

ADCPによる洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の 同時計測技術構築のための基礎的検討

FUNDAMENTAL EXAMINATION OF SIMULTANEOUS OBSERVATION
TECHNIQUE FOR FLOOD FLOW, BED AND SUSPENDED LOAD USING ADCP

岡田将治¹・萬矢敦啓²・本永良樹³・橘田隆史⁴

Shoji OKADA, Atsuhiro YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA and Takashi KITSUDA

¹正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³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)

⁴正会員 修士(工学) 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)

⁴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)

In this paper, the authors conducted the simultaneous observation of flood flow and moving bed velocity by using tethered boat equipped with ADCP and the Real Time Kinematic Global Positioning System (RTK-GPS) in Shimanto River during medium flooding. With this measurement system, moving bed velocity at each position was estimated with subtracting moving velocity vector of the boat estimated by RTK-GPS from velocities obtained by ADCP bottom tracking function. As the results of transverse observation with discharge of 3000m³/s, cross-sectional profiles of flow and moving bed velocity were obtained. Moreover, we examined measurement technique of the Acoustic Backscatter Turbidity (ABT) with ADCP.

Key Words: Acoustic Doppler Current Profiler, Moving bed velocity, Acoustic Backscatter Turbidity

1. 序論

近年、ADCPを用いた河川の流況観測が多く実施されるとともに、ADCPによる洪水観測技術やデータ処理、計測精度の評価手法等に関する検討が行われ、基礎的な技術はほぼ確立されてきたといえる。そして、ADCPを用いた観測技術の次のステップとして、多くの研究者・実務者の興味は流況と掃流砂量、あるいは浮遊砂量の同時計測技術の確立に移りつつある。ADCPにはナビゲーションの目的のために自機の動きを計測するためのボトムトラッキング機能(以下、BT機能と記す)が搭載されているが、河床が移動していないことを前提として対地速度を算出するため、河床が移動する場合には流速値が過小に出力されるという問題が知られている。二瓶ら¹⁾は、江戸川の洪水時(200~800m³/s程度)にADCPの定点観測によりBT機能の有無が流量推定精度に及ぼす影響を調べ、0.6m/sを超える対地速度を計測し、この条件下でBT機能を用いると流量は10~20%程度過小評価されることを指摘している。一方、Rennie et al.²⁾はADCPを静止させて得られる対地速度(河床移動速度)から掃流砂量計測技術への展開を図っている。その後、著者ら³⁾は大型実験水路においてADCPで計測された鉛直流速分布から摩擦速度

を推定するアルゴリズムを提案し、河床移動速度との関係を考察した結果、従来の対数則を仮定した摩擦速度よりもさらに正の相関を持つことを示している。さらに、現地河川において採砂器により掃流砂量の計測を行い、本手法の有効性を検証している⁴⁾。ADCPの反射強度から濁度および浮遊砂量を推定する技術については、著者らは超音波が水中を通過する際に生じる水塊による発散損失および吸収損失、懸濁物質による吸収、超音波の拡散・距離減衰等の影響を考慮した後方散乱の算出手法⁵⁾⁶⁾により、平水時の濁度が150ppm程度までの条件下において精度よく推定できることを確認している。しかし、洪水時の高濁度条件下においては、懸濁物質による吸収、浮遊砂の粒径等の影響により超音波の減衰が大きく、ADCPのデータが取得できない場合や取得できてもデータの品質が低下することから、検討事例はこれまでほとんど報告されていない。二瓶ら⁷⁾は江戸川においてHADCPで計測された第80層目と第3層目の反射強度比を指標とした濁度推定手法を提案し、濁度が120[FTU]までの条件下において有効性を確認しているが、河川によっては洪水中に濁度が1000[FTU]を超えるような場合もあり、汎用性の点で課題が残る。本研究では、洪水時にかける流況、掃流砂および浮遊砂量の同時計測技術の構築

のための基礎検討として、濁度が1000[FTU]程度の条件下において、ADCPおよびRTK-GPSを搭載した橋上操作艇を固定および曳航させて流速分布と河床移動速度の同時計測を行い、濁水採水、濁度測定、SS試験を行って著者らが提案する反射強度から濁度を推定する手法の適用性を検証した。

