

カメラ同期制御装置を用いた 近接写真測量による水面形状の計測

MEASUREMENT OF WATER SURFACE SHAPE BY CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY USING CAMERA SYNCHRONIZATION CONTROL DEVICE

安田 晃昭¹・萬矢 敦啓²・小関 博司³・安田浩保⁴

Teruaki YASUDA, Atsuhiko YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI and Hiroyasu YASUDA

¹非会員 学士 (工学) 株式会社 安田測量 (〒 322-0001 栃木県鹿沼市栃窪 1164-17)

²正会員 Ph.D 土木研究所 主任研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³正会員 修士 (工学) 土木研究所 研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴正会員 博士 (工学) 新潟大学 災害・復興科学研究所准教授 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050)

Water surface measurement by MLIT have played important roll in river management, though it is not intended to understand river morphology. Newly started hydrological observation system is installed in 1km interval, which may work very well to understand the flood waves. In order to understand water surface shape on bed forms, more precise measurements are necessary, whose time/special scales are short and small. The photogrammetry with plural camera is one of the key technologies to create 3-D geometry. Using a camera synchronization control device (SCD) as well as the SfM technology, it may be possible to measure the water surface in required scale and time. In this report, we measure the actual river using five sets of commercially available cameras and SCD, and success in precisely acquiring the water surface shape in the range of 25m × 50 m. It is also confirmed that the accuracy of the measurement is in the acceptable ranges comparing with fixed points on the ground and on the water surface.

Key Words: Close range photogrammetry, ADCP, water surface measurement, SfM, remote sensing

1. はじめに

実河川の平常時と洪水時の各々における水位の計測は、圧力式や超音波式の水位計を用いた点計測が一般的である。河川によっては洪水時における左右岸の水位差はメートル単位に達することが知られている。しかし、既存の水位の計測法ではこのような水位差を容易に計測できない。近年、国土交通省により危機管理型水位計と称する安価な水位計が開発され、これを左右岸に 1km 程度の間隔で設置する事業が急ピッチで進められている。しかし、現状での国内の河川堤防の整備率は 5 割程度に留まる。整備中の多くの堤防の天端高は数百メートル程度での凹凸を持ち、洪水時の水位の計測は 1km 間隔毎では危機管理上、十分ではない。

このように現状では実河川の水位の計測は 1km 間隔毎に 1 次元的に把握されるだけに留まっている。開水路の水理学では比エネルギーの応用例として底面起伏の影響が水表面に表出することを学ぶ。著者らが知る範囲では実河川における底面起伏の影響が水表面に表出したことの計測例はほとんどないようである。関連

する研究の一つとして、砂堆スケールの水面波の波長に基づき、水深の推定をできることが報告^{1),2),3),4)}されている。この研究をはじめとして、実河川の河床面には、水深の数倍の波長となる砂堆や川幅の数倍の波長となる砂州などが形成され、これと対応する水面の存在が推測される。しかし、水面の起伏形状を高分解能に計測できる手法は未確立で、現状では水深や川幅スケールの波長の河床波に由来した水面の起伏形状の計測は困難である。

実河川の平面的な水位の把握の有力な手法の一つとして平面 2 次元の水理解析が挙げられる。しかし、前述までの事情から実河川の実測と平面 2 次元解析との対比は皆無である。このような計測値の不足は、実河川における平面 2 次元の水理についての理解や把握が不十分であることを強く示唆する。理解不足の具体的な平面 2 次元の水理としては、平面 2 次元の水理におけるエネルギー損失の規模や機構が挙げられ、これらは全く未解明と言って良いであろう。平面的な水位の計測が可能となれば、これらの解明やモデル化を大きく前進させられる可能性が大きい。



