複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型 ADCPによる融雪洪水流の空間計測

SPATIAL MEASUREMENTS OF SNOW MELT FLOOD BY IMAGE ANALYSIS WITH MULTIPLE-ANGLE IMAGES AND RADIO-CONTROLLED ADCP

藤田一郎¹・北田真規²・霜野充²・橘田隆史³・萬矢敦啓⁴・本永良樹⁴ Ichiro FUJITA, Masaki KITADA, Mitsuru SHIMONO, Takashi KITSUDA, Atsuhiro YOROZUYA and Yoshiki MOTONAGA

¹正会員 学博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
²学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
³正会員 ㈱ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18)
⁴正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Measurements of flood flow have been conducted intensively at major control sections in Japan for storing reliable hydrological data to use for a long-term river planning. However, such a measurement pays attention only on a flow passing through one cross-section and thus spatial flow features are not available, while river channel changes its feature at every flood event. In this research, we performed concurrent measurements of a snowmelt flood of the Uono River by an image analysis and a radio-controlled ADCP. In the image analysis with STIV (Space-time Image Velocimetry), three video cameras were used to cover a river reach of about 500m by changing their view angles at every location. On the other hand, the boat-mounted ADCP was remotely controlled to form a zigzag trajectory to cover the same reach. The accuracy and limitation of STIV was made clear through a comparison with ADCP data and a spatial distribution of correction factor from surface to depth-averaged velocity was found to have a weak correlation with a large-scale bed slope.

Key Words: STIV, image analysis, radio-contrAolled ADCP, surface flow measurement, river flow structure

1. はじめに

最近では、河川モニタリング用のカメラが数多く の河川に設置され、大規模な洪水時にも貴重な映像 が記録されるようになってきた. これらの映像を見 て再認識させられるのは、実際の河川洪水の流れは 非常に複雑であり、平面的にも大きく変化している といういわば自明のことであるが, では実際の流速 分布が平面的にどのように変化しているのかという 問いには、いまだに十分に答えられないというのが 現状と思われる.一方で、数値シミュレーションに よる解析技術も発展してきているのは確かだが、実 河川における境界条件は複雑多様であり、それらを 正確に解析に反映させることは容易ではない. した がって,特に流速分布に関して言えば,十分な実測 データとの比較が行えないままに数値解析結果が提 示される場合が非常に多い. それは,河川空間のよ うに広域にわたる流れ場を計測できる手法がこれま であまりなかったためと言える.

ー断面における河川の計測法としては,流量計測が 主体の様々な手法が新たに提案され,各手法の計測 精度についての比較検討が行われつつある¹⁾.代表 的な手法としては,橋上からロープで牽引しながら 詳細な内部流速分布を計測できるADCPを用いた方 法^{2.3)},表面流のビデオ画像を用いる手法^{4),5),6)},あ るいは,電波式流速計を移動しながらあるいは複数 台設置して計測する方法⁷⁾などがある.この中で橋 の存在を意識しないで,ある範囲の河道区間を計測 できるのは画像解析のみであるが,ADCPについて も流速が高速でなければボートに搭載して移動しな がら広い範囲の三次元計測を行うことが可能である. 例えば,Tsubakiら⁸⁾は,網の目状にボートを移動し て得られた大量のADCPデータから,流れの三次元 構造を抽出する新たな補間法を提案している.最近 では,ADCPを小型のラジコンボートに搭載し,遠 隔で操縦しながら流れ場を計測できる機器^{9,10)}も開 発されている.

画像解析に関しては、気象観測用の鉄塔から水制群 を含んだ宇治川の洪水の表面流を複数アングルで撮 影し、100m程度の河道区間の流速分布をLSPIV

(Large-Scale Particle Image Velocimetry)¹¹⁾により計 測した事例¹²⁾がある.また、トレーサを用いて平水 時の宇治川を可視化し、ヘリビデオ画像解析により 表面流速分布を求めた例¹³⁾、さらには淀川で発生し た洪水流を、合流する三川(宇治川、木津川、桂川) を含めて数キロに渡ってヘリビデオ撮影し、表面流



図-1 計測地点の概要(魚野川根小屋橋地点)

速分布から流量の収支を検討した例¹⁴などがある. Fujitaら¹⁴は、空撮ビデオによる画像解析をAerial LSPIVと名付けている.

