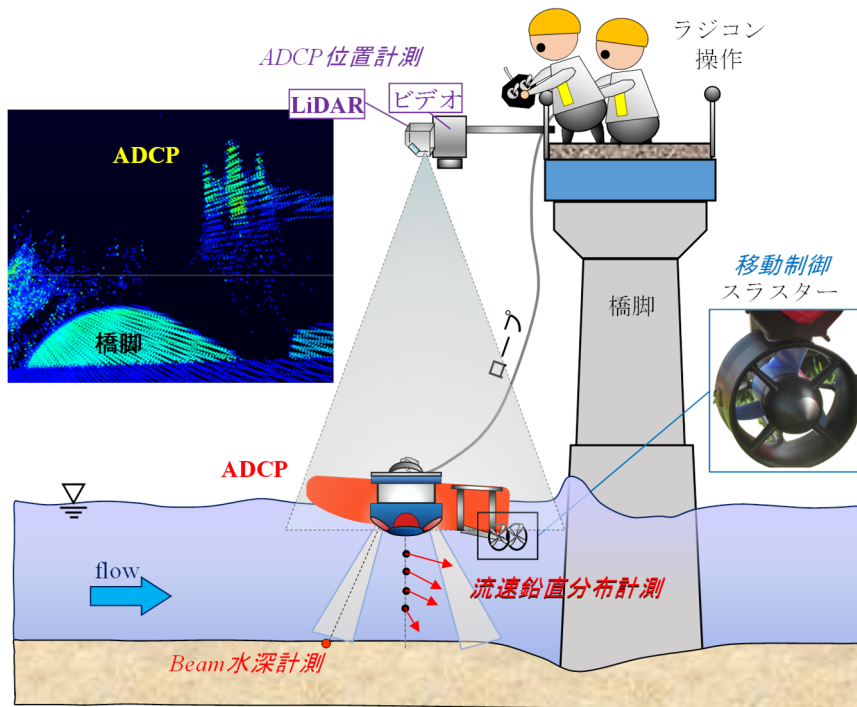


図 1 観測システムの全体像

2.2 現地観測の概要

本システムを用い、江戸川・野田橋（河口より39.5km地点）左岸側から2つ目の橋脚周辺における流速・河床変動観測を行った（図2）。観測は表1に示すとおり、4イベントで実施しており、平常時3回、洪水時1回である。具体には、2021/9/15（水位0.95Y.P.m, 予備観測）と11/4（0.08Y.P.m, 本観測1）、2022/7/12（3.42Y.P.m, 本観測2）、2022/9/25-26（7.38Y.P.m, 本観測3, 台風15号による出水）である。観測内容としては、予備観測では、スラスタが無かったため、位置同定システムの精度検証を主目的とした。ここでは、トータルステーションTS（SET500, SOKKIA社製）を左岸堤防上に設置し、ADCP上に取り付けた360度プリズムを用い3次元位置を計測し、本位置同定システムの結果と比べた。この際、TSやLiDARの設置位置は、RTK-GNSS（R10 Model2, Trimble製）で計測した。同日に橋脚周辺の流速・河床変動計測を各1-2分間を計9セット行った。

一方、スラスタを用いた本観測では、橋脚前面における乱流現象の詳細を把握するための固定観測と、橋脚周辺の流速および河床高の空間分布を捉えるための移動観測を行った（図3）。固定観測では、スラスタの出力を流れと釣り合わせる形で橋脚前面にADCPを静置し、5分間の計測を行った。移動観測では、ADCPを橋脚周辺を網羅できるように移動し、左右岸側それぞれ3分間の計測を行った。このような固定観測+移動観測を1セットとし、表1に示すセット数の観測を実施した。

ADCPの設定条件はハイスピードサンプリングモードであり、鉛直層厚を20cm、層数を40、不感帯幅を0.25mとする。サンプリング間隔は2.0秒であり、この間に3回の超音波を発信する。水深計測用の超音波beamは3回計測している。また、LiDARでは、レーザーが70.4°の円錐角で照射され、角度精度は0.1°未満、距離精度が20m先において2cm以下であり、1秒間に100,000点のデータを計測可能な機種となっている。本観測ではTSの計測は行っていない。

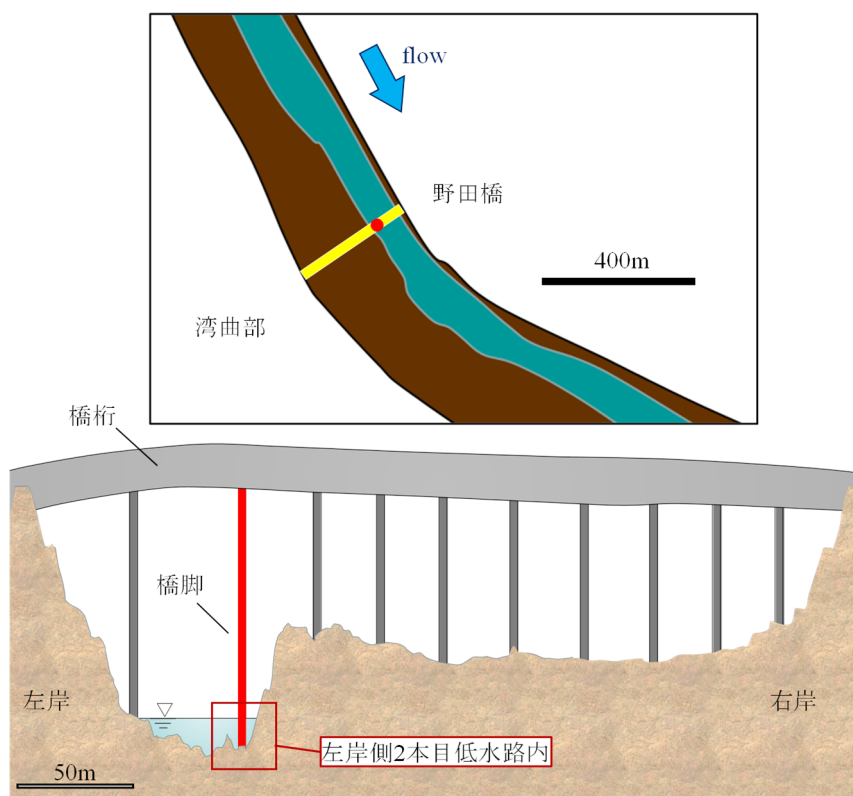


図2 観測サイトの概要（江戸川・野田橋）

表 1 観測の概要

呼称	観測日	流況	最高水位 [Y.P.m]	スラスタ 有無	観測 セット 数	評価項目
予備観測	2021/9/15	低水	0.95	無し	—	TSをreferenceとした本システムの位置同定精度の検証
本観測1	2021/11/4	低水	0.08	有り	3	平常時における河床高分布および三次元流動特性の観測
本観測2	2022/7/12	低水	3.42	有り	2	平常時における河床高分布および三次元流動特性の観測
本観測3	2022/9/25-26	洪水	7.38	有り	3	洪水時における河床高分布および三次元流動特性の観測

