

ADCPの反射強度による洪水水中の浮遊砂量推定と 水中採水による浮遊砂濃度の鉛直分布計測

ESTIMATION OF THE AMOUNT OF SUSPENDED SEDIMENT USING ACOUSTIC
BACKSCATTER AND VERTICAL DISTRIBUTION MEASUREMENT OF
SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION BY UNDERWATER SAMPLING

岡田将治¹・萬矢敦啓²・橘田隆史³

Shoji OKADA, 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 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 (〒305-8156 つくば市南原1-6)

³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 order to develop the estimation method of suspended sediment volume using Acoustic Backscatter, authors carried out flood observation using ADCP and water sampling in Shimanto River. Observation results have revealed that authors' proposed method is effective under small grain conditions. Also we improved water sampler to measure the depth of sampling point with high accuracy, and then examined availability of measuring vertical distribution of suspended sediment concentration during flood in Hiji River. As a result, we succeeded in obtaining underwater samples within 3m depth.

Key Words: *Acoustic Backscatter Turbidity (ABT), Suspended sediment concentration, Underwater sampling*

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, 流量観測に関する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, 多くの研究者および実務者の興味は, 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の反射強度から濁度および浮遊砂濃度を推定する技術について, 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^{1,2)}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, 洪水水中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³⁾は江戸川に

おいてH-ADCP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。

そこで, 本研究ではADCPを用いた洪水時における流況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, はじめに四万十川の洪水水中の高濁度条件下において, ADCP橋上操作艇を横断方向に曳航させて計測した流速および反射強度の横断面分布と採水した試料の濁度測定, 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について検証した結果⁴⁾を示す。つぎに, そこから技術的課題として挙げられた洪水水中の浮遊砂濃度の鉛直分布を把握するための水面下の採水手法を検討するために, 市販の水中採水器を改良して流れに対する横方向の安定性および採水地点の深度の計測精度を向上させ, 2013年10月の肱川洪水時に適用した。さらに, 採水試料から得られた浮遊砂濃度の鉛直分布とRouseの浮遊砂濃度分布式と比較するとともに, 洪水水中の採水手法の技術的課題について示す。

2. ADCPによる観測および採水データを用いた浮遊砂フラックスの算出方法

図-1に本研究で用いた現地観測データに基づいて浮遊砂フラックスを算出するまでの流れを示す。まず、現地観測においてADCP橋上操作艇により流速および反射強度の横断面分布を計測する。その際、ADCPで水深も計測できることから横断面形状および断面流量も得られる。また、採水を行い、持ち帰って試料の粒径分布、濁度およびSSを計測し、濁度-SS濃度換算式を作る。つぎに、著者ら¹⁾が提案するADCPで計測された反射強度から超音波濁度(ABT: Acoustic backscatter turbidity, 以下ABTと示す)を計算する。そのアルゴリズムを以下に示す。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⁹⁾を参照されたい。

この式を用いて鉛直濁度分布に一致させるように各変数を決定し、超音波濁度(ABT)を求める。濁度-SS換算式にABTを代入することで、浮遊砂濃度が算出され、さらにADCPによって計測された横断面内の各計測グリッドの面積、流速を乗ずることによって浮遊砂フラックスが得られる。

3. 四万十川における2011年洪水時の現地観測

(1) 四万十川の2011年洪水の観測概要

図-2に現地観測を実施した渡川大橋付近の平面図、ADCP橋上操作艇による観測範囲、採水地点を示す。四万十川の河口から8.4kmに位置する不破地区渡川大橋を対象として、2011年7月19日に台風6号による洪水期間中に現地観測を実施した。四万十川流域では2011年7月18日夜半から7月19日の夜までの約2日間の総降雨量が上流域の船戸で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。

