

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

ISSUES OF RIVER FLOW MEASUREMENT METHOD AND APPLIED
OBSERVATION RESULT USING ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILERS

橋田隆史¹・岡田将治²・新井励³・下田力⁴・熊田康邦⁵

Takashi KITSUDA, Shoji OKADA, Rei ARAI, Chikara SHIMODA, Yasukuni KUMADA

¹正会員 修士(農学) ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天5丁目10-23)

²正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 修士(工学) 大阪府立大学大学院 海洋システム工学分野 (〒599-8531 堺市中区学園町1番1号)

⁴正会員 株式会社エス・イー・エイ (〒272-0127 千葉県市川市塩浜2-23)

⁵正会員 日本ミクニヤ株式会社 東京支店 (〒213-0001 神奈川県川崎市高津区溝口3-25-10)

Making the highly accurate flow measurement is an important problem for river planning. We report the current state and the problem of the river flow measurement method using ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) in Japan and overseas. And as an applied case of ultrasonic technology, we developed the presuming method of the amount of the suspended sediment based on new concept. From the calculated results of the sediment volume between two cross sections in tidal river by using this technique, we showed that this presuming method is more practical than previous ones.

Key Words: *Acoustic Doppler Current Profiler, River flow measurement method, Acoustic Backscattering Turbidity*

1. 序論

近年, 国内をはじめ諸外国においても河川の洪水流量観測にADCP(Acoustic Doppler Current Profilers: 超音波多層流向流速計)が多く用いられるようになり, ISO/TC113では河川流量観測ツールとしてADCP観測の規格化が進められている。また, 最近では流速測定に限らず超音波の特性を応用した河床形状や濁度分布計測等の応用観測手法が考案されており, その用途は広がりつつある。米国においては, U.S. Geological Survey(以下USGS)が中心となって, ADCPを用いた流量観測技術に関する調査研究と関係者の技術力向上を目的とした観測技術マニュアルの作成や講習会を行い, 技術の標準化を進めている。我が国では, 現在においても浮子流観が主体であるため, 浮子流量との相互評価を行うために, ADCPによる詳細な流速分布に基づいた浮子更正係数の検討などに活用されるなど^{1), 2)}, 補助的な利用に留まる。また, 国内においてはADCPの観測精度管理に関する議論が少なく, 観測者の技量によりその観測精度が大きく左右されるのが実状であり, 観測手法の標準化が望まれ

るところである。本稿では, 河川におけるADCP観測技術の標準化を進める観点から, 国内外におけるADCP観測技術の現状と課題について報告するとともに, 本研究グループが進めている, 超音波による浮遊土砂量の新しい計測技術を紹介する。

2. ADCPを用いた河川流量計測法の現状と課題

(1) 最近10年のADCPの計測性能の向上

ADCPは1981年に米国RD社によって開発された。我が国には1985年に初めて導入され, 海洋分野を中心に普及した。1995年に小型化され, 価格も従来の半額程度になったことが契機となり, 米国を中心に河川流量観測に広く使用されるようになった。その後多くの改良が加えられ, 2001年には浅水域で高解像度の計測が可能となり, 最小未測エリアがこれまでの44cmから10cm程度まで改善された(ゼロブランク)。さらに, 2002年には浅水深域に特化した機能が開発され, 流速の大きい流れに対しても高精度で計測(Mode12)できるほか, 最大40Hzでの高解像度高速サンプリング(Mode11)が可能と

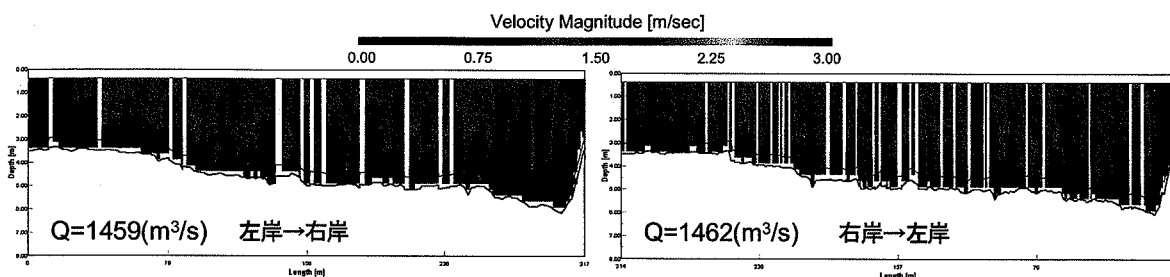


図-1 ADCP搭載ボートで往復した場合の流速分布と換算流量
(T川地点(川幅320m, 平均水深4.5m))

