

画像解析による河川流速計測における 撮影・標定技術の開発と適用性試験

DEVELOPMENT AND TEST FOR VALIDITY OF RECORDING AND ORIENTATION MEASUREMENT TECHNIQUES TO CURRENT MEASUREMENT USING IMAGE ANALYSYS

小林範之*・渡邊明英**・野谷靖浩***・藤田一郎****

By Noriyuki KOBAYASHI*, Akihide WATANABE**, Yasuhiro NOYA*** and Ichiro FUJITA****

Abstract: An orientation measurement method which used auxiliary recording instruments was developed to enhance applicability and operating efficiency of the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and the Space-Time Image Velocimetry (STIV), the non-contact current measurement methods which applied image analysis techniques. The method allows a video camera to obtain necessary parameters using the conventional orientation method which requires predetermined control points at an observation site. The validity was verified by field tests.

By using this method, field observations can be carried out without the reference marks at the time of observation, consequently saving the efforts of orientation measurement.

Key Words: non-contact current measurement, LSPIV, STIV, river surface flow

キーワード: 非接触流速計測、LSPIV、STIV、河川表面流速

1. はじめに

雨量や河川の水位・流量といった水文データは河川管理における基本的な情報であり、流量データ取得の一環として低水流量観測には可搬式流速計を用いた流速計測法が、高水流量観測には主として浮子法が用いられてきた。高水時の河川流量や流況の観測は河川管理上の重要な業務であるが、浮子法による観測については観測精度上の課題が指摘^{1) 2)}され、様々な新技術も開発されているが、悪天候下での観測となるため作業上の安全確保や、観測機器に作用する流水の流体力、流木等の浮遊物の衝突による観測機器の破損リスク増大など、観測を実施する上で厳しい条件に対応する必要がある。

これらの課題に対応した観測技術として、ドップラー効果を利用した電波流速計や画像解析の応用といった非接触流速計測技術が期待されている。このうち、画像解析を応用した実河川に適用可能な非接触流速計測技術としては、LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) やSTIV (Space-Time Image Velocimetry) 等の手法が開発されている^{3) ~10)}。

非接触で河川流速を計測するこれらの技術は、洪水時の観測に適した手法といえるが、単写真標定の技術を応用している計測原理から、観測時には現地における標定作業が必要である。そのため、LSPIVやSTIV等の適用性は、標定作業の実施可能性に依存するところが大きく、急な増水等による緊急時の観測や川幅の大きな河川で標識設置や標定測量が困難な場合など観測の制限要因となっていた。

今回適用した手法は、測量の分野で使われていた写真経緯儀の標定手法を応用することにより、現地への標定点設置や標定測量を行うことなく、撮影画像をオルソ画像に三次元射影変換するのに必要な標定パラメータを取得する方法である。これにより現地に標識等の既知点を設けずに観測を行なうことを可能とし、画

* 農修 (株)東京建設コンサルタント 環境モニタリング研究所 TOKEN C.E.E. Consultants Co.,Ltd.

** 工博 (株)東京建設コンサルタント 環境防災研究所 TOKEN C.E.E. Consultants Co.,Ltd.

*** (株)東京建設コンサルタント 環境モニタリング研究所 TOKEN C.E.E. Consultants Co.,Ltd.

**** 学博 神戸大学大学院教授 大学院工学研究科 Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, KOBE University

像解析による流速観測の適用性を大きく拡張し、また省力化が期待できるものである。

2. 新規開発した技術の内容

(1) 座標系と変換式

LSPIVやSTIV等の画像解析による流速計測法を適用するには、対象河川を斜め撮影した画像を幾何補正して無歪みオルソ画像を生成するための変換パラメータを求める標定作業が必要である。

一般的な単写真標定では、図-1に示すとおり、観測対象の空間は三次元の物理座標系で表現されるのに対し、撮影された水面の画像は二次元の画像座標系で表現されるため、三次元写真測量における一般的な共線条件式を変形して整理した以下の平面对空間の関係式を用いる。なお、ここで物理座標系は、水平面をXY平面とし高さ方向をZ軸に対応させた三次元の座標系としており原点や方向等は任意で構わないが、測量座標系を使用すると観測データと地図データとの対応等をとる場合に便利である。

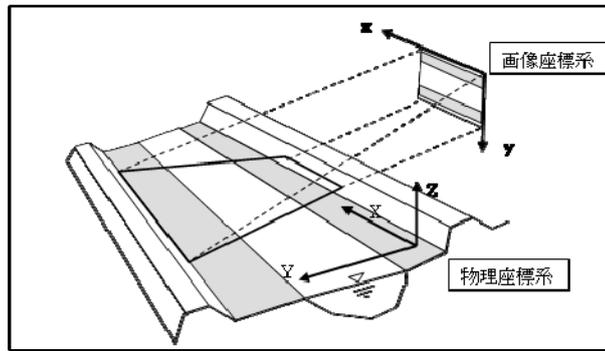


図-1 単写真標定における空間座標系と画像座標系の関係

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (2)$$

ここで、11個の係数 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 、 $C_1 \sim C_3$ は M 点 ($M \geq 6$) の標定点座標を用いて最小二乗法により求めることができる。

前述の式(1)、(2)に対し、以下の共線条件式¹¹⁾をもとに三次元射影変換を行う。

$$x_1 = -c \frac{a_{11}(X_1 - X_0) + a_{12}(Y_1 - Y_0) + a_{13}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (3)$$

$$y_1 = -c \frac{a_{21}(X_1 - X_0) + a_{22}(Y_1 - Y_0) + a_{23}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (4)$$

ここに、 x_1, y_1 :対象物 p が写っている画像上の写真座標、 X_1, Y_1, Z_1 :対象物 p の地上座標、 X_0, Y_0, Z_0 :投影中心(レンズ中心)の地上座標、 c :焦点距離、 a_{ij} :カメラ角度に関する次式の係数である。

