

ADCP で計測したボトムトラック速度を用いた 掃流砂量算定手法に関する実験的研究

上原 有稀¹・岡田 将治²・萬矢 敦啓³・小関 博司⁴

¹ 学生会員 準学士(工学) 高知工業高等専門学校専攻科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1)

E-mail:s1812@gm.kochi-ct.jp

² 正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 准教授 (〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1)

E-mail:okada@ce.kochi-ct.ac.jp

³ 正会員 Ph.D. 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail:yorozuya@pwri.go.jp

⁴ 正会員 修士(工学) 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ (同上)

E-mail:h-koseki@pwri.go.jp

本研究では、著者らが提案する ADCP で計測されたボトムトラック速度を用いた掃流砂量算定法について、移動床水路実験によりその有効性を検証した。はじめに、ADCP で計測されるボトムトラック速度が河床上を移動する掃流砂の速度を表していることを STIV 法により確認した。つぎに、5 台のデジタルカメラのインターバル撮影画像から SfM により下流端に堆積した土砂量の時間変化を 5%以内の精度で計測する手法を構築した。これらの知見に基づいて移動床実験を実施した結果、SfM により計測された値と提案する手法により推定された掃流砂量の時間変化が概ね一致し、その有効性が明らかとなった。

Key Words: *acoustic Doppler current profiler, bedload discharge, bottom track velocity, STIV, SfM*

1. 序論

洪水中の土砂移動を把握するためのモニタリング技術として、ADCP のボトムトラッキング機能で計測される対地速度(以下、ボトムトラック速度、あるいは BT 速度と記す)を用いた掃流砂量計測手法の検討が進められている。この計測技術は、Rennie ら¹⁾によって BT 速度が河床上を移動する掃流砂の速度と同じであるとする仮定に基づいて提案されている。しかし、実河川においてそれを確認することは困難であるため、Ramooz ら²⁾は大型移動床水路において、高速ビデオカメラにより掃流砂の移動を撮影し、両者の比較が試みているが、十分な考察が行われていない。そこで本研究では、移動床実験水路において、河床上を流下する掃流砂の速度を STIV 法を用いて計測する方法を提案した。

つぎに、著者ら³⁾は BT 速度から掃流砂量を算出する手法を提案し、準実河川規模の人工流路において、ADCP と小型ナローマルチビームを搭載したボートを用いて計測区間下流のピットに堆積した土砂量の時間変化を計測し、比較することによってその手法の妥当性を確認している。

さらに、種々の水理条件下で確認するために、本研究では水路下流の下流に設置したトレイに堆積する土砂量の時間変化を 5 台のデジタルカメラで撮影した画像から SfM (Structure from Motion)で計測する手法を構築した。

以上の 2 つの計測手法を用いて、これまで定量的な検証が行われてこなかった BT 速度と掃流砂の移動速度の関係を明らかにするとともに、移動床水路において、著者ら³⁾が提案する掃流砂量推定手法の有効性を検証した。

