

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

二瓶泰雄¹・色川有²・井出恭平³・高村智之⁴

¹正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:nihei@rs.noda.tus.ac.jp

²非会員 新日本空調(株) (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町 3-7-1)

³非会員 東京都板橋区土木部計画課 (〒173-8501 東京都板橋区板橋 2-66-1)

⁴非会員 神奈川県県土整備部平塚土木事務所 (〒254-0073 平塚市西八幡 1-3-1)

超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) に基づく河川流量観測法を確立するために, ADCP を用いた現地調査を通して, その観測手順や流量計測精度について検討した. ここでは, 鉛直下向きにして水面付近に浮かべた ADCP を橋上より横断方向に移動させ, 横断面内の流速・水深分布を取得する, という ADCP 移動観測法を行う. 流量算定に必要となる流速や水深, ADCP 横断位置の計測精度を検討した結果, これらの相対誤差は 2~9% と全般的に小さな値となった. また, ADCP 移動観測法の流量計測精度は, 低流量条件では若干低下するものの, ある流量値 (ここでは 100m³/s) より大きいと高くなり, そのときの相対誤差は 5% 以下となった. 以上の結果に基づいて, ADCP 移動観測法に関する定性的な適用範囲を整理した.

Key Words: discharge, ADCP, river flow, acoustic measurement, hydrographic survey

1. はじめに

我が国における現行の河川流量観測では, 河川砂防技術基準¹⁾に基づいて, 低水時にはブライス流速計や電磁流速計を, 洪水時には浮子をそれぞれ用いた調査が一般に実施されている²⁾. これらの観測法に基づいて, 流量観測データが長年にわたり収集・蓄積され続けている³⁾. しかしながら, 近年の社会ニーズの変化に伴い, 流量観測法の省コスト化や高効率化, 高精度化が求められている⁴⁾. そのようなことから, 既存の流量観測技術の検証や見直しに加えて^{4), 5)}, 電波流速計, 超音波ドップラー流速分布計, 画像解析法等などの新しい計測技術の進展・応用が強く望まれている^{6)~8)}.

このうち超音波ドップラー流速分布計⁶⁾は, 表面流速のみを計測対象とする電波流速計や画像解析法と異なり, 三次元流速の鉛直分布と水深を同時かつ瞬時に計測し得る, という特徴を有する機器である. この超音波ドップラー流速分布計を鉛直下向きにして水面に浮かべ, それを横断方向に連続的に移動させることにより, 横断面全体にわたる流速分布や河床形状を計測することが可能となる. このように, 超音波ドップラー流速分布計は河川流量計測に対して高いポテンシャルを有しているものと考えられる.

元々海洋観測用に開発されてきた超音波ドップラー流

速分布計は, 外洋や沿岸域, 湖沼, 河口域の流速計測にこれまで多く用いられている⁹⁾. また, 近年の浅水域計測に特化した機器の開発¹⁰⁾により, 超音波ドップラー流速分布計の河川流量観測への適用例も増えており, 洪水流の内部構造の解明^{11)~13)}や更正係数の算定¹⁴⁾, 河川流量観測への適用^{15)~20)}が行われている. 特に, 米国では, U. S. Geological Survey (USGS) を中心として超音波ドップラー流速分布計による流量観測が数多く行われており, その観測技術の標準化や精度検証が進められている^{15)~18)}. しかしながら, これらの流量観測法には, 超音波ドップラー流速分布計の流速・水深計測精度や移動操作手順, 未計測エリアの取扱いなど必ずしも十分検討されていない課題が散在しており, 観測者により流量観測精度が大きく変わることが指摘されている¹⁰⁾.

本論文では, 超音波ドップラー流速分布計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, その第一歩として, 低水時・洪水時の流量観測を実施し, 超音波ドップラー流速分布計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. ここでは, 超音波ドップラー流速分布計として, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, Teledyne RDI 製) を用いているので, 以下では超音波ドップラー流速分布計を単に ADCP と呼ぶ. また, この流量観測では, ADCP を河川横断方向に移動させて,

横断面内の流速・水深データを取得しているため、この観測法をここでは ADCP 移動観測法と呼ぶ。

以下では、2. において、ADCP の流速計測原理や河川流速・流量計測上の問題点について列挙する。3. では、ADCP 移動観測法の概要や手順、流量算定法について記述する。4. や 5. では、ADCP 移動観測法の計測精度や手順を検討するための現地観測の概要やその結果について説明する。そこでは、まず、ADCP による流速・水深計測精度や ADCP の横断位置特定精度、という流量観測における個々の計測項目について検討する。次に、多くの観測結果に基づいて流量計測精度を調べるとともに、その流量計測精度に及ぼす ADCP 移動観測法内の諸設定（移動観測手順や計測モードの設定など）を検討する。最後に 6. では、得られた結果をまとめるとともに、ADCP 移動観測法の適用範囲を記述する。なお、本論文では、観測サイトや観測条件に制約があり、ADCP 移動観測法を標準化できる段階には至っていない。しかしながら、ここで示す検討結果が、今後、ADCP による流量観測法の確立に向けた貴重な成果になるものと考えられるので、以下に示す。