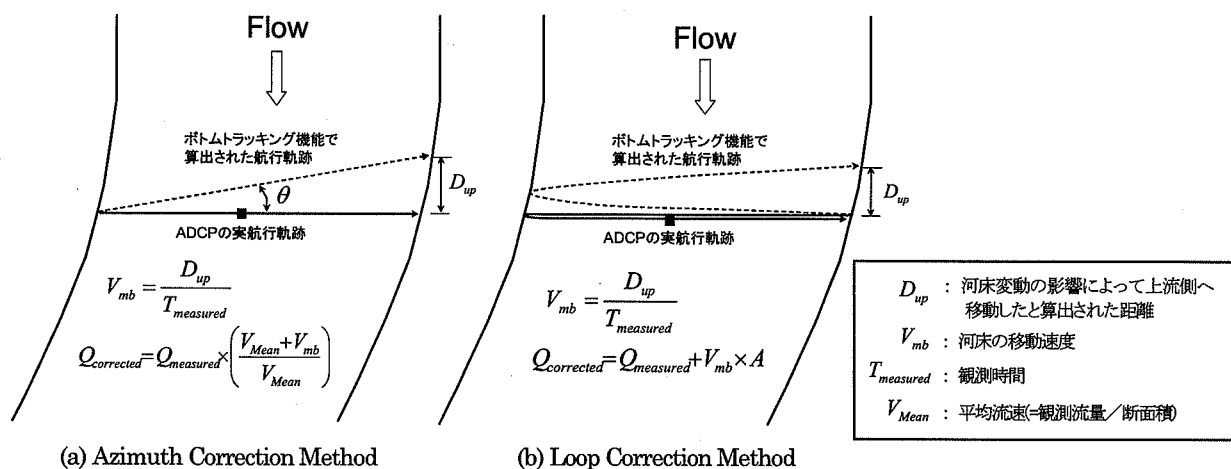


図-2 河床変動が大きい場合のADCP観測流量の誤差修正法 (Mueller (2005))

なった。このように、特に最近5年間で河川流況計測に対するADCPの性能が飛躍的に向上し、それに伴ってその活用方法の検討および新しい計測技術の開発が精力的に行われるようになった。

(2) USGSにおける流量観測データの取り扱い

USGSのOSW(Office of Surface Water)では、ADCPによる洪水流量観測法およびデータの取り扱いに関して、品質管理上の明確なガイドライン^{3), 4)}を設定している。これによると、各断面において最低4回(2往復)の断面流量計測を行い、4回の計測データに5%以上の誤差がある場合にはさらに4回の再計測を行って計8回分の流量データを平均した値を実測流量として認めるとしている。国内で計測した事例として、図-1に川幅約320m(低水路満杯流)、水深約4.5mのT川において往復した場合の流速分布と換算流量を示す。層厚25cm×40層、サンプリングタイムは1.5秒、理論上の流速計測精度はおよそ3cm/secである。ボートスピードは約1.5m/secで川幅300m程度の河川であれば10分程度で往復(2回分の計測)することができる。図より往復でほぼ同じ測線を通れば、同様な流速分布と誤差1%未満の精度で流量が得られることがわかる。ただし、河川の流れが不安定な場合、ボートの動揺が大きい場合、ADCP内蔵磁気コンパスがずれている場合などは往復の誤差が大きくなる。