2. 四万十川不破地点の概要と2011年7月台風6号による洪水観測

本研究では、四万十川河口から8.4kmに位置する不破地区渡川大橋を観測対象地点とした。図-1に観測地点の平面図、水位計とADCP観測を実施した位置を示す。渡川大橋の上下流区間の河道法線形はほぼ直線であり、横断河床形状も低水路中央部に比高の小さい中州がある程度でほぼ平坦である。渡川大橋直下流において、面積格子法による河床表面の材料調査を行ったところ、平均粒径はおよそ30mmであった。図-2に渡川大橋直下流の横断面図と洪水時の水位ハイドログラフを示す。四万十川流域では2011年7月18日夜半から雨が降り始め、7月19日の夜までの約2日間の総降雨量は上流域の船戸で826.5mm、梶原516mm、大正493mm、中流域の江川崎で388.5mm、窪川491mmを記録した。不破地点の水位のピークは7月19日の17時にT.P.換算値で9.16mを記録した。この時間帯には浮子による流量観測が実施されており、約8500m³/sであった。ADCPを用いた洪水観測は、翌20日5時から13時までに定点観測を4回、曳航観測を8回実施しており、その間の水位は5.82m(5:00)から3.67m(13:00)であった。表-1に洪水観測を行った際のADCPの設定条件を示す。観測には近年の洪水流観測で一般的に使用される1200kHzタイプのWorkhorse ADCPを用いて、Mode12(ハイスピードサンプリングモード)を使用した。計測層厚は0.25m、計測層数は50層として、超音波の発射回数を設定した結果、偏差流速は7.53cm/sであった。標準タイプの橋上操作艇に各時刻におけるボートの位置と速度ベクトルを高精度に把握するための小型RTK-GPSを搭載し、計測データを陸上局に無線でリアルタイムに送信する計測システムを用いた。

3. ADCPのボトムトラックとRTK-GPSによる河床移動速度の観測結果

(1) 固定観測による河床移動速度の計測結果
表-2に定点観測を行った時刻、平均水深、水面勾配および平均河床移動速度を、図-4に各ケースのADCPのボトムトラック機能とRTK-GPSによって得られるボートの航跡を示す。定点観測は河道中央部(図-3の220m地点付近)において20~25分間実施している。図-3をみると、CaseF4ではRTK-GPSの航跡に対してADCPのBT機能で得られた航跡は約25分間で主流方向に対して上流側



図-1 四万十川渡川大橋付近の平面図と観測体制

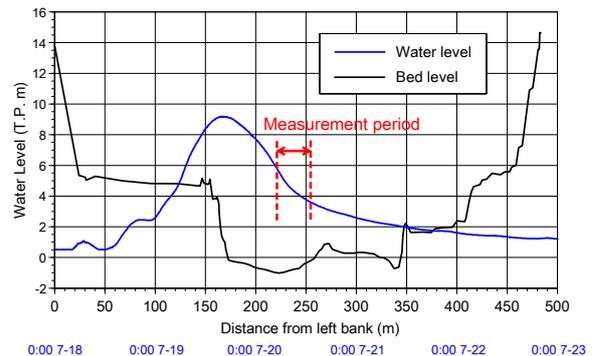


図-2 渡川大橋の横断面図と2011年7月洪水の水位ハイドログラフ

表-1 四万十川現地観測におけるADCPの計測設定条件

Workhorse ADCP 1200kHz	
計測モード	Mode12(ハイスピードサンプリングモード)
計測層厚	0.25m
計測層数	50層
アンサンプルタイム	3.14秒
ウォーターピング数	3ピング(サブ2ピング)
ボトムトラック機能	有り(3ピング)
偏差流速	7.53cm/s

