

ADCPとRTK-GPS搭載橋上操作艇を用いた 定点・曳航観測から得られた水深平均流速、 摩擦速度および掃流砂速度の考察

CONSIDERATION OF DEPTH-AVERAGED VELOCITY, SHEAR VELOCITY AND
BED-LOAD VELOCITY MEASURED BY STATIONARY AND MOVING
OBSERVATION USING TETHERED BOAT EQUIPPED WITH ADCP AND RTK-GPS

岡田将治¹・竹内慈永²・和泉征良³・萬矢敦啓⁴・橋田隆史⁵
Shoji OKADA, Jei TAKEUCHI, Masayoshi IZUMI, Atsuhiko YOROZUYA and Takashi KITSUDA

¹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)

²正会員 学士(工学) (株)日水コン大阪支所 (〒654-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101)

³学生会員 学士(工学) 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

⁴正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁵正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18)

Simultaneous observation of flood flow and bed load velocity by using a boat-mounted ADCP and the Real Time Kinematic Global Positioning System (RTK-GPS) was carried out in several rivers. Depth-averaged velocity, bed-load velocity and shear velocity data measured by stationary and moving observation were compared to examine the practical observation method of flood discharge and bed-load. Coefficient of variation CV of measured data were used to evaluate the measurement accuracy of depth-averaged velocity and bed-load velocity. These results indicate that more practical observation routine is the combination with stationary and moving observation.

Key Words: *Acoustic Doppler Current Profiler, Bed load velocity, Shear velocity*

1. 序論

近年の国内外の洪水観測技術の動向をみると、ADCPによる流量の観測から、ADCPのボトムトラッキング機能(以下、BT機能と記す)を応用した対地速度の計測による掃流砂量計測技術への展開がRennieら¹⁾により行われてきた。その後、著者ら²⁾によってRennieらが提案する手法の適用性について実験水路を用いて検討し、摩擦速度の算定手法についてさらに改良を加えた定点観測による新たな土砂モニタリング手法を提案している。

一方、Ramoozら³⁾はADCPのBT機能で河床付近の土砂の移動を適切に計測できているかを検証するために、大型実験水路でADCPのBT機能で計測した対地速度とデジタル動画から追跡した河床砂の動きを比較し、両者の相関性の高さを確認している。これらの既往の研究成果から、さらに発展させた流量と掃流砂量、浮遊砂量も併せた同時計測技術への新たな展開を迎えようとしている。

著者ら⁴⁾は、ADCPとRTK-GPSを搭載した橋上操作艇による流量と掃流砂量の同時計測技術の構築を進めており、四万十川および仁淀川の観測結果と二次元河床変動

解析の結果を比較している。その結果、著者らが提案している掃流砂量推定手法で求めた値が従来用いられている掃流砂量式で得られる値よりも2~4倍程度大きくなることを示している。ただし、これらの検討の中で、ADCPで計測した鉛直流速分布から得られる摩擦速度とADCPのボトムトラック機能とRTK-GPSにより得られる掃流砂速度の関係が10分程度同じ地点を計測した定点観測時に比べてデータのバラつきが大きかったため、今後の検討課題としている。すなわち、横断曳航観測では、横断面形状と断面流速分布および流量が得られる一方で、各地点に対して発射する超音波の数が定点観測に比較して少ないため、得られる流速分布や掃流砂速度の計測精度が低下すると考えられる。

Jamiesonら⁵⁾は定常流とみなせる洪水時において、定点観測と移動観測で計測される掃流砂速度の比較を、変動係数 CV を指標として行っているが、流況および流況と掃流砂速度の関係についての検討は行っていない。