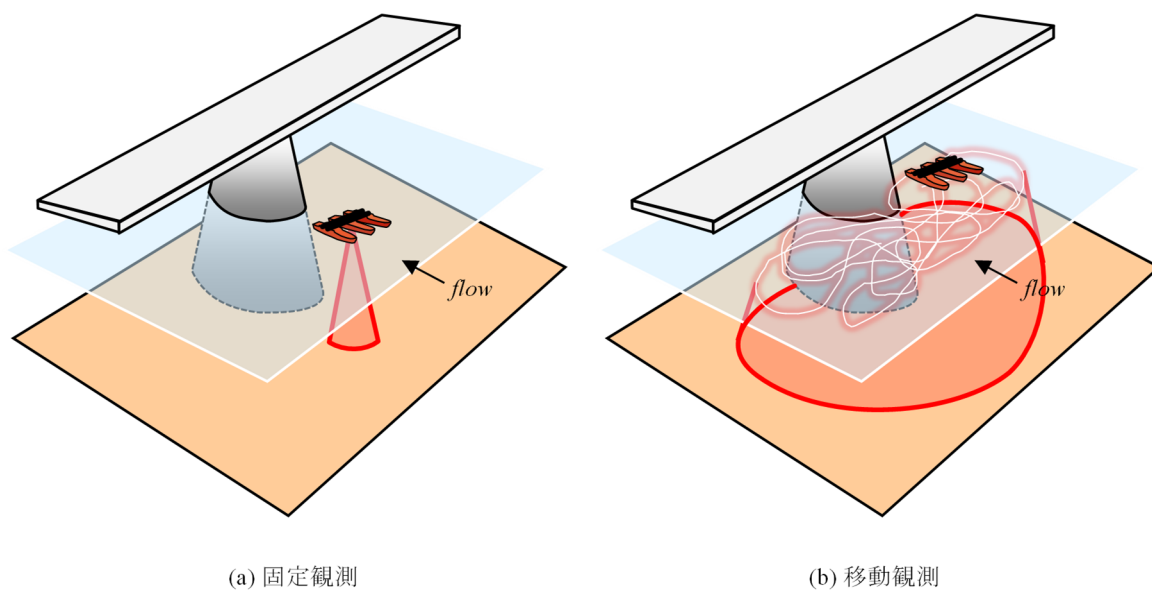


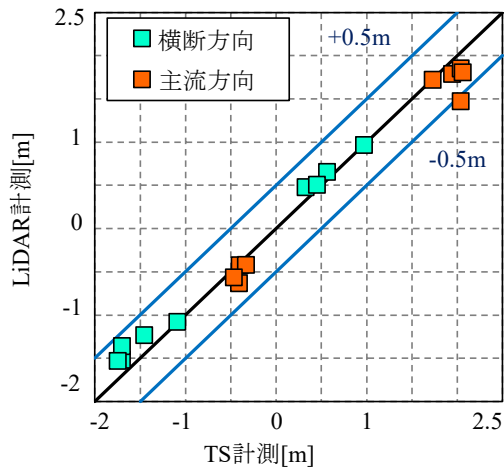
図 3 観測の種類概念図

3. 観測結果と考察

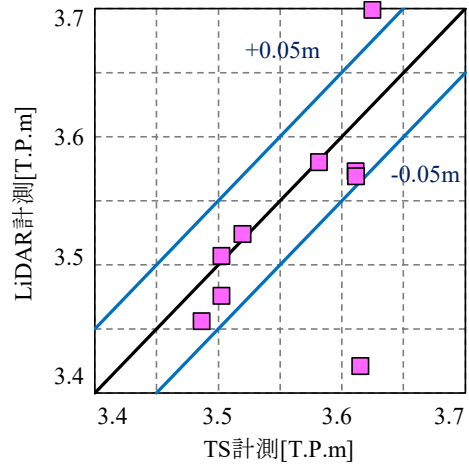
3.1 位置同定システムの測定精度

LiDARを用いたADCP位置の測定精度を検証するために、TSとLiDARによるADCPの3次元位置の計測値を比較した結果を図 4 (a), (b)に示す。ここでは、予備観測におけるADCP水平位置（主流・横断方向）と鉛直高さに関するTSとLiDAR計測値の相関図を表示している。なお、水平位置の原点は橋脚上流端とし、正の主流・横断方向はそれぞれ下流向き、右岸向きとする（後述の図 5）。これより、水平位置は $\pm 0.5\text{m}$ 、鉛直高さは $\pm 0.05\text{m}$ の範囲に概ね分布している。また、TSとLiDARの差（サンプル数9）は、水平方向では平均 15.9cm （標準偏差 22.0cm ）、鉛直方向では平均 4.6cm （標準偏差 7.8cm ）となった。予備観測時ではスラスターが無く、ADCPの移動制御をロープのみで行ったことや、本検証時に用いたRTK-GNSSの計測精度が鉛直（水平）方向 4.0cm （ 2.5cm ）であることを考慮すると、LiDARの位置計測精度は概ね良好と言える。ただし、ADCPの鉛直高さに関しては、LiDAR計測値の方がTSの結果よりもややばらつきが大きい。この詳細を検討したところ、LiDARの設置角度がLiDARの鉛直高さ計測精度に対して一定の影響が見られることが確認された。LiDAR自体は橋桁欄干に固定しているが（図 1）、観測を実施した野田橋は交通量が多く、橋桁自体も時折揺れたため、LiDARの計測方向が変化したことが影響した可能性がある。また、TS計測を行っていない本観測では、LiDARによる鉛直高さ計測の精度検証ができていないため、ここでは、計測範囲内の水位は一律と仮定している。

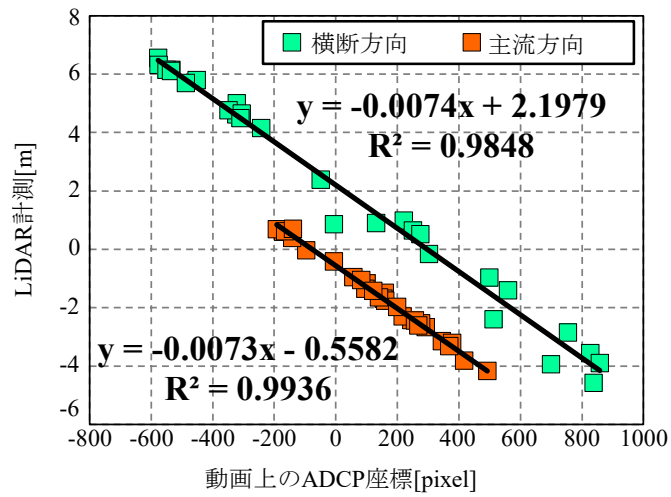
また、LiDARとDVカメラによるADCP水平位置の算出精度を検証するために、ADCP水平位置に関するLiDAR計測値（単位：m）と動画上の画素座標（単位：pixel）の相関図を図 4 (c)に示す。ここでは、本観測を対象に主流・横断方向に分けてプロットしている。これより、両者は良好な線形関係（ $R^2=0.98$ 以上）を有することが分かる。この相関式と動画データから、ADCP位置の追跡を効率的かつ高精度にできることが示された。