図-1 近接写真測量の計測状況

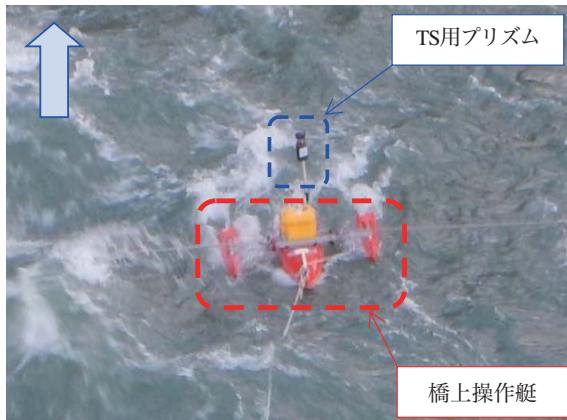


図-2 橋上操作艇の計測状況 (TS 用プリズムを搭載)

近年では Structure from Motion(以下、SfM) による 3 次元形状の計測が容易となってきた。模型実験における近接写真測量による水面形状の計測は椿ら^{5),6),7)}の研究がある。また、星野ら⁸⁾は模型実験レベルでの計測において底面起伏の影響が水表面に表出することを報告している。一方で、実河川を対象とした平面的な水位の計測の成功例はあまり報告されていない。その要因には、一般的に、水面はテクスチャが僅少などの写真測量に適していない被写体である⁹⁾ ことに加え、SfM による水位の平面的な計測では、2 枚以上の同時に撮影された画像が必要となるが、その同時撮影が困難であったことが考えられる。本研究では、カメラ同期制御装置 (Camera Synchronization Control Device、以下、SCD) を導入した近接写真測量による実河川の水面形状の計測を実施し、同計測法の精度を検証した。

表-1 使用した計測機材

機材	名称	販売元	備考
カメラ	SONY α 7 II	ソニー(株)	有効画素数：2430万画素 ILCE-7M2 ミラーレス一眼
レンズ	SONY FE 28-70mm F3.5-5.6 OSS SEL2870	ソニー(株)	標準ズームレンズ
SCD	-	(株)アミューズワンセルフ	
SfM ソフト	PhotoScan	Agisoft	現在、metashapeに名称変更

表-2 計測機材の主な設定値

機材の設定	設定値	備考
フォーカス	マニュアル	水面までの距離：約40mに設定
シャッタースピード	オート	1/250～1/500
絞り値	オート	f4～5.6
ISO	オート	100～320
露出	オート	補正無し
ホワイトバランス	オート	-

2. 計測方法

(1) 計測機材とその設定値

本研究では表-1 に示した計測機材を用いて計測を実施した。図-1 に示したように、カメラと SCD を 1 組とし、合計 5 組のカメラセットを用いた。水面の形状は、同時刻に撮影した 5 枚の写真を、SfM ソフトを用いて解析し、水面の 3 次元座標の点群を算定した。

使用した機材の特徴は、SCD 以外が市販品で、水面の近接写真測量の専用機材ではないことである。本観測が最初の試験計測であったため、カメラは市販品の上位機種の中からレンタルしやすい機材を選択した。

使用した計測機材の主な設定は、表-2 の通りである。フォーカスはマニュアル操作で水面に合焦するようにした。カメラから撮影した水面までの比高差は約 15m、水平距離は約 40m、俯角が約 70 度である。シャッタースピード、絞り値、ISO、ホワイトバランスは使用したカメラのオート設定を用いた。この設定の意図は、屋外の撮影において任意の設定を行った場合に、日光の量や角度の変化による毎分の写真の質の大きな変化を防ぐことである。同表に示した通り、設定値は、日中の屋外撮影における一般的な設定値である。