そこで本研究では、Jamiesonら⁵⁾が行った手法を参考に、四万十川、仁淀川および肱川において定点観測と曳航観測で得られた水深平均流速、摩擦速度および掃流砂

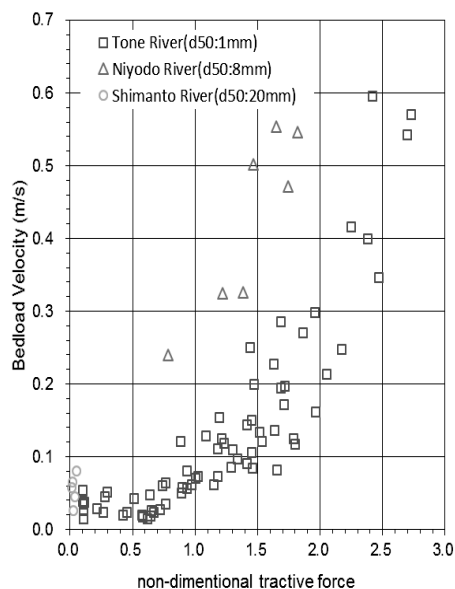


図-1 定点観測における無次元掃流力と掃流砂速度の関係

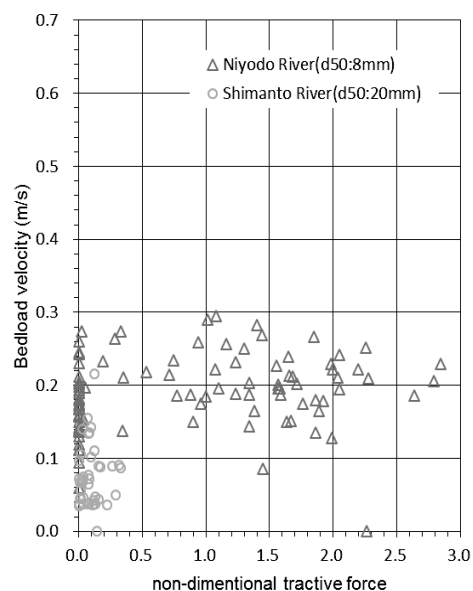


図-2 横断移動観測における無次元掃流力と掃流砂速度の関係

表-1 各河川の観測時における水理条件

	代表粒径 d ₅₀ (mm)	水深 (cm)	水面 勾配	水深平均 流速 (cm/s)	摩擦速度 (cm/s)	無次元掃流力
四万十川	20	455	1/1500	260	13	0.052
仁淀川(pt.1)	8	520	1/800	280	40	1.23
仁淀川(pt.2)	8	320	1/800	260	53	2.17
肱川	8	285	1/2800	230	45	1.56

速度の計測精度について、計測時間内の平均値に対する標準偏差の比で表される変動係数 CV を指標として定量的な評価を行い、洪水流量と掃流砂量の把握を目的とした実用的な計測手法について考察した。

2. ADCP と RTK-GPS を用いた定点観測・横断移動観測で計測された摩擦速度と掃流砂速度の関係

図-1に利根川、四万十川および仁淀川において定点観測で得られた無次元掃流力と掃流砂速度の関係を示す。これらのデータは1回につき、10～15分の定点観測で得られた平均値を示している。ここで用いている無次元掃流力は、ADCPで計測した鉛直流速分布から著者らが提案する手法により算出した摩擦速度を用いて算出した結果を使用している。図から、観測を行っている各河川の代表粒径が異なるため、無次元掃流力の値に違いはあるものの、掃流砂速度との関係には正の相関性を確認することができる。

図-2に四万十川および仁淀川において横断移動観測で得られた無次元掃流力と掃流砂速度の関係を示す。これらのデータは約10秒間の平均値をプロットしている。一般に曳航横断観測時の移動速度は、0.5m/s以下であることから、およそ5mの横断距離あたりの値と考えること

ができる。図より、同じ水理条件で実施した定点観測に比べてデータのバラつきが大きく、図-1に示すような正の相関が見られない。これらの異なる観測方法で得られる無次元掃流力(摩擦速度)と掃流砂速度との関係の違いについて、以下に考察を進めることとする。

3. 定点観測で得られた水深平均流速と掃流砂速度および摩擦速度の考察

表-1に四万十川、仁淀川および肱川で現地観測実施時の観測地点の水理条件を示す。四万十川では、2011年7月20日6時20分から12時40分までに定点観測を6回、仁淀川では、2012年9月17日12時30分から18時30分までに水深の異なる2地点で定点観測を7回(右岸側Pt.1：4回、左岸側Pt.2：3回)、肱川では2013年10月25日16時10分から17時40分までに定点観測を2回実施している。