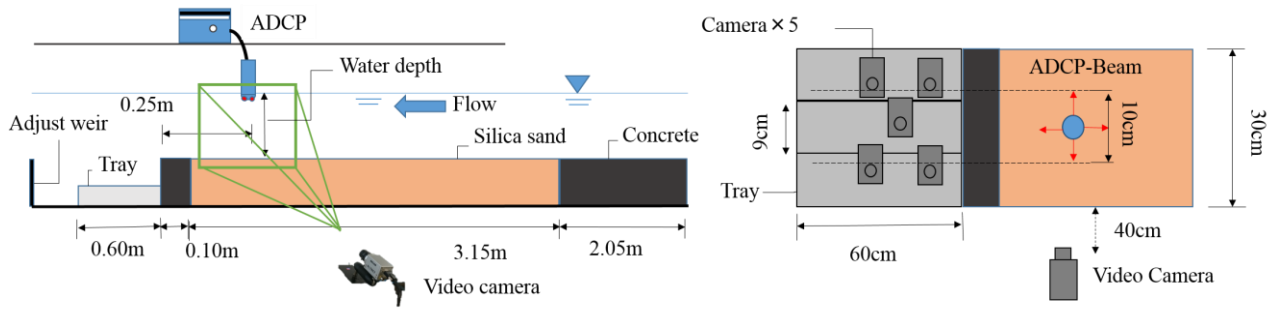
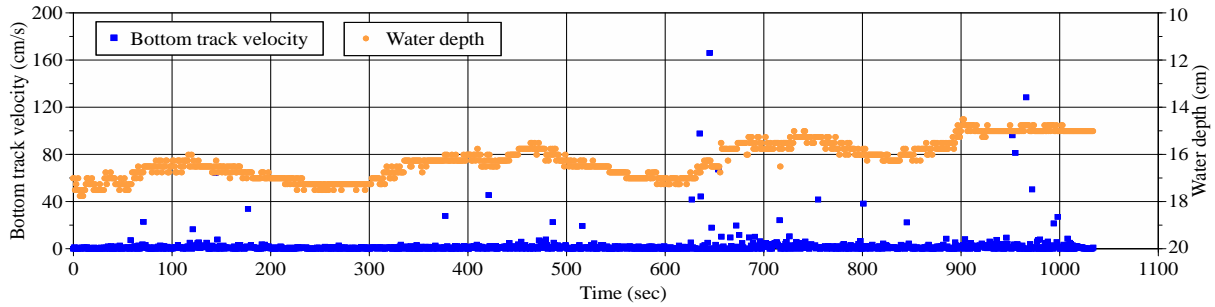
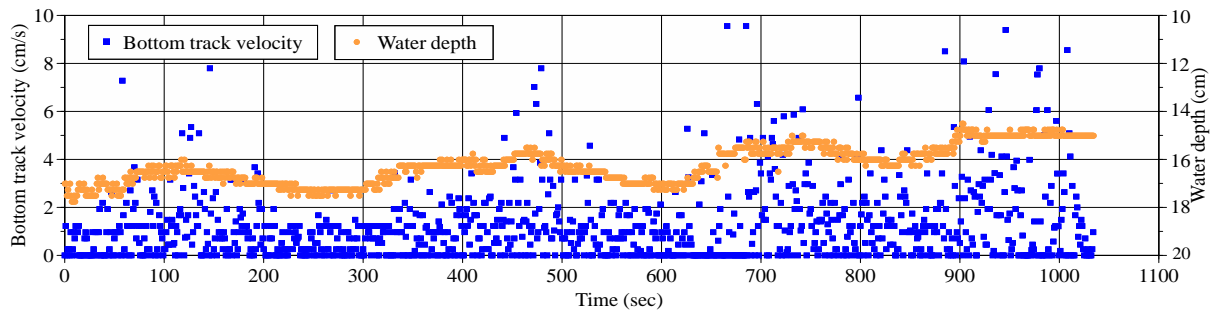


図-1 実験水路の諸元と計測機器設置状況 (左：縦断面図，右：下流部の平面図)



(a) ボトムトラック速度 0~170(cm/s)の範囲



(b) ボトムトラック速度 0~10(cm/s)の範囲

図-2 ADCPで計測した水深とボトムトラック速度の時間変化

2. ADCPで計測されるボトムトラック速度の検証

(1) 実験概要

図-1に本実験で使用した移動床直線水路と計測機器の設置状況を示す。水路幅 0.30m，水路長 7.00m の可変勾配式開水路を使用し，水路床勾配を 1/100 に設定している。下流の移動床区間 3.15m に珪砂 4 号(代表粒径 0.7mm)を敷き詰めている。

実験条件の設定にあたり，異なる水理条件で試験通水を行った結果，使用した小型 ADCP (Teledyne RDI 社：Stream pro ADCP)で BT 速度を計測するためには水深が 10cm 以上必要であること，BT 速度は掃流砂が活発に移動する状況でないと出力されないことがわかった。それらの条件を満たし，掃流砂のみの移動形態となるように，流量と下流端水深をそれぞれ毎分 1970 リットル，17cm に設定した。平坦河床から通水を開始し，下流端のトレイに堆積土砂が満杯になるまでの約 17 分間後に終了し

