

水工学シリーズ 11-A-6

河川工学に関わる ADCP 計測技術の最前線

東京理科大学 理工学部 准教授

二瓶 泰雄

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2011 年 8 月

河川工学に関わるADCP計測技術の最前線

FOREFRONT TECHNOLOGIES OF ADCP MEASUREMENT IN RIVER ENGINEERING

二瓶泰雄（東京理科大学）

Yasuo NIHEI (Tokyo University of Science)

1. 今、なぜADCPなのか？

ADCPはAcoustic Doppler Current Profilerの略で、日本語では超音波ドップラー流速分布計と呼ばれている。これは、超音波のドップラー効果を利用して、一台で瞬時に流速鉛直分布の計測が可能な機器であり、その概観は図1のようなものである。ADCPは、1970年代に海流計測用に開発された機器であり¹⁾、河川流のような浅い水域への応用は1980年代後半からなされるようになった²⁾。しかしながら、当初はADCP自体が非常に大きく、かつ、重かったため、海洋観測などで使用される大型船を用いない河川流観測では、それほど普及しなかった。それが2000年以降のADCP計測技術の革新（小型化、軽量化、浅水流計測向きの機能搭載）により、ADCPの河川流計測も徐々に増えていった。

その一方で、河川管理に必要な流量観測の体制としては、我が国では、戦後直後に決められた観測方法（浮子など）が50年以上も継続して採用されている。その間に、ADCPを始めとする様々な流速計測技術が発展してきたが、これらの技術をうまく現場に活かすことができていないのが現状である。その理由としては、過去50年以上にわたって継続して行われてきた流量計測と全く違う方法で行うと、計測データの品質が大きく変わり、過去と現在のデータの整合性が担保できなくなる可能性があるためである。また、河川管理の実務担当者に最新の計測技術の啓発・普及が十分に進んでいないことも大きな原因である。

そのため、本報では、いくつかの流速計測技術の中からADCPやその関連技術であるH-ADCP（水平設置タイプのADCPであり、流速横断分布計測が可能）について、著者の取り組みを中心に紹介する。以下では、まず、河川工学におけるADCP利用の最重要目的である流量観測法について分類・整理する。次に、ADCPやH-ADCPを利用した流量観測方法の詳細や適用事例、計測精度などについて記述する。さらに、ADCPやH-ADCPの流速・流量観測以外の適用事例として、土砂輸送量観測への応用事例についても示す。なお、この手の測定器は、論文上では製品名で呼ぶことを避けるものであるが、このADCPは製品名として関係分野には広く浸透しており、論文タイトルにも頻繁に用いられているため、ここでもそれに倣い、そのままADCPと呼ぶこととする。



図1 ADCPの概観

2. 流量観測法の分類

(1) 流量観測は必要か？

河川整備基本方針では、基本高水や計画高水流量が一級河川における代表地点毎に策定されている。そのため、河道整備・管理には、質の高い流量観測を継続的に行うのは当然であるが、「流量データは無くても水位データのみで河川管理は十分である」と流量観測を軽視する河川管理者が存在するのも事実である。河川水位データは洪水時における水防活動や避難への直接的な指標となっており重要であるのは言うまでもないが、流量データは河道の“流下能力”を示すものであり、過去から現在までの河道整備がどの程度なされてきたかを示す河川技術者の“成績表”とも言えるべきものである。そのため、洪水時における流量観測データを持っていないということは、治水対策としてなされた河道整備の成果を直接確認できないことを意味しており、現代の社会基盤整備で主流となっている“順応的管理”

を行う前提が崩れている。これはごく一部の理由に過ぎないが、流量観測は河道管理・整備を行う上で必要不可欠であり、渇水時から洪水時まで全てをカバーし得る流量観測法の開発・整備が必須である。

(2) 流量計測に必要なもの

流量 (DischargeもしくはFlow rate) は水理学や流体力学の教科書の最初のほうに登場する基本量である。流量を「質量流量 (Mass discharge)」と「体積流量 (Volume discharge)」に分けて扱う場合もあるが³⁾、ここでは後者の体積流量を単に流量と呼ぶ。この流量の定義は「ある断面を単位時間当たりに通過する流体の体積」となっている。

このような流量を計測する上では、図2に示すように、ある横断面における、①横断面に直交する方向の流速横断・鉛直分布、②河床形状、③水位、という3項目をそれぞれ計測する必要がある。このうち、水位計測は相対的に容易であり、一般的には断面の一地点において計測され、「水位が横断面内で一様である」と仮定して水位観測値から断面積を算出する。この仮定は概ね妥当であると思われるが、洪水後に河川に残されている痕跡水位の結果より、左岸と右岸で痕跡水位が異なることがしばしば見られるなど、「水位が横断方向に一様」とする仮定の妥当性については疑問が残る。これに関しては、縦横断方向に密な水位観測データを取得・解析する必要がある、今後の課題として残されている。

また、河床形状に関しては、定期的または洪水イベント前後において実施される横断測量結果から与えられることが一般的であり、「河床形状が洪水中に変化しない」と仮定し横断測量結果と時々刻々の水位から断面積を算出している。しかしながら、洪水時に河床変化が顕著となるのは頻繁に報告されており、この仮定の妥当性は大きい疑問が残る。これは、河床高さの自動連続観測機器が十分確立されていないためであり、流量計測に必要な3項目の中で最も計測が困難である。

以上より、流量計測には、本質的には水位横断分布、河床高さの横断分布、流速横断・鉛直分布を時々刻々計測する必要があるが、実際の流量観測では、

- ・ 水位観測は横断面の一地点のみで行われ、その時間変化は計測される。
- ・ 河床高さは定期横断測量結果が与えられ、洪水時における河床高さの時間変化は計測されない。

このような扱いにより、水位や河床形状の計測精度やそれらに基づく流量推定精度は大きな問題となるが、計測機器の数やコスト、河床形状計測機器の現状レベルから、これらの扱いは現在の流量観測では概ね共通して行われている。このため、「流量」観測方法を分類することは、「流速」観測方法の分類を意味することになる。

(3) 分類

河川流量観測法としては、図3のように、対象地点に直接出掛けて流量観測を行う「単発観測」と何らの方法により無人で自動連続的に流量観測を行う「連続観測」に分類される。

a) 単発観測

「単発観測」としては、プライス流速計 (回転式流速計)、電磁流速計、浮子、画像解析法、電波流速計、ADCP等による様々な調査が実施されている^{4)~7)}。これらの方法の概要は表1に示すとおりである。

このうち、プライス流速計や電磁流速計という「点」流速計を用いる場合には、横断面内における多くの鉛直・横断地点において流速を計測し、流量を算出する。これらには多くの労力と時間がかかり、かつ、センサーにゴミ等が絡まると計測できなくなるため、これらの流速計は低水時用として用いられる。また、浮子に関しては、横断面内の複数地点で浮子を投下し、得られる浮子の表層流速に更正係数を掛けて水深平均流速に直し、そ