定点観測から得られるデータを定量的に考察するために、本研究ではJamiesonら⁹⁾が用いた計測時間内の平均値と標準偏差の比で表される変動係数 CV を用いて、その値やその時間を算出する。変動係数 CV は次式により算出している。

$$CV = \sigma / \mu \quad (1)$$

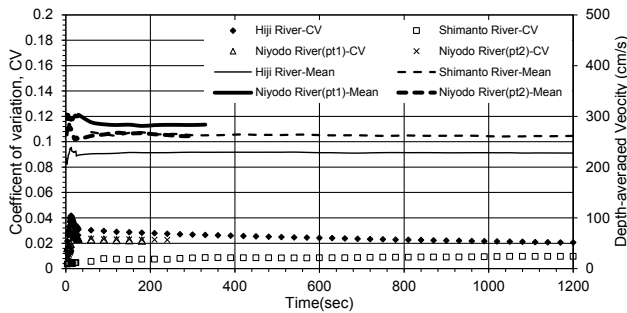


図-3 水深平均流速の平均値と変動係数の時系列変化
(計測開始から1200秒間)

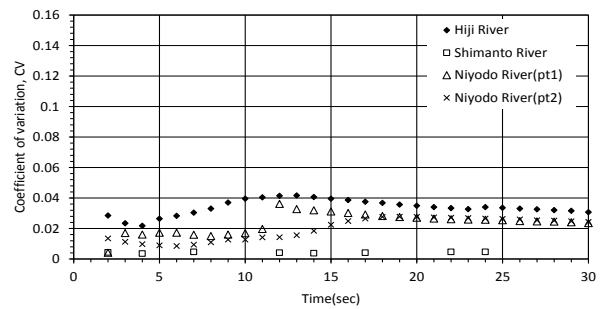


図-4 水深平均流速の変動係数の時系列変化
(計測開始から30秒間)

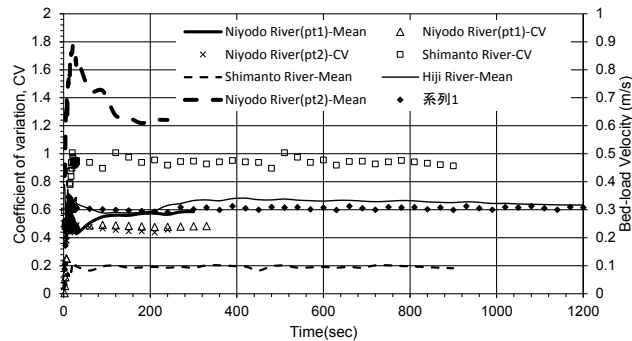


図-5 掃流砂速度の平均値と変動係数の時系列変化
(計測開始から1200秒間)

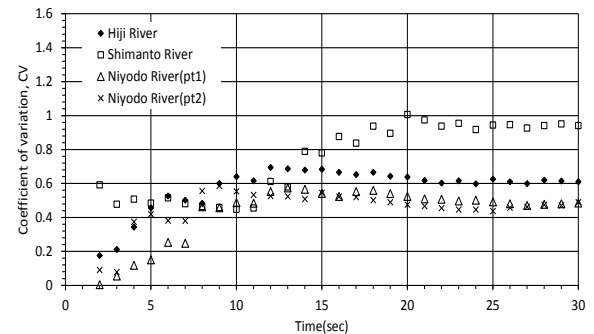


図-6 掃流砂速度の変動係数の時系列変化
(計測開始から30秒間)

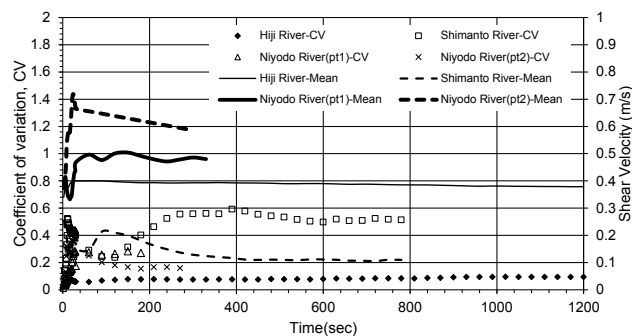


図-7 摩擦速度の平均値と変動係数の時系列変化
(計測開始から1200秒間)

