

画像解析を用いた河川流速計測のための WEBアプリケーション開発と適用性試験

DEVELOPMENT OF WEB-BASED APPLICATION FOR OBSERVATION OF RIVER FLOW BY USING IMAGE ANALYSIS

小林範之¹, 渡邊明英², 野谷靖浩³, 藤田一郎⁴, 若杉佳功⁵

Noriyuki KOBAYASHI, Akihide WATANABE, Yasuhiro NOYA, Ichiro FUJITA and Yoshinori WAKASUGI

¹正会員 農修 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

²正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

³非会員 学士 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

⁴正会員 学博 神戸大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵非会員 農修 株式会社東建エンジニアリング (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

In order to improve the applicability and operational efficiency of image-based noncontact river flow measurement using a video camera, we developed an auxiliary recording device which can accurately calculate the vertical imaging angle by combining high precision inclinometers. With this method, an oblique image can be ortho-rectified without using reference marks at the time of observation. Therefore, it is possible to omit the labor of measuring the reference marks to easily perform field measurement. Furthermore, we developed a web-based application using this device. In this system, image geometry correction and LSPIV analysis are performed on the web server, so it becomes possible to check the measurement results on the site. As an application to the river flows observation, we examined the change in the flow velocity due to the Asahi Bridge over the Shinano River and successfully demonstrated the influence range of wake flow by the bridge piers.

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

1. はじめに

LSPIVやSTIV等の画像解析を応用した非接触流速計測技術は洪水時の河川流況観測手法としてその有効性は認識されていたが、実際の観測において画像内に複数の既知点を写し込む標定手法が適用上の課題であったことから、筆者らは精密傾斜計による俯角とカメラの内部標定値を用いた標識を用いない標定手法を提案し、室内試験やフィールド試験をとって実用性や適用性を確認してきた^{1) 2) 3)}。これらをふまえ、WEBベースで画像の幾何補正からLSPIV解析までをより簡便に行うシステムを構築した。一般に、画像解析には高速処理と大容量のメモリを有するPCが必要であるが、開発したWEBベースのシステムでは、実際の演算処理はクラウドサーバで行うため、手元で操作するPCは通信機能を有しWEBブラウザが動作するものならノートPC等でも流況画像解析が可能であり、現場での解析も可能となる。論文では、新た

な標定手法とWEBベースの解析システムによる河川流況観測への適用性試験として、信濃川旭橋において実施した観測において橋梁上下流での流況変化や橋脚後流の影響範囲などの観測事例、空撮画像による広範囲の流況観測との比較等の検討事例を示す。

2. WEBアプリケーションの開発

(1) WEBアプリケーション方式の利点

本アプリケーションの開発にあたる際の要件として、現地で観測結果を簡単に確認できるなどの機動性を確保するためには、軽量のノートPCやタブレット端末でも動作することが条件として挙げられた。そのため計算処理系はサーバに実装し、実行指令や結果の取得、表示を端末側で行うWEBアプリケーション方式を採用することとした。これにより、端末の性能要件はインターネットへの接続と、一般的なWEBブラウザが動作できる程