表-2 固定観測の実施時刻、平均水深、水面勾配

	観測時刻(時間)	平均水深	水面勾配	平均河床移動速度
Case F1	8:16-8:40(1330sec)	5.46 m	1/947	2.1 cm/s
Case F2	9:20-9:39(1133sec)	5.02 m	1/892	5.2 cm/s
Case F3	10:16-10:42(1534sec)	4.46 m	1/937	9.4 cm/s
Case F4	11:15-11:39(1481sec)	4.44 m	1/1012	7.5 cm/s

約110mの位置にあり、平均的な河床移動速度は7.5cm/sであった。CaseF1の平均河床移動速度は2.1cm/sと他の3つのケースよりも小さい値となっているが、約11m下流の左岸寄りでは計測を行っていることが原因と考えられる。これについては図-8の河床移動速度の横断分布から再度考察する。図-4は、図-3に示した結果から得られる河床移動速度の流下軸成分を30秒間毎に平均し、水深の時間変化とともに示したものである。図より、水深は4.5m程

度であり、河床移動速度は0.03～0.16m/sの範囲で変動がみられるものの、0.05～0.10m/sに集中しており、計測時間内の平均値は0.08m/sであった。

(2) 曳航観測による河床移動速度の計測結果

表-3に曳航観測を行った時刻と断面流量、水面勾配を示す。断面流量は約3000m³/sから1500m³/sの時間帯に計8回の計測を行っている。図-5に曳航観測を実施した全8ケースにおける橋上操作艇の航跡(RTK-GPSデータ)を示す。洪水時の河床変動と河床移動速度の関係について考察を行うため、航跡がほぼ同じであるCaseM1-M3とCaseM5, M7およびM8の2つのグループに分ける。後者は前者よりも約37m下流の測線で観測を行っている。2つのグループについて、図-6にRTK-GPSの航跡にADCPで計測した水深平均流速ベクトルの横断分布の重ね図を示す。CaseM1ではRTK-GPSとBT機能による航跡に大きく差が生じ、低水路内で河床移動が生じており、CaseM7では航跡差が見られず河床がほとんど移動していないと判断できる。また、断面内では中州左岸側が濡すじとなっており、最大流速はCaseM1では約3.5m/s、CaseM7では約3.0m/sとなっている。

図-7に各ケースにおける水位と横断河床形状を、図-8に河床移動速度の流下軸方向成分の横断分布を示す。

図-7左のCaseM1-M3をみると、濡すじ部および中州において、河床が時間の経過とともに低下しているのがわかる。特にCaseM2とCaseM3の比較から約20分の間に中州で0.5m、濡すじ部で1m程度低下している。図-8左図に示すこの時間帯の河床移動速度をみると、CaseM1では低水路中央の水深平均流速が約2.5m/sを超える区間で0.1m/sを超えており、特に中州部で0.2m/s、濡すじ部で0.15m/sであった。CaseM2およびM3では、断面全体で河床移動速度が小さくなっており、特徴的なのは、河床が大きく低下した濡すじ部においてほぼゼロになっている点である。一方、流量が2000m³/s以下になった図-7右のCaseM5, M7およびM8では、中洲部および濡すじ部で0.05cm/sを越える地点があるものの、それ以外の区間ではほぼゼロで移動していないことがわかる。河床移動の違いを水面勾配および水深から簡易に算出した摩擦速度 u_* と河床粒径を30mmとして岩垣の式から得られる限界摩擦速度 u_{*c} を比較した結果、 u_{*c} が15.58cm/sに対して、河床移動が顕著に見られるCaseM1の濡すじ部(水深6m)では26.04cm/sであり、若干の移動が確認できるCaseM7の濡すじ部(水深4.2m)では19.91cm/s、移動していない砂州部(水深3m)では16.83cm/sとなったことから、図-8の傾向を概ね説明することができる。つぎに、図-3に示した固定観測においてCaseF1の平均河床移動速度が他のケースよりも小さくなった原因について、ほぼ同じ時間帯のCaseM5とCaseM7の比較から考察する。横断距離が200～220mの区間において河床高が横断方向に大きく変化している