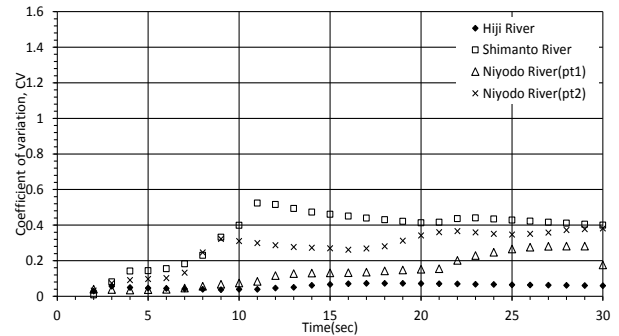


図-8 摩擦速度の変動係数の時系列変化
(計測開始から30秒間)

ここで、 CV ：変動係数、 σ ：計測時間内の標準偏差、 μ ：計測時間内の平均値である。

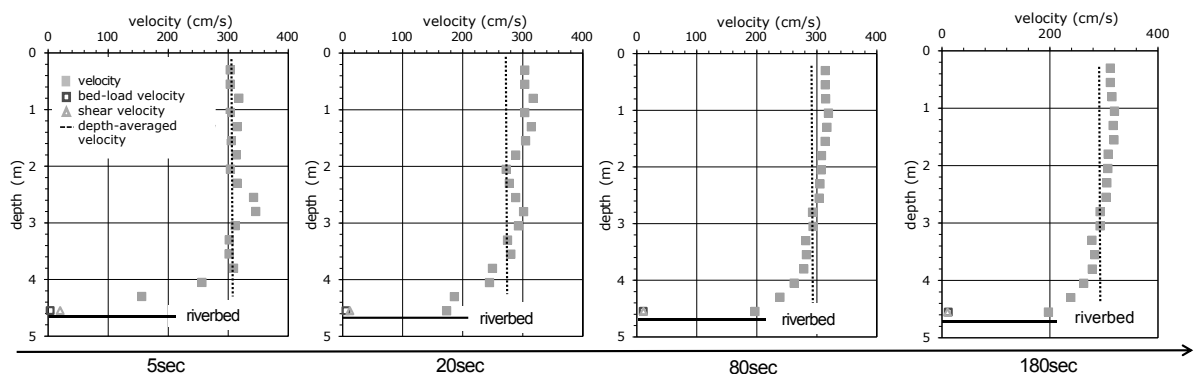
本研究では、ADCPとRTK-GPSを搭載した橋上操作艇によって得られる水深平均流速と掃流砂速度、実測した鉛直流速分布から著者らの手法により算出される摩擦速度の3つの諸量を検討する。摩擦速度と掃流砂速度に加えて水深平均流速を対象とした理由は、定点観測と横断移動観測の計測値の比較によって一般に行っているADCPによる流量観測の精度を確認するためである。

図-3、図-5、図-7にそれぞれ水深平均流速と掃流砂速度および摩擦速度の計測開始からの平均値と変動係数 CV の時系列を示す。また、計測開始後直後の各諸量の変化を見るために、図-4、図-6、図-8に、水深平均流速と掃流砂速度および摩擦速度の計測開始後30秒間までの時系列を示す。