た。また，通水中には上流端の河床が低下しないように給砂を行った。

ADCP のトランスデューサー(超音波の送受信部)は，水路下流端から上流 25cm の位置の水路断面中央部に設置し，図-1 の右図に示すように流下方向となるようにビームの向きを設定した。なお，実験で設定した流れでは，水深が小さく鉛直流速分布が計測できないため，アンサンブル時間が短くなるように計測層厚と層数を設定し，BT 速度値はおよそ 1 秒ごとに出力されている。

(2) ボトムトラック速度の計測結果

図-2 に ADCP で計測した水深と BT 速度の時間変化を示す。BT 速度のレンジを変えた 2 種類の図で示している。BT 速度は，0~170cm/s 間で計測され，ボトムトラック速度のほとんどが 0~4cm/s の間で計測されている。図から河床材料の移動により形成された河床波が定期的形成されているのがわかる。河床波が形成されている時

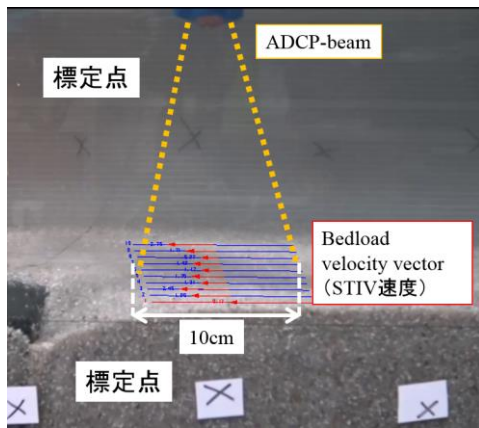


図-3 STIV法を用いた掃流砂速度の計測状況

にボトムトラック速度が 4cm/s 以上になる場合が多く、40cm/s 以上になる場合も確認できる。この現象については、実験時にビデオカメラを用いて同じ計測時間時に撮影された動画からも確認できる。

(3) STIV法を用いた河床上の掃流砂速度の計測方法

図-2 に示した BT 速度の値を評価するために、図-3 に示すアングルで撮影された動画を用いて、実河川において水表面の流速を計測する手法として近年多く用いられる STIV(Space-Time Image Velocimetry) 法により、実際に河床上を流下する砂の流速を(以下、STIV 速度と示す。)計測した。

カメラの高さと流下軸に対して横断方向に対する撮影範囲の比を 1/5 とし、標定点がアングル内に収まることも考慮しながら、できるだけ河床面を高い位置から撮影した。

標定点は図-3 に示すように、水路の前方に 3 点、水路の奥側に 3 点の合計 6 点設置し、検査線は横断方向に 3cm、合計 10 本設定して、10 秒間の動画から検査線上の平均的な流速を算出した。なお、通水中と水で満たされていない場合の STIV 解析上の幾何補正画像に違いが見られなかったことから、水による屈折の影響はないことを確認している。また、この実験条件では水深が約 17cm、トランスデューサーの吃水深が 3cm、ADCP のビーム角が 20 度であることから、ADCP は直径 10cm の範囲の平均的な掃流砂の移動速度を BT 速度として出力していることになる。

(4) ボトムトラック速度と STIV法を用いた掃流砂速度の計測結果

図-5 に実験中に計測された BT 速度と STIV 速度の比較結果を示す。ここでは、両者を比較するため、BT 速度も 10 秒間を平均値を用いている。図から、流速値が

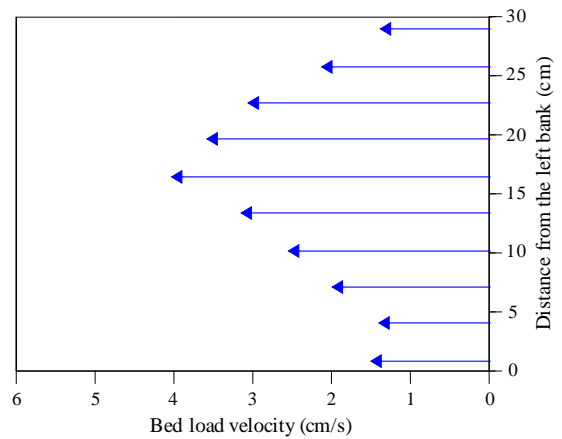


図-4 STIV法で計測された掃流砂速度の横断分布

(図-2 491-500 秒の時間帯の STIV 解析結果)