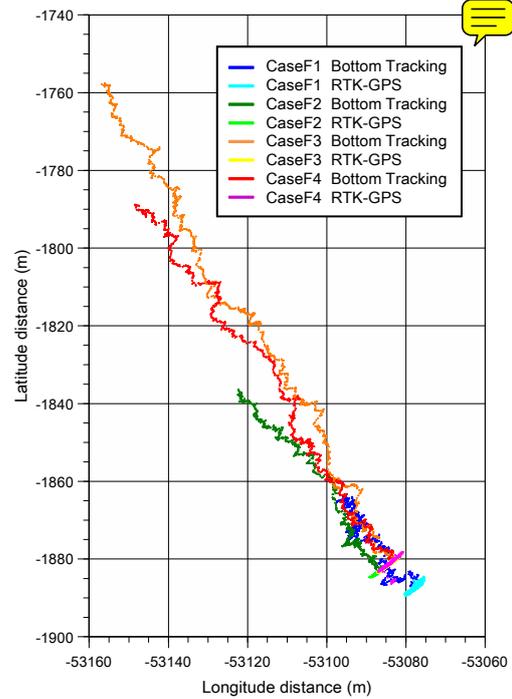


図-3 ADCPのBT機能とRTK-GPSで計測されたボートの航跡

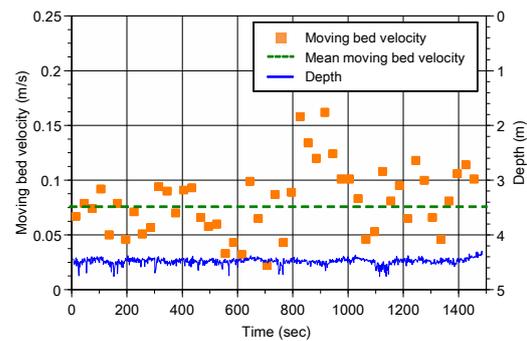


図-4 水深と河床移動速度の時間変化(CaseF4)

表-3 曳航観測の実施時刻、断面流量、水面勾配

	観測時刻(時間)	水面勾配	流量(m ³ /s)
Case M1	5:18-5:37(1176sec)	1/867	2916
Case M2	5:39-5:50(670sec)	1/845	2975
Case M3	6:00-6:13(780sec)	1/921	2413
Case M4	7:58-8:10(748sec)	1/967	2011
Case M5	8:49-8:56(389sec)	1/946	2018
Case M6	9:00-9:18(1088sec)	1/858	1850
Case M7	11:41-11:53(709sec)	1/1038	1582
Case M8	12:42-12:54(747sec)	1/1086	1510

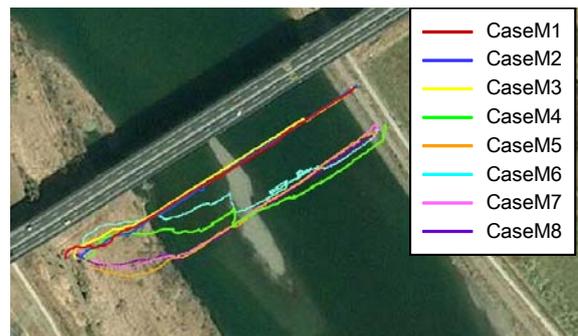


図-5 曳航観測8ケースにおける橋上操作艇の航跡

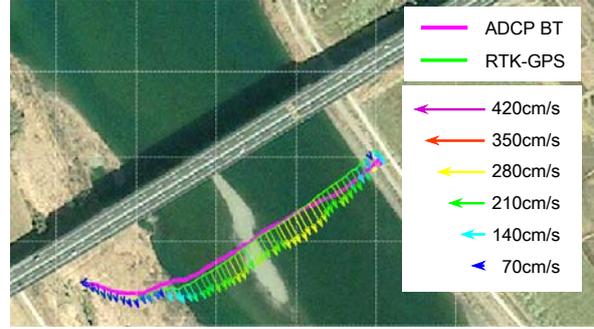
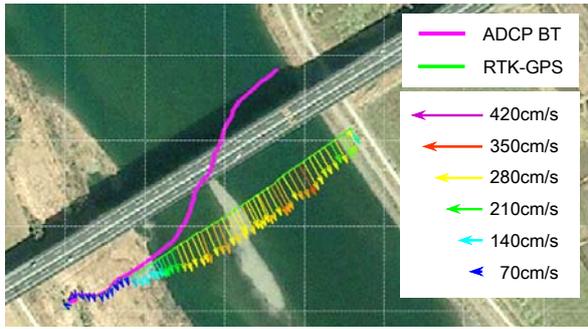


