

CommonMPプロジェクトの進展と 今後の河川流量観測の重要性

DEVELOPMENT OF CommonMP PROJECT AND IMPORTANCE OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION

山田 正¹
Tadashi YAMADA

¹正会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-4-1)

The author first introduces the CommonMP (Common Modeling Platform for water-material circulation analysis) which can run several element models simultaneously to find out the water and material circulation phenomena, and show the importance of advancement of river flow observation technology which depends on analysis precision. In addition, author review recent studies on river discharge observation technology and offer a future direction toward the advancement of river discharge observation technology.

Key Words: *CommonMP Project, River discharge observation technology*

1. はじめに

現在, わが国における水管理・河川管理に係わる検討手法が大きく変わりつつある。国土技術政策総合研究所が中心となって, これまで実現不可能であった複雑な数値シミュレーションをより高度なレベルで実現し, ささまざまな水理・水文現象を解析するために複数の要素モデルを同時に稼働させることができる水・物質循環解析ソフトウェアの共通プラットフォーム「CommonMP

(Common Modeling Platform for water-material circulation analysis)」の構築が進められている。これにより, これまでに開発されてきた解析エンジン等のソフトウェア資産の利用や新しいモデルの提案・発表等, ソフトウェアに関する様々な情報・意見の交流を実現し,

CommonMP による新たな水管理・河川管理に関する提案を参加者が発展させることが可能になる。これらの仕組み作りの一環として, 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 同河川局, 同国土技術政策総合研究所, 社団法人土木学会, 社団法人建設コンサルタンツ協会及び社団法人全国上下水道コンサルタント協会が共同して

「CommonMP開発・運営コンソーシアム」を設立し, 土木学会からは水工学委員会の下に「水理・水文解析ソフトウェアの共通基盤に関する小委員会」を組織し, CommonMP開発プロジェクトの推進にあたっている。

本稿では, 著者が委員を務めるCommonMPプロジェ

クトの概要を紹介するとともに, 解析結果の精度に大きく係わるデータとなる河川流量の観測技術高度化の重要性を示す。さらに, 近年の河川流量観測技術の動向について概観し, これらの観測技術の高度化に向けた今後の方向性を示す。

2. CommonMPプロジェクトの概要

(1) 日本の河川データ, 水理・水文ソフトウェアおよびモデルの研究開発の現状

わが国における水文水質データベースや河川環境データベース等は, データの一部は河川局で標準化されているものの, 企業各社, 各河川事務所, 地方整備局等の事業主体が独自に整備されており, 互換性のないデータがその都度異なる構造でつくられているのが一般的であり, 汎用化も進んでいない。また, 企業各社の解析ソフトも独自に開発されたものであり, データ構造も独自に決められていることから, 同じ流域を計算する場合でもソフトの違いによって複数の構造の異なるデータを準備する必要がある。さらに, 水理・水文モデルの研究開発の現状としても, 他の研究者や技術者が開発したソフトウェアを試す機会がないことや他のモデルと組み合わせることができないこと, データフォーマットが統一されていないために, データの再利用が難しいこと, 河川・流域のデータが利用しにくいこと等から, 水理・水

文モデルの研究開発の成果が分散し、共通利用できるデータ整備の遅れ等の課題が生じている。さらに、河川技術者にとっても、ユーザビリティのよい水理・水文ソフトウェアが非常に少ないことから、自ら水理・水文解析を行う機会が減少している。治水計画の検討に当たって、用いた計算手法や解析ソフトが明らかになっていない等、透明性(アカウンタビリティ)の確保も重要な課題となっている。

(2) CommonMP構築の目的と進捗状況

上記の背景から、本プロジェクトでは、水理・水文モデルだけでなく、それをとりまく流域の物質循環の複雑系を統合的に同期同調して解析できる共通プラットフォームを構築していくことにより、水政策検討のツールとなることを目指している。また、水・物質循環等のモデルの開発環境を提供することにより、これらの研究開発の活性化に寄与するものと考えられる。図-1にCommonMPのイメージを示す。これまで異なる仕様で作成された複数のモデルを用いて解析が行われてきたものから、共通利用できるデータ入出力等の機能を汎用化することにより、それらの機能をもつプラットフォームを構築する。このプラットフォーム上で規格化された要素モデルを接続し、解析を実行できるようにする。