(a)水平位置計測



(b)鉛直高さ計測



(c)LiDAR・カメラ計測値の相関

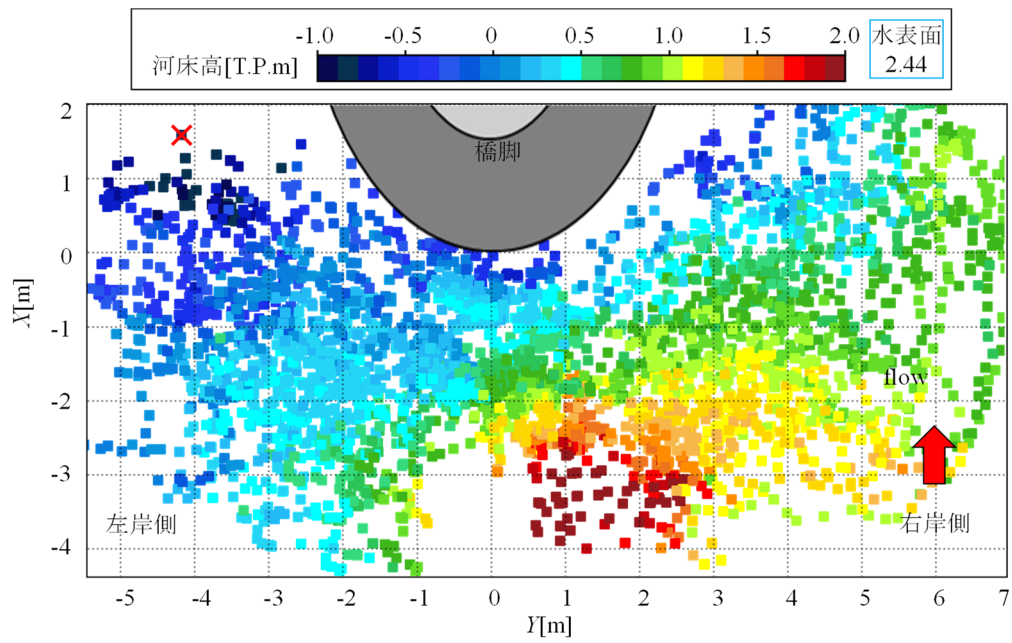
図 4 位置同定システムの精度検証結果

3.2 本橋脚周辺の洗掘状況

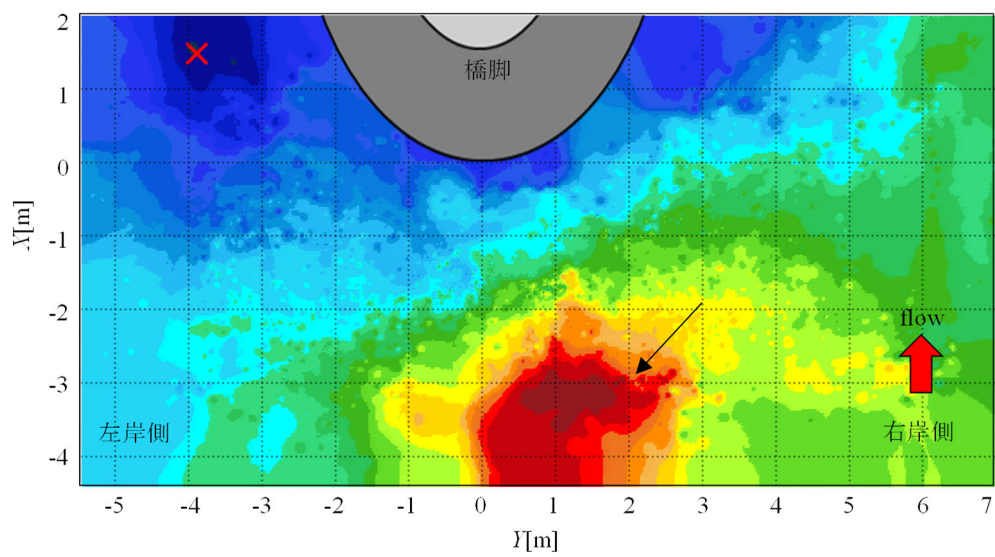
まず、平常時の観測結果として、本観測1において本システムにより得られた橋脚周辺における河床高の計測結果を図 5 に示す。同図(a)では、本観測①～③全ての計測結果の点を示し、LiDARとDVカメラによるADCP水平位置及びADCPによる4本のビームの測深結果からそれぞれ河床高を求めた。なお、ADCPの傾きについては、ADCP自身の計測値で補正を行った。また、点データを逆距離荷重法 (IDW) で内挿した結果を図(b)に表示している。これより、まず生データとして、橋脚前面において、高密度に観測結果を得られており、計測地点は橋脚周辺まで及んでいることが分かる。また、内挿された河床高コンターを見ると、橋脚周辺において河床高が低くなっており、洗掘が生じているという一般的な傾向が見られる。詳細を見ると、最低河床高は、橋脚上流側ではなく、橋脚上流端よりやや下流・左岸側 (低水路中心側) で見られる (図中×印)。なお、橋脚上流側にはマウンド (図中矢印、ごみの一部が堆積) が見られ、そのマウンドとの落差を考えると、橋脚上流側も洗掘が進行しているものと推察される。

さらに、洪水時の観測結果として、本観測3において本システムにより得られた橋脚周辺の河床高の計測結果を図 6 に示す。同図の見方は図 5 と同様である。同観測時には、最大流速が3.66m/sに達したが (詳細後述)、平常時と同様に概ね安定した河床高計測ができていた。本システムでは流速1.8m/sまでしか静止できなかったため、それ以上の流速が発生した本洪水観測中にラジコンボートの制御は橋脚前面の一部のエリアしかできなかった。そのため、ラジコンボートが下流に流されるたびに、橋上からロープによりラジコンボートを引き揚げ、再度橋脚上流側にラジコンボートを着水させる、という作業を繰り返し、橋脚周辺のデータを多く取得した。そのため、1回の計測時間が約60分に達した。観測データにはADCPの揺動に起因すると推察されるスパイクデータも一定程度発生しており、このような異常値は目視により除去した。内挿された河床高コンター図に着目すると、計測点が橋脚前面の中央に集中している。これは、橋脚中央 (よどみ点) に比べ、橋脚脇では流速が大きく、前述したとおりラジコンボートを制御できなかったためである。また、本観測1 (平常時、図 5) と比較すると、まず橋脚上流側に見られたマウンド部分における深掘れが最大で50cm程進行した。また、洪水時の観測では最深河床高が橋脚直上流に発生しており、平常時に比べ、深掘れが30cmほど進行した。

このように、本観測システムは平常時・洪水時ともに橋脚上流側の河床高の平面分布を極めて高い空間解像度で計測可能であり、これまで計測例のない洪水ピーク時の深掘れ状況の把握が可能であった。

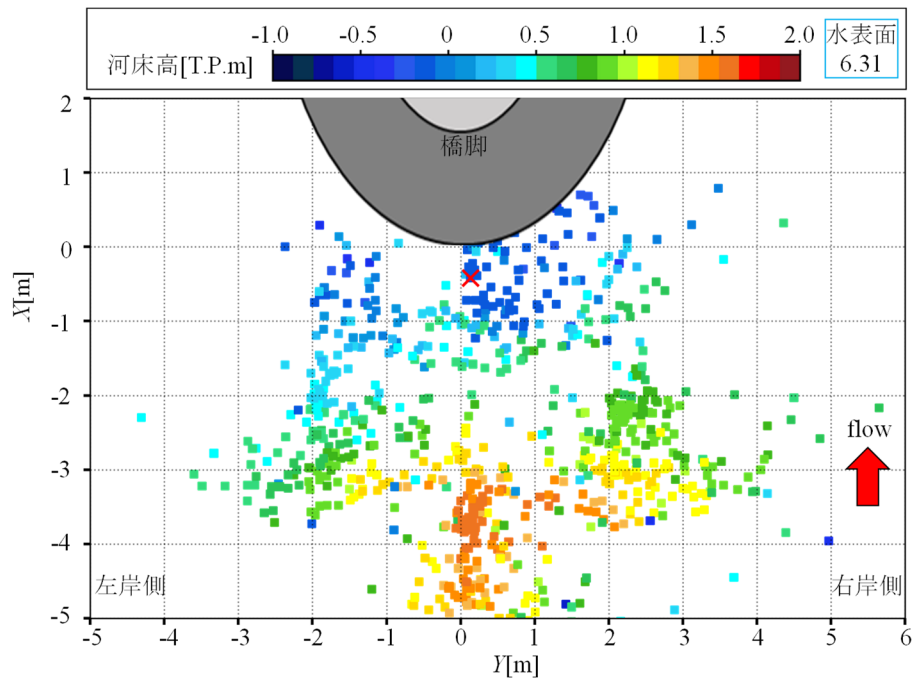


(a)生データ

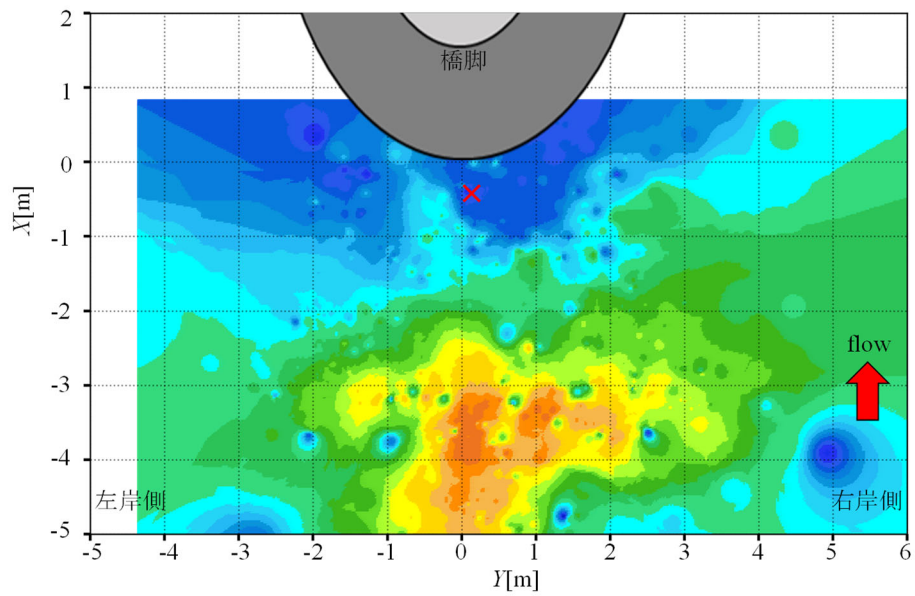


(b)内挿結果

図 5 本観測 1 (平常時) における本システムによる河床高計測結果 (X: 主流方向, Y: 横断方向)