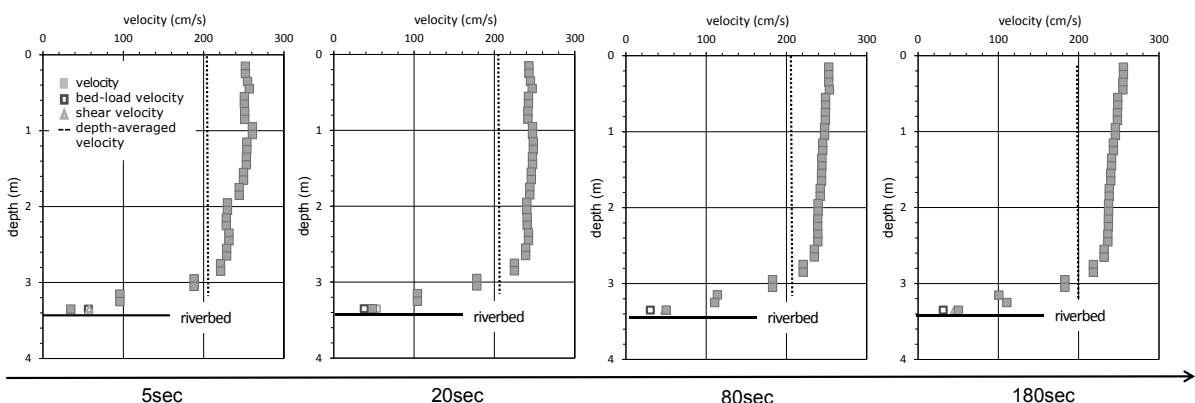
図-3の水深平均流速の変動係数 CV は、すべての河川で0.02~0.04と非常に小さい値となっている。すなわち、

2m/sを超える流速値に対する標準偏差は2~4%程度であり、図-4の計測開始直後15秒までに変動係数が若干の変化するものの、それ以降は徐々に一定値に落ち着いていくのがわかる。したがって、水深平均流速に関しては、数十秒程度の非常に短い時間の計測で、精度の高いデータが得られていることがわかる。

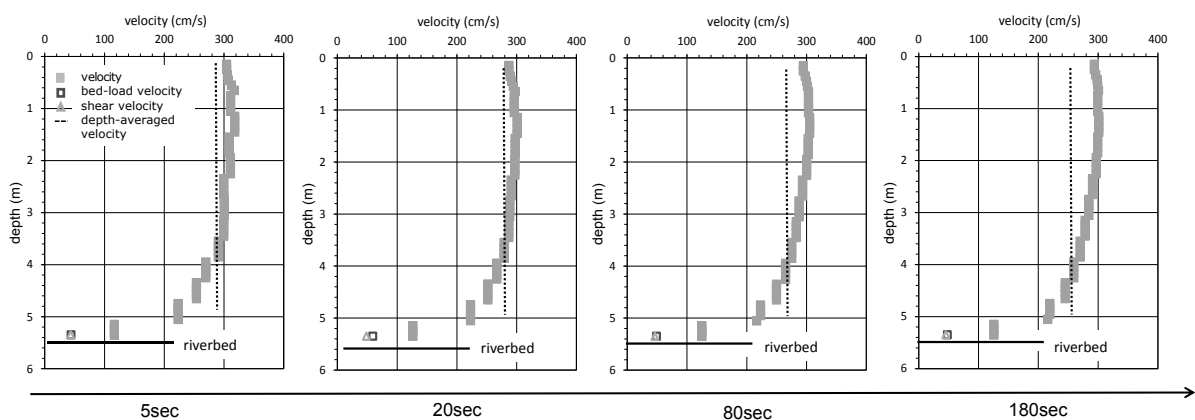
つぎに、図-5に示す掃流砂速度の CV は四万十川を除いてはすべて小さい値でデータが落ち着いている。 CV が大きくなるには、掃流砂速度の値が小さいことが考えられる。実際に、表-1を見てもわかるように四万十川は粒径が他の河川と比べると大きく、限界掃流力に近い条件であるため、砂粒子が掃流されにくい状況にある。また、図-6の短い時間における掃流砂速度の CV を見ると20~30秒程度でどの河川でも一定値に落ちついている。Jamiesonら⁹⁾の観測結果においても、定点観測における掃流砂速度の CV は0.4から0.8であり、オーダーとしては同程度であった。ただし、河床波が活発に移動するよう



(a) 四万十川



(b) 肱川



(c) 仁淀川(Pt1)