CommonMPとは、解析モデルそのものではなく、解析モデル同士や解析モデルとデータや断面諸元等を組み合わせ、容易に解析するためのプラットフォームのことである。要素モデルとなる各解析モデルは、初めからCommonMP仕様で開発されるもの他に、既存の解析モデル(Fortranプログラム等)をCommonMPの仕様に合うようにラッピングすることによって取り扱える要素モデルとしての活用が可能となっている。将来的には、様々な要素モデルが用意されることにより、複合的な物理現象をCommonMP上でシミュレートすることを目指しており、当面は、雨水流出や河道水理を中心とした水理・水文量の解析がCommonMP上で行えることを目標としている。CommonMPそれ自体の著作権者は、国土技術政策総合研究所であるが、CommonMPそのものはオープンソースとして開発され、無償で配布されている(<http://framework.nilim.go.jp/>)。CommonMP上で動作する要素モデル(解析プログラム)にどのような権利を設定するかは、要素モデルの著作権者の独占的権利であり、CommonMPの著作権者(国土技術政策総合研究所)がそれを規定することはできない。つまり、要素モデルの著作権者は、要素モデルをオープンソースとすることもソースを非公開とすることもできる。なお、国土技術政策総合研究所は、要素モデルの著作権者が、要素モデルとCommonMPを組み合わせたパッケージとして配布することを認める方針で、CommonMPの動作確認のために数種類の要素モデルの準備を始めており、これらの要素モデルはCommonMPと同様にオープンソースとして

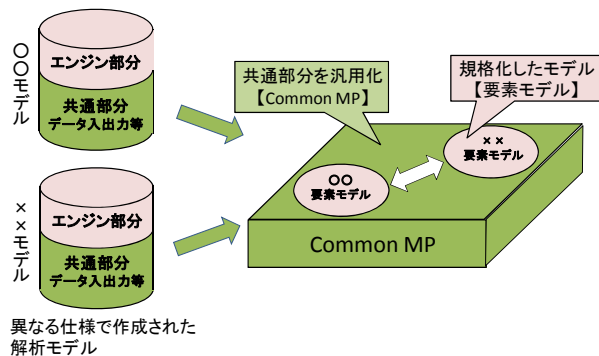


図-1 CommonMPのイメージ

公開する予定になっている。

(3) 河川流量計測技術の高度化の重要性

前項までで述べたように、様々な水・物質循環に係わる解析モデルの汎用化および高度化を進めるための仕組みづくりが着々と始まっている。これに併せて、インプットデータとなる降雨やアウトプットデータとなる河川流量の計測精度の向上も進めていくことが重要である。

降雨については、国土交通省が3大都市圏等において、XバンドMPレーダーの設置を進めており、機能を最大限に活用して、局地的な大雨や集中豪雨の予測技術の開発や洪水予測の高度化を行っている。それに対して、河川流量観測については、個々の新しい技術の進展はみられるものの、他に分野と比較すると、進んでいるとはいえず、洪水時の流れや河床変動を精度よく計測するために、個々の技術成果を結集した戦略的な検討が必要と考える。

3. 近年の国内における河川流量計測技術の動向

(1) 各種流速計測手法の進展

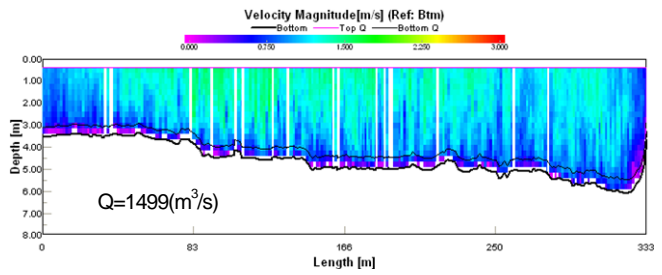
洪水時の河川流量観測には、従来から浮子による手法が用いられてきた¹⁾。わが国の洪水流特性や水面上に浮遊物が多い状況が考えれば、水面上あるいは水中に設置した機器から流況を計測することは多くの場合困難であり、特殊な観測機器や高度な技術を必要としない浮子測法は有効である。しかしながら、洪水の立ち上がり部やピークの観測に間に合わないこと、植生や橋脚等の河川構造物の影響を受けること、人員確保等の問題点が指摘されている。土木研究所では、これらの課題に対して、平成11年頃から計測機器のセンサ等を水に接することなく、河川の表面流速が計測できる非接触型の流速計測技術の検討を行っている²⁾。非接触型の流速計測法は、適用条件が広く、洪水時においても安全に計測ができる点において優れているものの、電波流速計では水表面の1点の流速データのみ、PIV等の画像解析法ではある範囲の表面流速分布の取得にとどまるため、洪水流の内部構造が計測できないという短所がある。近年では、藤田ら