(3) 河床変動が大きい場合の流量観測法

ADCPは河床との相対的な移動を捉えるボトムトラッキング機能を有しており、航走中の自機を速度を算定して対地流速を出力する。その際、河床が静止しているという前提で計算しているため、河床変動が生じる場合には誤差が生じる。これは、国内の観測事例²⁾においても指摘されているように、現在、ADCPによる流量観測法の課題として検討されているテーマのひとつである。USGSでは流量観測を行う前に2通りの補正方法⁵⁾を提案している。ひとつ目の方法は、移動床テスト(Moving-Bed Test)と言われる方法で、河道内の定点にADCPを静止させ、ボトムトラッキング機能をオンの状態で10分間計測する。河床が移動している場合には、ADCPを静止した状態でも上流方向に移動している様に算出される。10分間に移動した距離を1秒あたりの平均流速に換算することにより、河床が移動するによる流量算定誤差を評価することができる。ふたつ目の方法は、数cmの精度で場所を特定できるDGPSを使用する方法であり、Moving-Bed Testの結果から、移動床速度が断面平均流速の1%を超える場合にはこの方法を使用することとしている。しかし、DGPSを高い精度で使用できない地点があることやADCPの内蔵磁気コンパスとGPSの方位のズレが換算流量に大きく影響するために、実用的な段階には至っていない。そこで、Mueller⁶⁾は、DGPSを使用しない4種類の計測方法を検討している。

a) Section by Section Method

断面を数箇所に分割し、代表的な地点の流速分布を計測することによって流量を求める方法である。各地点の正確な流速分布を計測することができ、ボトムトラッキング機能が不要なため河床変動が生じる場合にも対応可能である。しかし、断面分布が得られないため、流量算定には各種内挿作業が伴う。二瓶⁷⁾はこの方法で計測を行い、未測エリアを補うために数値解析を併用した流量推定法を提案している。

b) Subsection Method

断面内の代表的な地点で移動床テストを行いながら移動させて流速分布を計測する方法。他の計測法に比べ時間を要する欠点がある。

c) Azimuth Correction Method

固定した始点から終点へ観測を行い、始点から終点への方位と実際に航行した方位と距離のズレから上流側へ移動したと算出された距離を求め、航行時間から河床の移動速度を求めて流量を補正する方法である(図-2(a))。

d) Loop Correction Method

固定した始点から河川を横断し、対岸に着いたら始点に戻る往復観測を行う。ボトムトラッキング機能で算出された航跡の終点と始点の距離と航行時間から河床の移動速度を求め、流量を補正する方法である(図-2(b))。中川²⁾が利根川下流域で行った補正方法はこの方法に近い。Muellerはこれらの計測手法の中から現地作業、後処理作業を考慮して、この方法が現段階で最も実用的であることを結論付けている。今後、我が国においてもADCPを用いた曳航観測法の主流になると考えられる。

(4) Index-Velocity Method

Index-Velocity Methodは、曳航観測で測定した流量と代表地点の流速(Index Velocity)の関連付けを行うことによって、1測線の流速分布データから断面内の流量推定する方法である。USGS資料^{8,9)}によれば、水平方向に設置されたH-ADCPを用いる方法、水面のフロートから、あるいは河床に設置して水深方向に計測した流速分布から流量を求めて方法が示されている。この推定方法は、水深によって横断面形状が大きく変化しないこと、河床形状が平常時、洪水時に変化しない等の河道条件の他に測定機器の性能上の条件(600kHzでは川幅約120mまで)、川幅水深比等の制約があるものの、水位-代表流速分布-流量の関係が確立している断面においては有効な推定方法である。国内においても、横尾¹⁰⁾、二瓶²⁾は河床にADCPを設置し、水深方向の流速分布を計測した単位幅流量と曳航観測から求めた流量の関係および単位幅流量と水位の関連付けた流量推定法を提案している。

(5) その他の流量観測方法

木下¹¹⁾が行った無人ラジコンボートによる洪水流観測法は、諸外国においても類を見ない観測法として注目さ

れており、特殊な技術が必要であるものの、国内での普及が望まれている。H-ADCPを用いたリアルタイム流量常時観測システム^{12,13)}は、現在一級河川で普及しつつあり、感潮域など従来法では流量把握が困難なケースで注目されている。また、安価な固定測線型H-ADCP流量計も開発され、中小河川への普及が期待される。韓国においても、類似システムの導入事例が見られるが、H-ADCPに関しては我が国が諸外国に先行している。