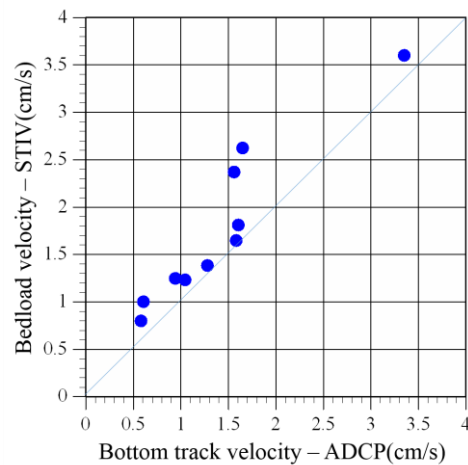


図-5 ボトムトラック速度と STIV法で計測された掃流砂速度の比較

1~4cm/s の条件下においては、両者が同程度となっており、ADCP で計測される BT 速度と河床波上を流下する掃流砂速度が概ね同等であることがわかった。BT 速度が全体的に STIV 速度より若干小さい値をとる理由については、現時点では不明のため、今後、他の条件でも実験を行って確認する必要がある。

2. 実験水路における SfM を用いた堆積土砂量の連続計測手法の検討

移動床実験において、下流端に堆積した土砂量を計測する際には、通常レーザー変位計が用いられる。しかし、この方法で計測する場合には、水を抜いた状態で行う必要があるため、時間変化を計測するには多大な時間を要するとともに、水抜き・水貯めの際に河床形状が崩れやすくなる等、計測精度の低下が懸念される。

そこで、文献³⁾で実施した準実河川流路においてナローマルチビームを用いた計測法のように、通水しながら連続的に堆積量が計測できる手法について

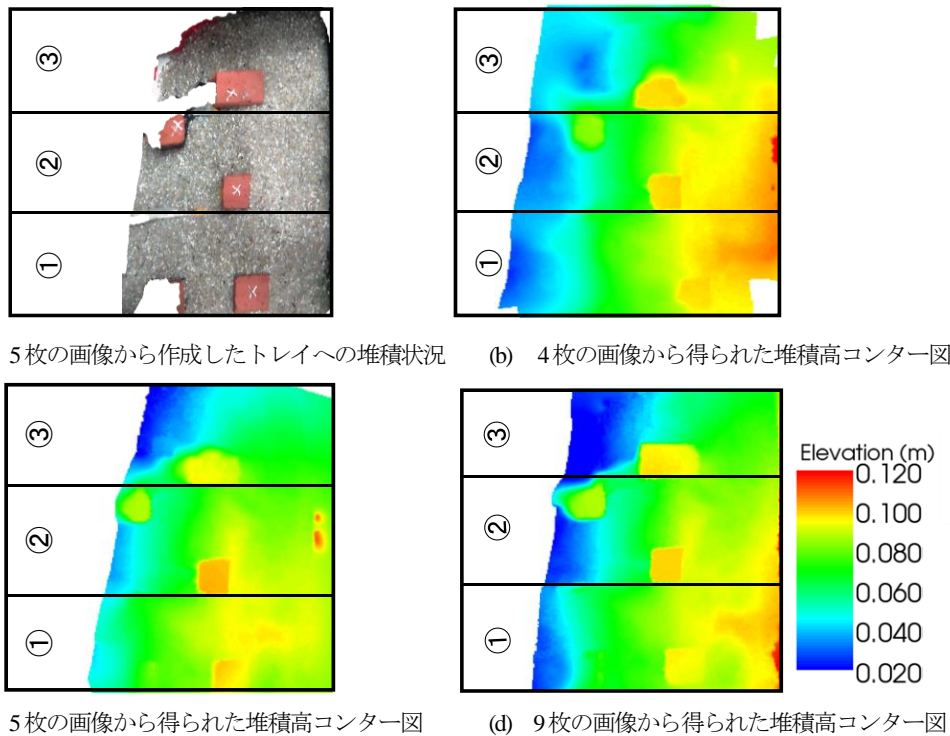


図-6 トレイへの土砂の堆積状況と SfMにより得られた堆積高コンター図

表-1 SfM とレーザー変位計によるトレイ②の堆積土砂量の比較

	SfM			レーザー変位計
	4枚画像	5枚画像	9枚画像	
堆積土砂量(cm ³)	1190	1100	1170	1070
レーザー変位計結果との比	1.12倍	1.03倍	1.04倍	1.0倍