(a)生データ



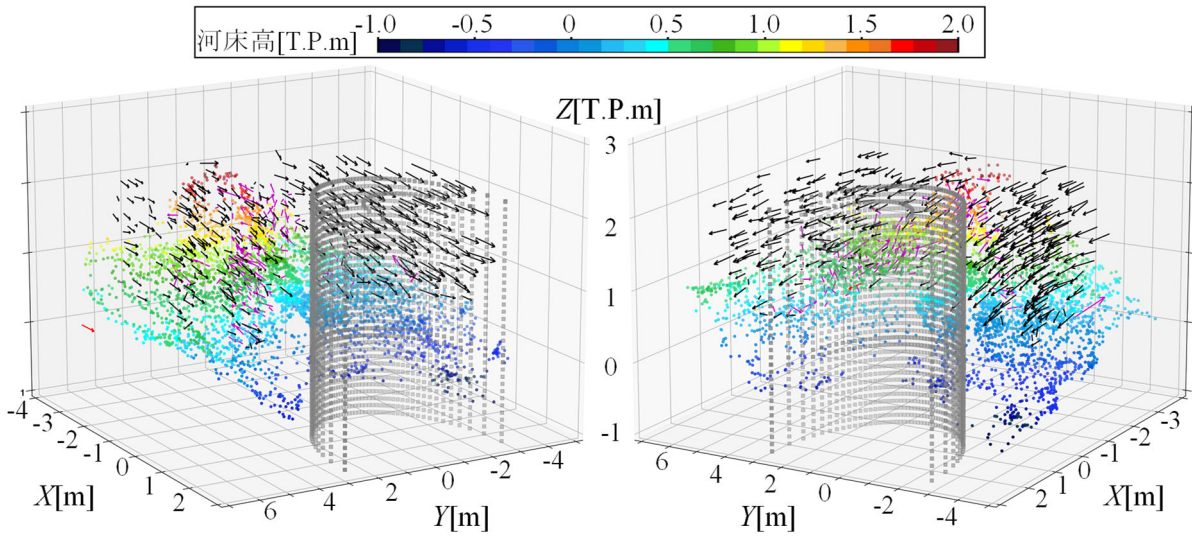
(b)内挿結果

図 6 本観測 3 (洪水時) における本システムによる河床高計測結果 (X : 主流方向, Y : 横断方向)

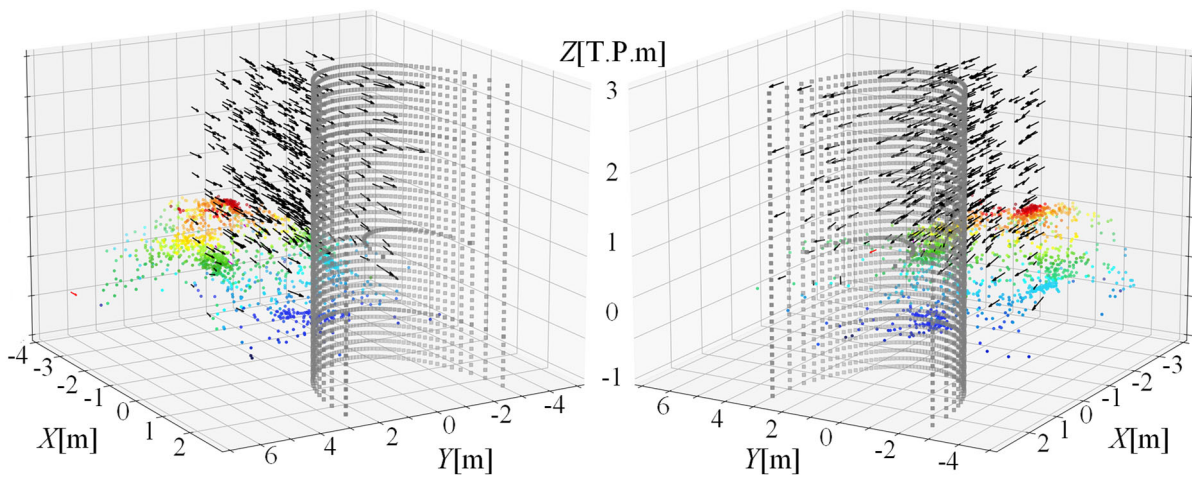
3.4 三次元流動構造と乱流特性

本手法により計測された三次元流動構造の全体像として、流速ベクトルと河床高の空間分布の鳥瞰図を図 7 に示す。同図(a), (b)はそれぞれ本観測1, 3の計測結果であり、左手側に右岸下流側から、右手側に左岸下流側からの視点での可視化結果を図示している。なお、同図はADCPの移動観測（3分間）の観測データを時間的に累積することで得たものであり、瞬間的な流速場でないことに注意する必要がある。また、計測位置が不均一で、膨大、かつ一定の観測誤差を有するADCPデータを取り扱うに当たり、水平方向0.25m、鉛直方向0.2mのメッシュを生成し、同メッシュ内の観測値を平均操作した結果を図示している。これより、本観測システムにより、橋脚上流側の極めて複雑な三次元流動構造の計測に成功している。

流動構造をより詳細に分析するために、水表面付近と河床付近における水平流速ベクトルの平面分布を図 8 および図 9 に示す。ここでも、図 7 と同様に25cmメッシュを作成し、各メッシュの平均流速を算出した結果を表示する。これより、平常時（図 8）においては、水表面付近では全体的に下流向きの順流ベクトルが卓越している。一方、河床付近では、左岸側では順流ベクトルが卓越しているが、右岸側では流速が微小もしくは逆流となっている。また、橋脚前面では、流速の大きさ、向きともに大きく変動しており、特にマウンドと橋脚前面の間では逆流が多く見られる。なお、ADCP計測値に含まれるError Velocityを調べたところ、平均的には0.08~0.15[m/s]の計測誤差が含まれていたが、上記の流速値や後述の結果に関しても、この程度の誤差ならば大きな問題ではないと判断される。次に、洪水時（図 9）では、平常時と比較して流速絶対値が大きく、主流方向流速が卓越している。水表面付近では、流速は橋脚を避ける形で概ね左右対称に分かれた。一方、河床付近については、橋脚に向かう、あるいは局所洗掘部に引き込まれるような分布が得られた。このように、水表面と底面付近で流向が大きく異なり、複雑な三次元的な流れ場が形成されていることが示唆された。

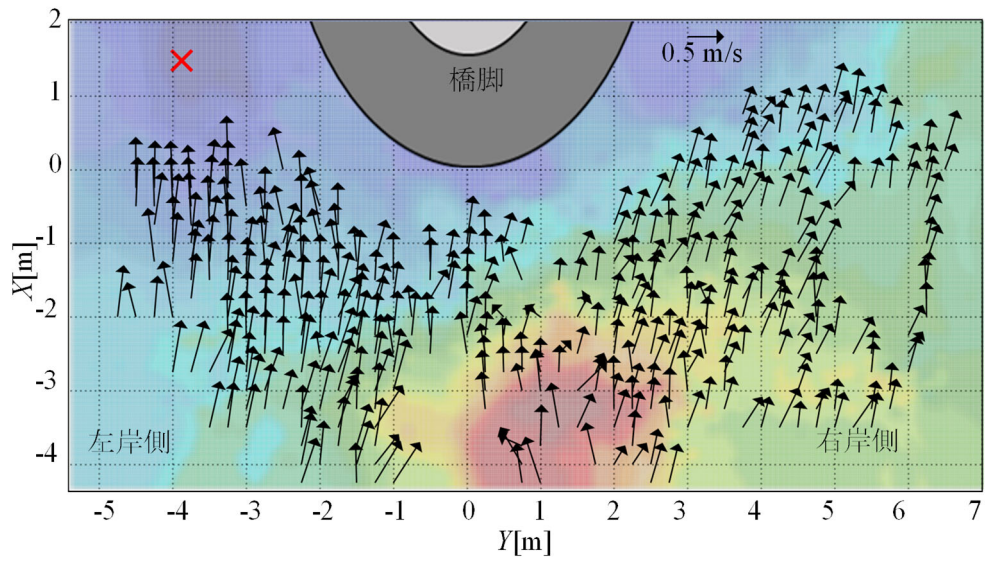


(a) 本観測1 (平常時)

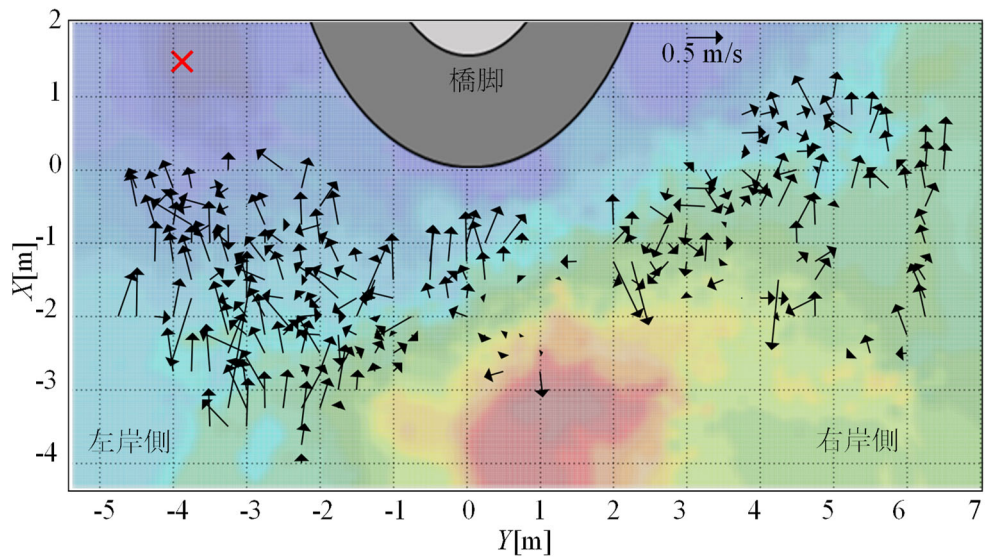


(b) 本観測3 (洪水時)