$a_{11} = \cos \phi \cos \kappa$	$a_{12} = -\cos \phi \cos \kappa$	$a_{13} = \sin \phi$
$a_{21} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa$	$a_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa$	$a_{23} = -\sin \omega \cos \phi$
$a_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa$	$a_{32} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa$	$a_{33} = \cos \omega \cos \phi$

本手法において取得するパラメータは、 c (カメラの焦点距離)、 ω (カメラ俯角)、 ϕ (カメラの左右の傾き)、 κ (カメラの方向)、及び $h=Z_0-Z_1$ (水面とカメラの比高)である。また、 Z_1 は観測対象の水面の高さで、一様な高さの水平面と仮定し、水面上の点の物理座標と画像座標の関係が式(3)、(4)で求められる。

なお、 c は、レンズの焦点を ∞ に設定して事前にカメラの内部標定により計測し、観測時にはオートフォーカス機能は使用しないで撮影する。 ϕ は今回開発した撮影補助具によりカメラの傾きを無くすことにより0とおくことができ、撮影方向を基準にすることにより、 κ も0とすることができる。

注意すべき点は、上記パラメータによる変換は、水面上の点を対象として無歪画像に変換するものであり、水面と異なる高さの地物は正しく変換されない。図-2は取得するパラメータとカメラの傾きの関係である。

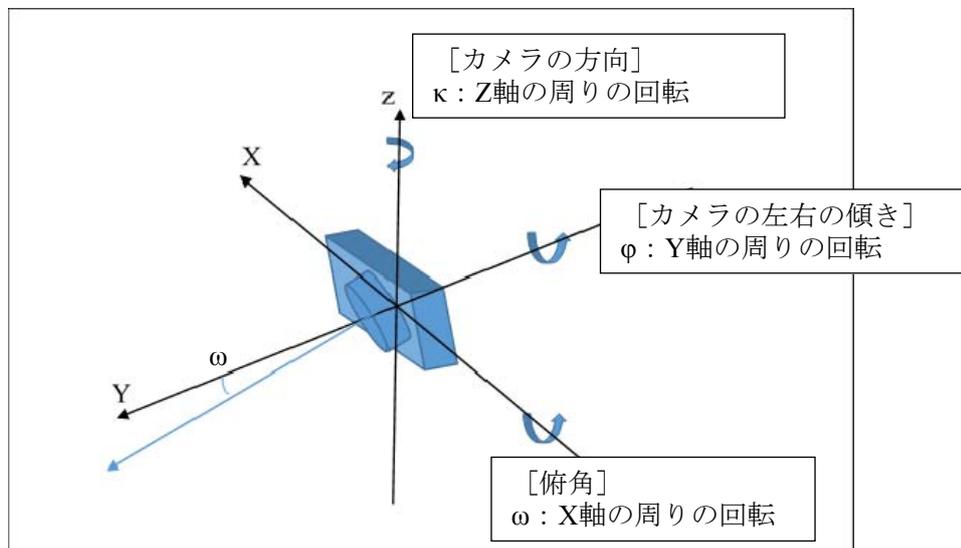


図-2 取得するパラメータとカメラの傾きの関係

今回適用した技術では、事前に内部標定を行ってカメラの光学特性を精密計測したカメラと、高精度の傾斜計を組み込み撮影時のカメラ光軸の角度を精密に計測できる撮影補助具を用いて撮影することにより、現地への標識設置や標定測量を行わず、カメラの外部標定（現地での撮影条件の標定）を可能とする手法である。これにより、現地で計測する標定要素は、新たに開発した撮影補助具により簡単に計測可能なカメラの俯角と、現地計測が容易な水面とカメラの比高のみで流速計測可能となる。

GPSコンパス等の利用により ϕ 、 κ の計測機能も付加した形で撮影補助具を作成することも可能であるが、今回は流況観測用に絞って適用性の向上と観測の簡便性に重点をおいて開発を行うこととし、取得するパラメータは事前にカメラの内部標定により求める c と、撮影補助具により測定する ϕ 、及び比高 h のみとした。

(2) 内部標定要素の計測（歪み補正方法）

複数の標識を設置し最小二乗法により標定諸元を求める方法ではなく、カメラ側で取得したパラメータのみで精度を確保するために、事前にカメラの光学特性を精密計測し内部標定を行った。

カメラの光学特性の精密計測、及び解析は、デジタル写真測量用に市販されているカメラキャリブレーションソフトウェア「Image Master Calib」（株式会社トプコン社製）を使用した。当該ソフトウェアでは、専用のキャリブレーションシートを5方向から撮影し、取得した画像からカメラの光学系の以下の7つのパラメータを求めている¹¹⁾。

- | | |
|-----------------|--|
| 1) レンズの焦点距離 | : f （前述の共線条件式からもとめた三次元射影変換式(3) (4)で焦点距離は c としたが、当該ソフトウェアでは、焦点距離は f として出力される) |
| 2) レンズの歪み（放射方向） | : $K1, K2$ |
| 3) レンズの歪み（接線方向） | : $P1, P2$ |
| 4) センサの主点位置 | : X_P, Y_P |

図-3は、キャリブレーションソフトを用いたカメラパラメータの解析と出力例である。

内部標定要素のうち、本手法において計測精度に特に影響のあるパラメータは、レンズの焦点距離 f である。レンズディストーション等の歪みも同時に計測されるが、試験に用いたデジタル一眼レフカメラ (CANON EOS 6D) とレンズ (CANON LENS EF 50mm) の組み合わせでは歪みの量は小さく、特に河川流速計測の際に使用する撮影画角の中央付近については歪みの量は僅かであった。