図-9 定点観測で計測した各時間内の鉛直流速分布と水深平均流速、掃流砂速度および摩擦速度の平均値の時系列変化

な条件下では、計測した場合には掃流砂速度が時間的に変化するため、 CV も大きくなると推察される。本研究ではそのような状況は確認されていない。

図-7に示す摩擦速度の変動係数では、四万十川が最大の値で落ち着き、肱川では最小の値で落ち着いている。仁淀川では180秒程度で落ち着いていることがうかがえる。四万十川は30秒ほどの短時間で落ち着いたが、200秒後からさらに値が大きくなり、最終的に CV が一定値に落ち着いたのは600秒ほどであった。ただし、これについては、橋上操作艇の位置を移動させたことが原因と判明し、他の河川と同様に180秒程度で一定値に落ち着

いている。したがって、水深平均流速、掃流砂速度、摩擦速度の3つの中で、変動係数 CV がある値に落ち着くまでに最も時間を要するのは摩擦速度であることがわかった。摩擦速度はADCPで実測した鉛直流速分布から算出しているため、ADCPで計測する鉛直流速分布がどの程度時間をかければ、その地点の流況を表すことができるのかを考察するために、図-9に四万十川、肱川および仁淀川においてADCPで計測した計測時間内の鉛直流速分布と3つの諸量の時系列変化を示す。例えば、20秒後の鉛直分布および各値は、計測開始から20秒間の平均値を表している。これらの図より、四万十川において鉛直流

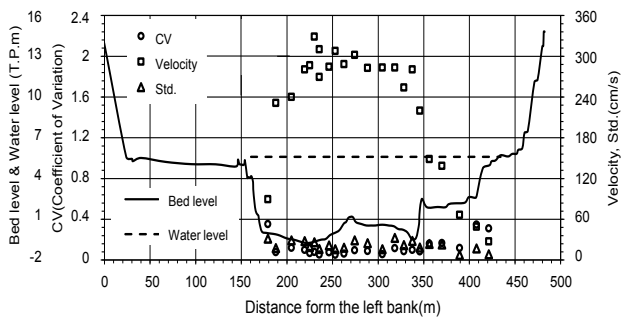


図-10 水深平均流速、標準偏差、変動係数の横断分布
(四万十川 2011年7月20日 6:00~6:13)

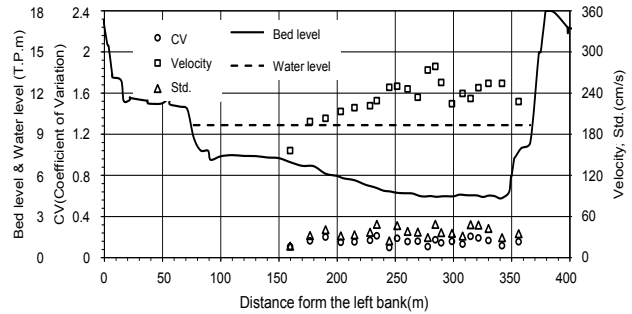


図-11 水深平均流速、標準偏差、変動係数の横断分布
(仁淀川 2012年9月17日 11:55~12:13)

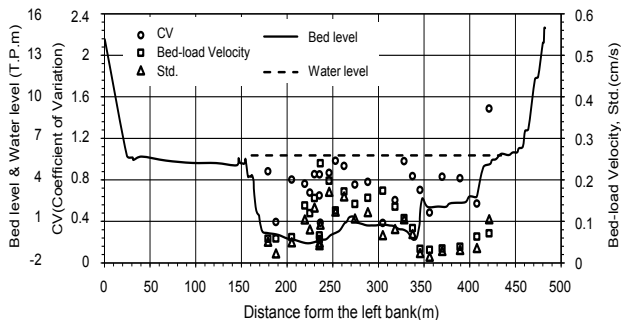


図-12 掃流砂速度、標準偏差、変動係数の横断分布
(四万十川 2011年7月20日 6:00~6:13)