2. ADCP の流速計測原理と河川流計測上の問題点

(1) 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。本論文で用いる 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-1 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。なお、ADCP の計測原理の詳細については、金子・伊東⁹⁾ を参照されたい。

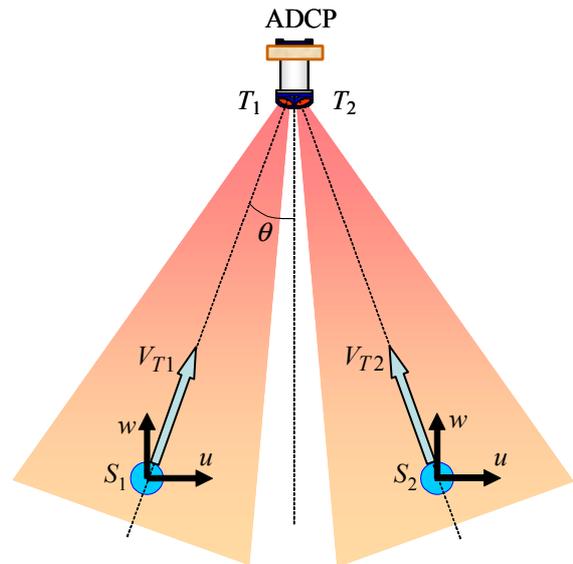


図-1 ADCP の流速計測原理に関する概念図

(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る。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、主要な問題点を列挙する。

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-2 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¹⁰⁾。

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-2）。底面付近では、ADCP から鉛直下向きに発信さ

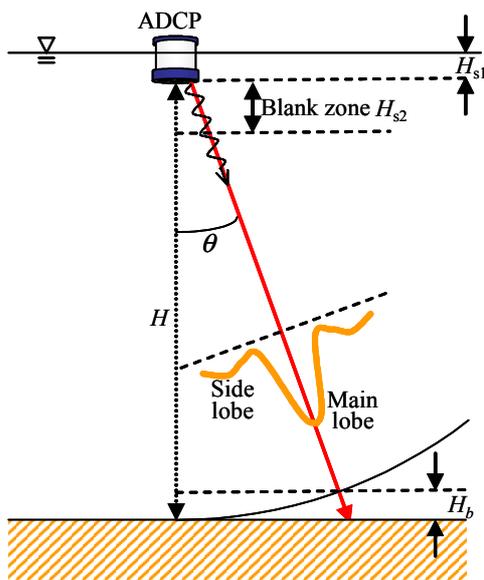


図-2 水表面・底面付近における ADCP の計測不能範囲

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⁹⁾。

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

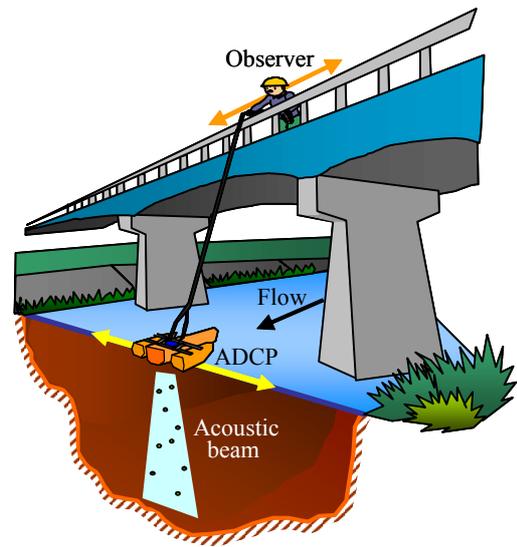
このとき、 $\theta = 20$ 度のときには、 $H_b = 0.06H$ となるが、安全側を見て $H_b = 0.10H$ として扱うことが多い¹⁴⁾。さらに、水深の浅い側岸付近では、上述したように水表面・底面付近におけるデータ欠測の影響を受けて、流速データを取得できないことが多い。

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¹⁰⁾。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^{2), 20)}。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²¹⁾。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非常に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、



(a) 模式図



(b) 実際の様子 (江戸川・野田橋)

図-3 ADCP 移動観測法の概要

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

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. ADCP 移動観測法について

(1) 概要

上述した ADCP の特徴や問題点に配慮して、ADCP を用いた河川流量観測を行う。観測方法としては、図-3 に示すように、ADCP を鉛直下向きにした形で専用浮体に取り付け、それを水面付近に浮かべて橋上より横断方向に移