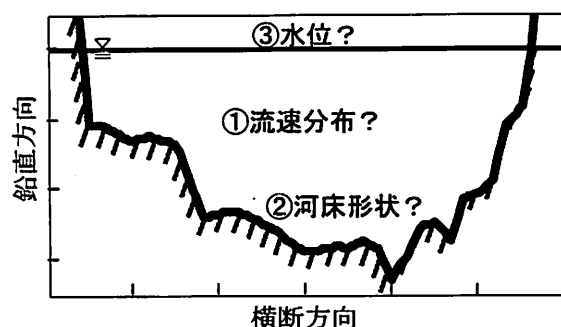


図2 流量観測に必要な計測項目

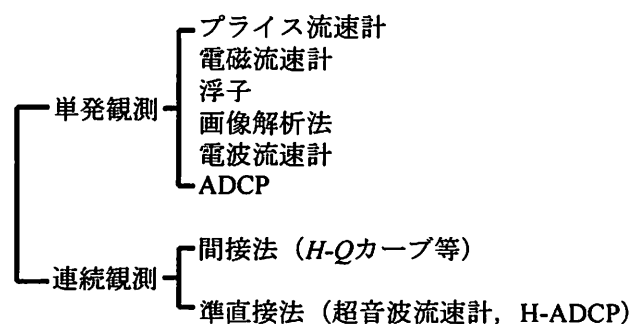


図3 流量観測法の分類

表1 河川流量（流速）計測法の概要

大分類	観測手法	計測原理	測定対象	長所	短所
単発観測	ブライス流速計（回転式流速計）	測定部に取り付けられたカップの回転速度を流速に換算する。	点流速	機器が安価で、計測が容易である。低水時観測に一般に用いられる。	センサーにゴミ等が絡まると計測不可となり、洪水時計測が困難となる。
	電磁流速計	測定部周辺に作られた人工の磁界が流水により変化し、それによる生じる電圧を計測する。	点流速	機器が安価で、計測が容易である。低水時観測に一般に用いられるが、高流速でも計測可である。	センサーにゴミ等が絡まると計測精度が低下する。また、高流速時における姿勢制御が容易でない。そのため、洪水時計測に不向きである。
	浮子	橋上などから浮子を投下し、橋下流の二断面間を浮子が通過する時間を計測し、流速を求める。	ある横断地点の表層平均流速	大量の浮遊物が流れる洪水時においても安価で確実に計測できる。	浮子が流下方向にまっすぐ流れず、どの横断地点を測っているかが不明確になる。浮子流速（表層流速）から水深平均流速に変換するための更正係数の設定法が適切でない。
	画像解析法	水表面のトレーサー（ゴミや波紋）等をビデオカメラにより撮影し、それをPIV等により画像解析して表面流速を計測する。	水表面上の流速分布	安価な市販のビデオカメラで十分計測可能である。水中に非接触状態で計測できるため、洪水時の浮遊物の影響が無い。また、瞬時に流速平面分布を計測できる。	幅広な大河川での計測は困難である。表面流速から水深平均流速に直す更正係数が風の影響を強く受け、設定方法が一般化されていない。本観測法の自動連続計測化は実用レベルではない。
	電波流速計	水表面に電波を発射し、ドップラー効果を利用して表面流速を計測する。電波発射方向の一方方向流速のみ計測する。	水表面上の点流速	非接触計測が可能であり、洪水時の浮遊物の影響は無い。自動連続計測が可能である。安価な可搬型タイプも市販されている。	波紋などが生じない低流速場では計測できず、低水時には適用不可である。画像解析法と同様に、更正係数の設定が問題である。
	ADCP	超音波のドップラー効果を利用して、流速鉛直分布計測が可能となる。	ある横断地点の流速鉛直分布	瞬時に流速鉛直分布を計測できる。専用ボートに搭載されたADCPを横断方向に移動させることで、横断面全体の流速分布計測が可能となる。水深の同時計測を行っており、短時間・少人数で流量観測の実施が可能である。	6m/sを越える大流速時には専用ボートの姿勢維持が困難になる。大量の流木等の浮遊物があるときは観測実施が困難な場合がある。
連続観測	H-ADCP	超音波を水平方向に発射し、ドップラー効果を利用して、ある高さの流速横断分布を計測する。	ある高さの流速横断分布	わずか1台で流速横断分布計測が可能であり、最大計測範囲が300mという長距離計測用も市販されている。	出水時には、高濁度水により超音波の減衰が顕著になり、計測範囲が減少する。計測値から断面流速分布に変換する手法の確立が必要となる。
	超音波流速計	超音波の送受信機を河川両岸に固定設置し、超音波伝播時間差から送受信装置間の平均流速を計測する。	送受信装置間の平均流速	大出力の超音波送信機を用いることにより、出水中の高濁度時においても計測が可能である。	センサーが比較的高価であり、設置も大掛かりな事例が多い。計測値から横断面全体の平均流速に変換する手法の確立がキーとなる。

れを断面積分して流量を算出しており、我が国では洪水時の標準観測法となっている。しかしながら、浮子の流速そのものや更正係数の設定により、浮子観測の計測精度の問題が指摘されている⁸⁾。画像解析法や電波流速計についても「新技術」として精力的に研究されており^{9)・10)}、これらの最大の特徴は水中に「非接触」で流速計測が可能となる点であり、洪水観測に向いている。これらの手法では、横断面全体での観測の効率化・省力化を実現し、更正係数の設定の問題を含めて水表面上の「点」流速から断面全体の「面」データに変換する手法が確立すれば、今後の発展が大いに期待できる。瞬時に流速鉛直分布計測を可能とするADCPについては、専用ボートに搭載したADCPを横断方向に

移動させることにより、比較的短時間で横断面全体をほぼカバーした形で流速を取得でき、上記の観測手法の中で最も流速計測範囲が広い。ADCP 観測では、洪水時における専用ボートの姿勢の安定性確保が必要であるが、流速が最大 6m/s までボートの姿勢が安定し得ることが確認されており、概ね多くの河川の大出水時でも観測できるまでに至っている。

いずれにしても、単発観測では、実際に河川に出掛けて流量調査の作業を行う必要があり、急激な出水時には現地河川への到着が遅れることや大規模な出水時における作業の危険性により、調査が行えず流量データを取得できない場合があることに留意する必要がある。

b) 連続観測

「連続観測」としては、流速計測を断面全体にわたり完全にカバーし得る流速計が存在しないことから、①水位などから間接的に流量を算出する「間接法」と、②断面内の一部にて得られた流速計測値を何らかの形で空間補間し、それから流量を推定する「準直接法」に大別される。

このうち間接法では、一般には、単発観測で得られた流量データと水位の関係式 (H - Q カーブ) を作成し、それと水位観測値から時々刻々の流量を間接的に算出しており、一般的な流量連続観測法として採用されている。しかしながら、 H - Q カーブそのものに精度上の問題があることや、潮汐の影響により単一の H - Q カーブが得られない感潮域などには間接法は原理的に適用し得ない⁴⁾。また、他の間接法としては、水位 H の代わりに流速 V や水位勾配 K を用いる方法が提案されている。

このような間接法よりも流速計測値から何らかの方法で流量を推定する準直接法は有望であり、そこでは前述した画像解析法や電波流速計、ADCPに加えて、水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler)⁹⁾ や超音波流速計が用いられている。これらの方法では、断面内の一部の流速を計測し、それを断面全体に何らかの形で内外挿して流量を算出しているため、流速の内外挿手法が流量推定精度に大きな影響を及ぼしている。しかしながら、一般には、流速鉛直分布 (対数則等) や経験的な更正係数を援用するという単純な空間補間操作を行っており、この場合、流量の算定精度が大きく低下してしまう可能性が指摘されている^{10)・11)}。このように、準直接法を発展させるキーは、計測された流速データを横断面全体に内外挿する技術の開発であり、そのためには数値解析技術の導入は必要不可欠である。

3. 単発観測としての ADCP 流量観測法¹²⁾

(1) ADCP の流速計測原理

水中に超音波を発信する ADCP は、水中における生物・非生物起源の散乱体が移動することにより生じる反射音波のドップラーシフトを利用して、流速鉛直分布をリモートセンシングする機器である。本報で用いる ADCP は Workhorse Sentinel 1200kHz (Teledyne RDI 製) であり、この機器には超音波を送受信するセンサー (トランスデューサー) が 4 つ配置されている。図 4 に示すように、一対のトランスデューサー T_1 、 T_2 を考えた時、鉛直線より θ だけ傾いているトランスデューサー面から超音波ビームが発信され、ビーム軸方向の流速 V_{T1} 、 V_{T2} が計測される。ここで、水中の散乱体 S_1 、 S_2 の速度 (u 、 w) が同一であると仮定すると、 u 、 w は次式のように与えられる。

$$u = \frac{V_{T1} - V_{T2}}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$w = \frac{V_{T1} + V_{T2}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

このとき水中の散乱体が水流と同じ速度で動いていれば、 u と w は水流速度となる。また、ビーム軸方向の異なる位置にお

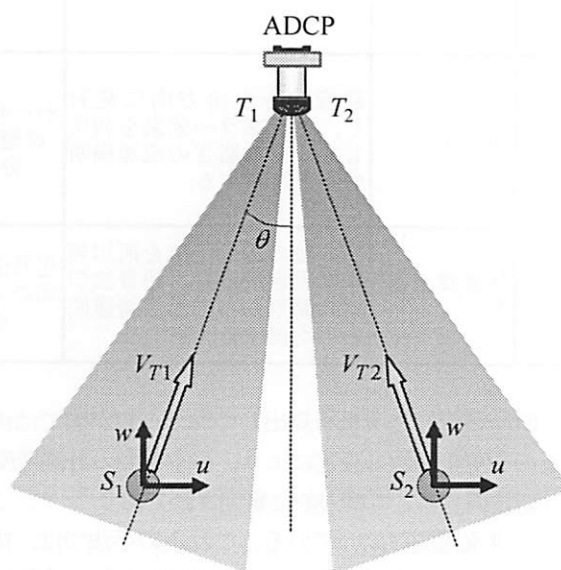


図 4 ADCP の流速計測原理に関する概念図

ける散乱体からの反射音波は異なる時間に受信されるため、ADCPではその時間差を利用して流速鉛直分布を計測することが可能となる。

(2) 河川流速・流量計測上の問題点

このようなADCPを用いることにより、効率的で精度の良い流量観測を実現し得ることが期待され、既に多くの応用事例が報告されている^{10)~15)}。一方、ADCPを河川流量観測に用いる際には、海洋観測などでは取り上げられない問題点がいくつか存在する。以下に、主要な問題点を挙げる。

a) 流速計測上の前提条件の妥当性

ADCPによる流速計測は、上述した「水中散乱体 S_1 、 S_2 の速度が同一である」という前提条件に基づいている。深さ z の計測では、水中散乱体間の距離は $2z \tan \theta$ であり、一般的な θ ($=20$ 度) の場合、 $z=5\text{m}$ で 3.6m 、 $z=10\text{m}$ で 7.3m となる。このため、河川流場のように、横断方向に水深勾配や速度勾配が大きな流れ場では、上記の仮定が常に成り立つかどうかは疑問である。

b) 水面・底面・側岸付近の計測値の取り扱い

ADCP 移動観測法により横断面内の大部分における流速データは取得されるが、水面・底面・側岸付近での流速値は計測されていないか、もしくは計測されていても誤差が大きい。まず、水面付近では、図5に示すように、ADCPの喫水分 H_{s1} に加えて、不感帯（センサー面から計測第一層までの深さ） H_{s2} においても流速は計測されていない。ADCPでは、超音波の送信と受信が同じセンサーで行われているために、センサー近くから反射された超音波は超音波の送信中に戻ってくるため受信できず、不感帯が生じてしまう。なお、最近では、不感帯を0とするタイプの機器も開発・市販されている。