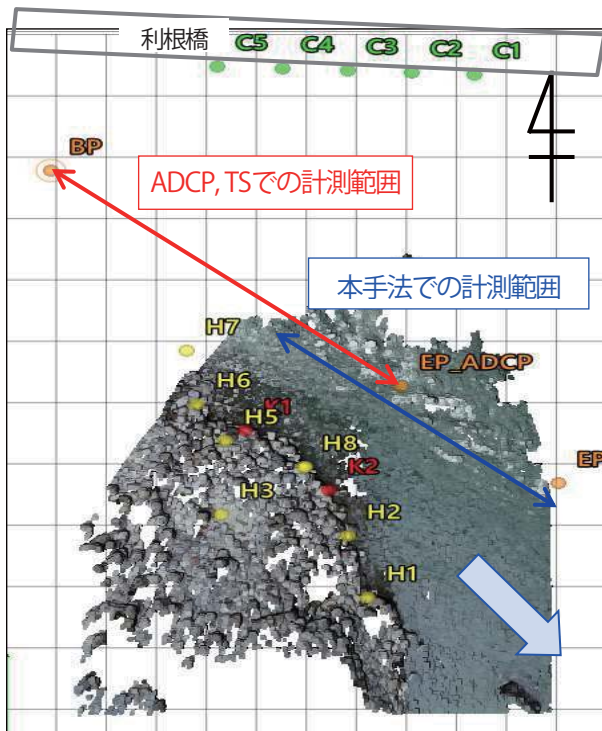


図-3 計測箇所の概況



図-4 計測位置の流況 (83 秒間の 2 秒毎の多重露光撮影)

(2) 計測方法

水面のように時々刻々と変化する対象物の正確な 3 次元座標を近接写真測量によって取得するためには、同時に撮影された 2 枚以上の写真が要求される。本研究では、カメラを同期するために、GPS から受信した時刻を基に、正分 30 秒毎に写真を 1 枚撮影する機能がある SCD を使用した。撮影した写真を基にした近接写真測量によって得られる 3 次元座標は任意座標系となる。このため、水面以外のブロックなどの現況の不動点を標定点として利用することとした。予めその点の座標をトータルステーション (以下、TS) で計測し、その座標を基に、本手法で計測した水面の 3 次元座標を世界測地系に変換した。

また、その他、計測結果の検証として、図-2 中に示したように橋上操作艇に TS 計測用の全方位プリズムを搭載し、1) 操作艇を定点固定して TS 計測を行い把

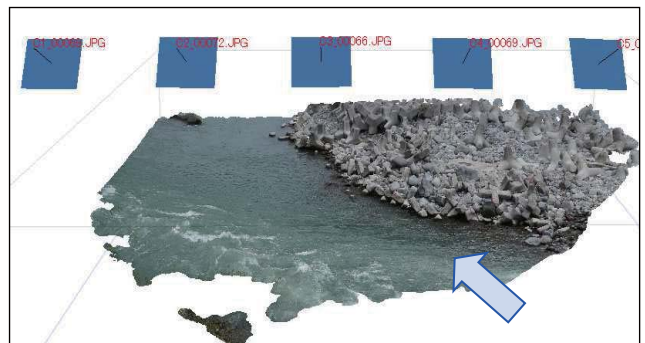


図-5 機材の配置状況 (俯瞰)



図-6 作成した 3D モデルの抜粋

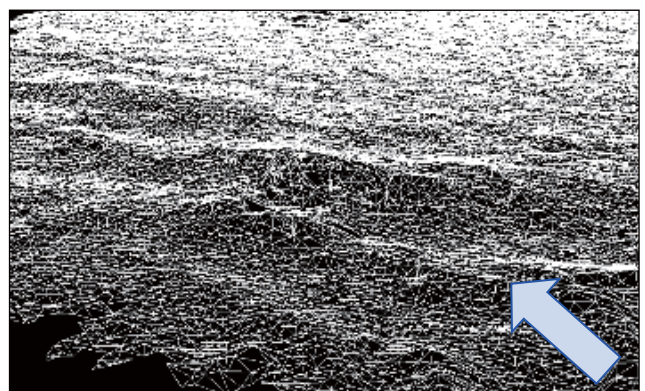


図-7 作成した TIN の抜粋

握した水位変動量と、同時時間帯に本手法で計測した水位との比較、2) 操作艇を流心に沿って流下させ、TS 計測した座標値から水位縦断面図、及び艀装した ADCP での計測値から河床縦断面図を作成し、同時時間帯に本手法で計測した 3D モデルから同位置での水位縦断面図を抽出して比較する、2 手法に関して実施した。