図-6 ADCPのボトムトラックとRTK-GPSで計測されたボートの航跡と水深平均流速ベクトル(左図:CaseM1, 右図:CaseM7)

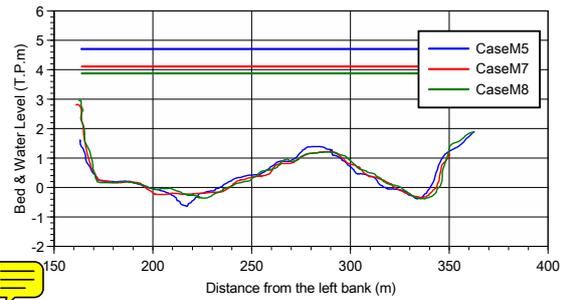
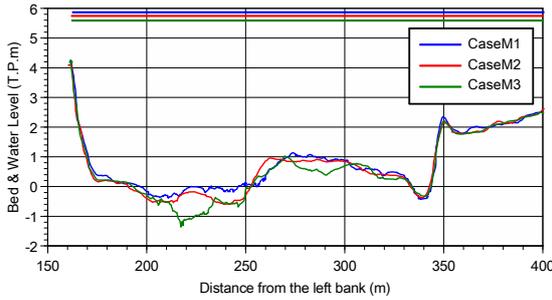


図-7 CaseM1-3とCaseM5, M7, M8における横断河床形状と水位

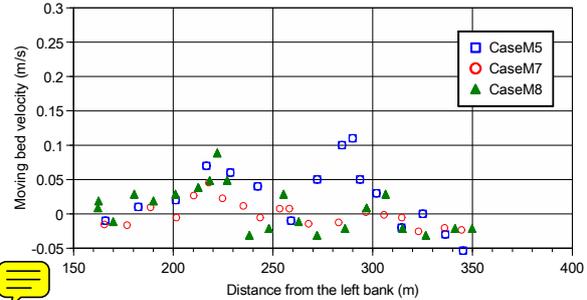
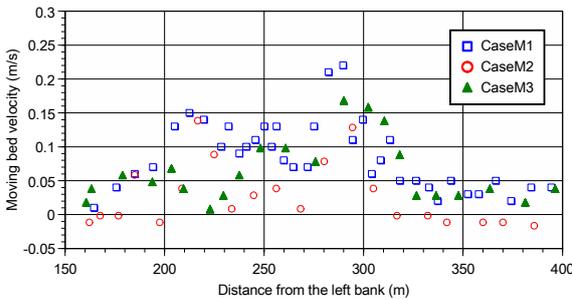


図-8 CaseM1-3とCaseM5, M7, M8における流下軸方向の河床移動速度の横断分布

ため、河床移動速度も左岸ほど小さくなっている。したがって、他のケースよりも左岸側の地点で計測を行ったCaseM1の河床移動速度の値が小さくなったものと推察される。通常、洪水流量観測を実施する場合、橋上でボートを操作する観測員の移動速度は0.5m/s程度で、300mの河道幅に対して計測時間は約10分間となる。これと同程度の移動速度で曳航観測を行っているCaseM7の場合でも、同じ時間帯に定点観測(CaseF4)で得られた時間平均の河床移動速度と同程度になったところから、通常の曳航観測によって十分な精度で河床移動速度の横断分布を得られることが確認できた。

4. ADCPの反射強度を用いた浮遊砂量推定結果

つぎに著者らが150ppmまでの濁度条件において有効性を確認しているADCPの反射強度を用いた濁度推定手法の洪水流への適用性を検証する。はじめに本手法で用いるABT(Acoustic backscatter turbidity)の計算アルゴリズムを示す。散乱強度EIは、ソナー方程式から式(1)で表される。

$$EI = SL + SV + Const - 20\log(r) - 2\alpha_w r \quad (1)$$

ここに、EI: 散乱強度(dB), SL: 発射強度(dB), SV: 粒子の後方散乱, α_w : 水の吸収係数(dB/m), r: トランスデューサーからの距離(m)である。