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

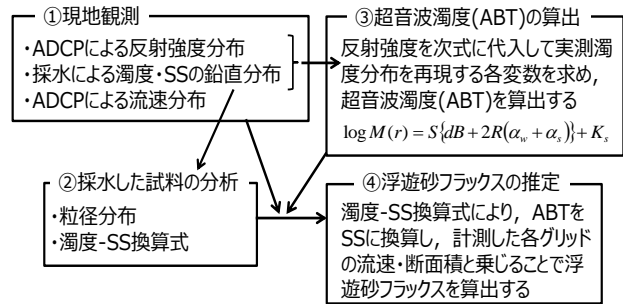


図-1 現地観測データを用いた浮遊砂フラックスの算出フロー

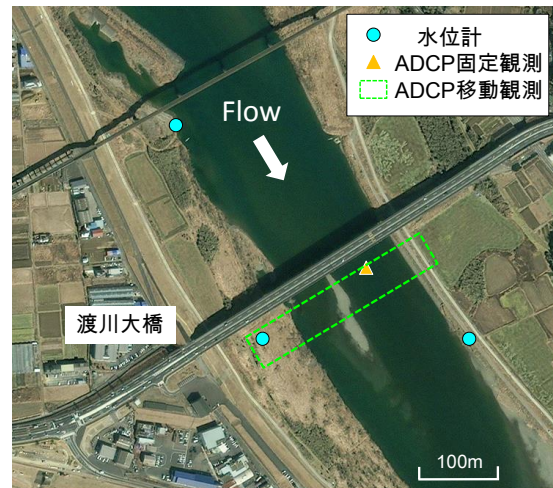


図-2 四万十川渡川大橋付近の平面図と観測体制

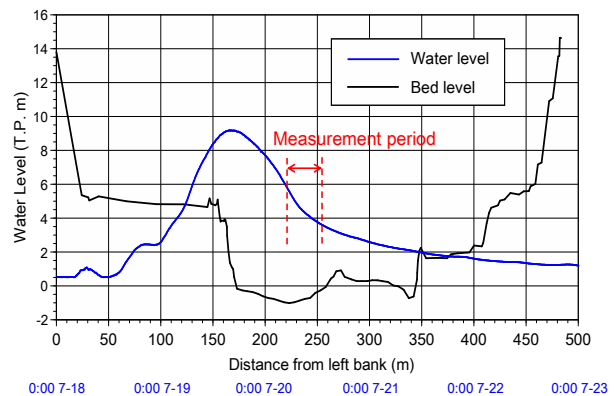


図-2 渡川大橋の横断面図と2011年7月洪水の水位ハイドログラフ

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

(CaseM1 ~ CaseM8)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。

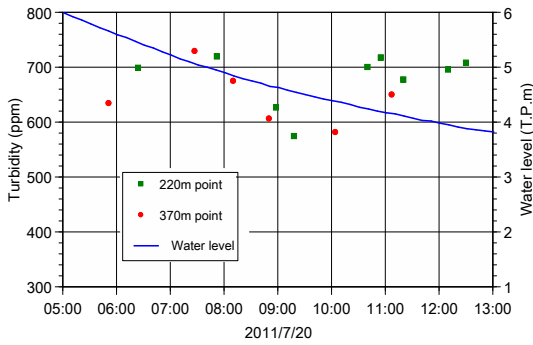


図-3 ADCP観測期間の濁度の時間変化

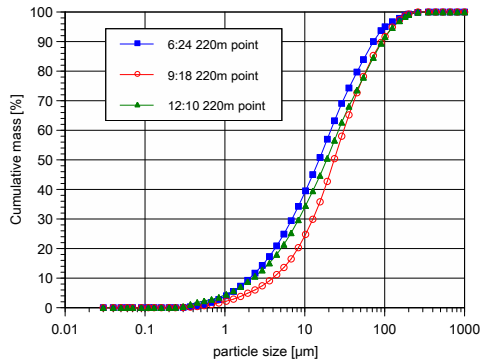


図-4 ADCP観測期間中の浮遊砂の粒度分布

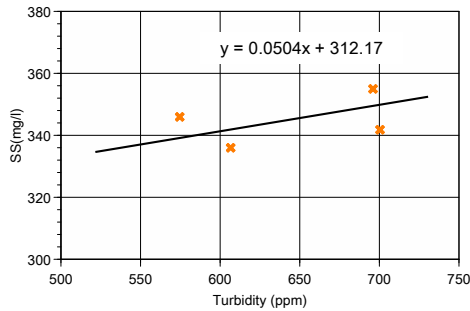
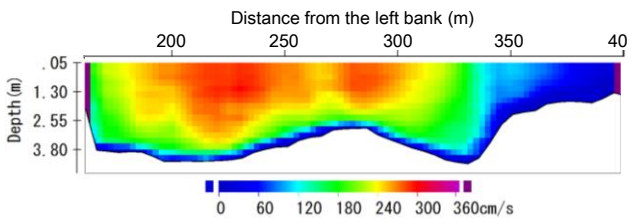
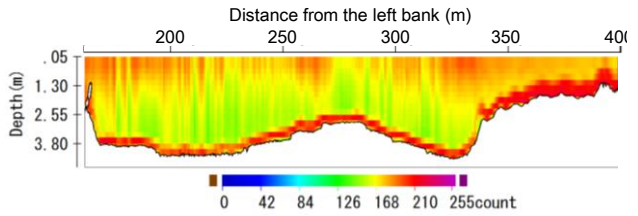


図-5 濁度のSSの関係

表-1に洪水観測を行った際のADCPの設定条件を示す。

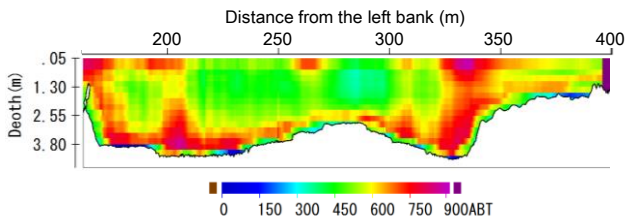


(a) 流速

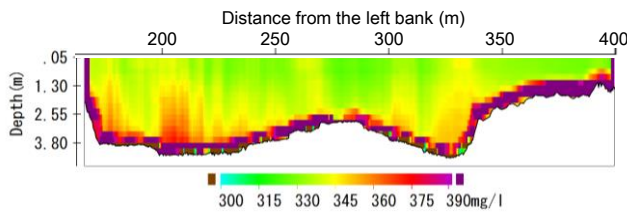


(b) 反射強度

図-6 CaseM7(11:41-11:53)における流速, 反射強度の横断分布



(a) ABT



(b) SS

図-7 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(11:41-11:53)におけるABTとSSの横断分布

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。採水作業は、曳航観測時に図-2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み行い、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。

(2) 観測結果および浮遊砂フラックス推定結果の考察

図-3に各時刻に採水した試料の濁度を示す。ここで用いた濁度計は、中濃度用と高濃度用の2種類のセンサー

で濁度を計測しており、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-4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-5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でのみ有効とする。

反射強度からABTの算出例として、図-6にADCPで計測されたCaseM7(11:41-11:53)における (a)流速、(b)反射強度の横断面分布を示す。流速は低水路の滞り部において3.5m/s程度となっている。ADCPでは反射強度を0から255の256段階で受信され、表面付近は大きく、河床に近いほど小さくなる傾向がみられる。

ここで得られた反射強度、220m地点において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算出する。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-7(a)に推定したABTの断面分布、(b)に図-5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-6(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。図-6 (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-5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-6(a)の流速値を乗じることによって、浮遊砂量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ が推定できる。四万十川で実施したCaseM1～CaseM8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-8に示す全国の一級河川で実施した浮遊砂観測結果⁵⁾の範囲にプロットした。その結果、河川流量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ とウォッシュロードの量 $Q_s[\text{m}^3/\text{s}]$ 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、