(3) 計測箇所

本手法での計測試験は、図-3 に示す利根川水系利根川の利根橋の下流で実施した。この場所は、瀬淵構造を持ち、特に、この地点は早瀬にあたる。そのため、図-4

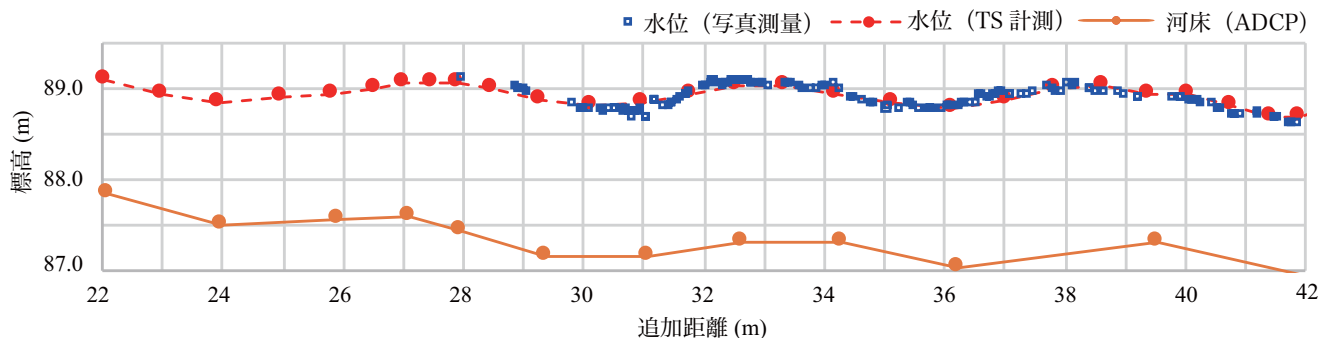


図-8 水位および河床位の縦断面図

に示すような定在波が平時にも見られることから、この地点を計測箇所を選択した。

(4) 機材の配置

図-3 の上部緑点で示したように、左岸から右岸方向に C1 から C5 までの 5 台のカメラを利根橋の欄干に三脚ごと固定し、SCD を用いた水面の同時撮影を実施した。カメラの配置間隔や設置角度等の状況は図-5 に示した通りである。

水面の撮影時にカメラは流心に向けて 5 台を配置し、画角は隣り合う写真同士が約 8 割重なるように現地に確認しながら設定した。図-5 の上部の水色矩形は、SfM 解析結果から算定されたカメラの撮影位置と角度を示している。その他に撮影時に留意した点は、SfM の解析精度を左右する特徴点をできるだけ多数確保出来るように現況の消波ブロック等の不動点が映り込むように撮影した点等がある。図-3 中の黄色点 (H1 から H8) は座標変換に用いた標定点、赤点 (K1, K2) は計測した点群の精度を確認した検証点である。それぞれ、非冠水域の現況地物の不動点にマーキングして作成したものである。

表-3 精度検証の結果

点名		X 座標 [m]	Y 座標 [m]	Z 座標 [m]
K1	理論値	42749.714	-69419.485	89.635
	計測値	42749.724	-69419.542	89.606
	差分	-0.010	0.057	0.029
K2	理論値	42742.352	-69411.674	89.248
	計測値	42742.360	-69411.719	89.198
	差分	-0.008	0.045	0.050

表-4 水位の比較結果

No.	TS 平均 [m]	σ	TS 平均 +2 σ	TS 平均 -2 σ	計測水位 [m]
日時	2018年11月13日 15:06:40~15:09:46				15:16:30
1	89.04	0.022	89.08	88.99	88.98
日時	2018年11月13日 15:25:51~15:29:05				15:37:30
2	88.99	0.035	89.06	88.92	89.09
日時	2018年11月13日 15:46:15~15:53:44				15:39:30
3	88.88	0.029	88.94	88.83	88.86