図 7 流速ベクトル及び河床高の空間分布の鳥瞰図

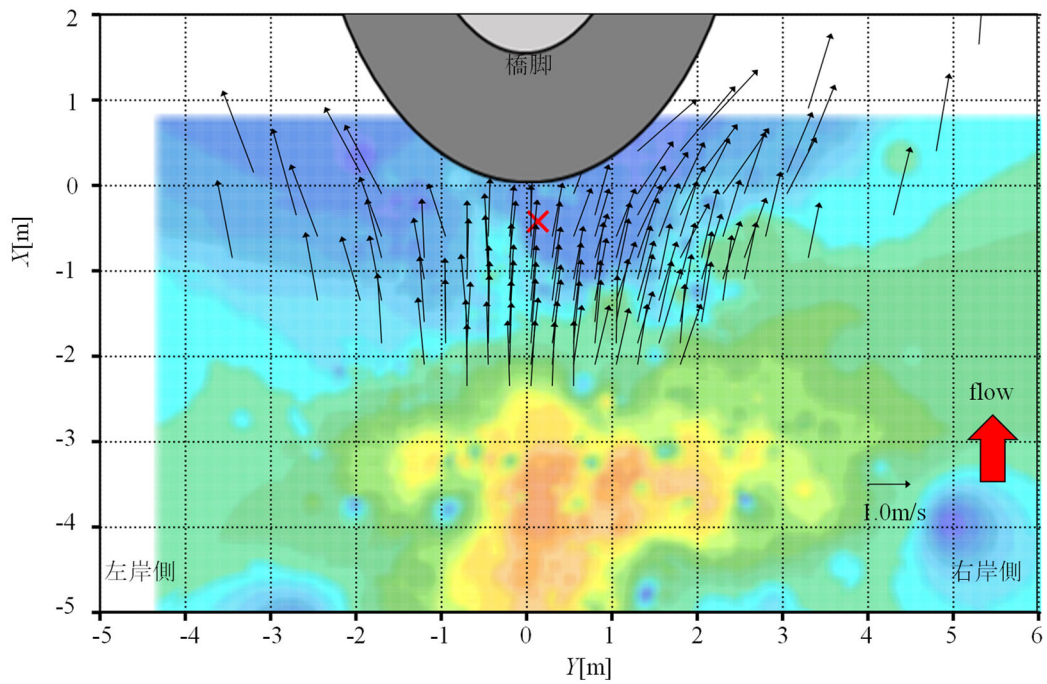


(a)水表面付近

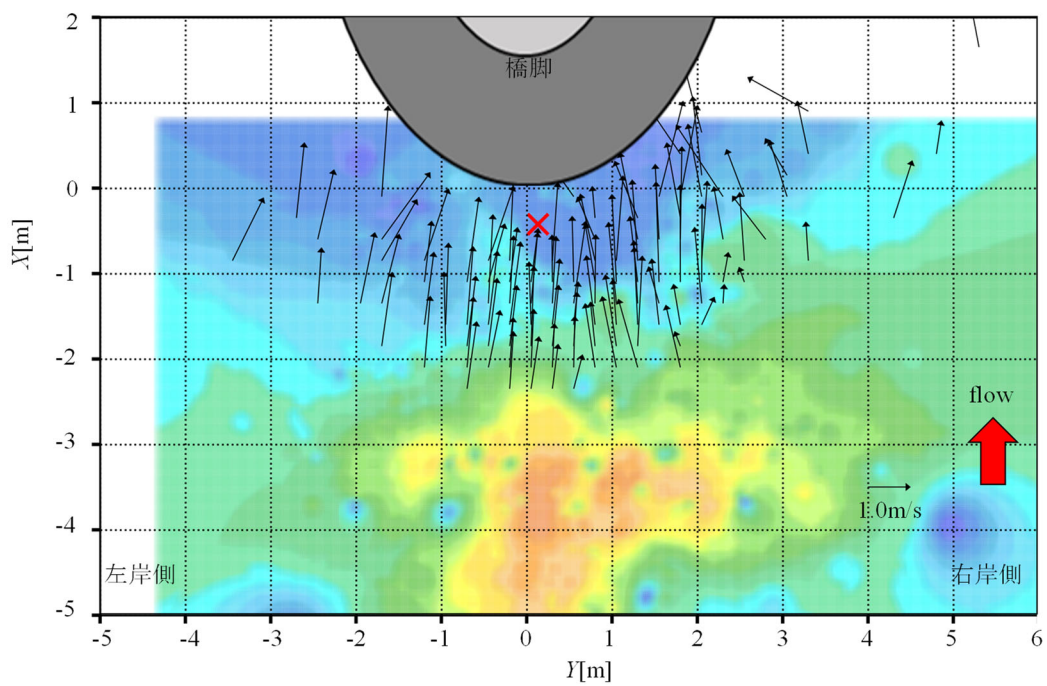


(b)河床付近

図 8 流速ベクトルの平面分布 (本観測 1, 平常時, ×印は最深地点)



(a)水表面付近



(b)河床付近

図 9 流速ベクトルの平面分布 (本観測 3, 洪水時, ×印は最深地点)

渦構造の一部を可視化するために、まず、本観測1（平常時）における橋脚前面の縦断断面（ $-2.5\text{m} < X < 0$ ）における流速ベクトルを図 10に示す。ここでは、中央（ $-1.0 \leq Y \leq 1.0\text{m}$ ）、右岸側（ $1.25 \leq Y \leq 2.25\text{m}$ ）、左岸側（ $-2.25 \leq Y \leq -1.25\text{m}$ ）の範囲に得られた流速データに対して、鉛直方向に20cm、主流方向に10cmのメッシュ毎の平均値を算出して図示している。これより、中央や右岸側では、橋脚前面（ $X=-0.5\sim 0\text{m}$ 付近）で洗掘孔に沿って潜り込むような下降流が、橋脚から少し離れた地点（ $X=-2\sim -1\text{m}$ 付近）の底面付近では、上流向きの流速ベクトルがそれぞれ見られる。一方、左岸側では、底面付近では逆流ベクトルが見られておらず、流速鉛直構造が橋脚の右岸・左岸側で異なっていることが示された。

このことをより詳細に検討するために、横断断面（ $-5.0 < Y < 6.5\text{m}$ ）における二次流ベクトルを図 11に示す。ここでは、 $-0.5 \leq X \leq 0.5\text{m}$ の範囲における25cmメッシュの流速を平均化している。これより、局所的な下降・上昇流も見られるが、全体的には右岸向きの流れが卓越している。これは、低水路河道の湾曲の影響を受けているものと推察される。このように、室内実験などで確認されている橋脚前面におけるらせん渦は、本観測結果より断片的に見られるものの、全体像としては明確には捉えられていない。その一方、河道全体で生じている湾曲部の二次流の影響も受け、結果として、実橋脚周辺の流れ場はより複雑化している可能性が示唆された。