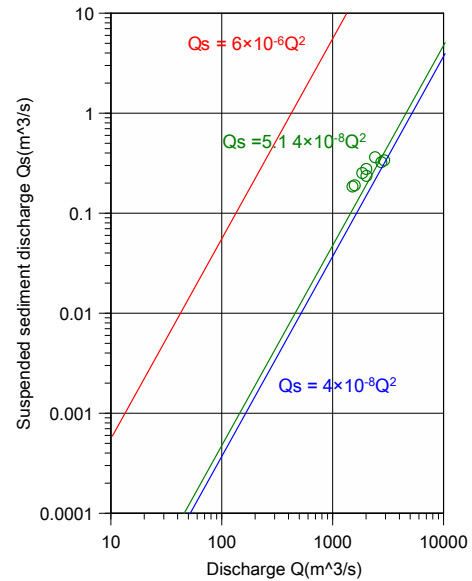


図-8 本手法で推定した浮遊土砂量とADCPで計測した流量との関係



図-9 改良した水中採水器

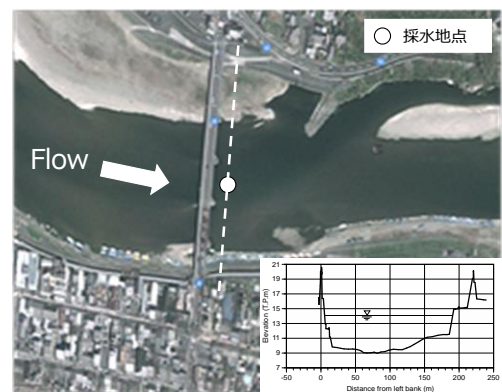


図-10 脇川橋付近の平面図と横断面図および採水地点の位置

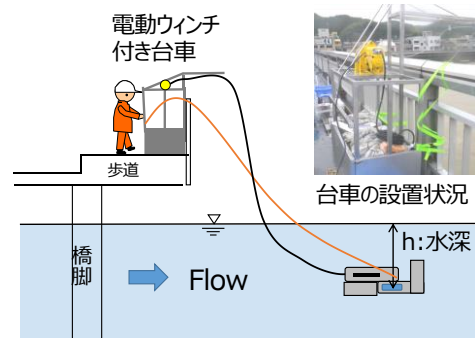


図-11 水中の採水方法のイメージ

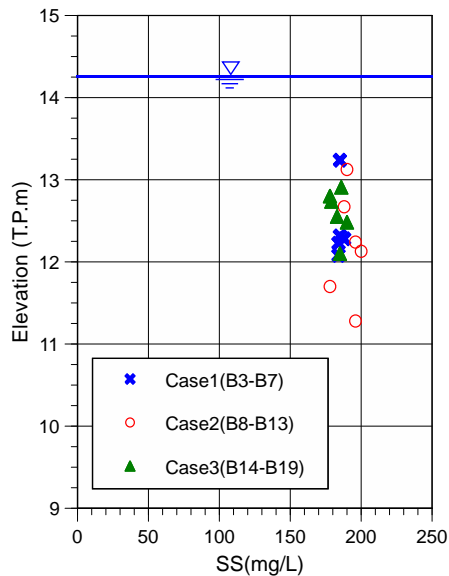


図-12 洪水中に実測したSS濃度の鉛直分布

一般的な値の範囲内であることがわかった。

以上より、570～700ppmの高濁度条件下においても、濁水中の粒径が比較的小さいウォッシュロード成分が大半を占める条件においては、著者らの推定手法が適用可能であることがわかった。しかし、この現地観測では採水を表面流のみで行っているため、濁水中の粒径がさらに大きく浮遊砂濃度に鉛直方向に分布する条件下においては、検証データが得られないため、本手法の有効性が確認できない。したがって、洪水中の各水深において採水が実施できる手法について実用化することが浮遊砂量推定技術の高度化に向けた課題となる。

4. 水中採水器の改良と肱川における採水試験

(1) 水中採水器の改良

洪水中に浮遊砂濃度の鉛直分布を計測するために採水方法について検討を行った。図-9に本観測で用いた水中採水器を示す。水中における採水を行うために、ここでは洪水時に水面下の採水用に開発された東京計測(株)社製の河川水採取器FL-SSを用いた。この採水器は内径110mm、長さ490mmのステンレスパイプがスプリング開塞式になっており、後方のロープを引くことで前後の栓を閉めて約3000mlの水が採取できる。