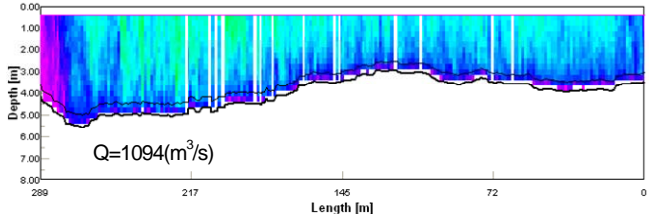
(a) 有人ボートによる計測状況



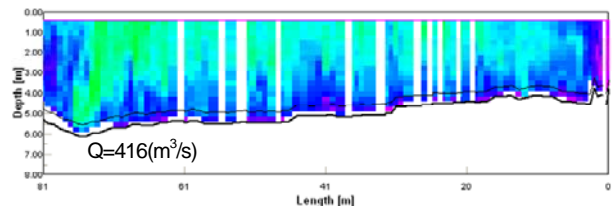
(b) 関宿地点付近の平面図



(c) 利根川 (分流前)



(d) 利根川 (分流後)



(e) 江戸川 (分流後)

図-2 利根川関宿地点における2004年台風23号時のADCP流量観測結果

³⁾ が従来から提案してきたLSPIV(Large-Scale Particle Image Velocimetry)解析法の適用が困難であった劣悪な条件において、新たなSTIV(Space-Time Particle Image Velocimetry)解析法を提案し、有効性を検証している。

一方、機器を流れに接する形式で計測を行う接触型流速計測法では、近年、各計測層における3成分の流速分布が計測可能なADCP(Acoustic Doppler Current Profiler: 超音波ドップラー多層流向流速計、以下ADCPと記す)が有効な観測手法のひとつと認識されるとともに、研究者、実務者を問わず多くの観測事例がみられるようになった。次節では、ADCPを用いた国内における流量観測および推定技術の進展について、同時期の海外の状況と併せて概観する。

(2) ADCPを用いた流量観測技術の進展

ADCPは1981年に米国で開発され、海洋分野を中心に普及した。河川分野への普及は、1995年に小型化が進み、価格が従来の1/2程度になったことが契機となり、米国を中心に世界中で河川流量観測に用いられるようになった。現在、ADCP等を用いた流量観測は、固定観測と移動(曳航)観測に大きく分けられるが、以下では横断面内の流速分布と水深を計測して流量を算出する移動観測について示す。

日本国内においては、ADCPを用いた洪水流観測は、木下⁴⁾がラジコンボートに搭載して先駆的に行っており、土木研究所においても1998年頃からラジコンボートを用

いた流量観測システムの開発に取り組んでおり、阿賀野川で $1500\text{m}^3/\text{s}$ 級の洪水流観測に成功している⁵⁾。その時期の河川流量観測では、現在のものと比較して空間解像度が低く(計測層厚が大きく)、河床付近と水面付近の計測ができない不感帯が大きかったことから、河川でも主に水深の大きい区間を対象に使用されており、浅水域における観測事例は多くない。また、観測は有人ボートかラジコンボートで行うのが一般的であったことから、規模の大きい出水を計測した事例はない。2001年にADCPの計測機能が向上し、浅水域でも十分に活用できるような高解像度計測が可能となり、翌年2002年には高速流計測を対象とした計測モードが開発されたことによって、日本国内の河川流況特性にも十分に対応できるような機器性能となった。2003年には、橋上から安全にかつ確実にデータを取得するためのADCPを搭載する船艇を開発するために、USGSのMichael⁶⁾は、モノハル(単胴船)、カタマラン(双胴船)、トリマラン(三胴船)の船体構造の異なる計8種類の橋上操作艇を試作し、種々の流速場($0.6\sim 3.6\text{m/s}$)における安定性と引張抵抗を調べ、トリマラン型の船艇が最も適していることを示した。この結果に基づいて開発された橋上操作艇によって、ラジコンボートのような機器や特殊な操作技能を持たなくても計測が可能となり、ADCPを用いた流量観測がより一般的なものとなった。さらに、同年には、日本国内初となるリアルタイムH-ADCP観測システムが鶴見川に設置され、この時期がADCPを用いた河川流量観測技術の大きな転換期