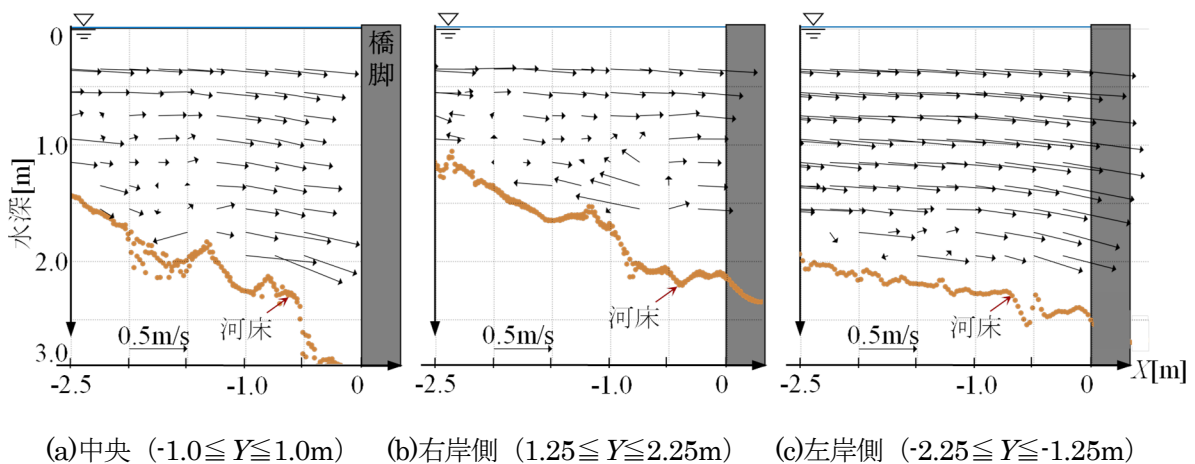


図 10 橋脚前面の縦断面における流速ベクトル（本観測 1，平常時）

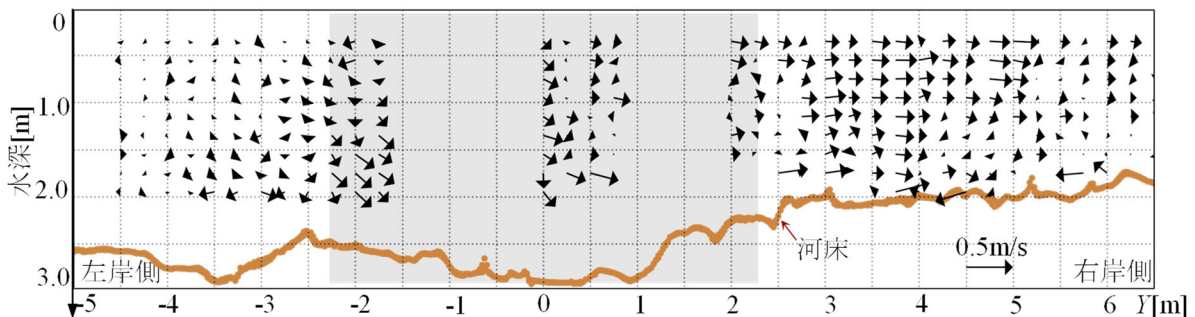
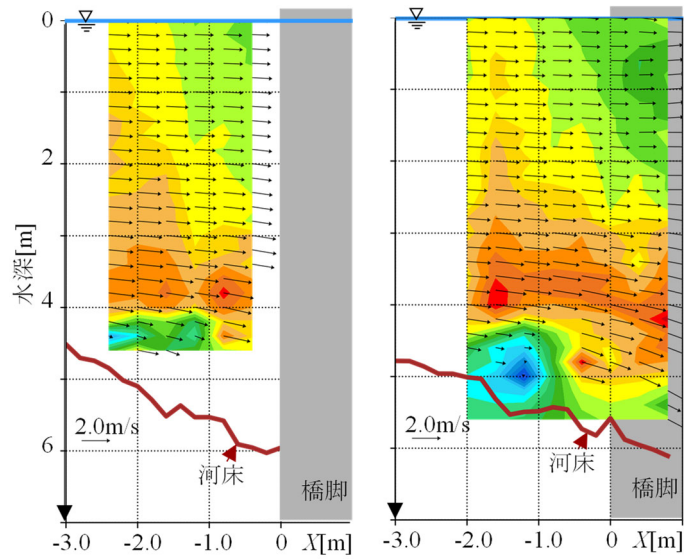


図 11 橋脚前面の横断面における二次流ベクトル分布（ $-0.5 \leq X \leq 0.5\text{m}$ ，本観測 1，平常時）

洪水時の観測データについて、まず流速誤差について調べた。ADCPは、4本のビーム方向流速から合成された3次元流速の鉛直分布を計測しており、これは「ADCPからの各ビーム上の水中散乱体の速度が同一である」という前提条件に基づく。ただし、橋脚周辺の底面近傍のように流れ場の局所性が大きい場合には、この仮定の妥当性を検討すべきであり、ADCPの流速誤差に注意を要する。そこで、ADCP計測値により出力されるError Velocityを調べた。その結果、Error Velocityの大半は出水時・平水時共に0.3m/s未満となっており、全般的には0.5m/s以上の大きな誤差を含むデータ数の割合は小さい。平水時と出水時を比べると、Error Velocityが大きい部分の割合は、出水時の方が平水時よりも大きくなっており、水深が大きい出水時の方が流速誤差は大きい。また、Error Velocityは橋脚中心 (Y=0) 付近で大きな値を示す傾向にあり、流速誤差に橋脚影響が確認された。以上を鑑み、本報ではError Velocity 0.5m/sを閾値とし、それ以上のデータは除去し、次節の流速データを解析した。本観測3における除去対象の流速データ数は、全計測データの6.3%であった。

洪水時の渦構造を分析するために、本観測3 (洪水時) における橋脚前面の縦断断面の流速ベクトル及び横断断面の二次流ベクトルをそれぞれ図 12と図 13に示す。ここで縦断面は $-0.5 \leq Y \leq 0.5\text{m}$ (橋脚中心) , $1.5 \leq Y \leq 2.5\text{m}$ (橋脚右岸側) , 横断面は $0 \leq X \leq 1\text{m}$ の範囲において、各断面の20cmメッシュ毎の流速平均値を算出し、主流方向流速コンターと合わせて図示する。なお、主流方向流速コンターは一部欠測部分を内挿している。これより、まず、縦断面分布としては、水表面付近では、主流方向流速は橋脚に近づくと共に減速するという一般的な流況が見られる。水深4m以深では流速が大きく減少し、橋脚前面での局所洗掘形状に沿った結果となっている。また、水深2 - 4m付近では水表面付近よりも流速が大きく、かつ、橋脚に近づいても表層付近ほど流速の減少は見られない。それに対して、横断面の流動構造を見ると、水表面付近では、橋脚中央から横断方向に発散する一般的な流れが見られるが、水深3m以深では逆に収束する二次流が形成されている。これに合わせて主流方向流速は水表面よりも底層付近において大きくなっている。このような表・底層で異なる二次流構造や主流方向流速分布は、出水時の別の期間でも観測されていたが、このような複雑な流動構造の形成要因は、本システムの計測誤差も含めて今後検討する。



(a)中央 ($-0.5 \leq Y \leq 0.5\text{m}$) (b)右岸側 ($1.5 \leq Y \leq 2.5\text{m}$)

図 12 橋脚前面の縦断面における流速ベクトル (本観測 3, 洪水時)

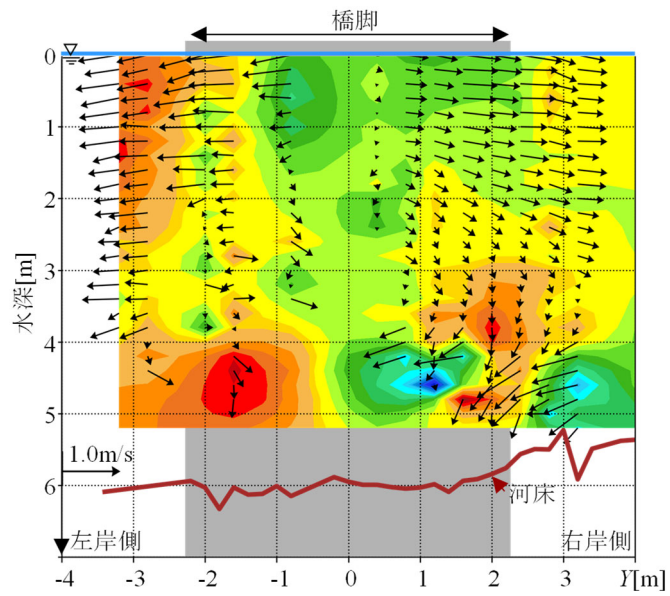


図 13 橋脚前面の横断面における二次流ベクトル分布 ($0 \leq X \leq 1\text{m}$, 本観測 3, 洪水時)

さらに、橋脚前面における乱流特性を調べるために、主流・鉛直方向の変動成分 u' 、 w' の相関図を平常時、洪水時それぞれ図 14、図 15に示す。ここでは、橋脚上流端付近にてADCPを固定観測した結果のうち、水深0.85m（本観測1）、4.25m（本観測3）のデータを例示している。これより、 u' 、 w' の間には明瞭な負の相関関係が確認された。すなわち、低速上昇流、高速下降流が生じており、レイノルズ応力の発生が示唆され、この状況は水深全体で確認された。そこで、本観測1のADCP固定観測時における主流方向平均流速とレイノルズ応力の鉛直分布を図 16に示す。図中には、ADCPの平均位置 ($X=-1.47\text{m}$) と河床高の縦断分布も示す。これより、流速鉛直分布としては、傾きが緩やかになった後に変曲点 ($z=0.75\text{m}$ 付近) が見られ (図中青矢印)、その高さ付近でレイノルズ応力のピーク ($z=0.65, 0.85\text{m}$) が見られる (図中赤矢印)。これらは局所洗掘時に生じている下降流や逆流ベクトルを含んだ、三次元らせん流の一部であると考えられる。以上より、乱流構造や河床高の同時計測を行うことが実現できたが、実際の洪水時には多くの課題が残っており、今後検討する予定である。