また、ADCPでは、計測用として発信する超音波（メインローブ）以外に、トランスデューサーの挙動により生じてしまうサイドローブと呼ばれる弱い音も発信している（図5）。底面付近では、ADCPから鉛直下向きに発信されたサイドローブ音波が強く反射するため、メインローブ音波の計測値に誤差が含まれる。そのサイドローブの影響を受ける深さ H_b は、センサー面から底面までの距離を H とすると、以下ようになる。

$$H_b = H(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

このとき、 $\theta=20$ 度のときには、 $H_b=0.06H$ となるが、安全側を見て $H_b=0.10H$ として扱うことが多い。さらに、水深の浅い側岸付近では、上述したように水面・底面付近におけるデータ欠測の影響を受けて、流速データを取得できないことが多い。

c) 河床変動の影響

ADCP 移動観測法のように、ADCPを完全に固定せずに水面付近に浮かべて流速計測を行う場合には、底面との相対速度（対地速度）を用いて流速を補正する、という「ボトムトラッキング（BT）」機能が一般的に使用される。また、得られる対地速度を用いて、ADCP自体の相対位置を求めることも可能である。このBT機能を適用し得る前提条件は「河床面が静止している」ということであるが、掃流力が増大する洪水時には、河床付近では掃流砂が卓越するため、上記の前提は成り立たない可能性がある。このことより、BT機能を利用した流速補正やADCPの位置出しの妥当性を検討する必要がある。

d) 測定時におけるADCPの姿勢

ADCPを水面に浮かべた形で観測を行う場合、ADCPが動揺したり大きく傾く場合には、ADCPの流速計測誤差は大きくなる¹⁶⁾。これは、海域や湖沼において波浪の影響を受ける場合に問題となるが、洪水流においても流れが強く乱れている場合や風波が発生している場合には、ADCPを水平に安定して保つことは困難になるため、そのための対策が必要となる。また、我が国では、出水時には大量の流木や浮遊物が存在するので、そのような場合には、ADCPによる計測自体が困難となる。

e) 高濁度時における流速データの欠測

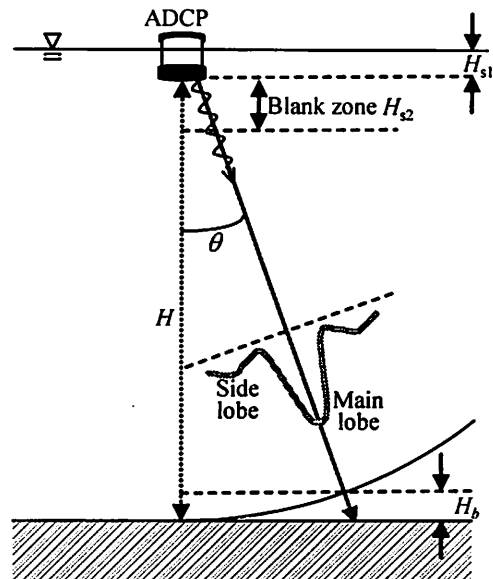
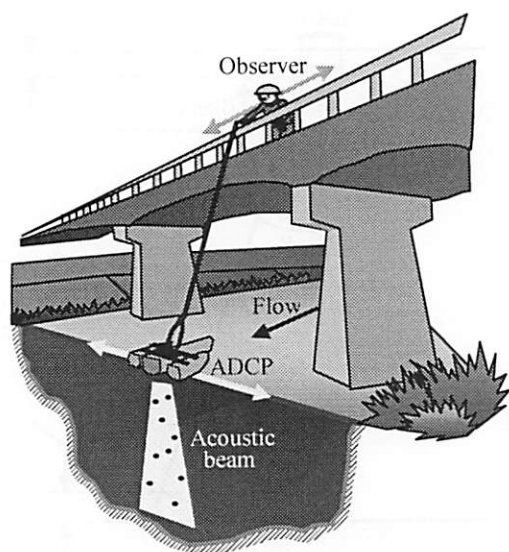
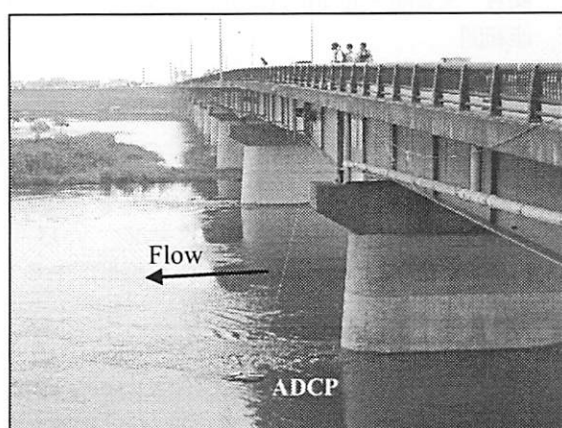


図5 水面・底面付近におけるADCPの計測不能範囲



(a) 模式図



(b) 実際の様子 (江戸川・野田橋)

図6 ADCP移動観測法の概要

水中の濁度レベルが増加すると、水中における超音波の減衰が顕著となるため、散乱体からの反射音波を計測できず、流速データが欠測となる。そのため、高濁度状況が継続する出水時には、ADCPによる流速計測自体が行えないケースが生じる。

(3) 調査・解析方法

ADCPによる河川流量観測法を確立・標準化することを目的とし、低水時・洪水時の流量観測を実施し、ADCPを用いた河川流量計測法の流量計測精度やその手順について検討する。瞬時に流速鉛直分布が計測可能であるというADCPの特徴を生かしつつ、特殊技能を持たなくてもADCPを移動させる可能となるように、図6に示すようなADCP移動観測法を実施している。ここでは、ADCPを鉛直下向きにした形で専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI 製) に取り付け、それを水面付近に浮かべて橋上より横断方向に移動させる。ここでは、ADCPにより各横断位置における流速鉛直分布と水深を計測し、また同時に目視でADCPの横断位置を記録することにより、横断面全体の流速と水深分布データを取得し、最終的に流量を算定する。ADCPの移動手段としては、橋上からロープ等で移動させるという簡便な方法とする。専用浮体の大きさは1.2m×0.8mとコンパクトであり、低水時の

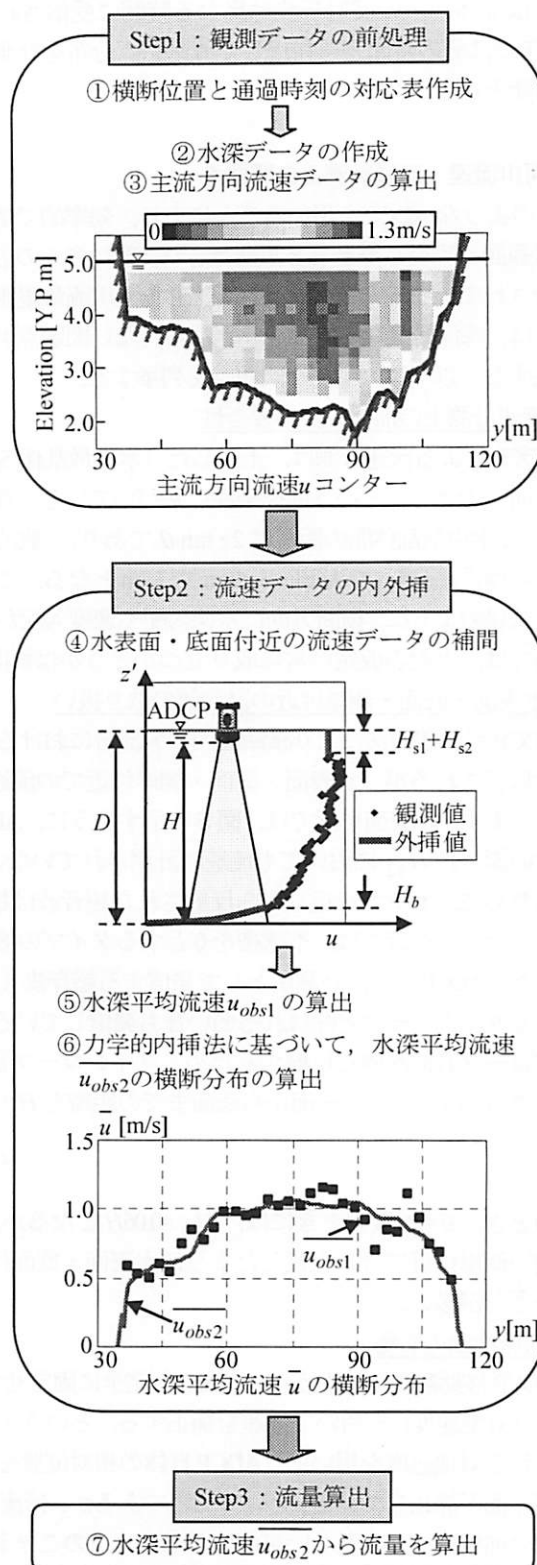


図7 流量算定フロー

みならず出水時においても、専用浮体をわずか1人で引っ張ることにそれほど労力を必要としない。

また、ADCPの流量観測精度を考える際には、データ取得してから流量を求めるまでの後処理が極めて重要である。ADCP観測は他の測器と比べて横断面内の大部分を計測し得るが、水表面・底面、側岸付近などでは未計測エリアが残る。そのため、このADCPの未計測エリアにおける流速補間操作が流量算定精度のキーとなる。これらを念頭として、著者らが行っている流量算定手順は図7に示すとおりである。