といえる。

著者の研究室においては、2004年の台風23号襲来時に利根川・江戸川分派地点の関宿において、有人ボートによるADCP流量観測を行っている。ハイドログラフ下降期の低水路満杯程度で、図-2に示すように分派地点の上下流において、30分程度の間3つの断面の流量観測を行った。利根川本川の低水路幅が約300m、江戸川分派後の川幅が約100mであった。その結果、分派前の流量 $1499\text{m}^3/\text{s}$ に対して、分派後の流量の合計が $1510\text{m}^3/\text{s}$ となり、複数回計測を行っても同様な結果が得られた。このことから、ADCPによる流量観測の有効性を認識するとともに、今後の流量観測技術の発展性を確信した。

一方、その時期に米国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⁷⁾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。条件としては、非常にシンプルで基準となっているが、流量値算出までのプロセスについて、ADCPの計測設定条件や計測方法の違いによる誤差評価を詳細に検証しており、実務者向けの計測技術、データ処理に関する多くの講習会を開催する等、一般化に向けた技術の共有が十分なされている。

日本国内においては、これまで流量観測データの精度評価や精度管理に関する議論は、ほとんどなされておらず、ADCPで計測したデータを統一的に評価する手法もなかったため、誰が計測しても同程度の精度を有していると誤った認識がなされていた。しかしながら、2008年に岡田ら⁸⁾が提案した従来のADCPの固定計測における計測精度を空間的に拡張した指標で表わされる偏差流速比および偏差流量比の考え方を採用することにより、計測設定条件やデータの取得状況から精度評価が可能となった。また、ADCPの精度検証事例としては、木下⁹⁾がいち早く平水時において実施しており、土木研究所の長大検定水路においてADCPのウォーターピング(流速分布を計測するために発射する超音波)の検定、さらに新潟東港において、流出入量の全くない条件でウォーターピングと対地速度を計測するボトムピングから得られる計測値を比較し、4往復8回の計測において、ミリメートル単位の流速差であったことを示している。実河川の流水に対するADCPの精度検証事例としては、島田¹⁰⁾らは石狩川の平水時において、ADCPを搭載したラジコンボートによる移動観測と設置型ADCPの比較を行って、ピング数(超音波の発射回数)とボートの走行速度の違いによる両者の相対誤差の関係を調べている。また、二瓶ら¹¹⁾は江戸川の小規模出水時($350\sim 570\text{m}^3/\text{s}$ 程度)において、ADCPの移動観測と定点固定観測で得られた流量を

比較し、相対誤差が1.6~7.8%であったことから、ADCPの移動観測精度が高いことを示している。しかしながら、我が国において観測対象となる中規模出水以上の洪水流は、毎秒3mを超える高流速であるとともに、水面が大きく波立つような流況であり、既往の平水時や小規模出水時における精度検証結果をそのまま適用できるとは考え難い。木下⁹⁾は上記の静止水における精度検定の結果が洪水のように激しい流動水に適用して真値が得られているのかという他者からの指摘に対して、検定は静止水、実際の使用は流動水であり、それを疑うことは当時のわが国の検定全てを疑うことになり、絶対流量値を正しく把握できるのは流量がゼロの場合のみであると考え、指摘には顧慮せず現地観測を行ったとしている。しかし、橋田ら¹²⁾は四万十川において平水時と洪水時の計測結果の比較から、ADCPを搭載したボートの揺動が水深や流速分布の計測精度を低下させる可能性があることを示している。その根拠として、ADCP観測では一般にボートの傾斜角補正を行っていないこと、ADCPに内蔵されている傾斜センサーが液面検知式であり、揺動周期が短く振幅が大きい場合に追従できていない可能性があることを挙げている。