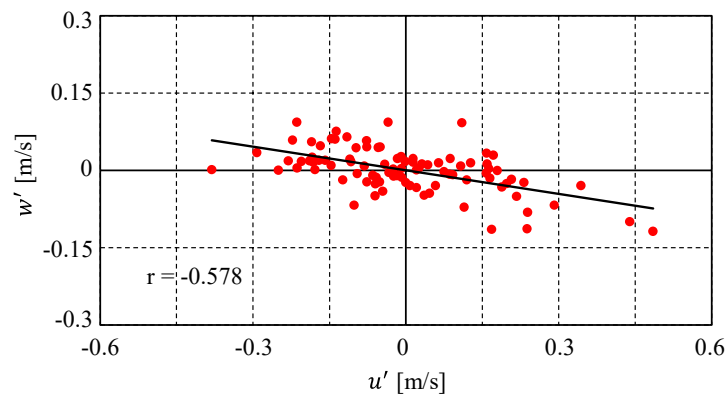


図 14 主流・鉛直流速変動成分の相関図 (本観測 1, 平常時, 水深 0.85m)

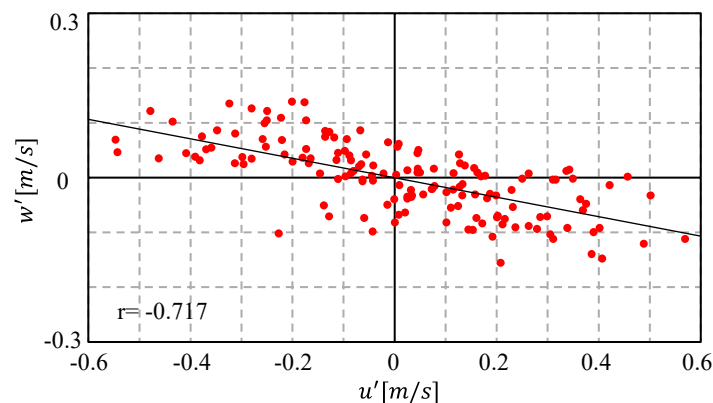


図 15 主流・鉛直流速変動成分の相関図 (本観測 3. 洪水時, 水深 4.25m)

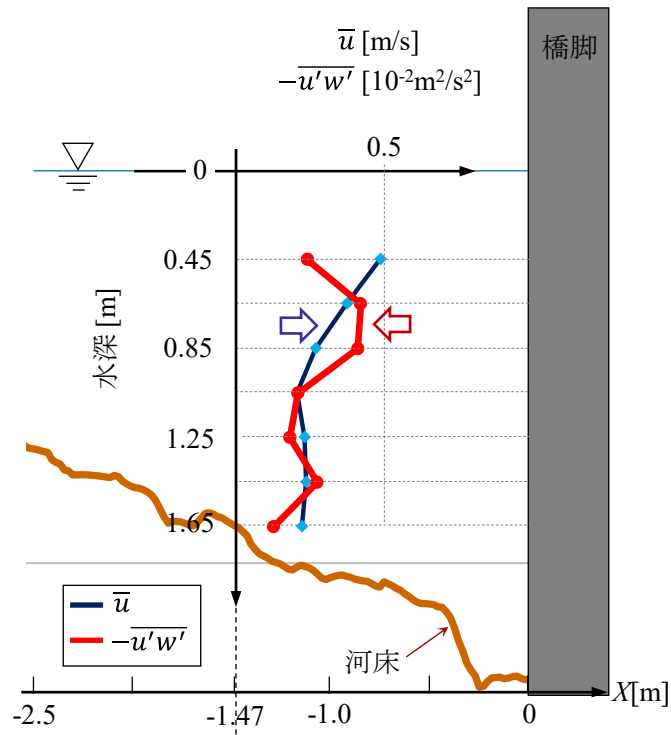


図 16 主流方向流速・レイノルズ応力の鉛直分布（本観測 1，平常時，青矢印：流速分布変曲点，赤矢印：レイノルズ応力のピーク）

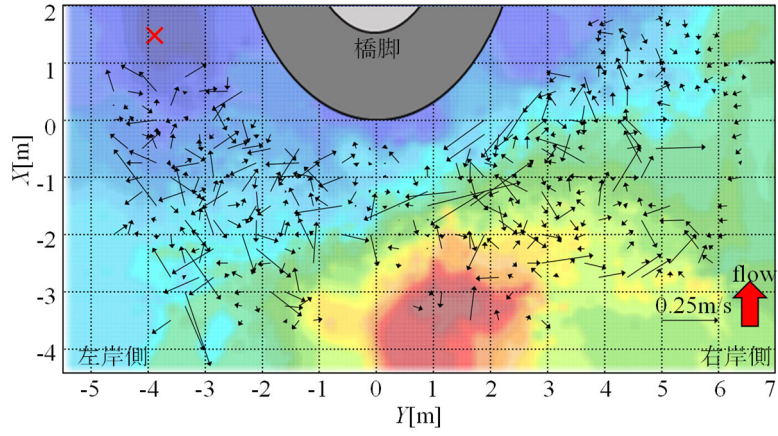
3.5 橋脚周辺の掃流砂ベクトル分布

本手法により計測された橋脚周辺の掃流砂ベクトルの平面分布を図 17に示す。ここでは、ADCPの計測位置が不均一であったため、25cmメッシュを作成し、各メッシュで平均値を算出した結果を表示する。掃流砂ベクトルの算出には、ADCPのボトムトラッキング(以下BTと略記)機能を利用した。BT機能は、河床とADCPの相対速度を計測し、河床の固定を仮定することでADCP本体の移動速度を高精度(誤差0.3cm/s程度)に計測する機能である。一般に、洪水時には掃流砂が発生することで、本来目的のBT機能は適用困難である。しかし、本観測システムでは、ADCPの位置と移動速度を計測しているため、BT速度(ADCP移動速度+河床移動速度の和)とADCP移動速度の差分から掃流砂ベクトルを求めることが可能となる。

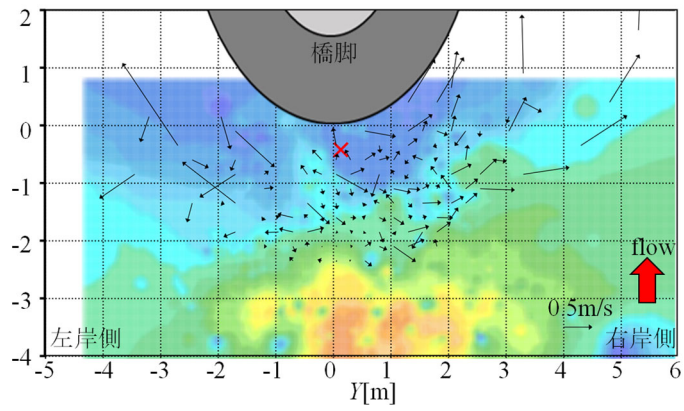
まず、平常時の結果として図 17(a)に着目する。江戸川の平常時には掃流砂の発生は想定しづらいが、計測範囲全体にわたって掃流砂ベクトルの発生が認められる。また、ベクトルの大きさ、向きともにランダムな分布を取っていることから、エラーベクトルの可能性が示唆される。次に、図 17(b)に示す洪水時には平常時と比較して大きな掃流砂ベクトルの発生が認められ、かつ、最深河床部を起点とした発散する分布となっている。このように、掃流砂の発生していないと推察される平常時には観測誤差が卓越しているのに対し、河床変動が生じ掃流砂の発生が期待される洪水時には掃流砂ベクトルの観測をある程度の精度で捉えることができた可能性がある。

さらに、BT速度の計測誤差の頻度・割合分布を図 18に示す。これより、平常時においては全計測点の95%以上が2.2cm/s以下の計測誤差(平均0.5cm/s, 最大8.1cm/s)であり、出水時には全計測点の90%以上が10cm/s以下の計測誤差(平均4.03cm/s, 最大40.3cm/s)であった。本報ではそれぞれError Velocity 2.2cm/s(平常時)、10cm/s(洪水時)を閾値とし、それ以上のデータは除去した結果を示した。これらを考慮すると、下図の結果はエラーベクトルの可能性は低く、位置同定システムにから算出した移動速度に影響されている可能性が示唆された。このことについては今後の検討課題とする。