また、懸濁態濃度は、音響強度と懸濁態濃度の関係について伝搬損失を考慮した式(2)で算出している。

$$\log M(r) = S\{dB + 2R(\alpha_w + \alpha_s)\} + K_s \quad (2)$$

M(r): トランスデューサーからの距離における懸濁態濃度, S: 後方散乱係数, dB: 拡散補正後の後方散乱強度, α_s : 粒子の吸収係数, K_s : トランスデューサー一定数である。各項の詳細については著者らの文献⁶⁾を参照されたい。

曳航観測時に図-3の220m地点(濤すじ部)と370m地点(右岸低水路と高水敷の間の小段)においてバケツによる表面流の採水を行い、研究室に持ち帰った後、濁度計測(JFEアドバンテック(株): INFINITY-Turbi), SS試験および粒度分布測定((株)島津製作所: SALD-2200)を実施した。図-9に各時刻に採水した試料の濁度を示す。ここで

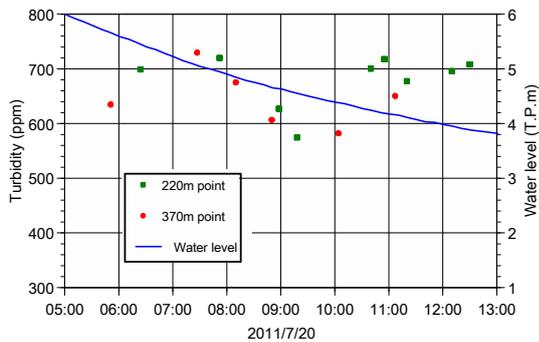


図-9 ADCP観測期間の濁度の時間変化

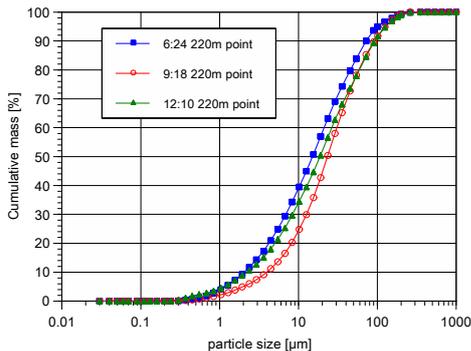


図-10 ADCP観測期間中の浮遊砂の粒度分布

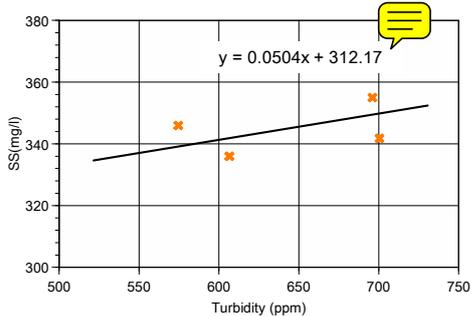
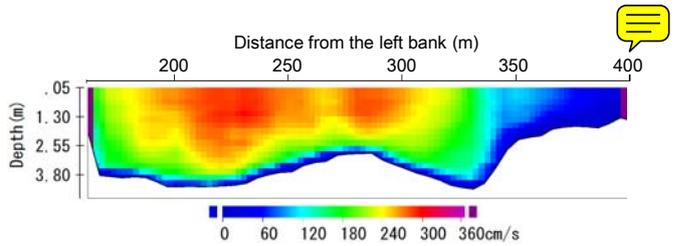
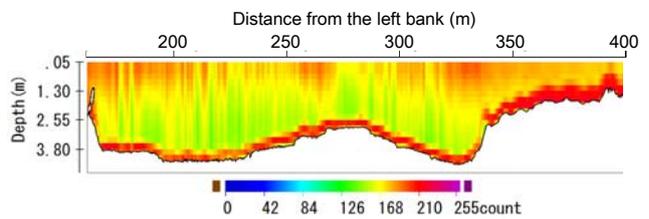