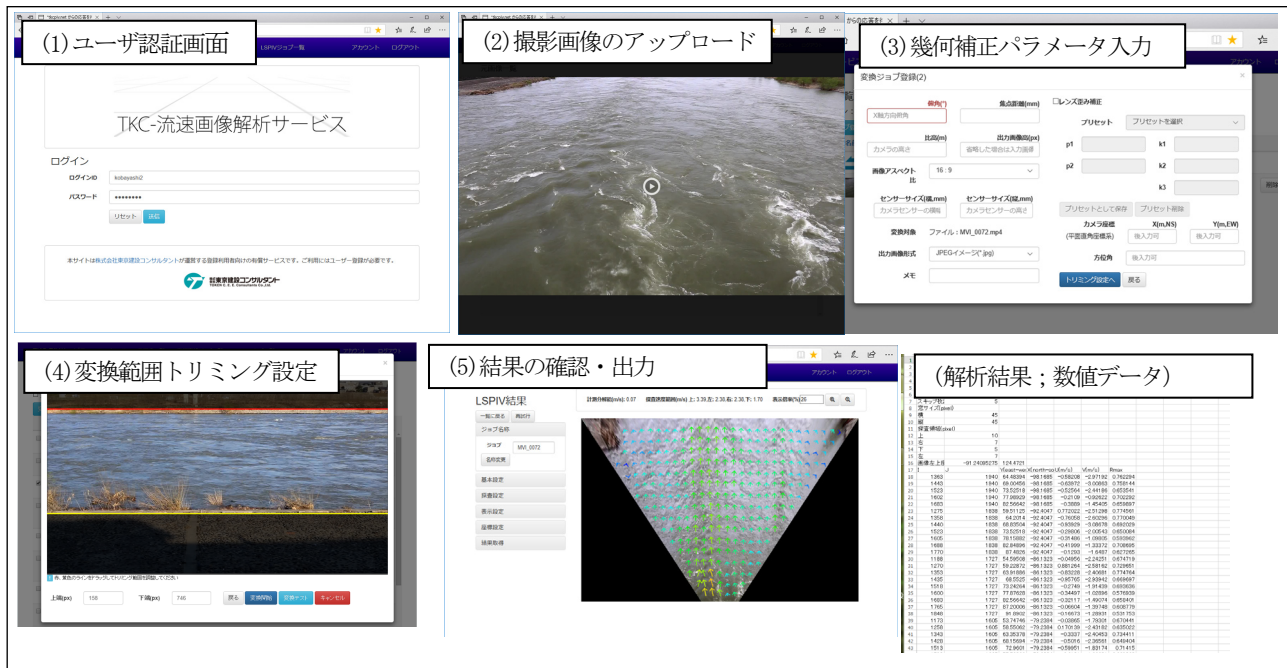


図-1 WEBアプリケーションの操作・出力画面

度まで引き下げることができる。

一方WEBアプリケーション方式の場合、処理サーバ側では多数のユーザによる処理依頼が集中することとなり高い処理能力が必要となるが、処理負荷に応じて自律的に処理能力が拡張できるクラウドコンピューティング環境上に計算処理系を実装することにより処理依頼が集中した場合でも、遅延を最小限に抑えて処理が可能となる。

またWEBアプリケーション方式とすることで、動作に必要なソフトウェアはすべてサーバ側に配置されるため、アップデートなどのサービスメンテナンスを効率的に行うことができ、サービスレベルの維持、さらには提供コストの低減に寄与する。

一般的に画像を扱うアプリケーションの場合、対象が画像であるため、必要なストレージ領域は多くなる。本アプリケーションの場合はサーバ側に集中するため、相当量のストレージ領域を予め準備することになるが、稼働環境がクラウド上にあるため、安価なクラウドストレージを利用でき、同じく提供コストの低減に寄与する。

利用者が使用するWEBブラウザは各々異なることが予想される。WEBブラウザに実装される言語処理系は製品、バージョンごとに若干異なるため、適切な動作を保証するためには、各々の製品ごとに動作確認を行う必要がある。

(2) 機能と諸元

本アプリケーションで画像解析に用いることができる素材は、ビデオ動画、ならびに連続静止画である。本アプリケーションが持つ機能を以下に示す。

a) 撮影画像管理機能

撮影された、動画や静止画をシステムに保存、階層分

けによる整理を行うことができる。

b) 幾何補正機能

斜め方向から撮影した画像を撮影時の撮影俯角、その撮影諸元から幾何補正するとともに変換画像の地上解像度（1画素あたりの地上スケール）を算出し、画像上の座標と物理座標（測量座標）の関係付けを行う。

c) LSPIV解析機能

幾何補正を行った画像群に対し、探査点を設けLSPIVによる流速解析を行うことができる。探査点の配置は自由に行うことができ、b)で明らかになった解像度から流速ベクトルを求めることができる。

d) 流速ベクトル図作成機能

c)によって得られた結果を、幾何補正後の画像上にベクトル図として得ることができる。結果はベクトル図の他、CSV形式による数値データとしても得ることができる。またベクトル図を測量座標系に配置するためのアフィン変換パラメータも得ることができる。