3. 新しい超音波濁度計測技術の開発と観測事例

(1) 技術の背景

近年ADCPの反射強度から濁度を計測する技術が国内外で研究されており、こうした技術を、ABT(Acoustic Backscattering Turbidity: 超音波濁度)と呼ぶ。この技術のメリットは、濁度の多層観測が出来ること、および、流速との同時観測が出来ることにある。また、濁度からSSへの推定式を併用することで、河川土砂フラックスのモニタリング観測に応用できる。

計測原理は、超音波の後方散乱と濁りの関係式を応用したものであるが、水中を伝搬する超音波は、距離減衰、音場における吸収など様々な影響を受けるため、複雑な補正が必要となる。現状では研究者らがその都度補正式を構築することで精度確保を図っているが、汎用性に乏しい。本研究グループでは、こうした技術を広く利用できるように汎用ソフトの開発に着手しており、国内外の研究事例と合わせて次項に紹介する。

(2) 国内外の研究事例

国内の研究事例を見ると、反射強度を応用した海域や河川での土砂観測の事例がいくつか見られる。川西¹⁴⁾、横山¹⁵⁾、山崎¹⁶⁾は、ソナーの式を基本とし、濁度の実測値と最小自乗法でフィッティングさせて良好な相関を得ている。しかし、いずれもその応用観測の有効性を示すことに主眼を置いているため、超音波の伝搬理論や機器特性に踏み込んだ議論は少ない。一方、海外の事例をみると、超音波の各種理論式を駆使して精度良く濁度を算出するための基礎研究がみられ¹⁷⁾、反射強度から濁度を算出するための支援ソフトも販売されている(英国DRL社)が、未だ発展途上にある。

本研究グループでは、複数の音波伝搬理論式を組み合わせるとともに、センサーメーカーからの技術情報を基に、高精度に濁度を算出できる変換式および手法を研究・開発しており、ADCPやH-ADCPを用いた河川土砂フラックスのモニタリングシステムの応用開発を計画している^{18,19)}。

(3) 超音波による濁度計測技術の概要

水中を音波が伝搬する際に、諸要因により音圧レベルが低下していく、いわゆる伝搬損失が知られている。伝搬

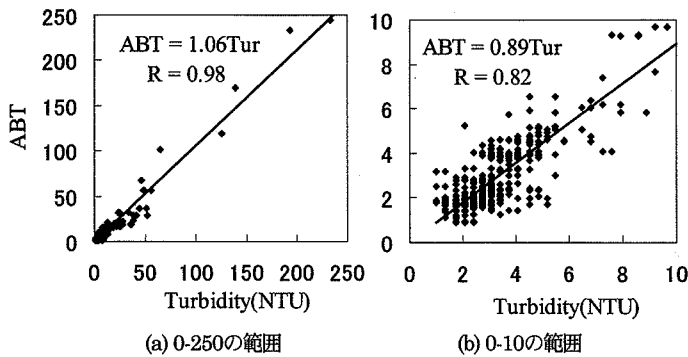


図-3 ABTと実測濁度との相関

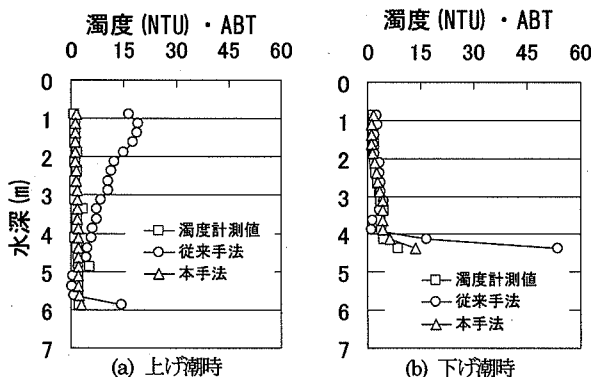


図-4 本手法と従来手法の比較

損失は拡散損失と水隕による吸収、懸濁物質による吸収、散乱の和からなる。水隕による吸収は水温、塩分、音波の周波数により大きく異なり、懸濁物質による吸収、散乱は粒径、浮遊物質濃度、密度等の影響を受けることが知られている²⁰⁾²¹⁾²²⁾。