(4) 観測精度の検証結果

a) 流速

ADCPの流速計測精度を調べるために、江戸川・野田橋下流におけるADCPと電磁流速計(Compact-EM, JFEアドバンテック(株)製)を用いて得られた主流方向流速 u の横断分布を図8に示す。これは低水時(2005年10月13日)の結果である。データ表示法としては、観測データのばらつきを考慮して、1秒間隔で計測された電磁流速計の結果については、平均値±標準偏差と幅をもたせて示す。また、15秒間隔のADCP計測値については、計測値をそのままプロットしている。これらの結果を見ると、電磁流速計による流速データの標準偏差はおおよそ0.03~0.06m/sとなっており、特に、側岸付近における流速の標準偏差値は平均値と比べて相対的に大きい。このような電磁流速計の計測値とADCPの流速観測値を比べると、両者の計測値はそれぞれのばらつきの範囲内に概ね位置している。

ADCPによる流速計測誤差を定量的に示すために、各地点において1分間計測したADCPと電磁流速計のデータの平均値を算出し、その両者の差に関する平均とRMS(Root Mean Square)値を表2に示す。ここで、平均 Δu とRMS値 Δu_{rms} は、以下のように求められる。

$$\overline{\Delta u} = \frac{1}{n} \sum (u_{ADCP} - u_{EMC}),$$

$$\Delta u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (u_{ADCP} - u_{EMC})^2}$$

(4)

ここで、 u_{ADCP} と u_{EMC} はADCPと電磁流速計による主流方向流速である。また、表中には、流速差を電磁流速計の流速値で無次元化した値の平均とRMS値をパーセントで示している。この表より、流速誤差の平均値は、-0.024m/s(-4.2%)となり、ADCP流速値の方が全般的に電磁流速計の結果より小さい。また、誤差のRMS値は0.036m/s(6.9%)となっている。これらの値は、ADCP機器固有の測定誤差(=0.025m/s)と同程度か若干大きい。そもそも電磁流速計はセンサー周りにおける「点」計測を行っているのに対して、ADCPは厚さ0.20mにわたる「層平均」流速を計測している。このように、両測器の計測範囲が異なることや流速値そのものの変化が大きいことを考慮すると、ADCPと電磁流速計の計測結果は概ね一致しているものと見なせる。

また、表2には、ADCP移動観測法における水深と目視による横断位置及び流量に関する計測誤差の平均値とRMS値が示されている。これらの結果は主として江戸川・野田橋で低水時にて行われた。これより、本観測法による水深や横断位置の計測精度も既存手法と遜色ない結果となっている。

b) 流量

ADCP移動観測法における流量計測精度を調べる際には、ブライス流速計による流量観測結果を検証用データとして用いる。しかしながら、ブライス流速計による観測がADCP移動観測法と同時に進行していないため、ここでは、ブライス流速計による流量値 Q_p と水位 H から HQ 式を作成し、ADCP移動観測法が行われたときの検証用流量 Q_{HQ} を

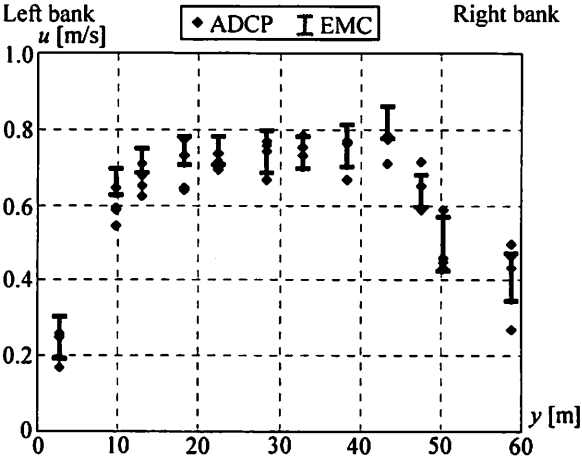


図8 ADCPと電磁流速計(EMC)により得られた主流方向流速 u の横断分布(江戸川野田橋, y : 横断方向距離(右岸向きを正), 2005年10月13日)

表2 ADCP計測項目の誤差の平均値とRMS値(RMS: Root Mean Square, n : データ数)

	Value		Percentage [%]		n
	Mean	RMS	Mean	RMS	
Velocity [m/s]	-0.024	0.036	-4.18	6.93	23
Depth [m]	-0.031	0.114	-1.13	9.18	123
Lateral position [m]	-0.256	0.950	-0.36	2.13	91
Discharge [m ³ /s]	-2.18	4.48	-3.63	6.20	36

求める。ADCP 移動観測法により得られた流量 Q_{ADCP} と、この $H-Q$ 式から算出された流量 Q_{HQ} の相関図を図 9 に示す。図中には、ADCP 移動観測法の計測誤差を見やすくするために、 Q_{HQ} に対する 0%, $\pm 10\%$ の誤差に相当する太線・細線をそれぞれ引いている。これより、ADCP 移動観測法による流量観測値の大部分は、誤差 10% 以内に収まっている。

より詳細に流量計測精度を調べるために、ADCP による流量観測値 Q_{ADCP} と基準値 Q_{HQ} の差の RMS 値 ΔQ_{rms} を式 (4) と同様にして求めた結果について図 10 に示す。ここでは誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} の流量依存性を見るために、図の横軸を流量 Q_{HQ} とし、流量を $20\text{m}^3/\text{s}$ 毎もしくはそれ以上の範囲に区分けし、各流量範囲内において求められた ΔQ_{rms} が図示されている。また、参考のために、プライス流速計による流量観測値 Q_p に関して算出した誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} も表示している。さらに、流量観測精度の一つの目安である誤差値 5% と 10% に相当する直線も図示している。これより、ADCP 移動観測法における ΔQ_{rms} はどの流量においても $6\text{m}^3/\text{s}$ 以下に収まっており、また、流量が増加すると ΔQ_{rms} が小さくなる傾向が見える。これらの結果を相対誤差に換算すると、全て流量において、相対誤差は 10% を下回っている。また、 $Q_{HQ} < 100\text{m}^3/\text{s}$ では相対誤差が 5% 以上となるのに対して、 $Q_{HQ} > 100\text{m}^3/\text{s}$ では相対誤差が 5% 以下である。一方、プライス流速計の結果に対する ΔQ_{rms} は、最大で $8.6\text{m}^3/\text{s}$ であり、相対誤差で見ると概ね 5% 強である。両結果を比べると、流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 未満ではプライス流速計の誤差値の方が ADCP 移動観測法の値よりも小さいものの、流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上ではその逆の大小関係になっている。さらに、全データに対する相対誤差の RMS 値を求めたところ、ADCP 移動観測法では 6.2% (表 2)、プライス流速計では 7.1% であり、ADCP 移動観測法の流量計測精度は、プライス流速計を用いた標準的な低水流量観測法と同程度となっている。なお、検証用データとして用いている $H-Q$ 式による流量算定結果においても、ある程度の流量誤差が含まれる。この誤差を厳密に評価することは簡単ではないが、プライス流速計の計測結果との相対誤差の RMS 値は約 7% であり、その大きさが一つの目安である。

以上のことより、ADCP 移動観測法がプライス流速計と同程度に精度良く流量計測を実現しており、流量が相対的に大きくなるほどその精度は向上することが示された。なお、流量が相対的に小さい場合には水深が浅くなるため、ADCP 移動観測法では流速計測可能なエリアが相対的に減少するとともに、測深誤差が増加する。その結果として、低流量条件では、ADCP 移動観測法の計測誤差が増大するものと考えられる。また、ここでの流量計測精度の検証は低水時のみに限定されているが、水表面における ADCP の姿勢を安定して保つことが可能な流況ならば、洪水時においても ADCP 移動観測法の流量計測精度はここで示した結果と同程度に

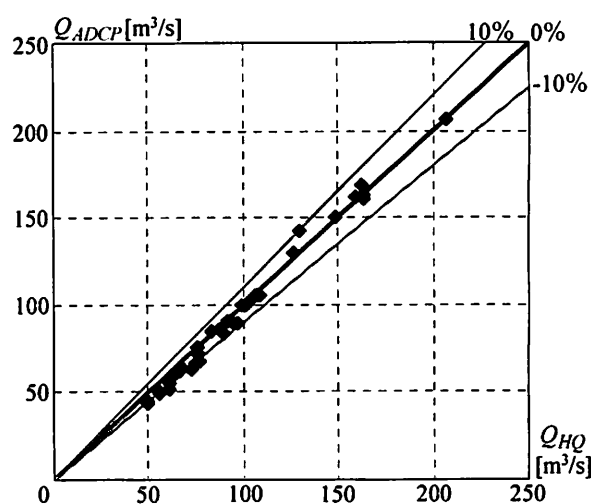


図 9 ADCP 移動観測法による流量値 Q_{ADCP} と $H-Q$ 式による流量値 Q_{HQ} の比較 (図中太線と細線は ADCP 移動観測法による観測値の誤差 0, $\pm 10\%$ を示す)