(3) 標定と流速解析

斜撮影された画像を用いて流速解析を行うためには、画像上の座標と物理座標の関係を求める標定作業が必要である。一般的には各々の座標系において6点以上の標定点を必要とするが、本アプリケーションでは、撮影俯角、水面からの比高の撮影諸元と、撮影に使用したカメラの焦点距離、撮像センササイズのカメラ内部標定情報から標定を行う方法を採用している。この内、撮影俯角に関しては撮影時に精密な測定が必要となるため、角度センサを搭載したカメラ雲台も同時に開発している。この方法により、標定作業の大幅な効率化、簡略化を実現できた。WEBアプリケーションの操作・出力画面イメージを図-1に示す。表-1には幾何補正やLSPIV解析に

表-1 WEBアプリケーションの入力項目一覧

項目名	単位	摘 要	備 考
幾何補正に関する入力項目			
俯角	度	チルトシステムで計測された撮影時の撮影俯角	必須
比高	m	水面からカメラまでの高さ	必須
焦点距離	mm	撮影時のカメラ焦点距離	必須
画像アスペクト比	-	撮影した画像の（横）：（縦）の比	必須
センサーサイズ	mm	撮影したカメラの撮像素子の大きさ（横サイズ、縦サイズ）	必須
出力画像高	pixel	幾何変換後の画像の縦方向サイズ（省略した場合は入力画像と同じ）	任意
出力画像形式	-	幾何変換後の画像のフォーマット（JPEG, TIFF, ビットマップより選択）	必須
カメラ座標	m	撮影時カメラ位置の平面直角座標	任意
カメラ方位角	度	撮影方向（方位角の値で入力）	任意
レンズ歪み補正パラメータ	-	接線方向歪係数：p1,p2, 放射方向歪係数：k1,k2,k3	任意
LSPIV解析に関する入力項目			
スキップ枚数	枚	連続画像のうち、LSPIV解析対象に含める画像間隔	必須
dT	s	連続画像間の実時間間隔、幾何補正ジョブの結果から自動入力	自動
dX	m	ピクセル当たりの横方向物理距離、幾何補正ジョブの結果から自動入力	自動
dY	m	ピクセル当たりの縦方向物理距離、幾何補正ジョブの結果から自動入力	自動
窓サイズ	pixel	LSPIV探査窓のサイズをピクセル数で入力する	必須
探査領域	pixel	LSPIV探査を行う上下左右方向の範囲をピクセル数で入力する	必須
カメラ位置情報	m	幾何補正ジョブの結果から自動入力（変換時に設定した場合）	任意
撮影方向	度	幾何補正ジョブの結果から自動入力（変換時に設定した場合）	任意



図-3 撮影状況（左：橋上から、右：堤防から）

おける入力項目の一覧を示す。幾何補正に関するパラメータのうち俯角と比高は現地観測時に取得する外部標定要素であり、その他の情報はカメラの光学系の内部標定情報と補正画像の出力に関するパラメータである。また、LSPIV解析に関する入力項目は、観測対象の流速、画像上での動きの速度、及び画像の状態等により最適値が決まる。

3. 現地観測による適用性試験

開発したWEBアプリケーションの河川流況観測への応用について、現地における試験観測を行い現地観測への適用性を検討した。

(1) 試験観測対象箇所

試験観測は、信濃川水系信濃川の旭橋地点で実施した。試験観測を行った場所は図-2に示す信濃川旭橋地点（新潟県小千谷市）で、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2017年4月27日～28日に実施したものである。基盤となる基準点や標定点等は、事務局が事前に設置して情報共有したものである。