一方、4つのトランスデューサーの受信感度は機器内の温度で大きく変化する等、反射強度の計測値には機器固有の特性値も影響する²³⁾。このように超音波の反射強度から濁度を算出するにあたり伝搬損失と機器特性に関するパラメータを補正する必要があるため、本研究ではこれらの補正項を詳細に検討している。本研究と既往研究との相違点は、①水温、塩分および超音波の周波数をもとに水隕による吸収量を算出、②浮遊物質濃度、粒径、粒子密度等をもとに浮遊物質による吸収と散乱を算出、③機器内温度から受信感度を算出の3点である。なお、②の散乱を求めるに際し、原位置における超音波の反射強度が必要となるため、本手法では音源側から浮遊物質濃度およびその散乱、吸収量を漸次的に算出することで、これを求めている。基礎理論式を以下に示す。

$$\log_{10} M(r) = S \{ EI + 20 \log r + 2r(\alpha_w + \alpha_s) \} + K_s$$

$M(r)$: 原位置における濁度 EI : 散乱強度 (dB) S : 後方散乱に関する定数

r : センサーからの距離 (m) K_s : 後方散乱に関する定数

$\alpha_w(T, S, f)$: 水の吸収係数 (dB/m)

$\alpha_s(M, f, T, S, \rho_w, \rho_s)$: 浮遊懸濁物質による減衰係数 (dB/m)

(4) ABT(超音波濁度)の観測事例

ADCPによる濁度観測の事例を次に示す。観測事例と

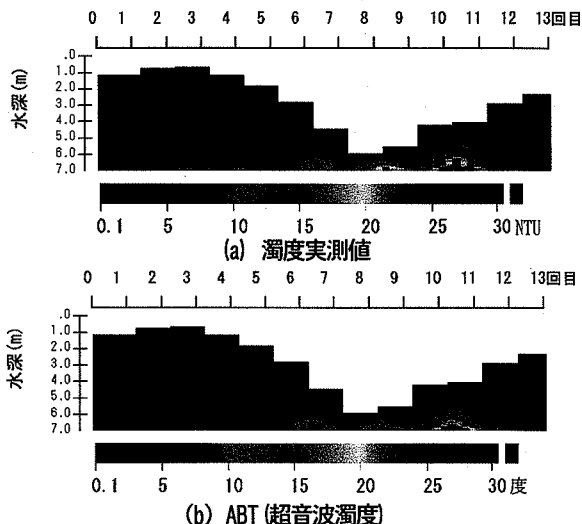


図-5 ABTと濁度実測値の比較(1潮汐)

しては、a)海域定点における濁度実測値との比較観測、b)航路を横断する断面濁度観測、c)河川2カ所の長期観測による土砂収支の試算、以上の3ケースで、いずれも、濁度計による鉛直的なキャリブレーションを実施して各種係数を予め求めておき、後日、ADCP観測値から濁度へ変換している。

a) 海域における観測事例

K港において1潮汐の連続観測(1時間毎)を4地点で行った(2004年9月)。観測項目は、多項目水質計による水温、塩分、濁度およびADCPによる流速、反射強度とした。水質は鉛直方向下向きに0.1m間隔で観測し、ADCPはセンサーヘッドを下向きに艀装し、層厚0.25mで観測した。観測された水温、塩分を用いて反射強度と実測濁度とのキャリブレーションを行い、上記各種パラメータを決定することで反射強度をABTに変換した。キャリブレーション結果を図-3(a)に示す。濁度との相関係数は0.98と良好であるが、図-3(b)より10NTU以下の低濁度時においては相関が0.82と精度が低下する傾向が見られた。また、本手法と従来手法で反射強度からABTを算出し、実測値と共に図-4に示した。本手法は実測濁度に良く一致していることがわかる。従来手法は、ソナーの式を基にフィッティングさせたもので、水隕による吸収を定数とし、懸濁物質による減衰を考慮していない。そのため、図-4(b)のように底層付近において高濁度が発生した時や図-4(a)のように音波の吸収量の鉛直変動が大きい時に誤差が生じるものと推測される。