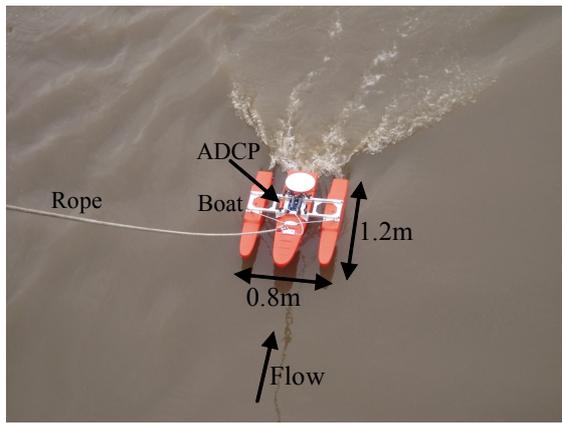


図-4 ADCP 専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI 製)

動かせる。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、別途 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。

この時の ADCP の移動手段としては、熟練した技術者を要するラジコンボート^{11), 19)}を用いるのではなく、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。このとき ADCP を取り付ける浮体として、図-4 に示す市販の ADCP 専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI 製) を用いる。これは3つの浮体を繋げた形となっており、中央の浮体に ADCP を取り付けている。この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。このような専用浮体を用いることにより、測定中の ADCP の姿勢をある程度安定化させることは可能となるが、大きな風波が生じる場合には、浮体が動揺して ADCP の計測誤差が生じることに注意する必要がある。

また、ADCP の横断位置を記録するには、前述した BT 機能を使う方法や高精度 GPS を用いる方法が一般に行われている^{10), 16), 17), 22)}。前者の BT 機能を用いる方法に関しては、掃流砂が顕著となる洪水時にそのまま用いることは難しい場合があり、何らかの補正が必要となる。また、高精度 GPS を用いることにより、ADCP の位置を精度良く追跡することが可能となるが、一般に高精度 GPS センサーは高価であり、ADCP を含めた観測システムのコストが増加する。本研究では、よりシンプルな方法として、ADCP 操作用として橋上に観測者がいることを利用して、橋上に一定間隔の目印を設け、その目印を水面上の ADCP が通過する時刻を観測者が目視により確認して、時々刻々の ADCP の横断位置を記録する。ただし、目視により ADCP の横断位置を判断しているため、その精度検証を行う必要がある。

以上のような ADCP 移動観測法では、簡便に横断面内

表-1 ADCP 移動観測法における基本的な設定条件

Cell size	0.20m
Number of cells	65
Blank distance	0.15m
Sampling interval	15s
Draft	0.10m
Moving speed	0.17m/s

の流速と水深、ADCP の横断位置を計測し得るため、少ない人数かつ短時間で流量観測を実施することが可能となる。このため、ADCP 移動観測法は最近の社会ニーズを反映した省コストで効率性の高い流量観測法として有望である。以下では、ADCP 移動観測法における観測準備から最終的に流量を算出するまでの手順を説明するために、観測前と観測中、観測後に分けて各々の手順を述べる。

(2) 事前準備 (観測前)

ADCP 移動観測法を行う前に、この観測実施に適しているかどうかを確認するために現地踏査を行う。その後、ADCP の設定、ADCP センサー一面の喫水、座標系、移動速度などについて事前調査・検討を行う。以下に、各内容を記述する。

a) 現地踏査

橋上から ADCP をロープで移動させる際、安全性に問題がないか、また、ADCP を移動させる上で障害物が存在しないかを確認するために、歩道の有無や橋梁形式等について調べる。ADCP の移動操作を考えると、実際の観測では橋下流側において行うことになるので、上記について下流側を重点的に確認する。特に問題が無い場合には、ADCP の横断位置記録用の目印を橋の欄干に付ける。本論文では、目印の間隔を 5m とする。

b) ADCP の設定

ADCP の設定条件としては、対象サイトの横断面図や流況を勘案して決定する。表-1 中の上位4つの項目は、本論文で主として採用している ADCP の設定条件であり、これは大河川における洪水流観測 (水深 10m 以上、最大流速 5m/s) を念頭にして決められる。ここでは、高速流用の設定モード (Mode 12) を採用し、鉛直層厚を 0.2m、層数を 65、不感帯幅を 0.15m とする。サンプリング間隔は 15s であり、この間に 10 回超音波を発信する。この条件では、超音波の送受信に関わる計測誤差を流速に換算すると 0.0254m/s となる。なお、前述したように、ADCP の横断位置の特定を目視により行うため、ここでは BT 機能を用いる必要はない。