(2) 観測方法と試験内容

流速観測のための撮影は、高精度傾斜計を組み込んだ



図-2 現地試験実施箇所の位置図（新潟県小千谷市・信濃川旭橋地点）

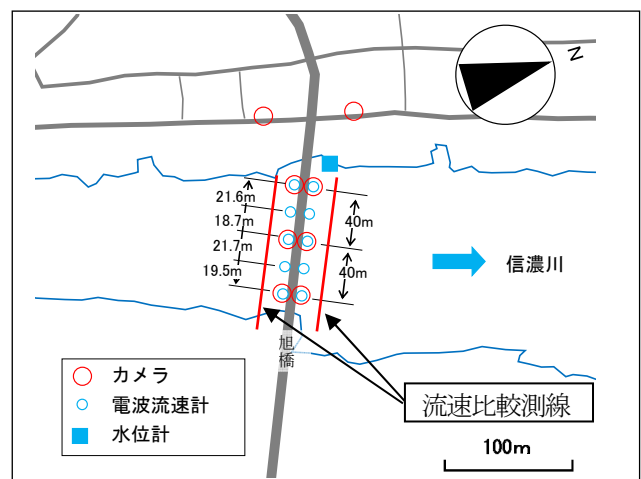


図-4 カメラの配置、及び電波流速計の配置状況

専用標定器を用い、旭橋の上から上下流それぞれに3か所、旭橋上下流の左岸堤防上の2か所、合わせて8か所から撮影を行った（図-3）。使用したカメラはデジタル一眼レフカメラのCanon EOS6D、レンズは橋上からの撮影

表-2 観測時の標定諸元

カメラ位置		4/27 12:00観測				4/27 16:00観測			
		外部標定要素		内部標定要素		外部標定要素		内部標定要素	
		俯角 (度)	比高 (m)	焦点距離 (mm)	センサーサイズ (mm)	俯角 (度)	比高 (m)	焦点距離 (mm)	センサーサイズ (mm)
旭橋下流	橋上左岸	25.990	12.874	24	36×24	26.015	12.655	24	36×24
	橋上中央	26.062	12.758	24	36×24	26.005	12.518	24	36×24
	橋上右岸	25.992	12.344	24	36×24	26.019	12.190	24	36×24
	左岸堤防	9.952	9.366	50	36×24	10.127	9.317	50	36×24
旭橋上流	橋上左岸	25.100	12.807	24	36×24	26.307	12.588	24	36×24
	橋上中央	25.146	12.716	24	36×24	26.138	12.473	24	36×24
	橋上右岸	26.016	12.308	24	36×24	26.051	12.091	24	36×24
	左岸堤防	10.082	9.141	50	36×24	10.164	9.079	50	36×24

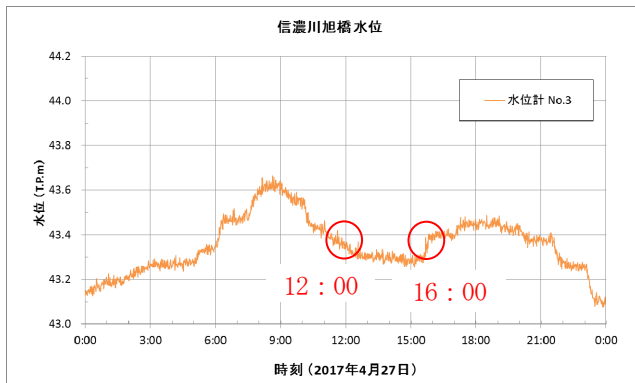


図-5 観測時刻と水位変化

メラ、電波流速計、および水位計の配置は、図-4に示すとおりである。

流速値の比較検証用に、旭橋上下流の5ヶ所において電波流速計による表面流速観測を、また、UAVを用いた空中からの動画撮影、STIV、LSPIVによる流速解析を行い、地上（橋上および堤防）撮影した画像の解析結果と比較した。撮影画像の幾何補正精度の確認は、当該箇所の平面図の他、3D地上レーザ計測により砂州等の河道内の地形計測を行い、変換画像と重ね合わせて比較し確認した。