洪水時に適用する前に、流速2m/s程度の流れ場において試験計測を実施し、その結果からつぎの2点の改良を行った。まず、流れに対して横断方向の安定性を向上させるために、尾翼を追加し、橋上からの操作性を向上させ、1回の採水作業に要する時間を短縮させることができた。2つめは採水を行った深度の計測精度の向上である。従来はワイヤーの長さからおよその深度を把握するしかなかったが、採水器側面に簡易圧力計を設置することにより、より正確な深度が計測可能となった。

図-10に肱川橋付近の平面図、横断面図および採水地

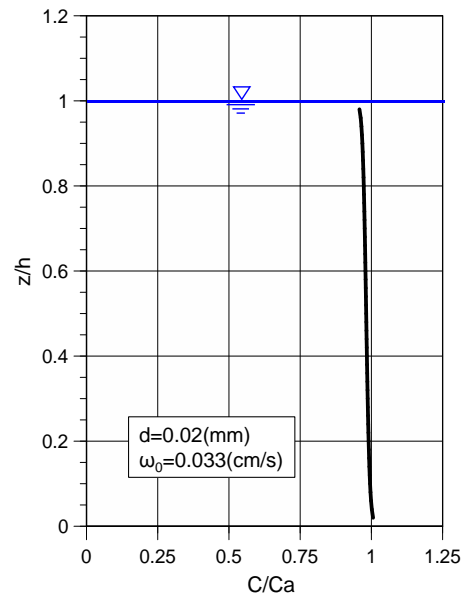


図-13 Rouseの式から得られた浮遊砂濃度鉛直分布

点を示す。肱川河口から18.6kmに位置する肱川橋を観測対象地点とした。この地点を選んだ理由は、肱川橋付近における河床材料の粒径 d_{50} がおよそ8mmであり、四万十川不破地点($d_{50}=20\text{mm}$)よりも小さかったため、出水時に水面下の採水を行うことができればウォッシュロード成分だけでなく、浮遊砂となる粒径群も採取できると考えたためである。台風27号によって洪水状態となった2013年10月25日に採水を実施した。その時間帯の水位は13.62(T.P.m)(15:19)から14.29(T.P.m)(17:28)であった。その時の水面幅はおよそ190mで、水面勾配は1/2800、水深平均流速は2.3m/s程度、流心部における水深は5m程度であった。

図-11に本研究で実施した水中採水方法のイメージを示す。橋上の歩道に設置した電動ウィンチ付台車と採水器をワイヤーで繋ぎ、観測者が取得したい深度で後方にある開塞用のロープを引くことにより、水中の濁水を採取する。採水した(ロープを引いて栓を閉じた)時刻と簡易圧力計で記録される時刻、水温および圧力のデータから、採水した深度を正確に把握することができる。また、台車についても過去に実施された観測事例等を参考に、肱川の観測地点の状況を考慮して製作した。なお、この採水作業は、電動ウィンチを使用しているため、2名の観測員で実施が可能であり、1回の採水作業に要する時間は肱川の条件で4～5分間程度である。

採水は、10月25日13時38分から17時28分までに19回行い、これらの試料を時間帯ごとに3つのグループに分け、それぞれCase1(B3-7)、Case2(B8-13)、Case3(B14-19)として濁度、SSおよび粒径分布を計測した。濁度は日本工業規格 JIS K 0101に定められた分析法に従い、積分球式濁度計により測定した。SSは環境庁告示第59号付表8に定められた分析法に従ってGF/Cフィルターによるろ過を行い、測定した。また、粒度分布は四万十川の時の同様

にSALD-2200(株)島津製作所)を用いて計測を行った。

(2) 洪水中に実測した浮遊砂濃度の鉛直分布とその考察

肱川橋中央部において15時19分に12.1(T.P. m)の高さで採水した試料の粒度分布を調べた結果、 d_{50} の粒子径は20 μm であり、他の深度で採取された試料についてもほぼ同様な結果であった。したがって、肱川で採水した濁水は、四万十川と同様に、そのほとんどがウォッシュロード成分であったことがわかる。