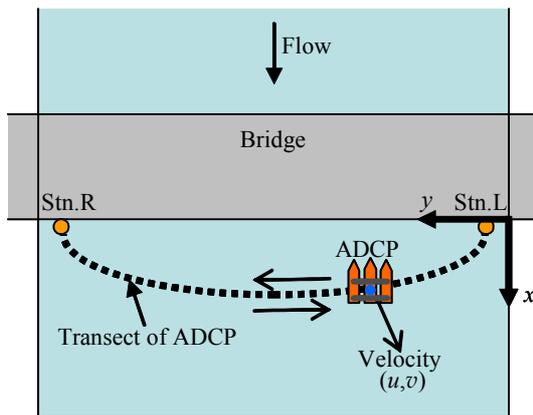


図-5 ADCP 移動観測法における座標系の定義

c) 喫水の計測

水表面付近における ADCP の未計測エリアを把握するには、ADCP センサー面の喫水 H_{s1} を計測する必要がある。喫水に関しては実験室などで求めればよく、今回の場合、喫水 H_{s1} は 0.10m である (表-1)。

d) 主流・横断方向の決定

流速データから流量を求めるためには、主流方向と横断方向を決定し、得られた流速から主流方向流速 u (横断面に直交する成分) を抽出する必要がある。ここでは、図-5 に示すように、橋に沿う方向を横断 (y) 方向、それに直交する方向を主流 (x) 方向と定義する。これらの方位を求めるために、橋上にて測量を行う。なお、ADCP を横断方向に移動させる際には、完全に横断方向に沿わせることは難しく、実際上の ADCP の軌跡は、同図に示すように、下流側に膨らんだ形状となる。この場合においても、各横断位置 y における主流方向流速 u を求めれば、流量算出には支障は生じない。

e) 移動速度の検討

ADCP を橋上より移動させる速度としては、川幅や観測作業時間、流況、ADCP の安定性、作業の安全性などを勘案して決める必要がある。洪水や潮汐など流況の非常変化が大きい場合には 1 回の作業時間を短くすることが望ましいが、ADCP の移動速度を大きくすると橋上での作業の安全性を十分確保できず、また、水面上での ADCP の姿勢を安定させることが難しい。そこで、姿勢を安定に保った形で ADCP を無理なく引っ張って歩ける速さとして、表-1 に示すように、移動速度の基本設定を 0.17m/s とする。これは、目印の設置間隔である 5m を 30 秒かけて歩く速さに相当している。

なお、これらの設定条件が必ずしも最適な条件であるとは限らないが、本論文ではこれらを基本条件として多くの流量観測を実施している。さらに、後述のように、これらの条件をいくつか変更した検討も合わせて行っている。

(3) 観測中の作業手順

現地における観測作業としては、次に示す 4 ステップから構成される。ここでは、図-5 中の左岸側 (Stn.L) から観測をスタートさせる場合を例として説明する。

- [1] スタート地点である左岸側の水際近傍地点 (Stn.L) や左岸側水際の横断位置を記録する。
- [2] Stn.L から右岸側へ向けて ADCP を移動させる。このとき、設定された移動速度を守るように注意し、ADCP が目印点を通る時刻をデータシートに記録する。
- [3] 右岸側の水際近傍地点 (Stn.R) まで ADCP を移動させて、到着時刻を記録する。この時の Stn.R 及び右岸側水際の横断位置を記録する。
- [4] 今度は逆に右岸側 (Stn.R) を出発して、ADCP を左岸側の Stn.L まで移動させる。このように ADCP を 1 往復 (左岸→右岸, 右岸→左岸) させる。

ここでは、観測精度を確保することや移動方向による観測結果の違い²³⁾に配慮するために、ADCP を 1 往復させて、1 回の観測で 2 個の流量データを算出している。USGS では、1 回の観測で ADCP を最低 2 往復させて計 4 個の流量データを取得しデータの品質を確保しているが¹⁶⁾、観測作業時間を短縮することと、後述するように 1 往復でも概ね 5% 以下の誤差に抑えられたので、本研究では ADCP の往復回数を基本的に 1 回とする。また、観測始点・終点である Stn.L や Stn.R は水際近傍であるが、完全には水際とは一致していない。それは、水際の水深が極浅く ADCP を河床に接触させる可能性があるためである。結果として、両岸側の水際から始点・終点 (Stn.L, Stn.R) までの側岸部は未計測エリアとなるため、別途流速を計測するか、何らかの形で流速データを補間する必要がある。本研究では、後述するように、数値シミュレーションを併用して、流速データの空間内外挿を行う。

(4) 流量算定手順 (観測後)

観測終了後、ADCP より時刻と三次元方向流速、対地速度、反射強度、センサー面から底面までの深さなどの実測データを収集する。また、河川管理事務所などが取得している水位や測量結果なども別途入手する。これらを使用する流量算定手順について、図-6 を用いて説明する。

(Step 1 : 観測データの前処理)

- [1] データシートに記録された各横断位置の通過時刻を参照して、時刻と横断位置の対応表を作成する。
- [2] センサー面から底面までの深さ H に事前に計測していた喫水 H_{s1} を足し合わせて、各横断位置の水深 $D (=H + H_{s1})$ を算出する。また、側岸付近の未計測区間の水深に関しては、既存の測量結果等とその時の水位から与える。
- [3] 主流・横断方向の方位データを用いて、東西・南北方