3. 計測結果

(1) 計測結果

本研究では、撮影した写真から SfM を用いて水面形状の 3 次元座標を算定した。前述したカメラの配置からは、縦断方向に約 50m × 横断方向に約 25m 程度の領域における水面の 3 次元座標が得られた。また、現況の不動点に基づき、それらの水面の 3 次元座標を世界測地系の座標へ変換した。図-6 と図-7 は、これらの水面の 3 次元座標を 3D モデルと TIN として示したもので、両図が撮影された原画像と一致することを確認している。

本計測では被写体までの距離が約 40m であったため、計測に用いた機材での撮影解像度は、約 1.5cm/画素で

ある。また、SfM を用いて算定した水面の 3 次元座標の空間密度は約 1,500 点/m² であった。従来の水位計などによる計測と比べ、飛躍的に高分解能かつ広域の平面的な計測結果を得られることが分かった。

(2) 精度検証

表-3 に、検証点 (K1, K2) を TS で計測した座標と本手法で計測した 3 次元座標の差分を用い、本計測法の精度について確認した。その結果は、水平方向、鉛直方向共に 5cm 程度の差であった。水面形状を十分な精度で計測できていることが示された。

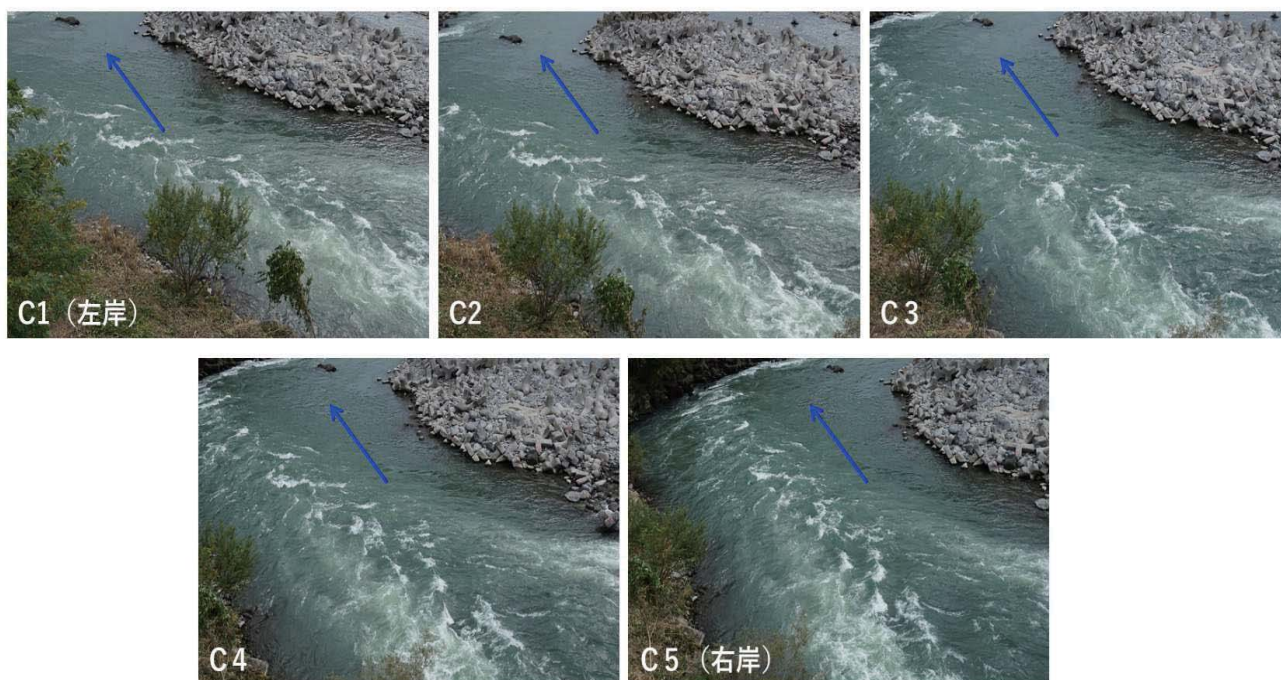


図-9 計測に用いた写真の組合せ例



図-10 撮影した写真の重なりイメージ

4. 他計測手法との比較

(1) 定点水位観測との比較

本計測における水面の時間変動量を把握するため、TS用のプリズムを橋上操作艇に搭載して定点に固定し、それをTSで5分程観測して水位を計測した。この時の計測間隔は1秒とした。

定点観測時の平均水位と標準偏差、本手法で計測した水位および計測時刻を表-4に示す。同表から、本手法で計測した水位は、定点計測した3地点のうち2地点で平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲にあることが分かる。また、他の1点は $+2\sigma$ の外側であるものの、TSと近接写真測量の計測値の差は3cmほどで、精度の高い計測結果が得られることが分かった。

(2) 縦断計測との比較

図-4は、近接写真測量による水面の計測を実施した領域における多重露光写真である。同図から分かるように、同図の中央には水面波が形成されている。同図中の概ね赤矢印の位置において、ADCPとTSを用いて縦断計測を行い、橋上操作艇に搭載したTS用プリズムを自動追尾計測することで水位を計測し、同操作艇に艀装したADCPにより水深を計測して河床縦断図を作成した。また、図-8に示すように本手法で作成した3Dモデルから同位置での水位縦断図を抽出して比較を行った。