検討を行った。

(1) SfMによる堆積土砂量の計測方法

図-1の右図に示すように、 ADCP の4つのトランスデューサーのビーム幅を想定して横断方向に3分割された金属製のトレイを水路下流端に設置した。ここで、中央部のトレイ②に堆積する土砂量が ADCP から算出する値と比較対象となる。

トレイの上方には、複数台の防水デジタルカメラを設置し、土砂の堆積状況を同時に撮影した画像から SfM ソフトウェア(Agisoft 社 Photoscan)により三次元地形モデルを作成した。

標定点は各撮影アングルに3点以上入るように高さを変えた赤レンガ上に設置し XYZ 座標を計測した。これらのデータを入力値として DEM(Digital Elevation Model : 数値標高モデル)データを出力し、土砂量を算出した。

効率的な撮影方法を検討するため、カメラの台数の違いによる精度の検証を行った。試験通水実験の終了後に下流端のトレイに堆積した土砂の体積を静水中でレーザー変位計(キーエンス社製 : IL-2000, IL-600×2 台, 1秒間

に10回の計測が可能)により計測し、その結果を正として、4枚、5枚および9枚画像から算出された結果と比較した。

(2) SfMを用いた堆積土砂量の計測結果

図-6(a)に5枚の画像から作成したトレイへの土砂の堆積状況を、図-6(b), (c), (d)に4枚画像、5枚画像および9枚画像を用いて SfM により算出した土砂の堆積高コンター図を示す。4枚と5枚の結果の違いは、トレイ中心部の画像の有無であるが、細部を比較すると、堆積部の高さが異なっている。

つぎに、上記トレイ②の範囲に4枚画像と5枚画像、9枚画像から得られた地形とレーザー変位計を用いて計測した地形の堆積土砂量を比較した。その結果、表-1に示すようにレーザー変位計の計測結果との比は、4枚、5枚、9枚画像がそれぞれ1.12倍、1.03倍、1.04倍となった。したがって、5台の防水カメラを用いて同時に画像を撮影することにより、5%以下の精度で堆積土砂量を計測できることがわかった。