向流速データから主流方向流速 u を求める。得られた流速コンターの一例を同図中に示す。これは、江戸川・野田橋における 2006 年 6 月 21 日 18 時の結果である。この段階では、表層・底層・側岸部では流速の欠測部分が存在する。

(Step 2 : 流速データの内外挿)

[4] ADCP では、前述したように、水表面・底面付近において流速データの欠測が生じるため、何らかの形で流速データを補間する必要がある。水表面付近については、計測された表層流速値を与える。また、底面付近では、流速実測値に対してべき乗則を当てはめて、それより外挿データを作成する⁶⁾。この流速のべき乗則は、次に示すとおりである。

$$u = az'^b \quad (4)$$

ここで、 z' は底面からの高さ、 a 、 b は係数である。今回は $b=1/7$ とし、実測値に対して式 (4) を近似式として適用して、 a を与える。

[5] [4]の結果を用いて、各横断位置における主流方向水深平均流速 \bar{u}_{obs1} を算出する。

[6] 側岸付近の流速データを補間しつつ、移動観測時における ADCP の計測誤差を減らすために、著者らが提案する力学的内挿法²⁴⁾により、水深平均流速の観測値 \bar{u}_{obs1} を内外挿した値 \bar{u}_{obs2} を求める。これにより、横断面全体の水深平均流速分布を算出する。

(Step 3 : 流量算出)

[7] 横断方向に内外挿された水深平均流速値 \bar{u}_{obs2} と水深 D を用いて、次式より流量 Q を算出する。

$$Q = \int (\bar{u}_{obs2} \times D) dy \quad (5)$$

今回の観測では、ADCP を常に移動させているので、[3]における主流方向流速 u は、水流速度に加えて、ADCP の移動速度の影響が含まれる。ADCP を始点 (Stn.L) から終点 (Stn.R) まで移動させると、この期間全体では ADCP 自体は主流方向に移動していないことになるため、各観測期間における主流方向の ADCP 移動速度の平均値は 0 と見なせる。ただし、流量は流速と水深の積の総和であるので、流量算定値には ADCP 移動速度の影響が厳密には含まれることになる。しかしながら ADCP の主流方向移動速度が横断方向速度よりも小さいことを考慮すると、その影響も十分小さいと考えられる。また、[4]では、係数 $b=1/7$ と設定しているが、一般には $b=1/6$ も用いられる。そこで、 $b=1/7$ と $1/6$ としたときの水深平均流速 \bar{u}_{obs1} を比べたところ、両者には大きな差がないことを確認して