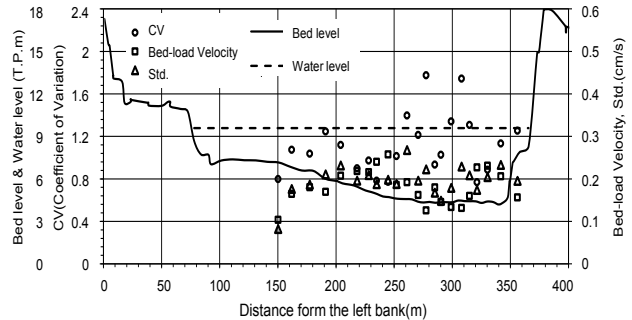


図-13 掃流砂速度、標準偏差、変動係数の横断分布
(仁淀川 2012年9月17日 11:55~12:13)

速分布が落ち着くまでに時間を要していることがわかる。この原因として、無次元掃流力が限界掃流力付近であるため、河床砂が定常的に移動していないことが流況に影響を与えていると考えられる。この点については、限界掃流力付近から河床砂の移動が確認されるかも含め、さらにデータを蓄積して検証していく必要がある。

これらの結果から、水深平均流速は計測開始時からCVがほとんど変化しないため、15秒程度の観測時間でその地点の流況を表すデータを得ることができ、掃流砂速度は河床波が活発に移動していない条件下では計測開始時から20~30秒程度で変動係数CVがある値に落ち着く。さらに、摩擦速度については、掃流砂が移動している河川ではCVが落ち着く時間が短く、限界掃流力に近い条件下ではCVが落ち着くまでに時間を要することがわかった。

4. 横断移動観測で得られた水深平均流速と掃流砂速度および摩擦速度の考察

前章で得られた結果に基づいて、横断移動観測で得られる各諸量について同様に考察する。ここでは、2011年7月の四万十川洪水観測で得られた移動観測のうち6:00~6:13(水位: 5.37m)と2012年9月に仁淀川において11:55~12:13(水位: 9.63m)に実施した横断移動観測データを用いた。

図-10に四万十川洪水時の移動観測で得た水深平均流速とその標準偏差および変動係数の横断分布を、図-12

には掃流砂速度とその標準偏差および変動係数の横断分布を示す。これらの観測では、ADCPの計測間隔が平均1.4秒であり、曳航観測時の移動速度は平均0.3m/sであった。これらの図には、10mの移動距離(20アンサンブル)の平均値をプロットしている。

図-10から、水深平均流速の変動係数は、流速が3m/s程度まで高流速となる主流部においても0.05~0.10となっており、定点観測の0.02~0.04と比べると大きい値となつてはいるが、移動観測においても精度の高い値が得られていることがわかる。一方、図-12に示した掃流砂速度では、標準偏差と変動係数ともに水深平均流速のCVと比較するとどちらも2倍近く違いがあり、定点観測と同様にバラつきが大きくなっている。

図-11に仁淀川洪水時の移動観測で得た水深平均流速とその標準偏差および変動係数の横断分布を、図-13に掃流砂速度とその標準偏差および変動係数の横断分布を示す。11:55~12:13のケースではADCPの計測間隔が約0.7秒であり曳航観測時の横断移動速度は平均0.2m/sであった。図に示す結果は、四万十川のものと同様に10mの距離平均(30アンサンブル)したものをプロットしている。

四万十のケースと同じく水深平均流速のCVは小さく、掃流砂速度のCVが示す値は大きい。このことから、曳航観測によって得られる掃流砂速度のCVは定点観測の場合と同様に、掃流砂速度の40%から同程度の標準偏差でバラつくことが四万十川および仁淀川の観測結果からわかった。

5. ADCP と RTK-GPS 搭載橋上操作艇による実用的な洪水流量と掃流砂量観測方法の考察

3章と4章での検討結果から、横断移動観測は定点観測に比べて、特に摩擦速度を得るための鉛直流速分布の計測精度が低下することが明らかとなった。しかしながら、曳航観測で得られた水深平均流速に含まれる標準偏差は水深平均流速の平均値に対して5~10%であり、流量観測のみを目的とする場合には、十分な精度を有していると判断できる。さらに、横断移動観測では流量に加えて定点ほどの精度は有していないものの、掃流砂速度の横断分布が計測できる利点がある。