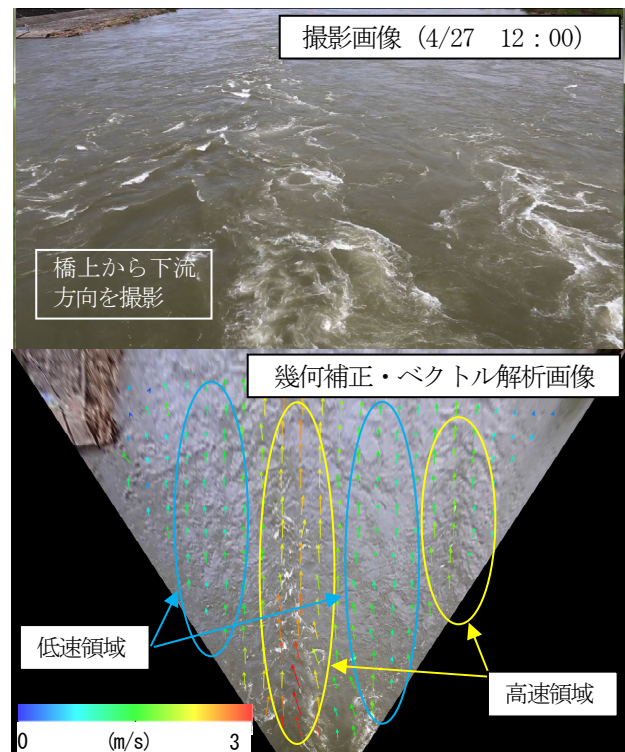


図-6 現地における試験解析の例

写真上：撮影画像，写真下：解析画像

4. 試験結果

(1) 観測当日の水位変化と観測諸元

観測は4月27日の10時から17時まで1時間間隔で毎正時に実施した。観測時間内の水位を図-5に示す。ここでは、ほぼ同じ水位で水位下降期にあたる12時と水位上昇期にあたる16時を対象として観測結果を比較した。16時の水位上昇は、上流側に位置する発電所からの発電放流の影響と考えられる。観測時の外部標定諸元（撮影俯角、水面との比高）、内部標定諸元（焦点距離、センサーサイズ）を表-2に整理した。

(2) 撮影および解析条件の現地確認

流況観測用の撮影に際し、WEBアプリケーションを用いて試験解析を実施し、観測現場で撮影方法や解析条

件を確認して適正な条件で観測していることを確認した。

試験解析により得られたベクトル図を図-6に示す。このとき入力する外部標定諸元は現地で専用標定器により計測した俯角とカメラから水面までの比高のみで、何れも現地観測時に間接水準測量や量水標からの目視など簡単に計測可能である。これにより現場でベクトル解析結果が確認できる。解析時間はネットワーク環境と解析条件によるが、図-6のFull HD動画10秒(12Mb)でアップロードは数秒(Wi-Fi接続)、幾何補正に200秒程度、LSPIV解析（解析ポイント数233点）に240秒程度である。図-6のベクトル図は、橋上から下流方向に撮影した画像から、流速分布解析をした例であるが、橋の下流側で流速の早い領域や逆に流速の遅い領域の分布が視覚化され、観測条件の妥当性を確認することができた。画像解析による観測においては、従来は現地撮影後にデータを持ち帰って標定計算を行い幾何補正や流速解析等を実施して