以上のように、一定距離の河道区間の流況をADCP やビデオ画像を用いて調べた研究はこれまで行われ ているが、両方の手法を同時に使って流れ場を調べ た例はない.そこで、本研究では、魚野川(信濃川 支川)の融雪洪水を対象として両手法による同時計 測を実施し、画像計測法として用いたSTIV(Space-Time Image Velocimetry)¹⁵⁾の精度や流れ場の内部構 造について検討を行った.

2. 現地計測の概要

魚野川における観測は, 平成 25 年 4 月 19 日から 21 日にかけて実施した.この観測は,土木研究所 と水工学委員会流量観測技術高度化小委員会の合 同観測の一環として行われたものである.本解析は 4 月 20 日に実施した結果に基づいている.対象区 間は,新潟県魚沼市堀之内地点にある根古屋橋地点 より上流側の約 500mの河道区間である.図-1 に観 測区間の概要を示す.根古屋橋下流の断面では,多 手法(ADCP, STIV,電波流速計,電磁流速計およ びプライス式流速計)による流量の計測を平成 24 年度と同様に行っているが,4月 20 日の日中の水 位変動は図-2 に示すようにほとんどなく,定常流 と見なせる時間が半日以上続いた.このため,多少 時間をかけて行った ADCP による結果を画像解析 と正確に比較することが可能となった.

(1) ビデオ画像による観測

根古屋橋上流域の左岸堤防上に配置した3台の ビデオカメラの位置と撮影アングルの概略を図-1 に示す.上流側と下流側のカメラの設置間隔は約 300mで中間のカメラは、上流から約100mの地点 に設置した.今回の観測では、1台のビデオカメラ の撮影アングルを段階的に回転させ、視野に入る水 面をほほすべてカバーできるようにした.ここでは、 根古屋橋直上流の左岸堤防上に設置したカメラを



Camera A, 中間の左岸堤防上カメラを Camera B,そ して最上流の左岸堤防のカメラを Camera C とする. 高水敷の右岸側(カメラの対岸側)には一辺が 90cm の標定パネルを多数ジグザグ配置し,カメラに近い 左岸側用には一辺が 30cmの小型標定パネルを適宜 視野内に入るように配置した.すなわち,どのアン グルにカメラを向けても1画面内に6個程度は標定 パネルが写りこむようにした.STIV や LSPIV など の河川画像計測において,水面に対する斜め画像の 座標と対応する物理(測量)座標の写像関係式に二 次射影変換式を使う場合には上記のような標定点 が最低 6 個必要であるが,本研究ではカメラの物理 座標も測量して写像関係(共線方程式)を求めてい るため,標定点個数がそれより少ないアングルでも 写像関係式を求めることができた.

ビデオによる撮影は、10時から18時までの毎正時に各アングルに向けて数分ごとにカメラを振り向けた. Camera A では根古屋橋より上流側で3アングル(angle A-1~A-3), Camera B では上下流域を含んだ5アングル(angle B-1~B-5), Camera C では水位観測所より下流の4アングル(angle C-1~C-4)を基本とした.異なる時刻の撮影時における各アングルの再現性はないが、対岸の特徴点との対比からできる限り、同様の画像となるように心がけた.

(2) STIV による表面流計測

STIV ではまず、主流の向きと一致するように斜



図-3 各アングルの画像と検査線設定状況(カッコ内は、順に検査線長と間隔)

め画像上に一定長さの検査線を想定し、浮遊物や波 紋が検査線上を通過することによって変化する線上 の輝度分布を時空間画像(STI:Space-Time Image)とし て表現する. STI には波紋などの移流によって斜め パターンが現れるが、その勾配は検査線上を通過す る流れの平均流速と一対一の関係にあるため、簡単 に流速を求めることができる. 通常の STIV 計測で は流量観測のために、流れに垂直方向から撮影した 画像を利用するが、今回の計測では敢えて撮影の向 きを上下流に振ることで、広範囲に渡る流速分布の 取得し,同時に遠方の計測を試みることで撮影俯角 の限界を調べた.3 つのカメラの代表的な撮影アン グルで検査線を設定した画像を図-3に示す.この図 では、アングル毎に代表的な検査線群を設定した状 態を示した. どのアングルでも根古屋橋が撮影され ていることがわかるが、Camera Cからみれば非常に 遠方となり,波紋を識別できなくなるため,橋の直 上流の計測が困難であることは容易に想像される. ここでは、同一横断面を複数のアングルから計測し た結果を比較して計測限界を調べる.