つぎに、図-12に肱川のSS濃度の鉛直分布を示す。4.6～5.3mの水深に対して、水面下1m～3mの範囲で採水を行い、SSは170～200mg/lで水深が大きいほどSSが大きくなる傾向が若干みられるものの、鉛直方向にほぼ一様となった。採水作業中に別の作業員が実施しているADCP橋上操作艇による曳航観測のリアルタイムデータから採水地点のおよその水深がわかるため、水面から河床面までの広い範囲で採水ができるようにワイヤーの長さを調節しながら行ったが、著者らが最も必要としたより深い河床付近のデータが取得できていなかった。水面下3mよりも深い地点での採水には試行錯誤による検討が必要である。これについては今後の技術的課題とする。

これらの結果と次式のRouseの浮遊砂濃度の鉛直分布式⁶⁾と比較する。

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \left(\frac{h-z}{z} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right\}^z \quad (1)$$

ここに、 C ：浮遊砂濃度[mg/l]、 C_a ：基準面濃度[mg/l]、 h ：水深、 z ：河床からの高さ、 a ：基準面の高さ、 $Z = \omega_0 / \kappa u_*$ 、 u_* ：摩擦速度、 κ ：カルマン係数(=0.4)、 ω_0 ：流砂の沈降速度である。一般に基準面の高さ a は底面より0.05 h で与えられる。また、沈降速度 ω_0 は次式に示すRubeyの式⁹⁾から求められる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d + \frac{36\nu^2}{d^2} - \frac{6\nu}{d}} \quad (2)$$

ここに、 d ：粒径、 σ ：砂礫の密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 ν ：水の動粘性係数である。式(2)から粒径20 μm に対する沈降速度を求めると、 ω_0 は0.033cm/sとなり、基準高さに対する基準濃度で表したRouseの浮遊砂濃度鉛直分布が図-13である。横軸は基準濃度を表し、基準高さの $z=0.05h$ において $C/C_a=1$ となり、縦軸 z/h は、0が河床面で1が水面を表す。図-13より粒径が20 μm の場合は鉛直方向にほぼ一様な分布となり、図-12に示した実測結果と同様な傾向を示した。

5. 結論

ADCPを用いた洪水時における流況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、四万十川および肱川で実施した観測から明らかになった点は以下のとおりである。

1) 四万十川における洪水観測時の表面流速は約3.5m/s

(水深平均流速は2.6m/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。

- 2) 四万十川において水表面を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。
- 3) 洪水時の浮遊砂濃度の鉛直分布を計測するために、既存の水中採水器に改良を加え、計測中の採水器の安定性および採水深度の計測精度を向上させた。
- 4) 改良した水中採水器を肱川の洪水時に適用した結果、水深約5m、水深平均流速2.3m/sの流況において、水面下3mまでの採水を行うことができた。それよりも深い地点での採水については今後の技術的課題とした。
- 5) 肱川では、当初鉛直方向に分布が形成される粒径の河床砂が洪水中に捕捉できると想定して対象河川に選定したものの、結果として捕捉された河床材料粒径は四万十川と同じウォッシュロード成分の20 μm であり、鉛直分布が一様となる条件であった。

今後、浮遊砂濃度の鉛直分布が形成される条件でデータを取得するために、採水場所や洪水規模等の採水時の条件を検討するとともに、3mよりも深い地点での採水方法を含め、採水作業を確実に短時間で実施できるように改良を行っていく予定である。

謝辞：四万十川および肱川の現地観測は、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)の一環として行った。国土交通省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) 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.
- 2) 橋田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励：ADCPの超音波反射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, pp.49-56, 2011.
- 3) 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.
- 4) 岡田将治, 萬矢敦啓, 本永良樹, 橋田隆史：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, 土木学会水工学論文集, 第57巻, I_751-I_756, 2013.

5) 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.

6) 土木学会: 水理公式集(平成11年度版), 第2編河川編, 4.1.5 浮遊砂の濃度分布, pp.160.

(2014. 2. 10受付)