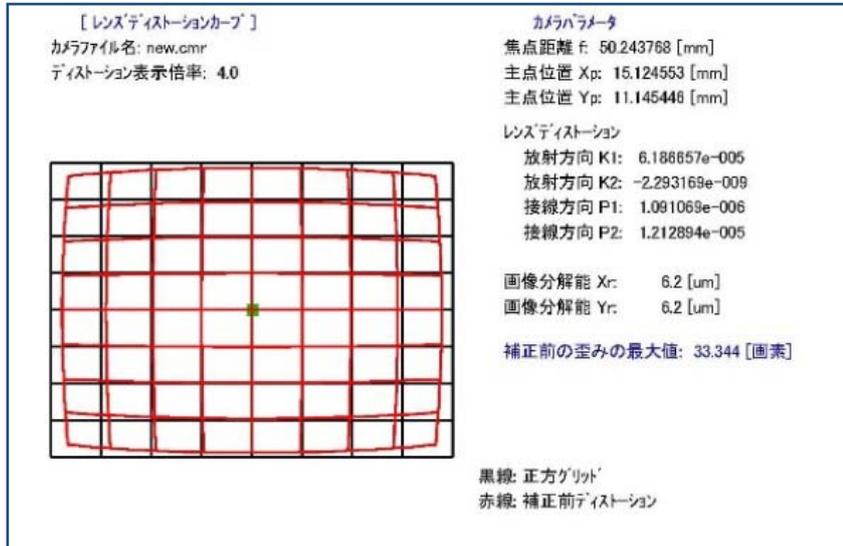


図-3 キャリブレーションソフトによる内部標定要素の計測例

(3) 撮影補助具を用いた外部標定要素の計測

外部標定要素のうち ω (撮影俯角) を計測するための、専用の撮影補助具を開発した。撮影補助具の概要を以下に示す。



写真-1 カメラを取り付けた状態の撮影補助具

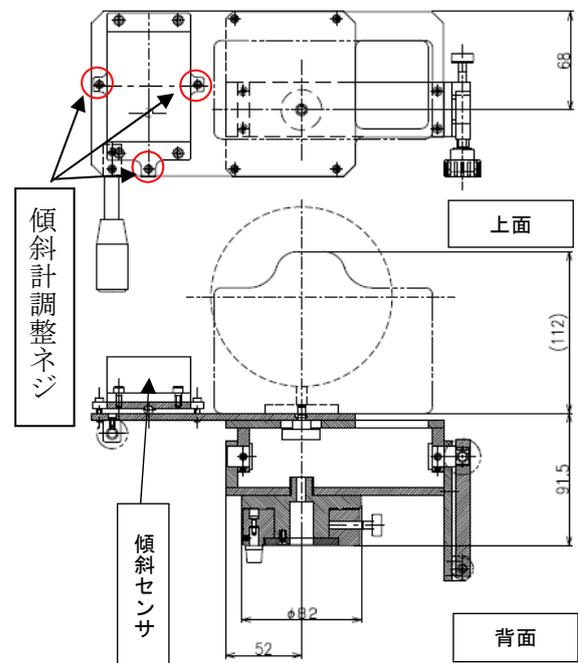


図-4 撮影補助具の基本形状 (単位mm)

写真-1は、開発した撮影補助具にカメラを装着した状態の写真である。

図-4に示す撮影補助具は、カメラの傾き (ω 及び ϕ) を正確に計測するため、測量機器に用いられる整準台を用いて水平面を確保した上で、傾斜センサを一体化したカメラ雲台にカメラを取り付けて撮影する。

また、カメラの光軸と傾斜センサの計測値が一致するよう、傾斜センサの取り付け部分には調整機構を組

み込み（図-4の傾斜計調整ネジ）、事前にセンサとカメラ光軸とを一致させるよう調整した。

傾斜センサのデータは、PCの通信プログラムによりリアルタイムで毎秒1データ取得し、PCの記録媒体に記録する。傾斜角の値は1/100度単位でPCに取得し、時間内の平均をとって撮影俯角とした。

現地で取得するこの他の外部標定要素に h （水面とカメラの比高）があるが、これはカメラ設置高と水位から求めることができる。水位は、スケールを決める重要なパラメータであるが、高水時は水面が大きく波うつため水文観測業務規定等に準じて水位計または現地に設置した水位標により平均的な水面高を計測する。

3. 計測精度の検討

事前に内部標定を行ったカメラと、高精度の傾斜計により撮影時のカメラ光軸の角度を精密に計測できる撮影補助具を用いて撮影することにより、現地への標識設置や標定測量を行わず、カメラの外部標定（現地での撮影条件の標定）を可能とする手法を開発し、室内試験と魚野川、及び信濃川における現地試験を実施し、適用性、精度の評価を行った。

画像解析による流速計測において、流速計測誤差の主要な要因は、幾何補正に伴う変換誤差と動画像から単位時間当たりの流体の移動量を検出する追跡誤差に分類することができる。

移動量検出のアルゴリズムは現地に既知点を設けて標定測量を行う従来手法と同じであることから、ここでの誤差の評価は、標定方法の違いによる幾何補正の精度について評価することとした。

（1）室内試験による検討

室内試験により、カメラ側の変換パラメータのみでどの程度の計測精度が期待できるかを検討した。

室内試験は、方眼紙を水平な台の上に置き、撮影補助具を用いて撮影を行ない、得られた変換パラメータを適用して幾何補正画像を作成し、画像上で計測した方眼の大きさと実際の大きさを比較して幾何補正による誤差の評価を行った。

室内試験では、方眼紙とカメラとの比高を0.4mに設定して撮影した。写真-2は試験用に室内で撮影した画像である。

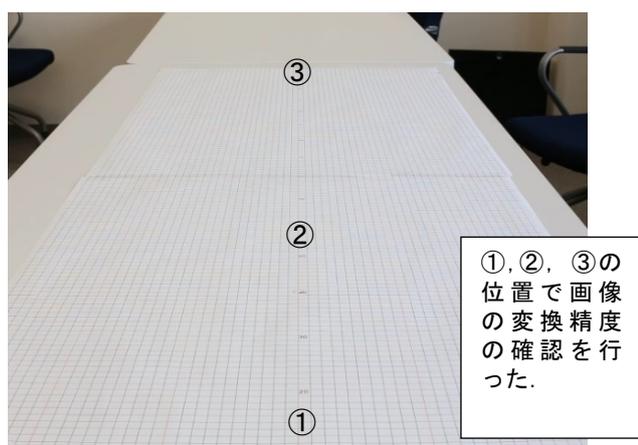


写真-2 室内試験用に撮影した方眼紙の画像



写真-3 幾何補正（オルソ）画像

この画像を、前述のカメラの内部標定で求めたパラメータによりレンズの歪みを補正処理し、さらに、 ω （撮影俯角）と h （カメラと被写体の比高）をもとに射影変換を行って作成したオルソ画像が写真-3である。