1潮汐の連続観測データ(1時間ピッチ)を図-5に示す。図-5(a)が濁度実測値で、図-5(b)がABT(超音波濁度)を示している。最干時から上げ潮時にかけて底層付近で高濁度が生じている様子が良く再現されている。濁度計でこうした鉛直分布を得るには相当な労力とコストを要すが、ADCPを用いることで、流速計測と合わせて濁度分布を簡便に得ることが可能となり、新たな観測ツールの一つとして今後の活用が期待できる。

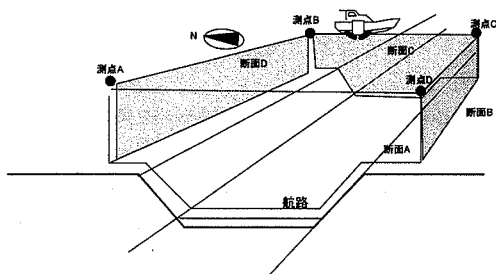


図-6 濁度観測状況

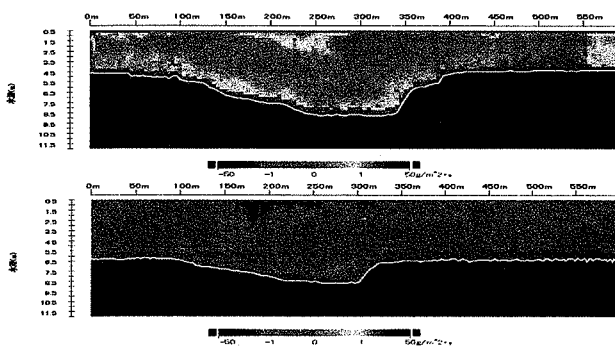


図-7 断面のSSフラックス分布

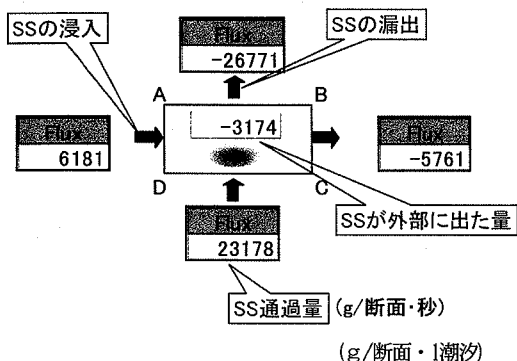


図-8 1 潮汐間における土砂収支量

b) 航路を横断する断面濁度観測

K港において航路に集積した浮泥の挙動を把握するため、航路を囲む1×0.5km四方の外周を航走観測し、断面の濁度分布とSSフラックス求め、航路への浮泥堆積量を試算した。観測状況を図-6に示す。断面の土砂フラックスは、ADCPの流速分布にABTを乗じて単位面積当たりのSS通過量に換算した(図-7)。濁度からSSへの換算は実測値を基に $SS=1.15 \times ABT$ の関係式を用いた。次に各断面の通過土砂総和量を求め、1 潮汐の間に航路内へ出入りする土砂収支量を試算したところ、-3.2kg という値が得られ、浮泥が航路から漏出している様子が観測された(図-8)。