図-11 濁度のSSの関係

用いた濁度計では、中濃度用と高濃度用の2種類のセンサーで計測しており、図の縦軸は高濃度用センサーの計測値である。なお、中濃度用センサーでは800～1300[FTU]の範囲のデータが取得できている。観測期間中に水位が約2m低下しているが、濁度は580～720[ppm]の範囲であった。図-10に観測時間帯の序盤、中盤、終盤に採水した試料の粒度分布を示す。時間帯による分布の違いは見られず、 d_{50} が20 μm 程度で、90%以上が100 μm 以下の微細な成分であることから、大部分がウォッシュロード成分と考えられる。図-11に濁度とSS試験結果との関係を示す。濁度の上下限値の試料を用いて実施したSS試験から浮遊砂濃度は340～360[mg/l]であり、これらの結果から濁度とSSの関係式を作成した。濁度計で計測した濁度の値に対してSSの値がほぼ同じ値をとっているため、今後サンプル数を増やして関係式の妥当性を検証する必要があるが、ここでは計測値がある範囲付近でのみ有効とする。反射強度から超音波濁度

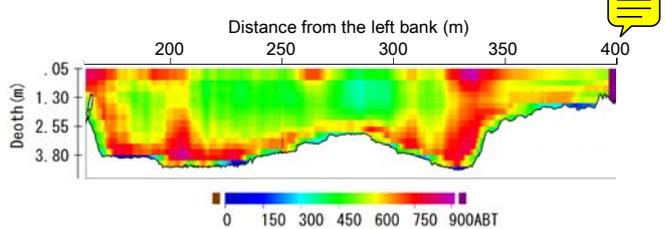


(a) 流速

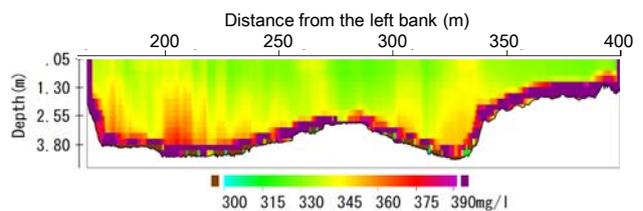


(b) 反射強度

図-12 CaseM7における流速、反射強度の横断分布



(a) ABT



(b) SS

図-13 採水データに基づいて著者らの推定手法から得られたCaseM7におけるABTとSSの横断分布

(ABT : Acoustic Backscatter Turbidity)を算出する事例として、図-12にCaseM7においてADCPで計測した(a)流速、(b)反射強度の断面分布を示す。ADCPでは0から255の256段階の反射強度を受信しており、表面付近は高く、河床に近いほど低くなる傾向が見られる。ここで得られた反射強度、220m地点においての採水で得られた水表面付近の濁度、代表粒径、水温および塩分(洪水中はゼロとする)データをキャリブレーションデータとして、後方散乱係数、粒子による拡散係数、水および粒子の吸収係数、トランスデューサー定数を求める。つぎに得られた式を断面全体に適用することによって、ABT分布を推定した。図-13(a)に推定したABTの断面分布、(b)に図-11の濁度-SS関係式を用いて得られたSSの断面分布を示す。推定したABTの断面分布で興味深いのは、河床移動が生じていると考えられる220m付近、低水路から水深が大きく変化する区間においてABT推定値が大きくなっている点である。これは図-12(a)に示した流速分布からも

わかるように、低水路の高流速域と小段の低流速域の境界部に一致する。これについては今後、現地観測の際に横断方向に詳細な採水を行い、流況と併せて確認する予定である。図-13(b)より、浮遊砂濃度は河床近傍を除いておよそ330~360mg/lの範囲と推定された。図-11の関係式の計測値がある範囲付近であること、また、大部分がウォッシュロード成分であることからSSの鉛直方向変化が小さいことからこの結果は概ね妥当といえる。各グリッドのSS値がわかれば、グリッドの断面積および図-12(a)の流速値を乗じることによって、浮遊砂量 Q_s [m³/s]が推定できる。CaseM1からM8の浮遊砂量 Q_s を推定した結果を一般的な指標でみるために、図-14に示す全国の一級河川で実施した浮遊砂観測結果⁸⁾の範囲にプロットした。その結果、河川流量 Q [m³/s]とウォッシュロードの量[m³/s]との関係式の $Q_s=(4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6})Q^2$ に対して、ADCPで観測した流量と本手法で推定された浮遊砂量の関係式は、 $Q_s=5.1 \times 10^{-8} Q^2$ であり、一般的な値の範囲内であることがわかった。