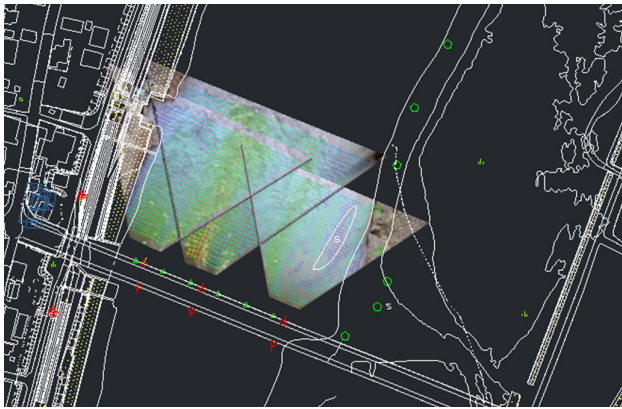


図-7 平面図との重ね合わせによる幾何補正の確認

いたが、開発したWEBシステムでは、標定測量を省略できるため現地で解析処理して流況を視覚化し確認可能であり、現地観測の機動性や簡便性の向上が評価できる。なお、表-2の外部標定諸元は、標定器のログに記録された毎秒データから解析時間内の平均値を求めた値であり、現地の簡易解析では標定器に時々刻々表示される俯角表示値から目視で読み取った値を入力した。試験解析により妥当性を確認後、観測撮影を行った。

(3) 幾何補正の妥当性確認

画像解析による流況観測において、流速値や流速分布の解析精度に影響のある幾何補正の精度について、3Dスキャナ計測した点群データや平面図（CAD図）との重ね合わせにより変換の妥当性を確認した。開発したWEBアプリケーションには、オルソ画像を測地座標系で管理された図面上にCADやGISで貼り付ける際の位置や縮尺情報をワールドファイル⁴⁾として書き出す機能があり、この機能を用いて変換画像を図面上に貼り付けることができる。CAD図との重ね合わせ図を図-7に示す。河岸の位置や形状、水面幅等が幾何補正されたオルソ画像と平面図とで一致しており、変換処理の妥当性が確認できる。

(4) 橋梁上下流における流況の把握

橋上と左岸堤防上の8箇所のカメラにより地上撮影された結果から、旭橋上下流の面的な流況解析を行った結果を、図-8に示す。橋の下流では橋脚により加速された領域と減速された領域が発生している状況が視覚的に把握でき、橋から下流側100m程度までこの影響が確認できる。橋の上流側は下流と比べて全体に均一な流れとなっている状況もわかる。

水位下降期の12時と、ほぼ同じ水位で水位上昇期の16時とを比較すると、16時の方が橋上流側の高流速域が広がっている。

(5) 空中撮影による流況解析結果との比較

旭橋から下流100m程度の区域を対象に、ほぼ同時刻（4月27日 11:15）に撮影されたUAVによる空中撮影動

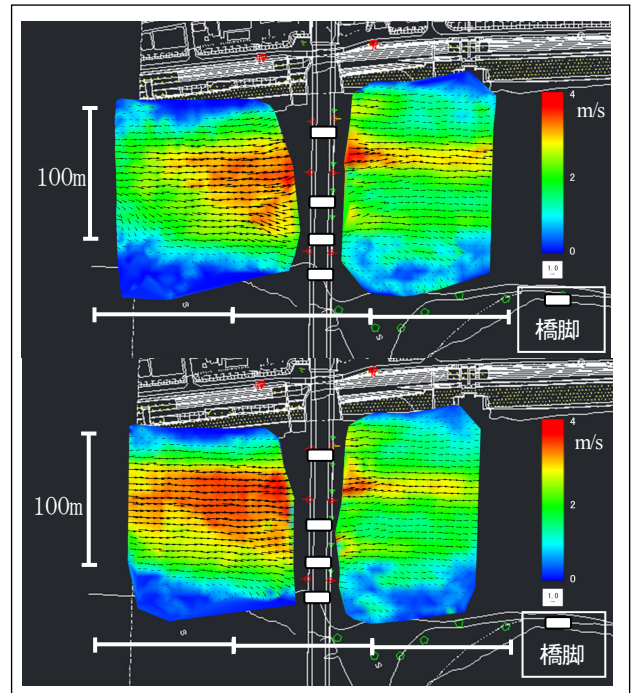


図-8 旭橋上下流の面的流況解析結果
(上：4/27 12：00，下：4/27 16:00)