ADCPとTSによる計測は平成30年11月13日の13時25分53秒から13時26分24秒に、近接写真測量による計測は同日の13時25分30秒、13時26分30秒、13時27分30秒の計3回実施した。各手法による計測範囲は、本手法の場合、図-3中の青線で示した利根橋を起点として上流から20から70m、TSでの計測範囲は図-3中の赤線で示した0から35mである。両者が重複する20から35m区間の水位縦断図を比較すると、両者は極めて良好に一定した水面形状となることが分かる。

本手法で計測した縦断図は、図-3中に橙色の点で示したADCPを流下させた起点と終点の位置を結んだ直線上における水面の3次元座標から抽出して作成した。また、ADCPとTSを用いて計測した縦断図は、操作艇に艀装されたプリズムをTSで自動追尾(1秒間隔で位置情報を記録)して計測した情報を基に作成した。な

お、ADCP の流下した累計距離と起終点を結んだ直線距離は約 2% の差異があったため、縦断面作成の際には追加距離を起終点 2 点間の直線距離に補正している。

カメラの設定値のうちシャッタースピードは前述のとおり 1/数百秒程度で、水面の瞬時の変化を捉えていると考えて差し支えないだろう。一方で、TS による計測値は、操作艇に艀装されたプリズムの追跡であるため、水面の揺動により最大で 10 数 cm 程度の変動は発生していることが推測される。これらを踏まえると、SCD を導入した近接写真測量による水面形状は、高精度に水面形状を計測しているものと考えられる。

なお、ADCP の計測結果から得られる縦断平均のフルード数は 0.6 から 1.1 の間で分布していた。

5. 今後の課題と展望

本研究で実施した水面の近接写真測量により水面の 3 次元座標を高精度かつ高密度に取得ができた要因は、特徴点となる白波などの微小な起伏が適度に撮影されていたためと推測される。しかし、必ずしも水面に微小な起伏が存在するとは限らず、鏡面状の水面においては特徴点が少なくなり、近接写真測量による水面の 3 次元座標の取得が困難となることが容易に推測される。図-5、9、10 に示した通り、撮影した画角の全てに対して SfM の処理はできなかった。被写体の撮影においては、できるだけ多くの特徴点を映り込ませる工夫とともに、静水面等の反射等もモデル化の欠損要因になることも考えられ、このような SfM の本質的課題の解決法を考える必要がある。