(3) ラジコンボート搭載 ADCP による計測

通常,流量計測に用いるADCPはロープを取り付けた小型ボートの下面に取り付け,橋上から人力でロープを横断方向にけん引しながら左岸・右岸を往復して移動計測するが,計測断面を挟んだ上下流の流れ場の流況は得られない.他の方法として数人乗りのボートの末端にADCPを取り付けて移動計測することは可能であるが,計測作業員がボートに乗り込むため,洪水時の計測は危険で避けた方がよい.この点を解消するための機器がラジコンボート搭載のADCPであり,我が国では木下ら¹⁶⁾の洪水計測を端緒とする.その後の計測機器の改良で,現在ではラジコンボート搭載型のADCPが製品化されており,



図-4 ラジコンボート軌跡と水面近傍ベクトル

今回,使用した機器も最大流速が3m/s程度までなら 計測できる仕様となっている.実際には、今年より 流量の大きかった昨年度にも同じ機器による計測を 同じ地点で試みているが、昨年度は最大流速が3.5~ 4m/sと今年より大きく、計測は途中で断念せざるを 得なかった.本年度は図-2で示したように流れの状 態が長時間一定であり、また最大流速が3m/s程度と 使用機器の性能を最大限発揮できる流況が広範囲に 分布していたため、良好な結果を得ることができた. 本年度のラジコンボートの軌道と水面最近傍の流速 ベクトルを図-4に示す. ADCPの計測条件は, 層数: 40層, 層厚: 0.1m, 1層目層厚: 41cm, 観測モード: ハイスピードサンプリングモード(WM12),メイン ピング: 2ping, サブピング: 10ping, 精度: 6.95cm/s(1 データ当たりのstd.), データ取得間隔:約1.6秒など である.計測は4月20日の13:37から14:13までの約30 分間,図-4に示すように3つの連続軌道に分けて行っ た. 軌道延長はのべ約2km, 流下距離で約400mに及 ぶ. ラジコンは、対象とした河道区間をくまなくカ



左(①):縦 300pixel(10sec),横 342pixel(21.3m),流速 2.36(m/s) 中(②):縦 300pixel(10sec),横 322pixel(21.3m),流速 2.47(m/s) 右(③):縦 300pixel(10sec),横 210pixel(21.3m),流速 1.38(m/s)

120

図-5 STIV による表面流速の一例

(c) ST I



バーするために,ジグザグな軌道を描きつつ河岸に 接岸しないように慎重に操縦した.

3. 結果および考察

ここでは、STIV による表面流速の計測と ADCP による水面近傍流速の比較,および ADCP による内部流速場の空間構造に関する考察等を示す.

STIV による表面流速分布

図−5 に典型的な STIV 計測例として, Camera C の Angle C-4 に対する幾何補正画像, 主流速分布, およ び代表的な STI を示す. 検査線は 25本, 長さ 21.3m, 間隔 4.4m で約 110m の水面幅をカバーしている. 俯 角は 2.94 度から 18.88 度の範囲である. 各 STI には 鮮明で直線的な一様パターンが現れており、パター ンそのものの継続性も高い.これは,水面波紋がそ のままの形状を保ちながら数秒程度移流しているこ とを示唆する. このようなパターン移流速度が表面 流速を表すものとして得られた分布は最大流速が左 岸側にシフトした形状となっている. この断面の最 大流速は2.7m/s程度でラジコンボート計測の性能限 界に入っている. 同様の解析をすべての検査線に対 して行い、二次元補間した結果をラジコンボートの 軌跡とともに図-6に示す. 左岸側に寄った主流は計 測区間全体にわたって継続しており, 下流端では高 速域が幅広く拡がっていることがわかる. 計測され た最大・最小流速はそれぞれ 2.9m/s と 0.5m/s, 使用





した検査線の中点に対する俯角で最小値は 2.4 度で あった. 主流が左岸にシフトしているのはこれより も上流で河道が大きく湾曲しているためと考えられ る.