5. 結論

本研究では、ADCPを用いた洪水流況、流砂量および浮遊砂量の同時計測技術の構築に向けた基礎検討として、ADCPのボトムトラックとRTK-GPSによる橋上操作艇の航跡から河床移動速度の横断分布形を計測する手法、著者らが提案するADCPの反射強度を用いた濁度分布推定手法の洪水観測への適用性を検証した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 四万十川不破地点において、1500~3000m³/sの流量時に実施した定点観測と曳航観測結果の比較から、通常行う曳航観測の方法でも各地点の河床移動速度を定点観測時と同程度に把握できることを示した。
- 2) 洪水観測時の流速は約3.5m/s、濁度は570~700[ppm]の高濁度条件下であったが、一般的な橋上操作艇を用いて、流速分布、水深および反射強度データを取得することができた。
- 3) 採水した試料の粒径分布から洪水時の浮遊砂の大部分がウォッシュロード成分であることを確認した。著者らが提案するADCPの反射強度から濁度を推定する手法を適用して、ABTおよびSSの断面分布、断面を通過する浮遊砂量を推定した結果、ADCPで計測した流量と推定した浮遊砂量の関係は、全国一級河川の観測結果の範囲内にあり、本手法が概ね妥当であることがわかった。

今後はさらに詳細な推定精度評価を行うために、キャリブレーションデータを水表面だけでなく、水中採水等により濁度およびSSの横断・鉛直分布を計測する必要がある。

謝辞：四万十川において実施した現地観測は、科学研究費補助

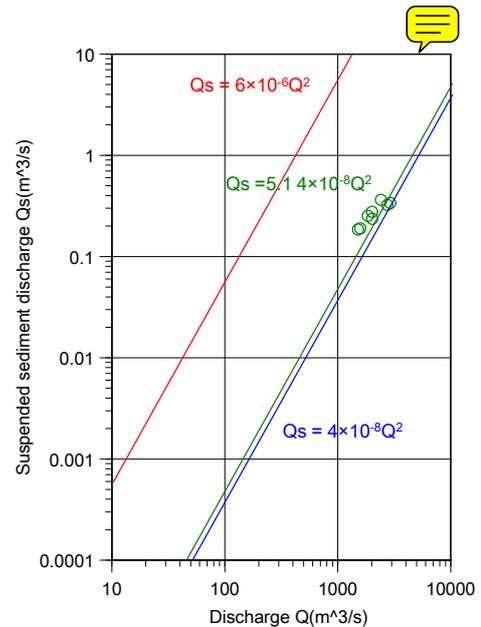


図-14 本手法で推定した浮遊土砂量とADCPで計測した流量との関係

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)の一環として行った。国土交通省中村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) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之: 超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集B, Vol.64 No.2, pp.99-114, 2008.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Yorozuya A., Okada S., Kanno Y. and Fukami K.: Bed-load discharge measurement by ADCP in actual rivers, River Flow 2010, pp.1687-1692, 2010.
- 5) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, 第12巻, pp.133-138, 2006.
- 6) 橋田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励: ADCPの超音波強度を利用した濁度計測技術について, 河川流量観測の新時代, 第2巻, 2011.
- 7) 二瓶泰雄, 北川秀飛, 木水啓, 原田靖生: H-ADCP計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの構築, 土木学会河川技術論文集, 第13巻, pp.225-230, 2007.
- 8) 建設省河川局: 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編), 第14章流送土砂調査, pp.280-282, 1997.

(2012. 9. 30受付)