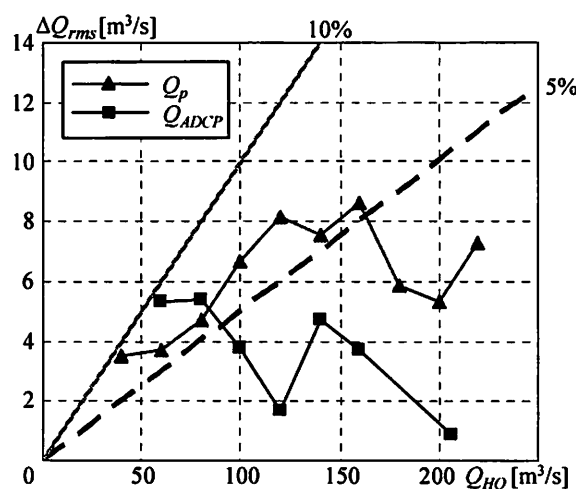


図 10 流量誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} と流量の関係 (図中の点線と実線は観測誤差 5, 10% を示す)

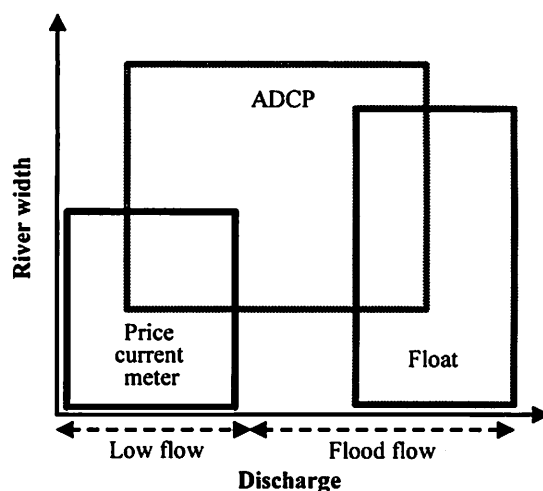


図 11 ADCP 移動観測法の適用範囲の概念図

なるものと推察される。

(5) ADCP 移動観測法の適用範囲

ここで得られた研究成果を用いて、ADCP 移動観測法の適用範囲の概念図を図 1 1 に示す。ここでは、藤田⁹⁾と同様に、横軸を流量規模、縦軸を河川幅スケールとし、図中には、ADCP 移動観測法の他に、我が国で一般に行われているプライス流速計や浮子測法も表示している。これら以外の観測法として、画像解析法や電波流速計等が存在するが、ここでは省略する。図示しているように、プライス流速計は低水流量観測用として使用されるのに対して、浮子測法は主として大規模洪水時の流量観測用として用いられる。そのため、これらの方法のみでは、中小規模洪水の観測が行われないことが多い。

一方、ADCP 移動観測法に関しては、プライス流速計や浮子測法よりも効率的に流量観測を行うことが可能であるので、相対的に大きなスケールの川幅を持つ河川流量観測に適している。しかしながら、流量が小さい場合や小規模スケールの河川では流量計測精度が低下する。また、大規模出水時には、大量の流木・ゴミ等が浮遊するため、観測自体が困難となる可能性が高い。以上より、ADCP 移動観測法は、低水時～中規模洪水時の流量規模で、中・大スケールの川幅を有する河川における流量観測に適している。この ADCP 移動観測法により、これまでデータが少ない中小規模の洪水流量観測を行うことが容易となる。また、ADCP 移動観測法による流量計測が行える範囲では、他の観測方法の計測精度検証用として、ADCP 移動観測法を用いることも期待される。

4. H-ADCPによる準直接流量観測法^{17), 18)}

(1) 概要

上記の ADCP 観測や浮子観測は、現地河川に出掛けて行う「単発観測」であり、これらのデータから $H-Q$ 式を作成し、流量の連続データをモニタリングしている。このような「間接」流量観測法では適用精度や範囲に限界があるので、近年著しく発展している流速計測技術に基づく「直接」流量モニタリング手法の開発が求められるが、現状で横断面全体の流速分布計測を可能とする測定器は存在しない。そこで、流速計測技術を生かしつつ、適切な方法により観測値を補間する「準直接」流量モニタリング技術の開発が強く求められている。

そこで、わずカー一台で流速横断分布計測が可能な H-ADCP (Teledyne RDI 製) による観測技術と最新の河川流シミュレーション技術を融合して、低コストで高精度な自動流量モニタリングシステムを新たに開発した。図 1 2 は、本流量モニタリングシステムの基本構成を示す。本システムは、①固定設置された H-ADCP による流速観測システム、②簡易テレメータを用いたデータ転送システム、③力学的内外挿法 (DIEX 法, Dynamic Interpolation and Extrapolation method) に基づく河川流計算システム、④得られた流速分布や流量をリアルタイムで公表するための WEB システム、という 4 つのサブシステムから構成される。まず①では、H-ADCP を河川内に水平になるように固定設置し、ある高さの流速横断分布を連続計測する。②では、H-ADCP と陸上に設置された簡易テレメータを専用ケーブルで接続し、テレメータによるメールシステムを介して、H-ADCP による計測データを所定のメールアドレスに送信する。さらに、③にお

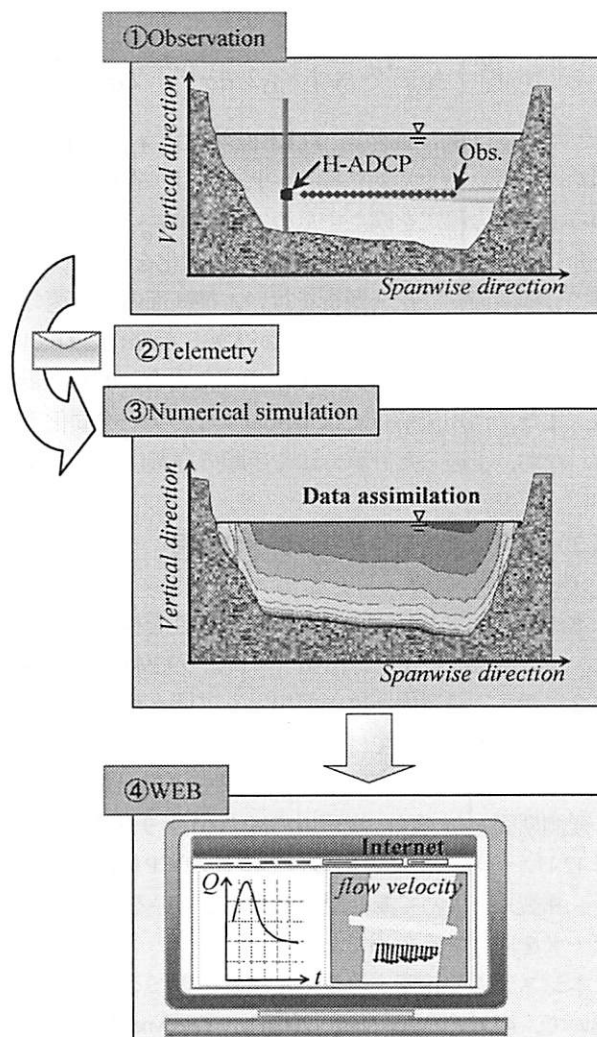


図 1 2 本流量モニタリングシステムの基本構成

いて、送られてきた観測データを取り込んだ形で河川流シミュレーションを実施し、横断面内全体の流速分布や流量を算定する。その際には、力学条件を満たした形で「線」流速データを横断面全体の面データに内外挿し得る力学的内外挿法（DIEX法）を用いる。最後の④では、①～③のサブシステムで得られた流速分布や流量をホームページ上に順次公開する。

本システムの特徴としては、H-ADCPでは計測できない領域の流速を、河川流解析により流体力学条件を満足して内外挿し得ることである。力学条件を満たさずに、単純に線形補間などで流速値を内外挿すると、DIEX法を用いた内外挿結果よりも流量推定精度は低下し、その低下量は、観測データの範囲が小さいほど顕著となる。一方、DIEX法により流速値の内外挿操作を行うと、観測データの範囲を変化させても、流量推定精度に大きな影響は見られない。

(2) DIEX法

準直接法のキーとなる流速観測データの内外挿に用いられる数値解析技術として開発されたDIEX法の概要を記述する。DIEX法では、計算精度・負荷を勘案してほぼリアルタイムに流量を算出するために、 y 、 σ を横断、鉛直方向とする横断面を計算対象として、簡略化された主流方向速度 u に関する次の運動方程式を基礎式とする。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_a = 0 \quad (5)$$

ここで、 g は重力加速度、 I は水面勾配、 A_H と A_V は水平・鉛直渦動粘性係数、 D は水深である。上式では、省略された移流項等に代わって運動方程式を満たすために付加項 F_a を導入し、また、この F_a を介してH-ADCPによる観測データの同化を行う。この式(5)を用いて「横断面」二次元解析を行い、横断面内の流速分布を求める。

DIEX法の特徴としては、基礎式が大幅に簡略化されているので、CPU時間が極めて小さく（汎用PCを用いた場合、0.3秒/計算ステップ）、リアルタイムで流量を算定することは可能である。また、河川流解析では事例の少ないデータ同化手法が組み込まれており、その際には独自に付加項を導入している。なお、上述した計算方法や手順の詳細に関しては、二瓶・木水¹⁷⁾を参照されたい。