(2) STIV の計測限界

図-6に示した STIV 解析ではカメラから対岸まで の距離が 150m 程度の場合,対岸の水際を見通す俯 角は3度程度と大きな値ではなかったが,STIには 明瞭な斜めパターンが現れており,基本的な計測に 問題は生じなかった.ただ,水面幅がさらに大きな 河川へ STIV を適用しようとする場合には,俯角や 水面幅に関する限界があるのは確かである.そこで, ここでは同一地点に対する流速を上流や下流に向け たアングルと真横のアングルの画像から同時に求め て値を比較する.その方法として,まず,河道中央



付近に図-6に示した縦断測線を設定する.次にアン グル毎にその縦断測線に沿った検査線を多少オーバ ーラップさせながら多数設定し,各検査線に STIV を適用して流速の縦断分布を求める.この際,検査 線の中点に対する俯角とその地点での1画素サイズ も調べる.

まず,3 台のカメラからの俯角と空間解像度の関係を図-7 に示した.favorable はパターンが鮮明, critical は不鮮明,difficult はパターンの識別ができな かった STI をさす.STIV は本来ノイズに対してロバ ストな画像計測手法であるが,カメラから遠距離に なるほど空間解像度が低下して波紋の識別が困難に なるのが原因である.このことから俯角の計測限界 は2度程度,空間解像度の限界は1 画素が0.4m 程度 と考えられる.実際には,俯角が小さくても空間解 像度が高ければ波紋移流は検出できるはずなので, STIV の計測限界の目安としては1 画素サイズが約 0.4m という条件をここに提案する.

図-7 の favorable に相当するデータを重ね合わせ てプロットしたのが図-8 である.検査線がカメラ設 置位置からかなり離れると計測された流速値に差異 が生じる場合があることがわかる.

(3) ADCP による表面流計測と STIV の比較

図-4 に示したラジコンボートの軌跡上の流速値 のうち,水面最近傍のデータ(水面下 41cm)を二次 元補間した結果を図-9に示す. データの補間方法は 以下の通りである.まず,対象区間を縦・横断方向 にそれぞれ MX と MY のメッシュに分解する. ここ では, MX=80, MY=50 としている. 次に, 各メッシ ュを中心とする円を想定し、この円内に ADCP デー タが5個以上となるまで水平面内で半径を段階的に 増大させる.最後に円内のデータを距離の逆数を重 みとして平均する. 図-9 と図-6 を比較すると STIV と ADCP による流速の空間分布は河岸付近のデータ を除けば全体的によく似ている. 河岸近くのデータ が一致しないのは、ラジコンボートは河岸の極近傍 までは近づけないためにデータがほとんどなく、河 岸付近のデータは主流側のデータを用いて補間され ているためである.定量的な比較のために、アング ル A-2, B-2, B-4 について比較したのが図-10 であ



る.上述の理由により河岸付近のデータを除けば定 量的にも両手法による表面流速分布はよく一致して いると言える.主流域で見られる数値の差異は, ADCP では少ないデータを用いて補間処理を行って いるためである.

(4) ADCP による内部流計測データ処理

ADCP のデータについては、内部流速や河床高に ついても図-9 とほぼ同様の補間処理を行った.図 -11 に水深分布を示す.ここでは河床形状の特徴を わかりやすくするために、移動平均して平滑化した データを示している.図より澪筋が左岸側に寄って いることや、根古屋橋に近づくにつれて若干堆積傾 向となっていることがわかる.これは、橋脚による セキ上げ効果のために掃流力が局所的に低下してい るためと思われる.上流側左岸では深掘れが続いて いるが、これは水位観測所の構造物の下流域に位置 しており主にその影響と思われる.