ただし、通水中に下流端付近で土砂移動が活発な時間

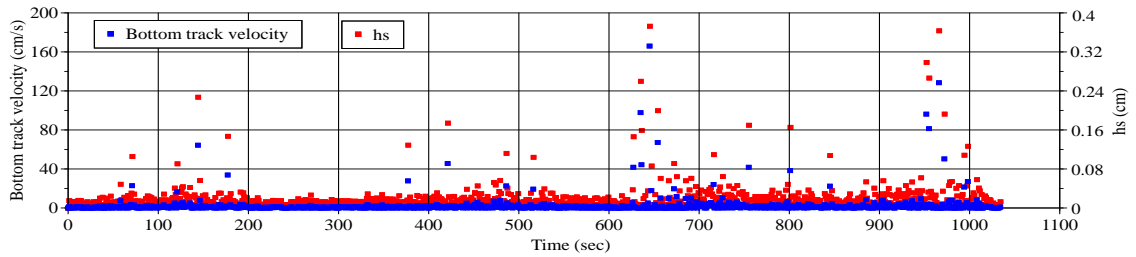


図-7 ボトムトラック速度から推定された移動層厚 h_s の時間変化

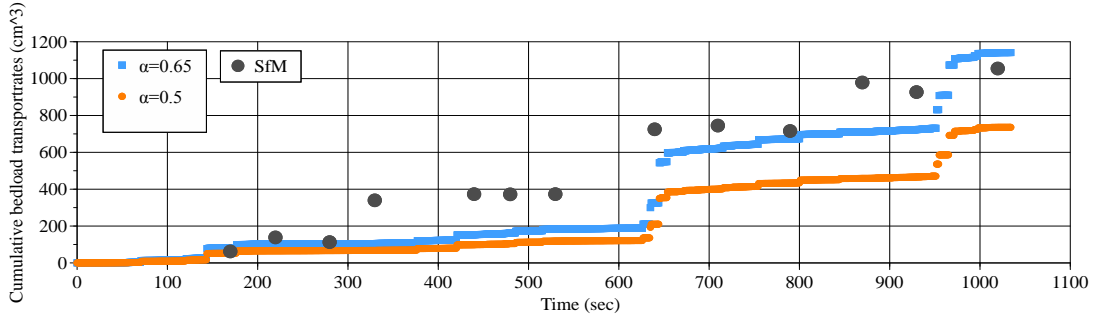


図-8 ボトムトラック速度から推定した掃流砂量と SfM による実測値の時間変化(トレイ②)

帯にはトレイに堆積する砂が舞っている状況では、SfMが行えない場合にも確認されたため、土砂量の算定はトレイへの土砂の堆積が多くない時間帯に行うこととした。

3. ボトムトラック速度から算出した掃流砂量と実測結果の比較

著者ら³⁾は、ADCPで計測されたBT速度 u_b と江頭ら⁴⁾の掃流砂量式を用い、掃流砂量算定方法を提案している。

$$q_b = \int_0^{h_s} c \cdot u \cdot dz \cong u_s \cdot h_s \cdot c_s \quad (1)$$

ここに、 q_b は単位幅掃流砂量、 u_s は掃流砂層の層厚平均移動速度、 h_s は掃流砂層厚、 c_s は平均土砂濃度(= $c \cdot 2 = 0.3$)である。 u_s は次のように導かれている。

$$\frac{u_s}{u_*} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_* \quad (2)$$

ここに、 K_1 は勾配に関する係数、 K_2 は相対水深に関する係数、 f_d は粒子衝突に関する係数、 f_f は間隙水に関する係数である。また、江頭ら⁵⁾によると、掃流砂層における鉛直流速の近似式が次のように提案されている。

$$\frac{u(z)}{u_*} = A_s \left\{ 1 - \left(\frac{h_s - z}{h_s} \right)^{3/2} \right\} \quad (3)$$

ここに、 z は珪砂の移動が発生している領域と移動が発生しない領域の境界との水面の高さ(理論河床高からの高さ)、 A_s は c_s 、 θ 、 ϕ_s の関数である。さらに、掃流砂層厚 h_s は、以下の式で表される。

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cdot \cos \theta \cdot \{\tan \phi_s - \tan \theta\}} \tau_* \quad (4)$$

ここに d は平均粒径、 θ は流向の河床面勾配、 ϕ_s は砂粒子の内部摩擦角である。なお、河床勾配は、ADCPの

4つのビーム長から計算する。

また、 u_s は u_b を用いて次のように定義する。

$$u_s = \alpha \cdot u_b \quad (5)$$

ここに、 α は掃流砂層の表面移動速度 u_b から層厚平均速度 u_s を算出するための更正係数である。式(3)より α を算出すると0.65となる。

一般的に式(1)、(2)、(4)を用いて掃流砂量を算出する際には、 u_s を用いて u_s 、 h_s が求められるが、本手法では u_s から u_s を求めている点が特徴であり、ADCPにより計測されるBT速度である u_b 、 θ 、水深と式(1)、(2)、(4)、(5)を用いて掃流砂量を算定している。

図-7にBT速度から式(2)、(4)により求めた掃流砂層厚 h_s の時間変化を示す。図-2に示した水深とBT速度との関係から、河床波のクレストがADCPの計測範囲に到達した際にBT速度が大きくなっており、河床材料の代表粒径0.7mmに対して、BT速度が40cm/sで h_s が0.16cm、最大の160cm/s程度で h_s が0.37cmであった。

つぎに、図-8にトレイ②に堆積したSfMによる実測値とボトムトラック速度から推定した掃流砂量の時間変化を示す。なお、SfMによる土砂堆積量の計測は、トレイへの砂の堆積が少ない、河床波が通過する前後の時間帯に行っている。著者らが過去に行った同様な比較結果³⁾において、 α の値が0.5から0.65の間に分布していたため、ここでも同様に2つの α の値を用いて掃流砂量を算定している。図から、通水開始後170secからトレイへの土砂の堆積が確認され、300secから600secの時間帯では、推定値が実測値より過少評価(約1/2)されているものの、それ以降の時間帯では両者の差は小さくなり、通水終了時には同程度となった。また、 α の値は0.65とし