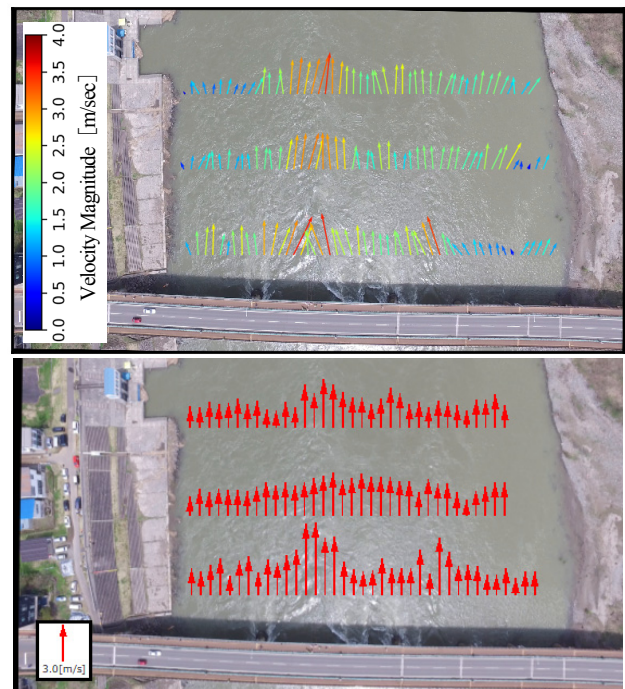


図-9 空中撮影画像からの解析結果（旭橋下流）
(上：LSPIV解析，下：STIV解析，何れも15秒の平均値)

画を対象とした画像解析結果（STIV法，LSPIV法）と比較検討を行った。図-8と図-9を対象として橋梁直下のほぼ同じ場所の流速に着目すると、空中撮影からのLSPIV解析，STIV解析の結果と地上撮影によるLSPIV解析の結果は、概ね同じ流れの傾向を示している。

(6) ADCP、電波流速計との比較検討

旭橋上流および下流側の流速比較測線（図-4）付近の横断流速分布を図-10に示す。12時の旭橋下流の観測に

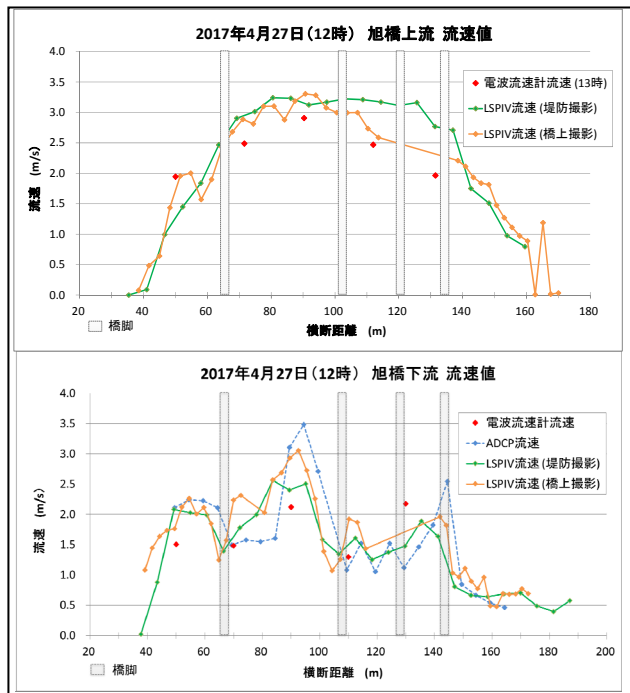


図-10 横断流速比較図 4/27 12:00観測
(上：旭橋上流，下：旭橋下流)