この課題については、2009年に行われた岡田ら¹³⁾の詳細な検討によって大きく進展した。高速流で、かつ水面を大きく変動する流況場の計測を想定し、大型水槽($25\text{m}\times 25\text{m}\times 5\text{m}$)において、ADCP搭載ボートに高精度のMEMS傾斜センサーを設置して種々の周期で揺動させる実験を行い、ADCPの傾斜角および水深に関する計測特性を調べた。つぎに、利根川平成大橋下流の高流速部において、ボートに水槽実験と同様な計測システムとRTK-GPSを搭載した流況計測を行い、ボートの揺動が流速計測値に及ぼす影響を明らかにした。その結果、ADCP内蔵の傾斜センサーは、計測特性としてMEMSセンサーに比べて揺動周期が短い場合に、値を過小に出力する傾向があることが明らかとなったが、それが流量換算値に及ぼす影響は15度傾斜しても5%以下であったことから、計測ボートの揺動が与える影響は大きくないことを明らかにした。さらに、計測ボートの傾斜角が15度を超えると、欠測が多くなることから、精度向上のためには揺動を抑える船艇が重要となることを示した。その結果を踏まえて、萬矢ら¹⁴⁾は、4台の形状の異なる橋上操作艇にADCP、RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載して流況観測を行い、安全性および計測精度向上の観点から洪水流計測に適した船艇構造について提案している。以上のように、ADCPを用いて直接的に横断面内の流量を計測する移動観測手法はこの技術レベルまで進歩している。

(3) H-ADCP, 超音波伝搬時間差式流速計等を用いた流量算出技術の現状

2005年以降、日本国内でもH-ADCP¹⁵⁾や超音波伝播

時間差式流速計を用いた洪水観測事例がみられるようになった。H-ADCPはある設置高さの横断流速分布のみ、超音波伝播時間差式流速計は断面平均流速のみの計測となるものの、常時観測や無人観測が可能であるという利点を生かし、ADCPの移動観測結果をキャリブレーションデータとして、二瓶ら¹⁶⁾や中川ら¹⁷⁾によって数値解析と組み合わせた流量推定手法が提案されている。また、近年では、川西ら¹⁸⁾が音響トモグラフィーを用いた横断面平均流速の計測手法を提案しており、広幅感潮河川の太田川において平水時の連続観測を行っている。洪水流観測の事例はまだないが、今後の成果が期待される。

(4) 河川流量プラスアルファの計測技術

ADCP等の超音波を用いた計測機器では、水中に放射された超音波が1)音波の拡散による減衰、2)水自体による吸収、3)懸濁物質による減衰、4)河床による散乱といった物理的な過程を経て伝搬する特性を利用して、水中の濁度分布の推定手法が検討されている。

橘田ら¹⁹⁾は、超音波の水温・塩分による吸収、濁質の平均粒径による吸収とレイリー散乱特性、ADCPのトランスデューサーが持つ温度特性など多くの補正項を用いてADCPで得られたABT(Acoustic Backscattering Turbidity)と実測濁度との比較検証を行っている。その結果、濁度1~250の範囲で良好な結果を得ている。また、萬矢ら²⁰⁾は実験水路において、ADCPで計測された流速分布から摩擦速度と掃流砂量の算定する手法を検討している。また、萬矢ら²¹⁾は、富士川において大規模なRTK-GPS、ADCPを搭載した橋上操作艇による流況計測とポータブル電波式流速計による表面流速観測に加えて、H鋼にセットした音響測深器による河床高自動計測を試みている。この手法が確立すれば、洪水時の流況と局所的な河床変動が同時に計測でき、この結果は土砂水理学の分野に新しい知見を与える可能性がある。