画像の変換誤差は、画像上に示した①～③の箇所を確認した。①は撮影画像における最近点であり、②は主点付近、③は最遠点である。写真-3の画像上で、方眼の大きさをピクセル数のカウントにより計測した画像計測値と、実寸法（実際の方眼の大きさ；1cm×1cm）との比較により変換誤差の発生状況を評価した。

表-1 変換画像の画像計測値の誤差

箇所	カメラからの距離	比較値 (mm)		誤差 (%)	備考
		実寸法	画像計測値		
①	70cm	100.0	98.3	-1.7	
②	115cm	100.0	101.7	1.7	画像中央
③	228cm	100.0	114.3	14.3	

注1) 表中の“実寸法”は方眼10メッシュの大きさであり、何れも100mmである

注2) 計測時の画素寸法は、0.5744856mm/ピクセル

なお、レンズ歪み補正の効果については、今回の室内試験が簡易的なものであるため精密な定量評価は今後の課題とし、カメラからの距離による誤差の発生傾向を確認することとした。

カメラから近い①や画像中央付近のひずみの少ない②の領域の変換精度が高く、カメラから離れた③の精度が悪い。実河川でどの程度の距離まで本手法が適用できるかについては、室内試験における箇所③の誤差が特に大きかったことから、実河川での比較観測等による実用範囲の見極めが必要と考える。

室内実験は、小さい空間スケールで誤差の発生特性を検討することを目的とした。カメラ解像度や傾斜センサの計測精度など、機器の精度条件は屋外観測の場合と同じであるが、現地観測時と室内試験では対応する空間スケールが大きく異なることから、今回の簡易的な室内試験により実用上の適用範囲を議論することはできないが、精度確保のための留意点として、今回適用した標定手法では、カメラの光学系が比較的歪みの少ないものを使用し、可能な限り画面中央の歪みの少ない領域の画像を流速測定に使用することが、観測精度を確保する上で重要である。

(2) 現地試験による検討

適用した標定手法の実河川スケールでの特性や適用性を評価するため、現地試験を行った。現地試験は、土木学会流量観測高度化小委員会合同観測の一環として2014年4月24日～25日に信濃川水系魚野川根小屋橋で、また、2015年4月23日～24日に信濃川水系信濃川旭橋で行ったものである。

土木学会流量観測高度化小委員会合同観測は、国立研究開発法人土木研究所が事務局となり、様々な観測手法、観測機器による観測を同じフィールドで実施し、観測データは相互に活用しあうことを基本に実施したものである。合同観測では、本論文で紹介している画像法（STIV）の他、ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler; 音響ドップラー式流速プロファイラー）、電波流速計、浮子法など複数の観測手法による試験観測が実施された。

①信濃川旭橋における試験観測

2015年4月23日～24日に土木学会流量観測小委員会合同観測の一環として信濃川水系信濃川旭橋で試験観測を実施した。対象箇所は、前年度に実施した魚野川とほぼ同程度の川幅を持ち、観測当日の水面幅は約140mであった。位置図を図-5に、ADCPによる横断流速分布観測の状況を写真-4に示す。