また、流砂現象は掃流砂と浮遊砂に大別されるが、橋脚周りの局所洗掘現象には掃流砂の影響が卓越すると考えられるが、浮遊砂のモニタリングも重要である。浮遊砂については、ADCPの反射強度(Echo Intensity)の減衰特性から濁度推定を行うABT(Acoustic Backscatter Turbidity)が提案されている。本研究では、反射強度の減衰が軽微であったため、具体の検討は行っていないが、ABTを適用することで、濁度を推定し、SSへの変換を行うことで浮遊砂フラックスの推算が可能である。

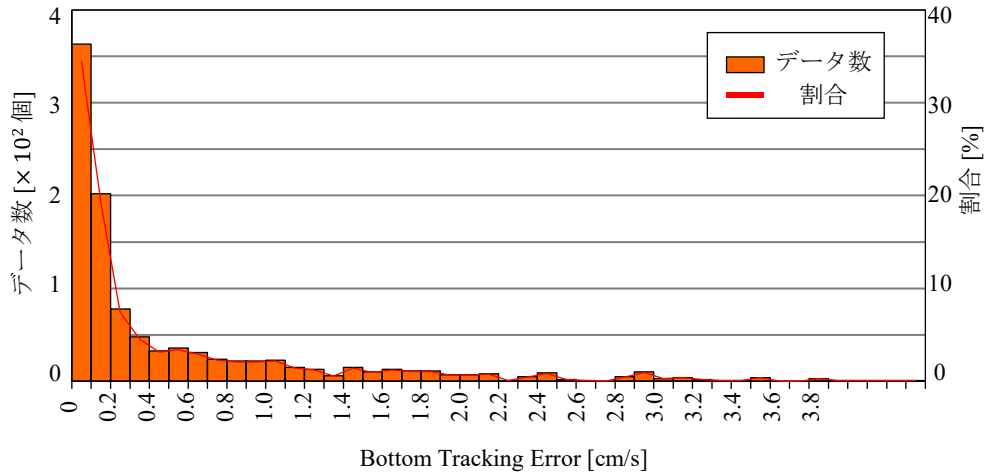


(a) 本観測 1, 平常時

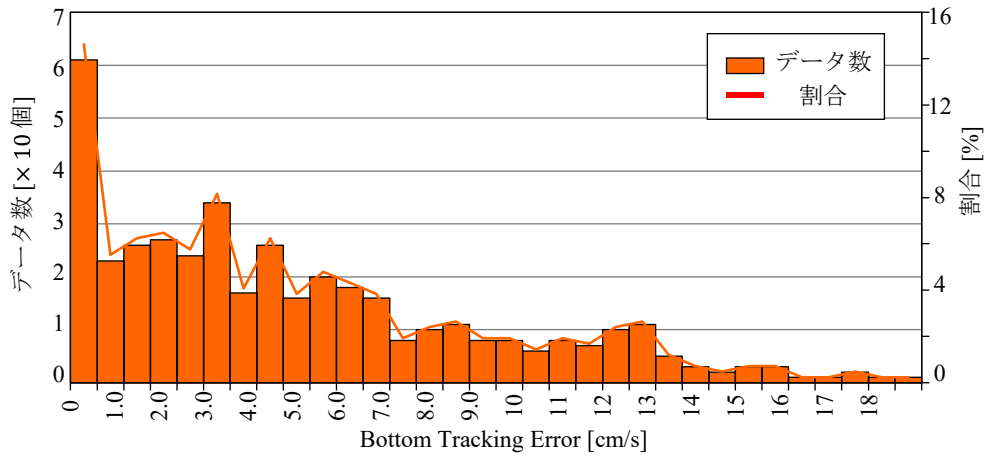


(b) 本観測 3, 洪水時

図 17 掃流砂ベクトルの平面分布 (×印は最深地点)



(a) 平常時



(b) 洪水時

図 18 ボトムトラッキング速度の計測精度評価

4. まとめ

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) LiDAR と DV カメラを用いた位置同定システムの精度検証を、TS をリファレンスデータとして行った。その結果、本システムの ADCP 位置同定精度が概ね良好であり、かつ DV カメラを併用することで効率性も向上できていることが示された。
- 2) 平常時および洪水時の江戸川・野田橋において、本手法を用いて橋脚周辺の流況と河床高を計測した。その結果、橋脚に近いほど洗掘が進行している一般的な結果を得られ、洪水時には橋脚上流側の深掘れの進行が確認された。なお、洪水時にはスラスターの出力が洪水流に対して不足したため、ラジコンボートが下流に流される度に橋上からロープでラジコンボートを引き揚げ、再度橋脚上流側に着水させる、という作業をくりかえす必要が生じたため、1回の計測に約60分を要した。
- 3) 橋脚前面において、3次元性の乱れを含む流動構造および掃流砂ベクトル分布を計測できることが確認された。洪水時には、特徴的な二次流構造も計測され、橋脚周りの流動シミュレーションのベンチマークとなり得る現地観測データが得られたことは、今後の解析技術の発展の礎となる。

今後は、本観測システムを江戸川野田橋の出水時観測を継続する。さらに LES による乱流解析を現地観測データを用いて行う。そのため、現地での橋脚周辺の河床データをより広範囲に集めていく必要がある。また、本研究では、観測範囲を橋脚前面に限定していたが、LiDAR を橋上下流側やボート上などに複数台設置することで、最終的には橋脚周囲全体の観測を目指す予定である。

参考文献

- 1) 玉井信行：豪雨による河川橋梁災害，技報堂出版，pp3-82，2015.
- 2) 土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団：2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団報告書，2017，
<https://committees.jsce.or.jp/report/node/144>（閲覧日：2022 年 5 月 25 日）。
- 3) 井上隆，山村優佳，二瓶泰雄：豪雨時の橋梁被害リスク指標の検討～H30 年西日本豪雨の三篠川橋梁被害縦断分布データを用いて～，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.75，No.2，pp.1417-1422，2019.
- 4) 国土交通省：JR 河川橋梁対策検討会，https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk7_000024.html（閲覧日：2022 年 5 月 20 日）。
- 5) 佐溝昌彦：河川増水時における鉄道橋脚の被害の実態と橋脚の安定評価に関する研究，国土館大学応用システム工学専攻学位論文，pp.1-27，2014.
- 6) 吉川秀夫，福岡捷二，岩間汎，曾小川久貴：橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察，土木学会論文報告集，Vol.194，pp.83-90，1971.
- 7) 中川博次，鈴木幸一：橋脚周辺による局所洗掘の予測に関する研究，京都大学防災研究所年報 B，Vol.17，pp.725-751，1974.
- 8) 辻本哲郎，水上敏昭：円柱橋脚前面での局所洗掘機構のモデル化，水理講演会論文集，Vol.29，pp.591-596，1985.
- 9) 福岡捷二，宮川朝浩，飛石勝：円柱橋脚まわりの流れ，河床変動と流体力，水工学論文集，Vol.41，pp.729-734，1997.
- 10) Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J. and Michelsen, J. : Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, Journal of Fluid Mechanics, 534, pp.351-401, 2005.
- 11) 内田龍彦，福岡捷二：水平方向渦度方程式を用いた底面流速の半直接解法と橋脚周りの局所洗掘解析，水工学論文集，Vol.54，pp.841-846，2010.
- 12) Kumar Ashish, and Umesh C. Kothiyari. : Three-Dimensional Flow Characteristics within the Scour Hole around Circular Uniform and Compound Piers, J. Hydraulic Eng., Vol.138, No.5, pp.420-429, 2012.
- 13) (公社)土木学会，水理公式集 [2018 年度版]，丸善出版，pp.365-367，2018.
- 14) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, J. Hydraulic Engineering, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 15) 二瓶泰雄，色川有，井出恭平，高村智之：超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討，土木学会論文集 B，Vol.64，No.2，pp.99-114，2008.
- 16) 岡田将治，橋田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP 搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水観測，水工学論文集，Vol.52，pp.919-924，2008.
- 17) 坂本静生：ゼロからわかる 3 次元計測: 3D スキャナ, LiDAR の原理と実践，オーム社，pp.1-232，2022.
- 18) スポーツ×アナリティクス：http://sports-analytics.jp/application/app_pc/kinovea/entry-34.html（閲覧日：2022 年 5 月 25 日）。
- 19) 岡田将治，萬矢敦啓，橋田隆史：ADCP 搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響，水工学論文集，Vol.54，pp.1087-1092，2010.