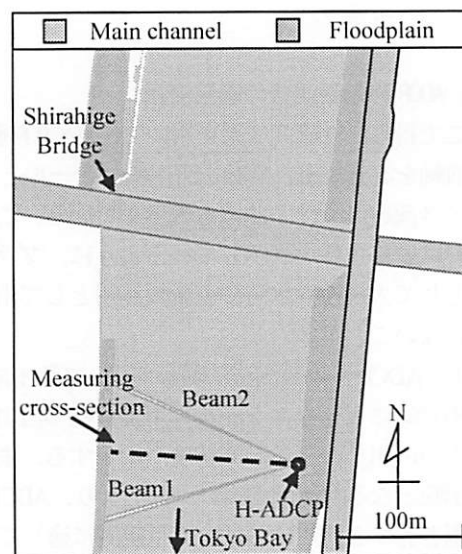
(3) 実河川流量モニタリングへの適用

a) 現地観測の概要

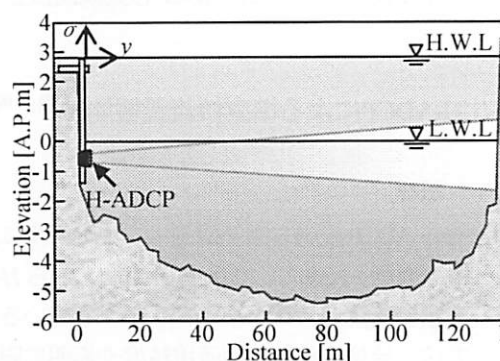
本流量モニタリングシステムの有効性を検証するために、本システムを実河川の流量計測に適用する。観測サイトは、順流域の江戸川・野田橋（河口より+39km）と感潮域の隅田川・白髭橋（同+9km）であり、隅田川での設置例を図13に示す。設置場所は両河川ともに低水路側岸付近である。設置されたH-ADCPはWorkhorse 600kHz（Teledyne RDI製）であり、低水時では低水路の対岸まで超音波が到達することを確認している。H-ADCPの基本設定としては、測定層厚は、江戸川では0.5m、隅田川では3.0mであり、サンプリング間隔は両河川ともに10分である。

観測期間としては、江戸川では2005年9月5日から12月6日、2006年6月6日から現在まで、隅田川では2007年7月12日から現在までである。このH-ADCP観測と同時に、自記タイプの光学式濁度計（Compact-CLW, JFEアドバンテック(株)製）を用いて濁度観測も実施している。これは、H-ADCPによる流速計測範囲に大きな影響を与える水中の濁度データを取得するためである。

本システムの流速・流量推定精度を調べるために、両観測地点の直上流に位置する橋もしくはH-ADCP計測断面において、ADCP（Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI製）を用いた流速・流量観測を行った。また、H-ADCP計測断面における横断測量も別途実施している。



(a) 平面図



(b) 横断面図

図13 H-ADCP観測サイト（隅田川）

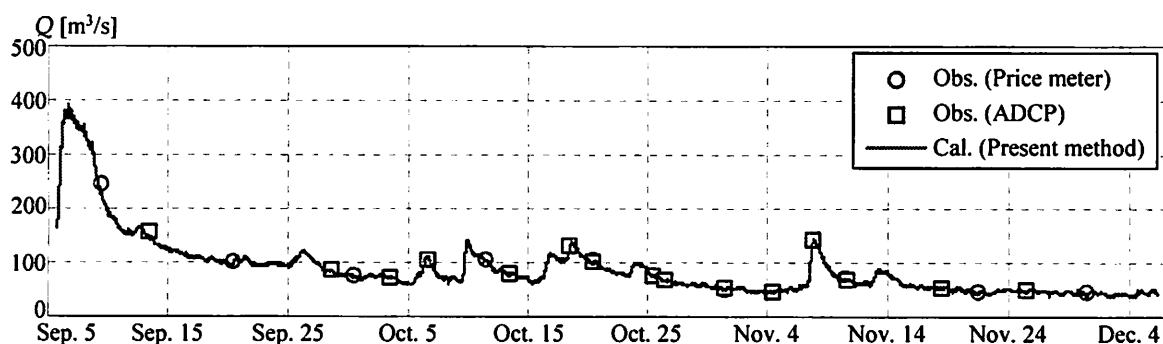


図 14 江戸川野田橋における流量の時系列変化 (2005 年)

b) 結果

<順流域・江戸川^{17)~19)}>

本システムによる流量推定精度を検証するために、江戸川における流量の時系列変化を図 14 に示す(2005 年 9~12 月)。ここでは、DIEX 法に基づく本手法の計算結果とプライス流速計及び ADCP による観測結果をそれぞれ図示している。これを見ると、本手法による流量推定値はプライス流速計や ADCP による流量の実測値と良好に一致している様子がうかがえる。本手法による流量の算定精度をより詳細に検討するために、流量の観測結果 Q_{obs} と計算結果 Q_{cal} の相関図を図 15 に示す。ここでは、DIEX 法による計算結果に加えて、単純法(観測データを直線で補間する手法)による推定結果も図示する。図中には流量推定値の誤差が分かるようにするために、誤差 0, $\pm 10\%$ に相当する直線(実線, 点線)も表示している。これを見ると、DIEX 法の計算結果は観測値と類似しており、全て誤差 $\pm 10\%$ 以内となっている。それに対して、単純法による計算結果は、DIEX 法の結果よりも観測値との差が大きく、 $\pm 10\%$ の誤差を上回る結果が多く見られる。また、単純法の流量推定値は全体的に観測値よりも小さい。これは流速の内外挿を行う部分において流速を過小評価しているためである。このように、DIEX 法は流量を精度良く推定しており、その相対誤差の RMS 値は 4% 以下となり、力学条件を考慮しない単純法の場合よりも十分低く、本流量モニタリング手法の有効性が示された。

出水時における水位 H と流量 Q の関係を見るために、本システムの流量推定結果と水位観測値の相関図を図 16 に示す。ここでも、ADCP 観測結果を併せて表示している。また、出水時データを増水期と減水期に分けて図示している。本システムによる流量推定結果では、同一の水位に対して、増水期の流量が減水期よりも大きい、というよく知られた水位-流量関係のループを描いている。本システムの推定結果と良好に一致している ADCP 観測結果においても、水位-流量関係のループは概ね確認できる。このような出水イベント中の流量の非定常変化は、最も一般的に用いられる流量算定法である $H-Q$ カーブでは当然再現できない。そのようなことから、出水中の時々刻々の洪水流量評価を行う上では、本流量計測システムの有用性が示唆された。

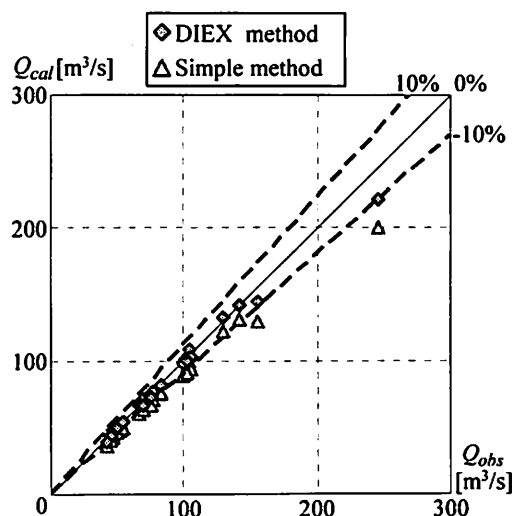


図 15 流量の観測結果 Q_{obs} と本システムによる計算結果 Q_{cal} の比較 (江戸川、図中の実線、点線は推定結果の誤差 0, $\pm 10\%$ を示す)

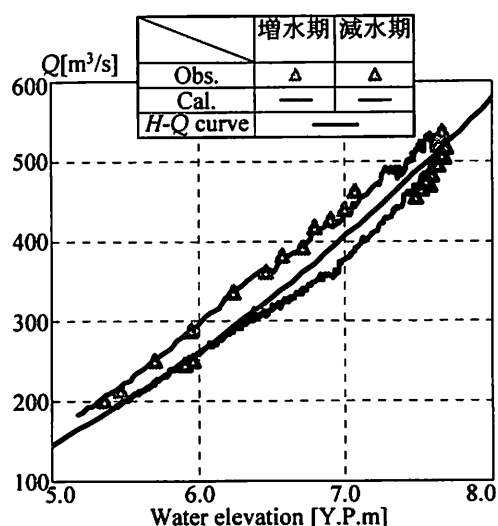


図 16 小規模洪水時における水位と流量の関係 (江戸川・野田橋、2006 年 6 月 16~20 日)

<感潮域・隅田川²⁰⁾>

H-Q カージが適用できない感潮河川における本システムの流量計測精度を調べるために、隅田川・白髭橋における本システムによる流量推定値と ADCP による検証用データの時間変化を図 17 に示す。ここでは、低水時（大潮時、2007 年 8 月 14 日）と出水時（2007 年 9 月 6、7 日）における流量の時間変化が図示されている。なお、流量の符号としては、下流（海）向きを正とする。これより、低水時では、本システムによる流量推定値は観測値と概ね一致している。特に、密度成層が形成されていたことが確認された 8 月 14 日 6 時から 9 時においても、流量推定値は観測値と一致しており、本システムの有効性が伺える。