については、ほぼ同時刻に観測されたADCP、および電波流速計による観測データも取得されていることから、これらの観測法との比較検討を行った。なお、ADCP観測の位置は旭橋から10～20m下流側の測線で、電波流速計は旭橋から10m程度離れた位置の表面流速である。また、ADCPと電波流速計は横断方向に移動しながらの観測であることから、撮影された同一時刻の流速分布を観測する画像法とは観測時刻、測定位置は厳密には一致していないが、横断流速分布や流速値は概ね一致しており橋梁下流側における各観測結果は概ね整合している。旭橋上下流の観測結果を比較すると、上流側は河道中央部付近を最大として滑らかな流速分布を示すのに対し、下流側では橋脚の影響により流速分布が変化している。

5. 考察

(1) WEBアプリケーションの現地観測への応用

WEBアプリケーションによる流速画像解析は、通信環境が確保されている場合には、従来は事後に室内解析で行っていた画像解析と流況把握が現地でも視覚的に確認できる。観測目的に則した撮影方法や解析パラメータの設定になっていることを、現地で確認しながら観測作業を行うことができ、観測時のミスや手戻りの防止につながるなど有効性が確認された。また、WEBアプリケーションに組み込んだ標識を使用しない標定手法は、現地状況に合わせて柔軟にカメラ位置を移動できることから、従来の標識を用いた単写真標定手法と比較して観測の機動性や柔軟性の向上が評価できる。

(2) 地上撮影と空中撮影との比較

面的な流況観測を目的とした撮影手法として、UAVの普及により空中撮影が容易に行えるようになり、河川流況観測にも適用が広がっている。しかしながら、空中撮影は荒天時の適用が難しい。今回の試験観測では橋上や堤防上から対象水面を分割して撮影し、事後に合成して広範囲の面的流況把握を試みたが、空中撮影による観測と比較しても広域の流況把握について遜色なく適用できることが確認された。荒天時等でUAVの利用が困難な場合の面的流況観測手法として十分活用できると考えられる。

(3) 流速観測精度の比較

観測された流速の精度について、他の観測法や別の撮影方向からの観測結果を比較した結果、観測された流速値の妥当性が確認できた。

6. 今後の課題

今後は、WEBアプリケーションのインターフェースをより充実した使いやすいものに改良し、解析機能の充実を図るとともに、視覚的で分かりやすい結果出力機能の充実、ユーティリティの充実などが課題である。そのために、様々な現地観測に応用してデータの蓄積を図るとともに、さらに改良を進める予定である。

謝辞：本論文を作成するにあたり実施した現地試験は、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実施したものであり、試験フィールドの準備に加え、試験観測時の水位観測や測量成果、およびADCP観測データといった貴重なデータをご提供いただいた研究会事務局および委員各位に対し、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小林範之，渡邊明英，野谷靖浩，藤田一郎：画像解析による河川流速計測の適用性向上と効率化に向けた撮影・標定技術の開発，河川技術論文集，第21巻，pp.67-70, 2015.
- 2) 小林範之，渡邊明英，野谷靖浩，藤田一郎：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，応用測量論文集27(JAST Vol.27), pp.99-110, 2016.
- 3) 小林範之，渡邊明英，野谷靖浩，藤田一郎，能登谷祐一：画像解析を用いた河川流速計測における撮影・標定手法の開発と精度管理に関する研究，河川技術論文集，第23巻，pp.191-196, 2017.
- 4) 津留宏介，峰島貞治，古本秀明，馬河紘子 編著：CAD/CG/GISユーザーのための航空・衛星写真画像ハンドブック，(財)日本測量調査技術協会，2008.

(2018. 4. 3受付)