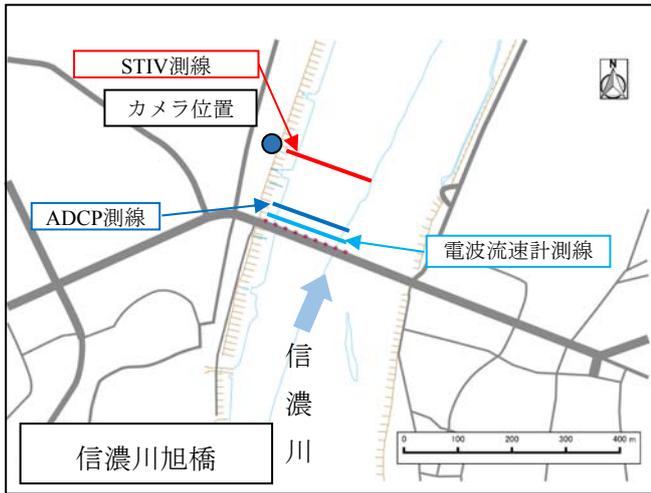


図-5 現地試験実施箇所の位置図（信濃川）



写真-4 現地試験の実施状況（ADCP）
（2015年4月 信濃川旭橋）

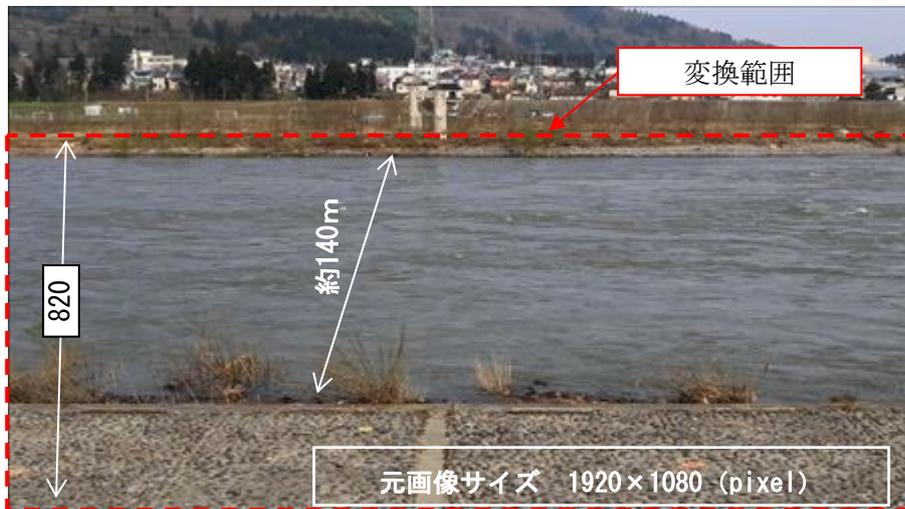


写真-5 STIV解析用に撮影した画像サンプル（信濃川 2015年4月24日16:00撮影）

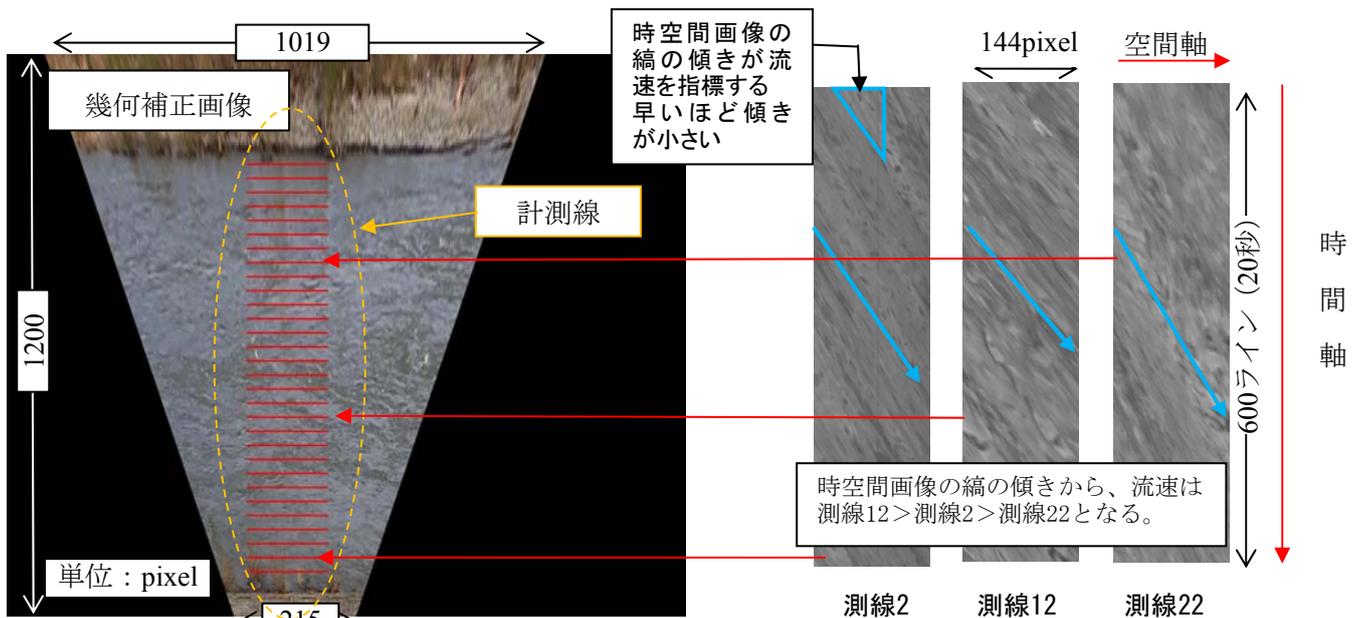


写真-6 幾何補正画像と計測測線（左），及び時空間画像サンプル（右）

STIV用の画像は、左岸堤防上にカメラを設置し、左岸から右岸を視準するように撮影した。計測位置は、ADCPと電波流速計は橋からの観測が必要であることから旭橋直下流の測線で計測し、STIVは橋脚後流の影響が少なくなる旭橋より約120m下流の位置で計測した。

STIV観測用に撮影した動画のキャプチャー画像を写真-5に示す。この画像を写真-6（左）に示すように幾何補正し、横断方向に赤の実線で示す位置に計測線を設定して時空間画像を生成した。写真-6（右）は時空間画像の例である。時空間画像の縞模様が流速を指標し、速度が速いほど縞の傾き角度が小さくなる。

ADCPによる観測は、上流側の旭橋から橋上操作艇をロープにより曳航し横断観測した。写真-7の左に示すようにADCPのセンサを搭載した橋上操作艇を、写真右のように橋上からロープで曳航し、横断観測を行なった。観測当日の流況は、最大で4m/s以上の流速があり、写真-7の観測状況でもわかるように橋脚の下流側では橋脚後流による渦や気泡の発生が顕著であった。



写真-7 ADCPによる横断流速観測の状況（2015/4/23 信濃川旭橋）

ADCP観測データは、流量観測小委員会事務局の国立研究開発法人土木研究所がデータの確認を行い、参加者共有データとして提供している。今回の比較データは、この提供された参加者共有データを用いた。

図-6に事務局より提供されたADCP観測結果と、STIVによる横断流速分布、及び同時刻に計測された電波流速計の観測結果を示す。なお、STIV及び電波流速計は表面流速、ADCPは表層（水面から33cm下層）の流