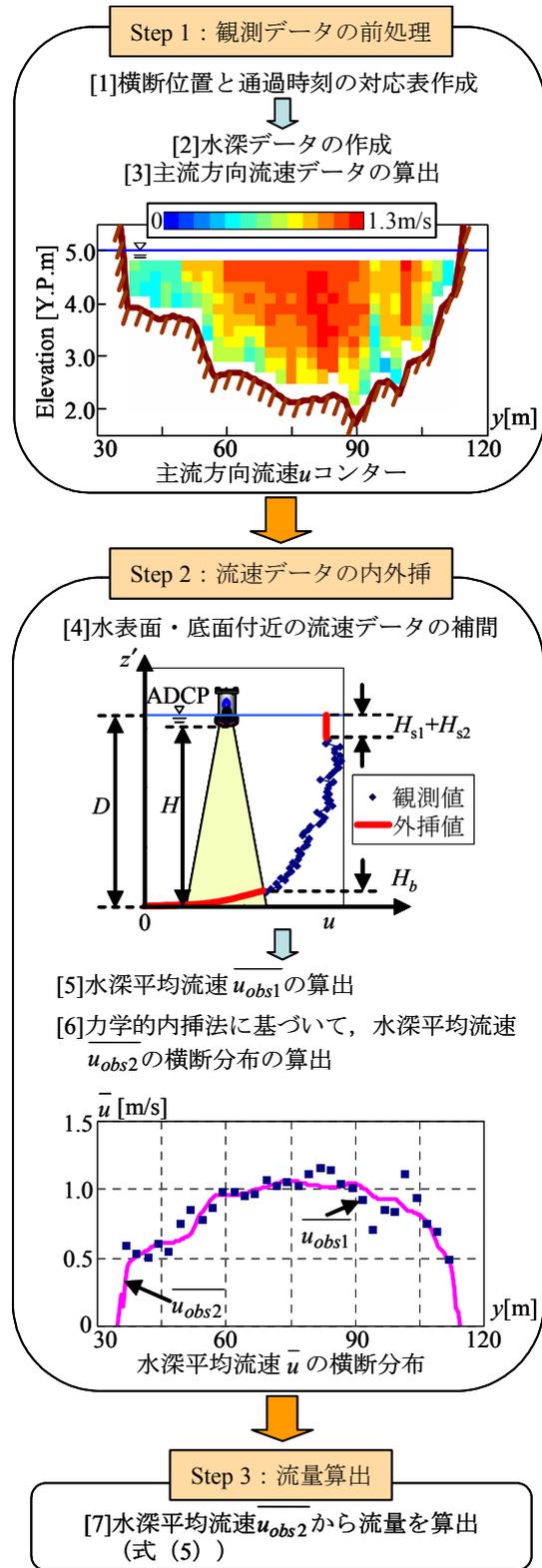


図-6 流量算定フロー (図中の主流方向流速コンターと水深平均流速の横断分布は、江戸川・野田橋における 2006 年 6 月 21 日 18 時の結果を例示している)

いる。さらに[6]では、側岸部における流速データの補間に関しては、単純な線形内挿などを行わずに、力学条件を満たした形で流速データを横断方向に内挿することが可能な力学的内挿法²⁴⁾を用いる。ここでは、未計測エリア

表-2 観測内容

(a) 流速・水深・横断位置に関する計測精度検証用調査

No.	検証項目	流況 (日時)	場所	検証用観測で用いる測器等
Case 1	流速	低水時 (2005/10/13, 26)	野田・横断面No.3	小型電磁流速計 (Compact-EM, アレック電子 (株) 製)
Case 2	水深	低水時 (2006/8/14, 11/8)	野田・横断面No.1~3	スタッフ
Case 3	横断位置	低水時 (2006/12/20), 洪水時 (2006/12/28)	江戸川・野田橋	GPS (Geko201, Garmin社製), D-GPS (D MAGIC, プラスグイン社製), 電子セオドライト (DT510S, ソキア社製)

(b) 流量計測精度に関する検証用調査

No.	目的	流況	場所	日時 (n:データ数)	備考
Case 4	流量算定精度を検証する。	低水時	江戸川・野田橋	2005/9/28~11/25 (n=12), 2006/6/15~2007/1/30 (n=24)	プライス流速計の観測結果を準用する。
Case 5	移動方向及び往復回数による流量の差を検証する。	低水時	江戸川・野田橋	Case 4と同じ (n=36), 2007/11/5~12/6 (n=9)*	往路 (左岸 → 右岸) と復路 (右岸 → 左岸) における流量を比較する。* 以外の観測では1往復のみ, *の時には2往復の観測を実施している。
			多摩川・丸子橋	2006/12/1 (n=15)	
		洪水時	江戸川・野田橋	2006/6/16~19 (n=26), 7/19~21 (n=4)	
			多摩川・丸子橋	2006/7/19 (n=4), 10/6 (n=11)	
Case 6	BT機能の有無が流量推定精度に及ぼす影響を調べる。	洪水時	江戸川・玉葉橋	2003/8/9~12, 2004/10/6~8, 10/22, 2005/7/27~28	ADCPを定点に固定して観測を行う。
			江戸川・新関宿橋	2004/10/6~8, 10/21~22	
			江戸川・野田橋	2006/6/16~19, 7/19~21, 10/7, 12/28	
Case 7	様々なADCP設定条件下における流量計測精度を調べる。	低水時	江戸川・野田橋	2006/8/30, 10/5	移動速度や設定条件を変化させる。

が大きくなることや ADCP の計測誤差を考慮するため力学的内挿法を採用しているが、未計測エリアが小さい場合には、単純な空間内外挿操作を施しても大きな問題は生じない。なお、ここで用いる力学的内挿法の基礎式や計算手順については、二瓶・木水²⁴⁾を参照されたい。

4. 現地観測方法

(1) 概要

ADCP 移動観測法の計測精度やその手順について検討するために、表-2 に示す合計7ケースの検証項目・目的に対する現地観測を行った。ここでは、Case 1~3において、ADCP による流速・水深計測精度や ADCP 横断位置の計測精度、という流量算定に用いる個別項目の検討を行う。次に、ADCP 移動観測法における流量計測精度を検証するために、Case 4 では、プライス流速計と ADCP 移動観測法により得られる流量を比較する。さらに、Case 5~

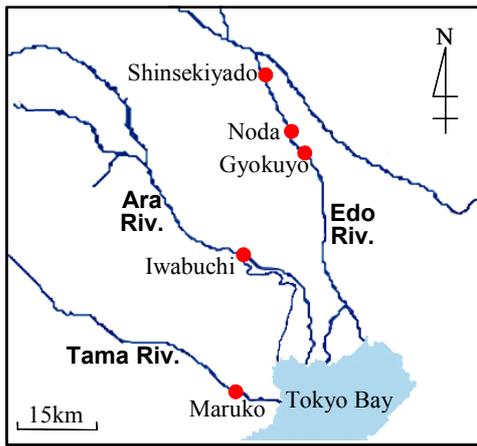
7 では、ADCP 移動観測法における様々な手順の違いが流量算定精度に及ぼす影響を調べる。