出水時に関しては、観測値の流量ピーク付近（図中矢印の範囲）を除いて、本システムの流量推定値と観測値は良好に一致している。一方、この矢印の範囲では、流量推定値は観測値よりも小さい。この時、濁度は 700FTU を超え、超音波減衰が顕著となり、有効計測層数は 10 以下となることが確認されている。このため、低水路中央付近の高流速部分を計測できず、結果として流量を過小に推定してしまったものと考えられる。なお、H-ADCP の種類を周波数 600kHz からより低周波数のものに変えれば、高濁度時の流速計測状況は改善され、それにより流量推定精度も向上するものと考えられる。

(4) まとめ

本章では、準直接法の流量モニタリング手法として、H-ADCP による流速計測技術と DIEX 法に基づく数値解析技術を融合した流量計測システムについて記述した。また、実河川における流量計測に本システムを適用し、低水時や出水時、順流域や感潮域において本システムの流量推定精度が概ね良好であることを示した。また、本システムに基づくリアルタイムモニタリングは既に稼働していたが、現在はテレメータの故障で休止中である。なお、ここでは、流速計測技術として H-ADCP を選定したが、他の計測システムの流速データに対して DIEX 法を適用することは容易であり、その結果も報告している²¹⁾。

5. H-ADCP の掃流砂量観測への応用

(1) はじめに

上述したように、ADCP や H-ADCP による流量観測手法としての精度や汎用性については検証されたが、これらの機器は流速と共に、超音波の反射強度を計測しているため、反射強度と関連する浮遊土砂濃度（SS）の計測事例も報告されている^{22)~25)}。また、ADCP の掃流砂量計測への適用も試みられているが²⁶⁾、浮遊砂観測法と比べてまだまだ課題が多い。また、超音波計測以外にも、音圧式（ハイドロフォン）や転倒マス式等の計測機器が掃流砂観測に用いられているものの、浮遊砂観測で用いられる機器ほどの汎用性はないため、今後、長期連続的かつ横断面全体にわたる掃流砂量計測法の開発が急務の課題である。

一方、4. で示した H-ADCP による準直接流量観測法では、流速横断分布や流量に加えて、摩擦速度や底面せん断力の横断分布情報等も得られることから、今後、様々な河川管理用モニタリング技術としての発展が期待される。本章では、H-ADCP 計測と数値計算の融合技術をベースとした掃流砂量推定手法を提案することを試みる。本手法を江戸川における掃流砂量の長期連続モニタリングに適用し、検証用の ADCP 観測結果と比較し、本手法の有効性を検討する²⁷⁾。

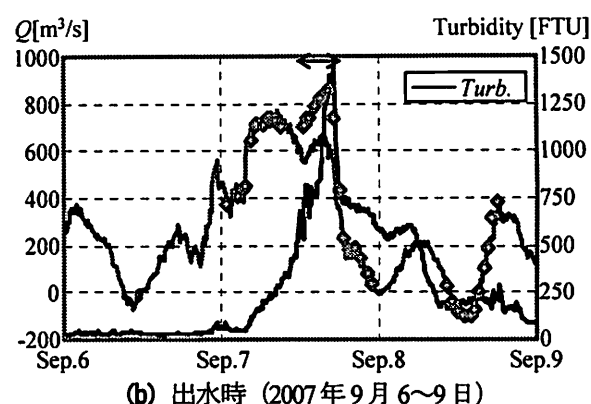
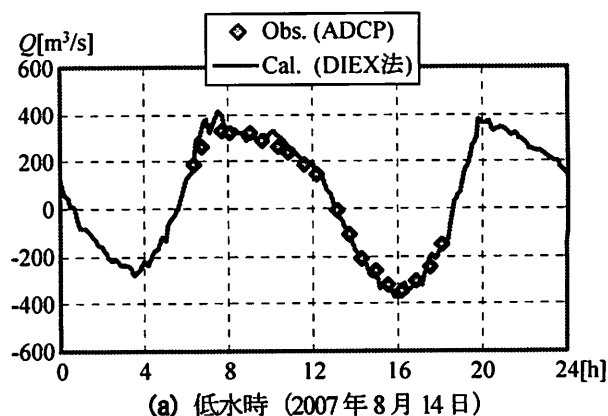


図 17 隅田川・白髭橋における流量の実測値と本システムの推定値の比較 (b) のみ濁度も示す)

(2) 本手法の構成

H-ADCP 計測と数値解析を融合した本掃流砂量モニタリング手法は、図 18 に示すように、①H-ADCP による「線」流速の計測、②力学的内外挿法 (DIEX 法) に基づく数値解析による「面」流速データ・底面せん断力・掃流砂量の推定、から構成される。②の DIEX 法では、4. で示したように「線」流速データを同化して「面」流速データを算出すると共に、底面せん断力 τ_0 の横断分布も求める。さらに、この底面せん断力 τ_0 を用いて底質の移動限界判定²⁰⁾や次式に示す一般的な掃流砂量式 (芦田・道上式)²⁰⁾を反映した数値アルゴリズムを導入している。

$$q_B = 17\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d^3} \quad (6)$$

ここで、 q_B は単位幅掃流砂量、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 σ は土粒子密度、 ρ は水の密度、 d は土粒子直径である。このように本手法は横断面全体をカバーして自動連続的に掃流砂量を推定することが可能な従来に無い技術であるが、計測精度については検証する必要がある。

(3) 現地観測の概要

本手法の基本性能を調べるために、江戸川・野田橋 (河口より 39km) に 2006 年から設置されている H-ADCP (Workhorse 600kHz, Teledyne RDI 製) の流速データを用いて、本手法により時々刻々の流量・底面せん断力・掃流砂量を推定する。検証用観測として、ADCP 移動観測を H-ADCP が設置されている横断面 (低水時: 2010/8/23, 11/16) 及び同断面から上流 200m に位置する野田橋 (出水時同年 5/27, 台風 1012 号 (9/24), 台風 1014 号 (10/31, 11/2)) にて実施した。ADCP 観測では、流速鉛直分布の計測値から底面せん断力を推定し、それから芦田・道上式²⁰⁾より掃流砂量を算定し、それを検証用実測値と見なす。

(4) 結果と考察

a) 流速・底面せん断力の推定精度

本手法における掃流砂量推定のキーとなる流速や底面せん断力の推定精度を検証するために、低水時 (2010/8/23 17:00) における水深平均流速及び底面せん断力の横断分布に関する ADCP 観測結果と本手法の推定結果を図 19 に示す。流速分布算定には、本手法におけるマンニングの粗度係数 n を $0.035 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ のみの結果とし、底面せん断力算定結果には n を $0.025 \sim 0.040 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ と変化させた結果を示す。水深平均流速に関しては、本手法の推定結果は同化範囲内外において概ね観測値と類似しており、右岸側の流速がやや大きい傾向も推定結果は再現している。また底面せん断力に関しては、 $n=0.035 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ の推定結果は観測値と概ね一致する。これは、本手法が精度良く流速鉛直分布を推定できているためであり (図面省略)、本手法の流速・底面せん断力の推定精度が概ね良好であることが示された。また様々な粗度係数 n

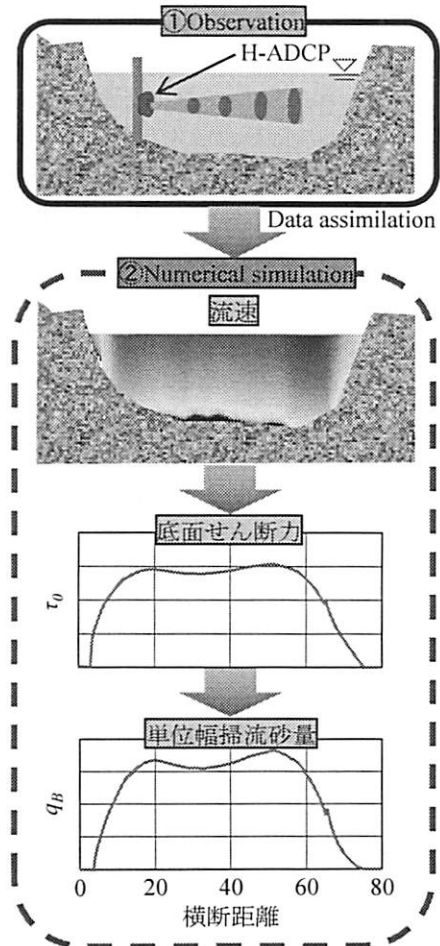


図 18 本掃流砂量モニタリング手法の基本的枠組みと計算フロー

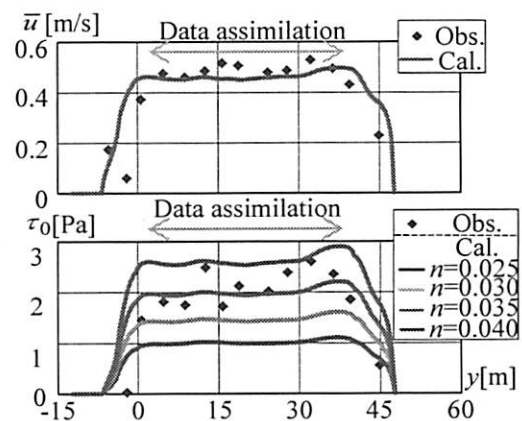


図 19 水深平均流速 (上)・底面せん断力 (下) の横断分布の観測値と推定値の比較 (低水時 (2010/8/23), n : m-s 単位)