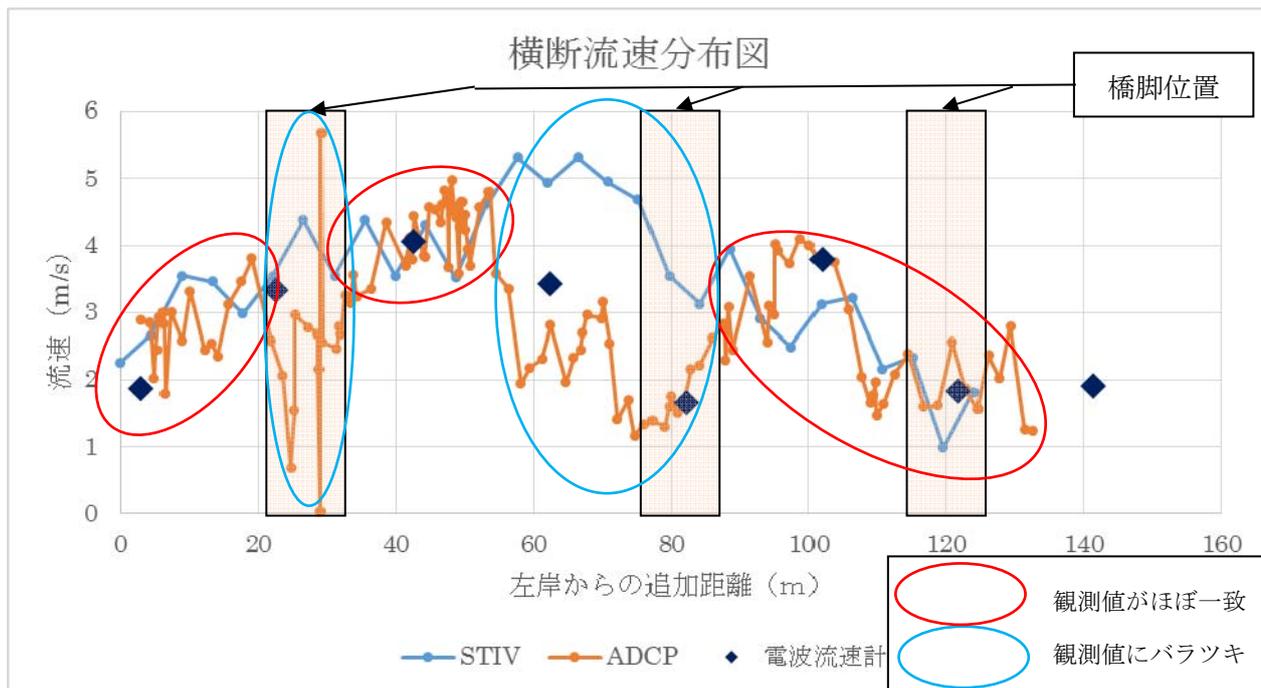


図-6 STIVによる流速分布計測結果（信濃川 2015年4月24日16:00）
[STIV及び電波流速計は表面流速、ADCPは表層流速]

速を示す。

観測結果を比較すると、各観測による流速分布は赤でマークした部分で概ね同様の傾向を示すが、青のマークの部分でバラツキがある。また、同じ測線の計測であるADCPと電波流速計はほぼ一致している。図-6には概略の橋脚位置も示しているが、図-5に示すとおり観測した測線位置がADCPと電波流速計はほぼ同じ橋梁直下流の観測であり橋脚の影響を受けて流速が大きく減速している状況（橋脚後流）がみられるが、STIVは両者の観測測線より約120m下流側で観測しており、橋脚後流の影響が減衰し、水深の大きい河道中央付近に主流のある元々の河道の横断流速分布に復帰している状況がわかる。全く同じ条件ではなかったため、流速計測に関する比較としては参考値とせざるを得ないが、橋脚後流の減衰状況など流れの状況を捉えていると考えられる。

②魚野川根小屋橋における試験観測

魚野川根小屋橋における試験観測は、2014年4月24日～25日に実施した。図-7に試験実施箇所の位置図を、写真-8に現地試験の実施状況を示した。ここでは、前述の3手法についてほぼ同じ位置での流速値の比較を行っている。

観測のために取得した河川表面の動画像データと傾斜センサーによる俯角計測値を使い、STIV法により流速解析して横断方向の流速分布を計測した。解析パラメータの h は水位からの比高を、 κ は 0とした。

また、ほぼ同時刻にADCPによる観測、電波流速計による観測が実施されていることから、これらのデータとの比較を行った。

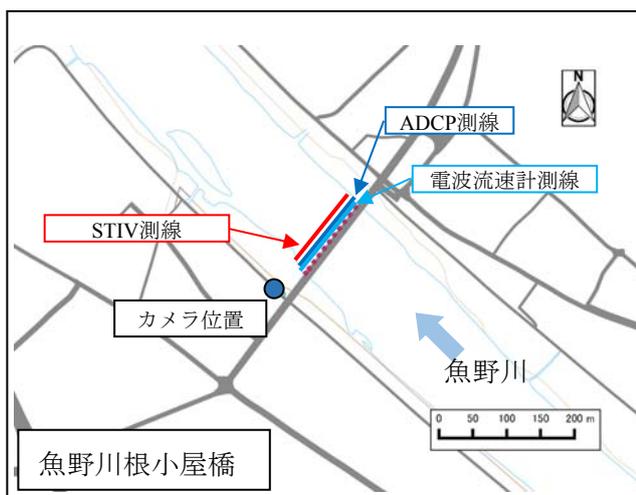


図-7 現地試験実施箇所の位置図（魚野川）



写真-8 現地試験の実施状況（STIV）
（2014年4月 魚野川根小屋橋）

図-8は本手法により撮影した画像に対しSTIV法による解析で求めた河川表面の横断流速分布と、ADCPによる横断流速観測、および電波流速計による流速観測の結果を重ね合わせた図である。

なお、観測位置、観測タイミングは厳密に一致しているわけではなく、また、ADCPの値は鉛直平均流速であるのに対しSTIV、及び電波流速計は表面流速であることから単純な比較はできないが、流速の分布形を見る限りADCPとSTIV、電波流速計で概ね整合し、特に同じ表面流速を測定しているSTIVと電波流速計の観測値は左岸側の測線1から測線21までほぼ同一値を示すなどよく一致している。

図-9は、俯角の測定誤差が与える影響を評価するため、傾斜計により測定した値から俯角を 0.05° 増減させた条件でSTIV法により流速解析した結果を重ね合わせたものである。俯角を変更することにより画像の幾何補正により生成されるオルソ画像が河道横断方向に少しずつ伸縮するため、流速解析する測線の位置にズレが生じることから流速分布の折れ線がオリジナルとは少しずつ変動する。特にカメラから離れるに従ってその影響が大きくなる状況がわかる。