図-12 には各メッシュ上に補間した鉛直流速分布 から求めた更正係数の分布を示す.ここでいう更正 係数は,鉛直流速分布の平均流速を表面流速で割っ た値とする.水深は各メッシュ毎に異なるため,底 面から水深の 10%の高さよりも下層ではべき乗則 で流速分布を補間して更正係数を求めた.これより, 更正係数分布は概ね一般的な値である0.85程度の値 を示しているが,堆積傾向にある下流側の領域では 若干値が小さくなっている.この場所では水深は減 少傾向だが,底面粗度の影響を受けた低速の層厚は



図-12 更正係数の空間分布とラジコンボート軌跡

あまり変化しないため、相対的に低速域の占める割 合が増大する.更正係数が減少しているのは、その ためだと考えられるが、この点については、今後さ らに詳細な検討が必要である.

4. おわりに

本研究では、河川表面流の画像計測手法である STIV とラジコンボートに搭載した ADCP という全 く計測原理の異なる手法により,魚野川における約 500mの河道区間を対象とした流れ場の空間計測を 行った.3台のビデオカメラの撮影アングルを固定 せず,上下流に振り向けることにより,この河道区 間の表面流速場を精度よく計測できることを ADCP との比較から示すことができた. STIV につ いては計測限界に関する提案も行った.一方,ジグ ザグに航行した ADCP のデータについては, 効率 的に二次元補間する方法を考案し,得られた三次元 流速データからは更正係数の平面分布を求めた.本 研究で求めたようなプロットはこれまでの計測法 では得られなかったものであり, 今後, 計測事例を 増やし,更正係数と河床形状の間の関連性について さらに詳しい検討を進めていく予定である.

謝辞

本研究は,流量観測技術高度化小委員会と土木研 究所の合同観測の成果の一部であるが,観測は参加 していただいた数多くの方々の協力によって実現 できた.特に,水文環境,ニュージェック,横河電 機の方々には大変お世話になった.ここに記して謝 意を表します.

参考文献

- 藤田一郎・小阪純史・萬矢敦啓・本永良樹:遠赤外線 カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測,土 木学会論文集 B1(水工学),Vol.69, No.4, I_703-I_708, 2013.
- 2) 萬矢敦啓・岡田将治・橘田隆史・菅野裕也・深見和彦: 高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関 する提案,河川技術論文集,第16巻, pp.59-64,2010.
- 岡田将治・萬矢敦啓・橘田隆史・菅野裕也・深見和彦: ADCP を用いた洪水流観測の計測精度評価に関する 総合的検討,水工学論文集,第 55 巻,pp.1183-1188, 2011.
- Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resources Research*, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 5) 藤田一郎・河村三郎:ビデオ画像解析による河川表面 流計測の試み,水工学論文集,第38巻, pp.733-738, 1994.
- 6) 藤田一郎:非接触型流速計測法を用いた実河川流の計 測と問題点,ながれ,第26巻,5-12,2007.
- 山口高志・新里邦生:電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, No.497/II-28,pp.41-50,1994.
- Tsubaki, R., Kawahara, Y., Muto, Y. and Fujita, I.: New 3-D flow interpolation method on moving ADCP data,*Water Resources Research*, 48, W05539, doi: 10.1029/2011WR010867, 2012.
- 9) 橘田隆史・岡田将治・新井励・下田力・出口恭: ラジ コンボートを用いた ADCP 移動観測の計測精度評価 法に関する一考察,河川技術論文集,第 14 巻, pp.295-300, 2008.
- 10) 岡田将治・橘田隆史・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 流観測,水工学論文集,第52巻, pp.919-924, 2008.
- 11) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 12)藤田一郎・武藤裕則・島津良郎・椿涼太・綾史郎:L SPIV法による水制周辺部の平水時および洪水時 流れに関する検討,水工学論文集,第47巻,pp. 943-948,2003.
- 13) 江藤剛冶・竹原幸生・高野保英・奥野訓史・藤田一郎・ 酒井信行:ローカルリモートセンシングによる河川表 面流のPTV計測の試み,土木学会論文集, No.796/II-72, pp.39-52, 2005.
- 14) Fujita, I. and Kunita, Y.: Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera, *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 5, Issue 4, pp. 323-331, 2011.
- 15) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 16) 木下良作・中尾忠彦: ADCP による河川流量の測定と 河道水理機構の観測, 土木学会誌, Vol.92, No.10, pp. 68-71, 2007.

(2013.9.30 受付)