における底面せん断力の推定値は、 n を大きくすると過大評価になり、最も適合性が高いのが $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ の結果である。このため、以下では、 $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ の推定結果のみを示す。

b) 出水時における掃流砂量のヒステリシス

台風 1014 号出水時における掃流砂量の時間変化を図 20 に示す。ここでは、掃流砂量 Q_b に関しては本手法の推定結果と ADCP による観測値、また水位も合わせて示す。この出水では二山のピークが見られ、一山目と二山目をそれぞれ期間①、②とする。これより、本推定結果は、ADCP による観測結果と概ね一致する。また、掃流砂量のピークは水位ピーク前の増水期に見られ、浮遊砂輸送量と類似したヒステリシスが掃流砂量にも現れる可能性が高い。それを検証するために、同出水時における水位と掃流砂量のヒステリシスを図 21 に示す。ここでは、推定結果に関しては期間①と②を分けて表示している。これより、期間①、②ともに、時計回りのループを描いており、掃流砂量にもヒステリシスが存在することが示された。

c) 掃流砂量の推定精度

本手法における掃流砂量の推定精度を調べるために、掃流砂量 Q_b に関する本推定結果と ADCP による観測結果の相関図を図 22 に示す。ここでは、推定結果に関しては 1 時間移動平均された結果を用いる。これより、両者は概ね一致し、全体の 93% は誤差 $\pm 10\%$ 以内に入る。また、推定値と観測値の差の RMS 値は 5.8% となっている。4. で示した流量推定誤差が 4~5% であることを考慮すると、本手法による掃流砂量推定精度は極めて良好であることが明らかとなった。

6. おわりに

本報では、これまでの流量（流速）観測法について分類し、長所・短所についてまとめた。また、その中で有望視される機器の一つである ADCP について、単発観測としての流量観測方法やその計測精度について示した。また、水平設置型 ADCP である H-ADCP を用いた準直接流量観測法として、H-ADCP 計測技術と数値解析技術を融合した新しい流量連続モニタリングシステムの概要やその結果の一例を紹介した。この H-ADCP 観測法を応用して、掃流砂量観測へ適用事例を示し、有効な手法であることを明示した。

ここで示した結果の半分は、ADCP や H-ADCP という高性能な機器により、流量計測精度や適用範囲が飛躍的に拡大したことによるものである。残り半分は、これまで「流量観測法の高度化」＝「流速計測機器の高度化」という常識から逸脱して、流速データの内外挿技術（データ同化技術）を新たに導入したことである。気象や海洋分野では、現地観測と数値解析の融合技術は着々と進化しているのに比べると、河川分野での取り組みは皆無と言ってよい。その意味から、データ同化技術の開発は今後の河川管理の高度化に必須であり、多くの研究者・技術者の参画が必要となる。

一昨年度より国土交通省では ADCP による流量観測法導入の検討を本格的に開始しており、筆者が研究を始めた時と比べると隔世の感がある。河川流量データは、河川管理上の最重要データのの一つであり、品質管理は極めて重要である。そのため、より慎重な流量データ管理を行う必要があり、過去からの連続性に縛られ最新の計測技術の導入が見

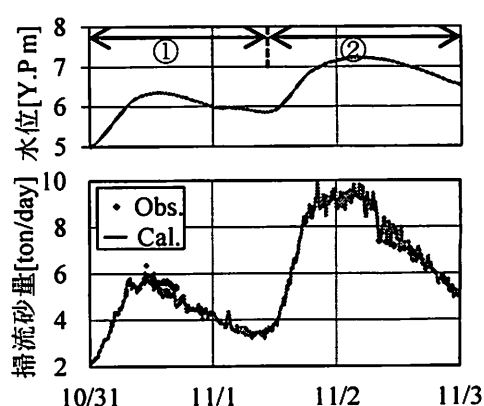


図 20 台風 1014 号出水時における水位と掃流砂量の時間変化

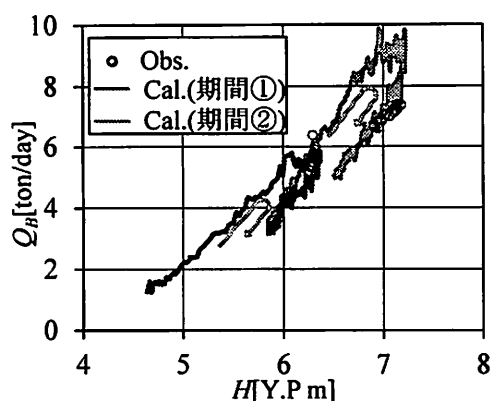


図 21 水位と掃流砂量のヒステリシス（台風 1014 号出水時）

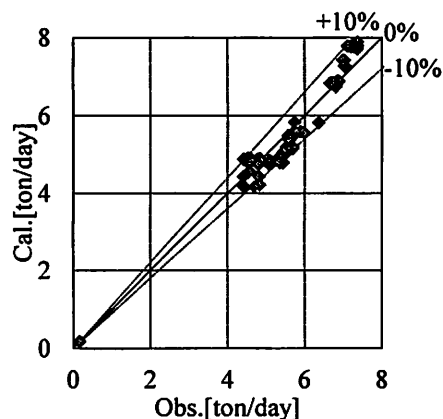


図 22 掃流砂量の観測値と推定値の相関図

送られるのは問題がある。その点、我が国における最近のADCP観測法導入の動きは画期的なものであると考えられる。

謝辞：本報で紹介した研究成果は、関係する河川管理者の皆様からの観測実施への協力やデータ提供をして頂いたおかげである。また、大変な観測作業や膨大なデータ整理には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の卒業生・現役生の惜しみないご協力のおかげである。特に、卒業生の故木水啓氏、酒井雄弘氏、原田靖生氏、色川有氏、岩本演崇氏、柏田仁氏、現役生の鈴木大樹氏・御厨純氏には大変お世話になった。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金子新・伊東集通：ADCPの普及と海洋学の発展，海の研究，Vol3，No.5，pp.359-372，1994.
- 2) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, pp.925-936, 1989.
- 3) Chanson, H.: *Environmental Hydraulics*, ELSEVIER, pp.11-34, 2004.
- 4) (社)日本河川協会編：改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，pp.33-58，1997.
- 5) 藤田一郎：非接触型流速計測法を用いた実河川の計測と問題点，ながれ，Vol.26，pp.5-12，2007.
- 6) 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.41-50，1994.
- 7) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.5，pp.460-471，1998..
- 8) 原田靖生・二瓶泰雄・酒井雄弘・木水啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，Vol.51，pp.1081-1086，2007.
- 9) Wang, F. and Huang H.: Horizontal acoustic Doppler current profiler (H-ADCP) for real-time open channel flow measurement: Flow calculation model and field validation, *XXXI IAHR CONGRESS*, pp.319-328, 2005.
- 10) 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 Vol.803/II-73，pp.155-160，2005.
- 11) Yasuo Nihei and Akira Kimizu: Evaluation of River Velocity and Discharge with A New Assimilated Method, *Journal of River Basin Management*, Vol.4, No.1, pp.27-30, 2006.
- 12) 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.
- 13) Lipscomb, S. W.: Quality assurance plan for discharge measurements using broadband acoustic Doppler current profilers, U. S. Geological Survey Open-File Report 95-701, 1995.
- 14) Mueller, D. S.: Field assessment of acoustic-Doppler based discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 15) Oberg, K.: In search of easy-to-use methods for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 16) 若岡圭子，横山勝英，石川忠晴：湖沼・貯水池における ADCP 観測の問題点と誤差補正に関する研究，水工学論文集，Vol.41，pp.1041-1047，1997.
- 17) 二瓶泰雄・木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集 B, Vol.64，No.4，pp.295-310，2007.
- 18) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 19) 木水啓・二瓶泰雄・北山秀飛：H-ADCP と DIEX 法を用いた河川流量計測法の洪水流観測への適用，水工学論文集，Vol.51，pp.1057-1062，2007.
- 20) 原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝：H-ADCP 計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング ～隅田川を例として～，水工学論文集，Vol.52，pp.943-948，2008.
- 21) 柏田仁・二瓶泰雄・高島英二郎・山崎裕介・市山誠：力学的内外挿法 (DIEX) に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築，河川技術論文集，Vol.17，pp.23-28，2011.
- 22) Young, R. A., Merrill, J. T., Clarke, T. L. and Proni, J. R.: Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary, *Geophysical Research Letters*, Vol.9, No.3, pp.175-178, 1982.
- 23) Deines, K. L.: Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers, *Proc. IEEE*, pp.249-253, 1999.
- 24) 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，Vol.45，pp.937-942，2001.
- 25) 二瓶泰雄・北山秀飛・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提案，河川技術論文集，Vol.13，pp.225-230，2007.

- 26) Rennie, C. D., Millar, R. G. and Church, M. A.: Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.128, No.5, pp.473-483, 2002.
- 27) 鈴木大樹・二瓶泰雄：H-ADCP 計測と数値計算に基づく掃流砂量自動連続モニタリングシステムの提案，水工学論文集，Vol.56，2012（投稿予定）．
- 28) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究（Ⅰ）限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，No.41，pp.1-21，1956.
- 29) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.206，pp.59-69，1972.