また、本計測においては、撮影した 5 枚の写真を現場で市販品のノート PC を用いて SfM 処理を行い、その処理時間は数分程度だった。撮影枚数の増加に伴って処理時間は増加するが、今後は高性能な解析 PC を用いることと、高性能な解析専用の PC へ撮影した画像を自動転送するシステムを構築し、これにより解析工程の省略を図る予定である。他にも、今回の撮影した画像には、位置情報が付与されていなかったため、解析後に世界測地系に変換する工程が必要となった。現在のところ、写真に EXIF 情報が自動的に付与される SCD を開発し、世界測地系に変換する工程の省略を図る予定である。

本計測では 70 度という大きな俯角を確保できた。しかし、現地条件によっては、十分な俯角を確保できない可能性があり、カメラから見て峰の奥側等の写真で撮影されていない部分の計測を出来ない問題が残る。この問題の解決法として、俯角が大きく確保でき、現地状況が広く確認できるようにするため、編隊飛行させた Unmanned Aerial Vehicle (UAV) からの水面の写真撮

影を予定しており、このシステムの構築により、災害時等でも安全かつ任意の箇所の水面の計測が可能となる。これについては別報にて詳しく報告する予定である。

6. おわりに

カメラ同期制御装置と 5 台の市販品のカメラを用い、実河川において 50m × 25m 程度の領域の水面分布の計測ができることを示した。同計測法における計測精度は、現況地物との検証結果は 5cm 程度である上、水位の定点観測との比較結果は概ね 95% 信頼区間範囲に入り、十分な精度が得られることを示した。また、縦断的な水位分布を比較した結果、本研究による計測値の波長や波高は TS による計測値とほぼ一致することが分かった。

謝辞：本研究は、国土交通省 関東地方整備局 河川部長 (研究当時：水管理・国土保全局 河川計画課河川情報企画室長) 佐藤 寿延氏から技術協力を得た。また、本研究は、土木学会流量観測高度化研究小委員会 (委員長：神戸大学 藤田 一郎 教授) の協力により推進されている。本報執筆に当たり、多数の計測結果の整理においては (株) 安田測量の大貫 隼汰氏が迅速かつ正確に作業を実施してくれた。ここに記して感謝の意を表します。また、本研究で用いたカメラ同期制御装置は特許出願中のものである。

参考文献

- 1) 小関博司, 萬矢敦啓, 山見英生, UAV 搭載型電波式流速計・水位計を用いた流量推定法の開発, 河川技術論文集, 第 25 巻, 2019(印刷中)。
- 2) 山田正, 池内正幸, 堀江良徳, 不規則底面をもつ開水路流れに関する研究, 第 28 回水理講演会論文集, pp.149–155, 1984。
- 3) 田中祐一郎, 移動床開水路の河床形態と抵抗則に関する研究, 京都大学学位論文, Doi:10.14989/doctor.r2204, 1973
- 4) Yalin, M.S. and Bishop, C.T. On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1977.
- 5) 椿涼太, 藤田一郎, ステレオ画像を利用した自由水面の水位分布計測法の開発, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.523–528, 2004。
- 6) 藤田一郎, 椿涼太, ステレオ水面計測法と POD を用いた側岸凹部流れの水面振動構造の解析, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.535–540, 2005。
- 7) 松原隆幸, 椿涼太, 藤田一郎, 安藤敬済, ステレオ撮影による開水路水面変動の画像計測, 可視化情報, Vol.26, pp.199–202, 2006。
- 8) 星野 剛, 安田 浩保, 倉橋 将幸, 土木学会論文集 A2(応用力学), 第 74 巻, 1 号, pp.63–74, 2018。
- 9) 津留宏介, 村井俊治: デジタル写真測量の基礎 デジカメで 3 次元測定するには, 公益社団法人 日本測量協会, 2011。

(2019. 4. 2 受付)