本調査は、調査区域を1 巡するのに1 時間を要したため、同時に問題があったが、広域の土砂フラックスを比較的短時間で把握できる点で工事の濁り監視などに有効であると考えられる。

c) 河川2地点の長期観測による土砂収支の試算

関東のT川河口域において、上流(河口から4km)・下流(河口)の2 地点にADCPを長期設置し、2 地点間に残留

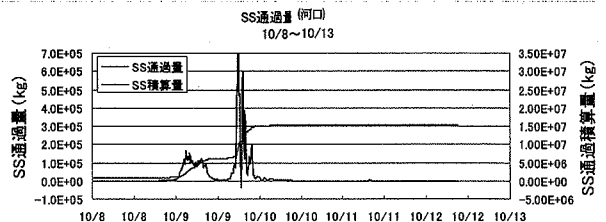
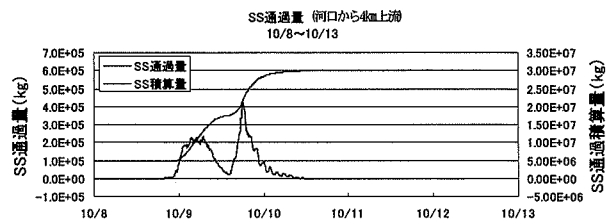
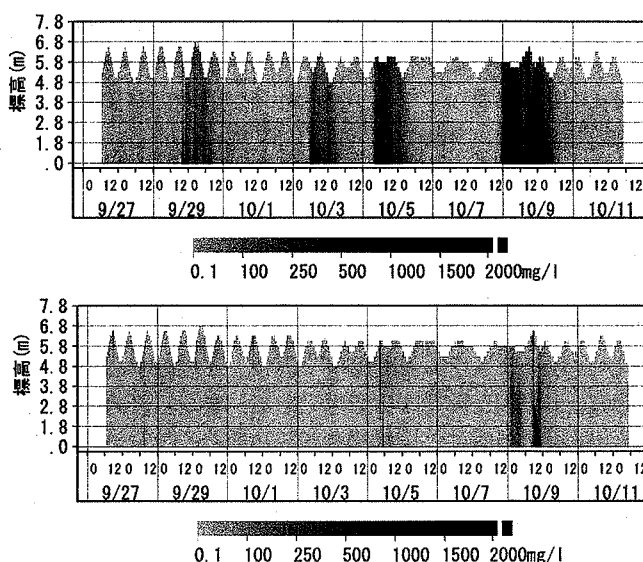
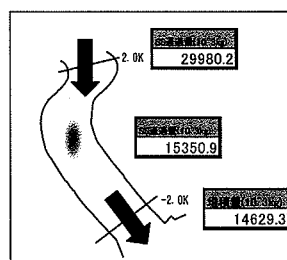


図-9 SS通過量の時系列変化



0.1 100 250 500 1000 1500 2000mg/l



SS (10 ³ kg)	土砂密度 (g/cm³)	堆積量 (m³)	堆積区間面積 (m²)	平均堆積厚 (cm)
14629.3	1.3	11.25	728000	1.5

図-11 鉛直ABT分布の時系列変化

する土砂収支を試算した(2004年10月)。土砂フラックスは、ADCPの流速値とABT(超音波濁度)、河川断面特性から、高さ毎に土砂通過量を求め、断面の積分値を得た(図-9)。濁度からSSへの変換は、別途実施した採水調査で一次変換式を構築し、ABTからSS濃度を算出した。上流と下流の鉛直ABT分布の時系列データを図-10に示す。両地点共に潮汐の影響を受けているが、上流側では上げ潮時に底層で高濁度が恒常的に発生している状況が

観測されている。観測期間中に何度か出水が生じており、両地点の土砂フラックスの差から出水による土砂供給量を概算した。計算の結果、河口から4kmの区間に残留する土砂は728,000m³、平均堆積厚1.5cmという値が得られた(図-11)。計算期間は、2004年10月1ヶ月間で、台風22号による出水が生じた期間を含んでいる。本観測は河道中央部1点での観測のため、横断分布が反映されていないこと等、改良の余地は多いが、従来の土砂供給量を計測する労力を考えると、簡便で連続的な値が得られる点で、有効な観測手法であると言える。