このことから、曳航観測の計測結果を用いて流量計測を行っても、掃流砂量推定を行うための摩擦速度および掃流砂速度の計測精度が高いとは言い難い。そのため、曳航観測により得られる掃流砂速度の横断分布から土砂移動の顕著な部分を把握し、その後、任意の場所において定点観測を行い、そこから得られた掃流砂速度と摩擦速度から断面全体の掃流砂量を推定することが望ましい。

現在、ADCPを搭載した橋上操作艇による流量観測は、浮子観測の結果と比較するため、1時間に1往復する方法が一般に用いられている。水面幅が300mの河川では、横断移動速度を0.5m/sとしても往復で約30分間必要とする。残りの時間で定点観測を実施すれば、1地点だけでなく、観測データをリアルタイムで処理して本研究で実施した変動係数を計算することにより、必要最小限の計測時間で2~3地点の複数地点の摩擦速度と掃流砂速度の関係を把握するのが実用的な観測方法といえる。

5. 結論

本研究では、ADCPを用いた移動観測における流量と掃流砂量の実用的な観測手法の構築を目的として、四万十川、仁淀川および肱川において、定点観測と曳航観測を実施し、水深平均流速、掃流砂速度および摩擦速度のデータの精度について変動係数 CV を指標として評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 定点観測で得られる水深平均流速の標準偏差は2.5m/sを超える計測値の5%以下で、変動係数も計測開始から15秒程度で一定値をとる。一方、横断移動観測では5~10%程度で定点観測の場合よりも低下はするものの、短時間で変動係数が落ち着くことから、橋上操作艇を曳航させる一般的な流量観測手法が高い計測精度を有している。
- 2) 定点観測における掃流砂速度の変動係数は、0.4~1であり、掃流砂速度の小さい四万十川において

大きい値をとった。河床波が活発に移動するような条件でなければ、掃流砂速度の CV はどの河川でも20~30秒程度で一定値に落ちついた。また、移動観測においては、定点観測の場合と同程度の変動係数の横断分布が得られた。

- 3) ADCPで実測した鉛直流速分布から算出する摩擦速度は、定点観測においても水深平均流速、掃流砂速度よりも変動係数が一定値になるまで時間を要し、本研究では180秒間程度であった。特に、無次元掃流力が限界掃流力に近い四万十川においては、鉛直流速分布形が落ち着くまでに時間を要した。
- 4) 本研究で得られた結果に基づいて、流量と掃流砂量の同時計測のためには、定点観測と横断移動観測を組み合わせた手法が実用的であり、計測時間を最小限に留め、計測地点数を多くするための方法として、計測したデータをリアルタイムで処理して変動係数をモニタリングする方法を提案した。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(基盤研究C)「ADCPを用いた洪水流況、河床速度、浮遊砂量の同時計測技術の開発と実洪水への適用」(課題番号：23560614)および平成25年度河川整備基金助成事業「洪水中の掃流砂量計測システム構築に関する基礎的研究」(課題番号：25-1212-010)の一環として行った。国土交通省高知河川国道事務所、中村河川国道事務所および大洲河川国道事務所には資料提供や現地観測に際してご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Rennie, C.D., et al: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *J. Hyd. Eng.*, Vol. 128, No. 5, 2002.
- 2) 萬矢敦啓, 岡田将治, 江島敬三, 菅野裕也, 深見和彦: ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定方法, 水工学論文集, 第54巻, pp.1063-1098, 2010.
- 3) Ramooz, R., and Rennie, C. D. : Laboratory measurement of bedload with an ADCP, United States Geological Survey Scientific Investigations Rep. 2010-5091, Reston, VA
- 4) 岡田将治, 和泉征良, 竹内慈永, 萬矢敦啓, 橋田隆史: ADCPとRTK-GPSの実測データに基づく掃流砂量推定手法の考察, 水工学論文集 Vol.70, No.4, I_631-I_636, 2014.
- 5) E. C. Jamieson, C. D. Rennie, R. B. Jacobson, R. D. Townsend : Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River -Moving versus Stationary Boat Conditions-, Vol.137, No.9, pp.1064-1071, 2011.

(2014. 4. 3受付)