た場合の時間変化と近い傾向が得られた。

過少評価された時間帯の堆積土砂量については、3章で示した SfM を用いた堆積土砂量の精度検証が通水終了時を対象としていることから、その約 1/3 の土砂量の計測精度が低い可能性がある。その点については今後、検証を行う予定である。

以上のことから、本研究で用いた掃流砂量推定手法では、文献³⁾の結果も含め、推定した累積値が実測値と比較して 1/2 から 1.5 倍以内に収まっていた。著者ら⁶⁾が実河川の洪水時に採砂器を用いて行った掃流砂量の観測結果に 2 オーダー以上のバラつきがあったことを考えると、本手法は掃流砂量の計測技術として十分実用レベルであるといえる。

4. 結論

本研究では、ADCP で計測されるボトムトラック速度から掃流砂量を算出する方法について、移動床実験水路を用いた検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 掃流砂が活発移動する条件下において、ADCP で計測されるボトムトラック速度は、STIV 法で計測された河床上の掃流砂の速度と同程度であった。
- 2) 5 台のデジタルカメラにより撮影した画像を用いて、SfM により水路下流端のトレイに堆積する土砂量の時間変化を計測する手法を構築した。通水終了時の土砂量を対象とした場合、レーザー変位計の計測結果との差は 5% 以下であった。
- 3) ADCP で計測できるボトムトラック速度および水深を用いて、江頭らの提案する手法で算出された掃流砂量と 2) の方法で得られた実測結果を比較したところ、累積値は 1/2 から 1.5 倍以内に収まっており、 α を 0.65 とした場合の時間変化と同様な傾向を示した。これより、本掃流砂量算定手法の

実用性が確認できた。

謝辞：本研究の実施にあたり、ADCP による計測方法、データ処理方法については、(株)ハイドロシステム開発の橋田氏から、STIV 法による河床上の掃流砂速度の算出法については、(株)福田水文センター橋場氏から技術的なアドバイスをいただいた。また、本研究は JSPS 科研費 15K06242 (代表者：岡田将治) の助成を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Collin D. Rennie, Robert G. Millar and Michael A. Church : Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, Journal of Hydraulic Engineering, MAY 2002, pp.473-483, 2002.
- 2) Ramoos, R., and Rennie, C. D. : Laboratory measurement of bedload with an ADCP, United States Geological Survey Scientific Investigations Rep. 2010-5091, Reston, VA, 2010.
- 3) 小関博司, 萬矢敦啓, 工藤俊, 橋田隆史, 岩見洋一 : 実河川における掃流砂量と有効摩擦速度の評価方法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, 2017.
- 4) 江頭進治, 宮本邦明, 伊藤隆郭 : 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.789-794, 1997.
- 5) 江頭進治, 芦田和男, 高濱淳一郎, 田野中新 : 連続体モデルに基づく流砂量式の誘導, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.441-446, 1991.
- 6) Atsuhiko Yorozuya, Shoji Okada, Yuya Kanno, and Kazuhiko Fukami : Bed-load discharge measurement by ADCP in actual rivers, River Flow 2010, pp. 1687-1692, 2010.

(2018.5.31 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CALCULATION METHOD OF THE BED LOAD DISCHARGE USING THE BOTTOM TRACK VELOCITY MEASURED BY ADCP

Aki UEHARA, Shoji OKADA, Atsuhiko YOROZUYA and Hiroshi KOSEKI

The authors proposed a calculation method of the bed load discharge using the bottom track velocity measured by ADCP and this study verified the effectiveness of the method by conducting an experiment with movable bed. First, we confirmed that the bottom track velocity measured by ADCP represents the sand velocity on the riverbed by using the STIV method. Next, a measurement method of the time variation of the sediment volume accumulated at the downstream end by SfM method using the interval photographed images of five digital cameras within 5% of accuracy was developed. As a result of the experiment based on these findings, the effectiveness was clarified since the time change of the bed load discharge estimated by the authors method and the measured value by SfM method roughly agreed.