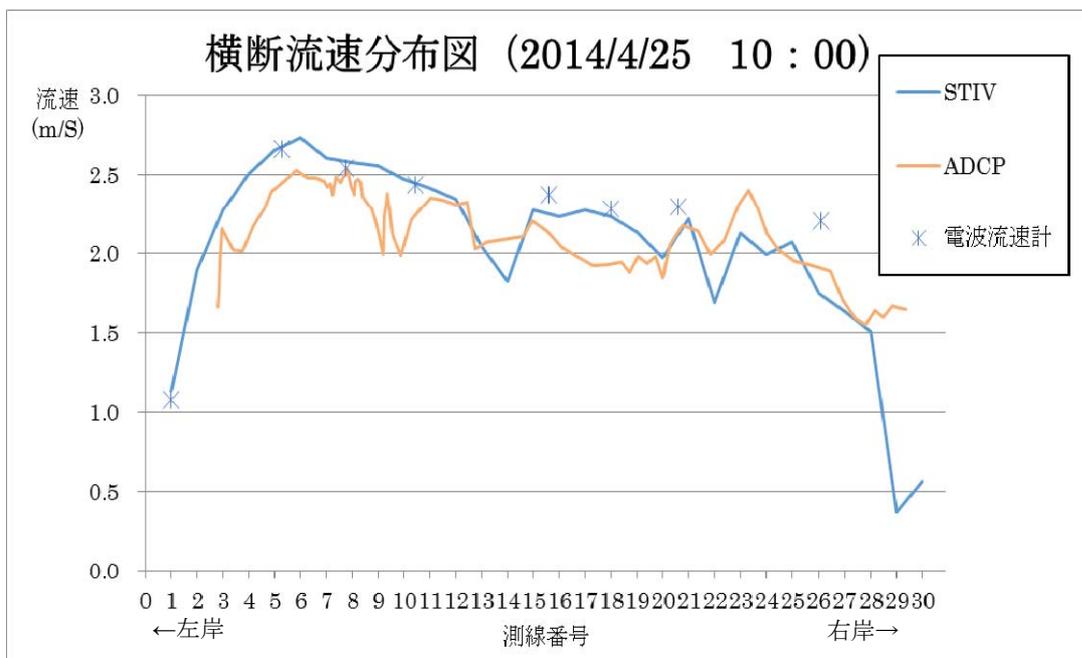


図-8 STIVによる横断流速分布計測結果（魚野川 2014年4月25日10:00観測）
（電波流速計，ADCPとの比較）

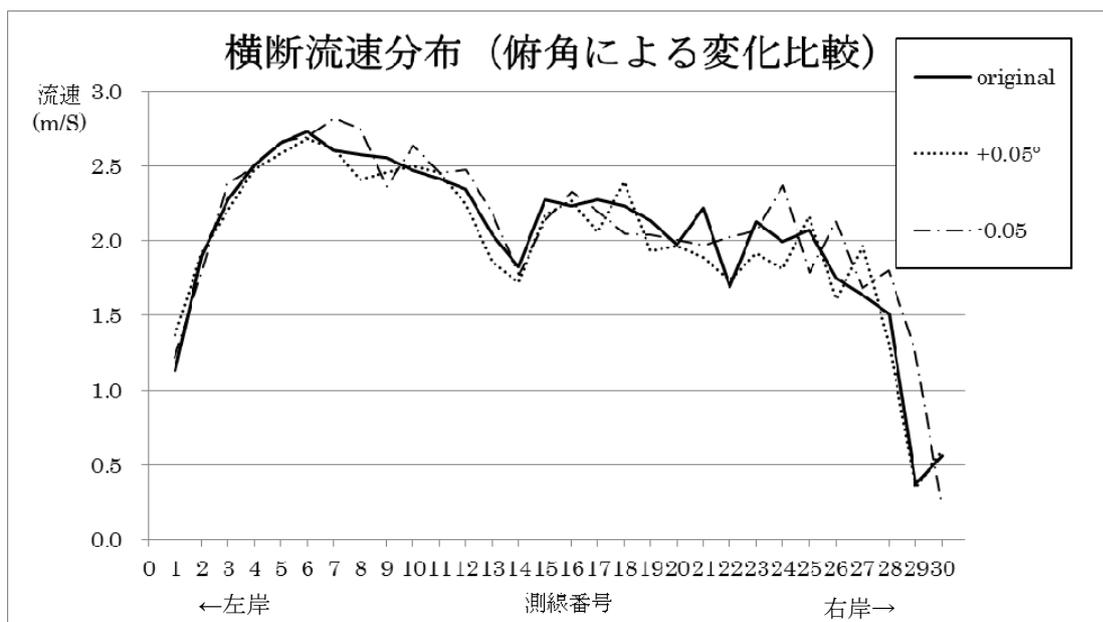


図-9 STIVによる横断流速分布計測結果（魚野川 2014年4月25日10:00観測）
（俯角の測定精度の影響比較）

しかしながら、全体的な流速分布について、計測値の変動幅は僅かであり、計測した30測線の平均流速で比較すると、 $+0.05^\circ$ で -2.4% 、 -0.05° で $+2.8\%$ であり、流速 \times 断面積で求められる河川流量観測の観点で見ると、断面計測の誤差も考慮すれば俯角の測定誤差が $\pm 0.05^\circ$ 程度なら、ADCPとの比較において10%程度の流量誤差の報告もある浮子測法による観測と比較しても、流速観測値は実用上利用可能な精度範囲で得られると考えられる。

室内実験では、カメラから離れるに従い精度の低下が見られたが、川幅160m程度の当該箇所における流況観測（流速分布、流量観測）への適用において、ADCP、電波流速計といった他手法との流速比較において概ね妥当と判断できる結果が得られた。

4. 結論

新たに開発した撮影補助具を用い、測量分野で利用されてきた写真経緯儀による標定技術を応用した観測について、流速計測法として実用上求められる観測精度を確保する上で、傾斜計に求められる角度測定精度、観測値への影響等を評価した。

魚野川の試験観測では角度に関する感度検討の結果から、川幅約160mの魚野川の現地試験では、試験に使用した撮影補助具の角度計測精度でADCP、電波流速計といった他手法との比較において、概ね同様の流速観測結果が得られた。