4. おわりに

～今後の流量観測技術の高度化に向けて～

河川の洪水流量観測技術およびそれらの結果を用いた応用技術はこの10年間で大きな進展をみせている。

洪水時における流量や土砂動態観測が今後無人化・自動化の方向に進むとすれば、移動観測による詳細なADCP断面流量をキャリブレーションデータとして、非接触型流速計、H-ADCP等の流速分布が計測できる手法と測深器による河床形状の連続計測を組み合わせる観測を行い、未計測部は数値解析によって推定する手法に移行していくものと考えられる。今後これらの計測技術について研究者をはじめ、実務者のレベルまで広めていくためには、各計測手法の適用条件および誤差を含む計測精度の範囲を明確にすることが重要になる。これにはCommonMPプロジェクトと同様な国レベルの取り組みが必要である。例えば、各種の流速・流量観測手法を同

じサイトで同時に使用して検討された事例は少ないため、国土交通省等が既存の手法や最新の計測技術を有する研究者や実務者を集め、同じサイトで合同観測を実施し、各手法の適用範囲や相対的な計測精度について検討する機会を設定することを要望する。また、計測したデータの品質保証や管理についてADCPを例とすると、観測を行う際の計測モードや計測層厚等の設定条件は、現地の流況に応じて観測者の経験に基づいて設定されており、その時点で計測精度に差が生じることがあった。しかし、最新機種には、一般的な計測条件であれば、現場の経験がなくても計測条件を自動で設定する機能が搭載されており、経験の有無に関わらず、同様な精度で計測できるようになっている。したがって、わが国特有の河道特性や洪水流特性に適した計測手法、データ整理、精度評価等の一連の作業について、USGSが実務者向けに定期的開催するような観測やデータ処理に係わる講習会等が行われれば、データの品質(精度)管理も十分可能である。これらの基礎となる計測技術、データ処理技術および精度評価技術の基礎は、ほぼ確立してきたと言えることから、今後のさらなる研究成果に期待するとともに、これらの成果を十分に生かせる仕組みづくりの進展を併せて期待したい。

参考文献

- 1) 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.33-59, 1997.
- 2) 大手方如, 深見和彦：非接触型流速計を用いた流量計の開発と実用化, 土木技術60巻3号, pp.79-85, 2005.
- 3) 藤田一郎, 安藤敬済, 堤志帆, 岡部健士：STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水流計測, 土木学会水工学論文集, 53巻, pp. 1003-1008, 2009.
- 4) 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.
- 5) 松浦達郎, 金木誠, 吉谷純一：ラジコンボートを用いたADCPによる流量観測システムの開発, 土木技術資料, Vol.42, No.9, pp.22-27, 2000.
- 6) Michael S. Rehm, James A. Stewart and Scott E. Morlock : Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
- 7) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurement Using Acoustic Doppler Current Profilers, U. S. Geological Survey, Scientific Investigation Report 2005-5183
- 8) 岡田将治, 橘田隆史, 森本精郎, 増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 土木学会水工学論文集, 第52巻, 2008.
- 9) 木下良作：ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について, 第4回河川環境管理財団研究発表会講演録, 2006.
- 10) 島田友典, 渡邊康玄：ADCPを搭載したラジコンボートによる流水中の流速測定精度, 土木学会第62回年次学術講演

概要集, II-106, 2007.

- 11) 色川有, 二瓶泰雄, 北山秀飛: ADCPによる流量計測精度の基礎的検証, 土木学会第61回年次学術講演概要集, II-219, 2006.
- 12) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 出口恭: ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察, 土木学会 河川技術論文集第14巻, 2008.
- 13) 岡田将治, 萬矢敦啓, 橋田隆史: ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 第54巻, 2010.
- 14) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 菅野裕也, 深見和彦: 高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案, 土木学会 河川技術論文集第16巻, 2010.
- 15) 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, 土木学会河川技術論文集, 第11巻, pp.243-248, 2005.
- 16) 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.
- 17) 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地検証, 土木学会水工学論文集, 第50巻, pp.709-714, 2006.
- 18) 川西澄, 渡辺聡, 金子新, 阿部徹: 次世代超音波流速計による感潮河川流量の長期連続モニタリング, 土木学会河川技術論文集, 第15巻, pp.489-494, 2009.
- 19) 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, 土木学会 河川技術論文集第12巻, 2006.
- 20) 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, 土木学会水工学論文集, 第54巻, 2010.
- 21) 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦, 葭澤広好, 宮本孝行: 流量観測高度化に関する富士川南部観測における取組, 土木技術資料, Vol.52, No.3, pp.40-43, 2010.

(2010. 7. 20受付)