観測サイトとしては、大部分のケースにおいて江戸川・野田橋付近 (河口より+39.3km) が選定されており、また、江戸川・新関宿橋 (+57.5km)、玉葉橋 (+35.5km)、多摩川・丸子橋 (+13km)、荒川・岩淵 (+21.3km) においても調査が行われている (各サイトの位置を図-7 (a) に示す)。これらの観測における ADCP の設定条件としては、Case 7 を除く 6 ケースでは基本的に表-1 と同じであるが、ADCP を静止させて観測を行う Case 1, 2, 6 では ADCP 移動速度が 0 となる。また、Case 7 に関しては、表-1 の条件からいくつか変更している。

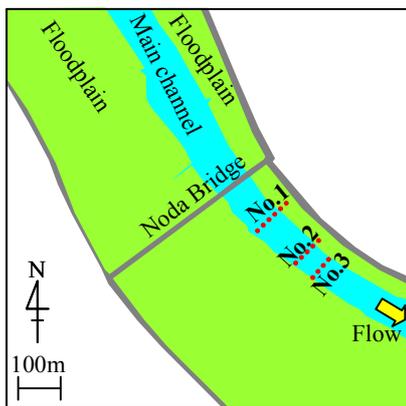
(2) 各ケースにおける観測内容

a) Case 1 (流速計測精度)

一般的な室内実験用開水路におけ流速検定を ADCP に対して行うことは、ADCP のサイズや壁面における超音波散乱に起因して難しい。そこで ADCP の流速計測精度を



(a) 広域図



(b) 江戸川・野田橋付近

図-7 観測サイト

検証するために、Case 1 として、現地河川において ADCP と電磁流速計により流速計測を同時に行い、両者の計測結果を比較する。観測サイトは、図-7 (b) に示すように、江戸川・野田橋の下流側 200m に位置する横断面 No.3 とする。この観測は、低水時 (2005 年 10 月 13, 26 日) において行われた。この観測では、観測断面においてロープを張り、ゴムボートでロープをつたいながら複数地点で静止し、ボート上にて ADCP と電磁流速計を固定し、水平方向流速を同時に計測した。計測高さは表層 50cm である。ここで用いる電磁流速計は Compact-EM (アレック電子(株)製) であり、そこでのサンプリング間隔は 1 秒と設定している。各地点における計測時間は 1 分間とする。

b) Case 2 (水深計測精度)

Case 2 では ADCP の水深計測精度を検証するために、同じ江戸川・野田橋下流の横断面 No.1, 2, 3 において、ADCP 及びスタッフによる測深を行った。観測日は、2006 年 8 月 14 日, 11 月 8 日であり、いずれも低水時である。この観測においても、複数の横断地点における測深を行う。その際には、ADCP における 4 つの超音波ビームによる水深計測を行い、4 つのビームの平均値を計測値として採用する。また、スタッフによる測深に関しては、河川水中に

スタッフを入れると、流れの抵抗を受けてスタッフが斜めになることが懸念されたので、スタッフの先端付近に水位計 (Diver, Eijikelkamp 社製) を取り付け、角度補正を行う。

c) Case 3 (横断位置計測精度)

目視による ADCP 横断位置の計測精度を検証するために、Case 3 では、目視による方法と GPS(Geko201, GARMIN 社製), D-GPS(D MAGIC, プラスゲイン社製), そしてレファレンス用として電子セオドライト (DT510S, ソキア社製), という計 4 種類の方法・測器により ADCP の横断位置計測用調査を実施している。この調査を江戸川・野田橋において、低水時 (2006 年 12 月 20 日) と洪水時 (同 28 日) に行った。

d) Case 4 (流量計測精度)

ADCP 移動観測法の流量計測精度を検証するために、Case 4 として、江戸川・野田橋における流量観測を実施した。観測期間・回数としては、2005 年 9 月 28 日~11 月 25 日に計 12 回, 2006 年 6 月 15 日~2007 年 1 月 30 日に計 24 回, 合計 36 回であり、これらはいずれも低水時であり計測範囲は低水路のみである。ここでは往路と復路の流量の平均値を流量データとして採用する。

ADCP 移動観測法における流量計測精度の検証用データとして、上記の期間内に行われた回転式のプライス流速計による低水流量観測結果 (データ数 $n=54$, 国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供) を用いる。ただし、このプライス流速計による流量観測が ADCP 移動観測法と同時に実施されていないので、プライス流速計により得られた流量 Q と別途連続計測されている水位 H から $H-Q$ 曲線を作成し、ADCP 移動観測法による流量計測が行われた時刻の流量値を求める。

e) Case 5, 6, 7 (観測方法が流量算定精度に及ぼす影響)