さらに、より高流速の発生した条件下での試験として、信濃川での観測結果からも洪水観測技術として利用可能であると考えられるが、精度や適用性の評価には今後の観測データの蓄積が望まれる。

また、実用性の面では、標定点の設置や標定測量が省略できることから、現地での作業効率の向上と、加えて川幅の広い河川や橋上からの縦断方向の撮影など、標識等の設置が困難な条件下での観測にも応用できる可能性があると考えられ、これについても定量評価に向けたデータの蓄積が望まれる。

今後も、実証データの蓄積と検証を行い実用性と精度向上を図る予定である。

5. 今後の開発課題

今回開発した撮影補助具は、測量分野で利用されてきた写真経緯儀による標定技術を応用した河川流速観測の検証を目的として、検証に必要な最低限の計測機能の確保を目指して開発したものである。

実際の観測現場においては、各種操作のインターフェースの改良、荒天時の観測にも対応できる耐候性の確保、幾何補正から流速解析まで統合化された解析プログラムの開発等が課題である。

開発過程で得られた知見や現地作業に適用する上での改善点をふまえ、今後の開発課題は以下のとおりである。

- ①**操作性の向上**：基本的な機能の検証を主目的としてカメラ、傾斜センサ、雲台、電源等各構成機器は、既製品をベースに組み合わせて製作している。そのため、画像データや傾斜計の計測はそれぞれ別個の操作が必要であり、作業が煩雑となることから改善すべき課題となっている。
- ②**耐候性の向上**：試験用に開発した機材は、降雨時の対策が施されていないため、簡易的にビニールシート等で機材を養生して対応しているが、洪水観測では降雨対策等、耐候性の向上は必須条件である。
- ③**ソフトウェアの改良と機能向上**：ハードウェアの改良とあわせ、取得した画像データや傾斜計データの取り込みや事後処理、画像の幾何補正ソフトの操作性・処理速度向上など、ソフトウェアの改良も望まれる。
- ④**精度や効果に関する実証的データの蓄積と検証**：本報告の検証データに加え、様々なフィールドや条件下での実証的なデータ蓄積をさらに進めるとともに、それらによる精度検証、作業性や経済性等も含めた定量的な評価の実施が求められる。

謝辞

本研究をとりまとめるにあたって、土木学会流量観測高度化小委員会合同観測の観測データを利用させていただいた。ADCP観測データについては、事務局である国立研究開発法人土木研究所から、また、電波流速計による観測データは横河電子機器株式会社からデータを提供いただいた。関係機関の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 深見和彦・天羽淳・大手方如・吉谷純一：流量観測に関する技術基準の課題と新しい技術開発への対応，土木技術資料 45-2, pp. 22-29, 2003.
- 2) 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.
- 3) 藤田一郎・原浩気・萬矢敦啓：河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築，水工学論文集，第55巻，s_1177-1182, 2011.
- 4) 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.
- 5) 藤田一郎・椿涼太：小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発，河川技術論文集，7巻，pp. 475-478, 2001.
- 6) 藤田一郎・椿涼太：時空間濃度勾配を利用した河川表面流の計測，可視化情報，Vol. 21, Suppl. No. 1, pp. 25-28, 2001.
- 7) 藤田一郎・安藤敬済・堤 志帆・岡部健士：STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水流計測，水工学論文集，53巻，pp. 1003-1008, 2009.
- 8) 原浩気・藤田一郎：時空間画像を用いた河川表面流解析における二次元高速フーリエ変換の適用，水工学論文集，54巻，pp. 1105-1110, 2010.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 津留宏介・村井俊治：デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元測定をするには～，社団法人日本測量協会，2011.

付録

1) **ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)**: 音響ドップラー式流速プロファイラー) : 超音波のドップラー効果を利用した多層流向流速計で、水中に超音波パルスを送信し、水中を浮遊する散乱体（プランクトンや塵など）からの反射音波の周波数変化（ドップラーシフト）から流速を求めている。河川流量観測に適用する場合は、曳航式のボートに取り付けて橋上から横断観測を行い、断面流速分布を測定して流量を求める。河岸に固定設置して横断方向の流速分布を計測する方式（*H-ADCP*）や、ラジコンボートによる観測も用いられている。



ADCP本体



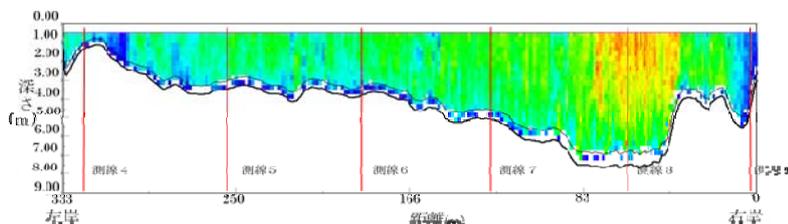
横断観測に使用する橋上操作艇



観測用ラジコンボート



固定設置型のH-ADCP

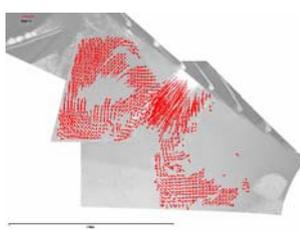


ADCPによる横断流速分布観測結果（例）

2) **LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)** : おもに室内の実験施設等で利用されてきたPIVの技術を実河川に適用できるように改良された手法で、斜め撮影された動画を幾何補正してオルソ化し、その画像上で相関法等による粒子画像の移動追跡を行い、面的な流速分布を計測する。



ダム下流の流況観測にLSPIVを適用した事例



LSPIVを用いて水制工の効果確認を行った事例



3) **STIV (Space-Time Image Velocimetry)** : 前述のLSPIVが河川表面の平面二次元の流速分布を計測するのにに対し、STIVは横断測線に沿ってスリット状の計測線を設定して時空間画像を生成し（写真-6参照）、時空間画像に現れる縞模様の傾きを計測することにより流速を求めるもので、一次元の流速を求める手法である。LSPIVと比べると、俯角の小さい撮影条件の画像や、画質の良くない画像などでも適用性が高いとされる。