4. 結論

ADCPによる河川流量観測の変遷と国内外の技術動向および新しい超音波濁度計測技術による土砂量観測手法について報告した。我が国でも河川流量観測ツールとしてADCPが普及してきたが、その精度管理に関する議論はまだ少ない。今後、国内においてもADCPによる流量観測精度管理の議論が活発化することが望まれる。また、超音波の特性を利用して様々な応用観測手法が考案されており、超音波濁度と流速分布の同時計測による土砂フラックスのモニタリングなどは今後の発展が期待される。当研究グループではADCPを活用した土砂フラックステレメトリーシステムを開発中であり、平成18年度中には現地試験観測を実施する予定である。また、H-ADCP断面流量観測装置にこの機能を組み込むことで、河川断面の土砂フラックスがより詳細に計測できるメリットがあり、今後の開発が期待される。

参考文献

- 1) 酒井雄弘, 二瓶泰雄: ADCPを用いた中小河川の流量計測法に関する検討, 水工学論文集, 第50巻, pp.721-726, 2006.
- 2) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実証実験, 水工学論文集, 第50巻, pp.709-714, 2006.
- 3) Stephen W. Lipscomb: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, U.S.G.S. Open-File Report 95-701.
- 4) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2005-5183
- 5) David S. Mueller: Use of Acoustic Doppler Instruments for Measuring Discharge in Stream with Appreciable Sediment Transport, Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002.
- 6) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
- 7) 二瓶泰雄, 木水啓: 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集 No.803/II-73, pp.155-160, 2005.
- 8) Scott E. Morlock, Hieu T. Nguyen, and Jerry H. Ross.: Feasibility of Acoustic Doppler Velocity Meters for the Production of Discharge Records from U.S. Geological Survey Streamflow-Gaging Stations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4157, 2002.
- 9) Catherine A. Ruhl and Michael Simpson.: Computation of Discharge Using the Index-Velocity Method in Tidally Affected Areas, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5004.
- 10) 横尾啓介, 中津川誠, 羽山早織, 大熊正信: 超音波式流速計の連続観測に基づく流量推定手法-河川感潮域を対象として-, 河川技術論文集, 第10巻, pp.369-374, 2004.
- 11) 木下良作: ADCPと無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について, 農業土木学会平成15年度応用水理研究部会特別講演録, 2003.
- 12) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正: 鶴見川感潮域におけるH-ADCPを用いた流量観測, 河川技術論文集, 第11巻, pp.243-248, 2005.
- 13) 大東秀光, 上坂薫, 南修平, 劉炳義, 橋田隆史: H-ADCPを用いた河川流量観測システムの開発と現地試験観測結果について(3) 土木学会第56回年次学術講演会論文集第II部門 2002
- 14) 川西澄, 水野博史: 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第45巻, pp.1045-1050, 2001.
- 15) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.937-942, 2001.
- 16) 山崎真一, 奈良俊介, 宮下将典, 新山雅紀, 山下俊彦: 鶴川河口海域における流動と底質の堆積・移動特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.111-115, 2000.
- 17) Kent L. Deines: Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, Proceedings IEEE 6th Working Conference on Current Measurement - San Diego, 1999.
- 18) 橋田隆史, 新井励, 南修平, 劉炳義: ADCPを応用した河川土砂フラックスのモニタリング手法の研究(1), 第41回環境工学研究フォーラム講演集, pp.22-23, 2004
- 19) 橋田隆史, 新井励, 岩井克巳, 田邊勝, 吉津憲: ADCPの散乱強度による濁度の算出とモニタリング手法の実用化について, 海洋調査技術学会 研究成果発表会講演要旨集, 2004
- 20) Schukin M. and Marsh H. W.: Absorption of Sound in Sea Water, J. Brit. IRE, 25:1963-493
- 21) Sheng J. and Hay A. E.: An Examination of the Spherical Scatterer Approximation in Aqueous Suspensions of Sand, J. Acoust.Soc.Am, 83:1988-(2)598
- 22) Urlick R. J.: The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles, J. Acoust.Soc.Am, 20:1948-(3)283
- 23) RD Instruments: Calculating Absolute Backscatter, Technical Bulletin ADCP-90-04. RD instruments, San Diego, Ca., USA

(2006. 4. 6 受付)