まず、Case 5 では、ADCP の移動方向による流量算定値の違い²³⁾を調べるために、低水時及び洪水時における流量観測を行い、往路と復路の流量を比較する。観測場所は江戸川・野田橋と多摩川・丸子橋 (両地点ともに低水時と洪水時に実施), 荒川・岩淵 (洪水時のみ実施) としている。また、ADCP の往復回数の違いによる流量算定結果を比べるために、これまで 1 回のみとした往復回数を、USGS と同様に 2 回実施¹⁶⁾, 1 往復目と 2 往復目における流量を比較する。ここでは、低水時の江戸川・野田橋を観測対象とする。

次に、Case 6 では、ボトムトラッキング (BT) 機能に着目した検討を行う。ここでは、BT 機能を用いたことを想定し、ADCP を水面に静止させて、流速と対地速度を計測する。この時の対地速度は、ADCP が静止しているため、河床付近における流砂の移動速度に相当している²⁵⁾。横断面内に複数の定点を設け、その定点に ADCP を固定して流速観測を行い、対地速度の実態を調べるとともに、対

表-3 Case 7における ADCP の設定条件

No.	Cell size	Sampling interval	Moving speed
Case 7-1	0.20, 0.10, 0.05m	10s	0.17m/s
Case 7-2	0.20m	10, 5.0, 2.0s	0.17m/s
Case 7-3	0.20m	10s	0.17, 0.33, 0.50m/s

地速度を用いた時の流量算定誤差について検討する。観測サイトは、江戸川の新関宿橋・野田橋・玉葉橋である。観測は、掃流砂が卓越する洪水時に行われている。

最後に Case 7 では、表-1 に示す ADCP の設定条件のうち、鉛直層厚やサンプリング間隔、ADCP の移動速度を変化させた場合における流量計測精度を検討する。ここで用いた設定条件の詳細は表-3 に示すとおりである。これらの条件に基づいて、低水時（2006年8月30日、10月5日）に江戸川・野田橋において流量観測を実施した。サンプリング間隔に関しては、表-1 では15sとしているが、ここでは、低水時のみを対象としたため10sをベースとしており、Case 7-2において5s, 2sと変化させている。この際、サンプリング間隔を10sと15sとしたときに流量計測結果に差がないことは予備調査において確認している。また、Case 7-3 ではサンプリング間隔を同一にして ADCP 移動速度を変化させているため、横断方向の計測間隔も変化している。そのため、この条件下における流量計測精度には、ADCP 移動速度の影響に加えて、横断方向の計測間隔の影響も含まれていることに注意を要する。

5. 観測結果と考察

(1) 流速 (Case 1)

ADCP の流速計測精度を調べるために、Case 1 として行われた江戸川・野田橋下流の横断面 No.3 における ADCP と電磁流速計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。

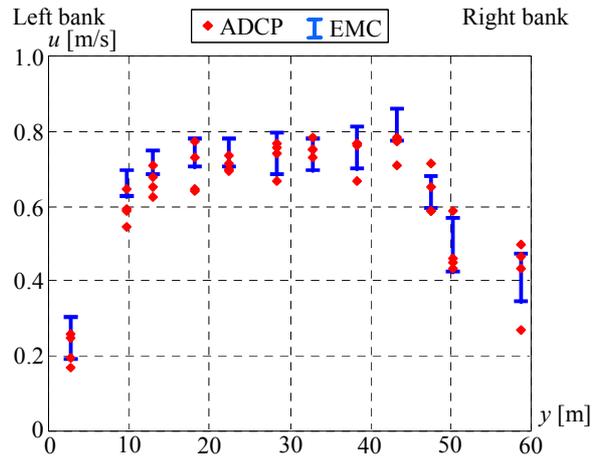


図-8 ADCP と電磁流速計 (EMC) により得られた主流方向流速 u の横断分布 (Case 1, y : 横断方向距離 (右岸向きを正), 2005年10月13日)

表-4 各項目の計測誤差の平均値と 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

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-4 に示す。ここで、平均 $\overline{\Delta u}$ と RMS 値 Δu_{rms} は、以下のように求められる。

$$\overline{\Delta u} = \frac{1}{n} \sum (u_{ADCP} - u_{EMC}) \quad (6a)$$

$$\Delta u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (u_{ADCP} - u_{EMC})^2} \quad (6b)$$

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。なお、誤差の RMS 値には、誤差の平均値の影響も含まれるため、データのばらつきを論じるには RMS 値ではなく標準偏差を採用することも考えられる。しかしながら、流量計測誤差に関する既存の研究⁵⁾では後述するように RMS 値が採用されていたので、ここでも RMS 値を用いる。この表より、流速誤差の平均値は、

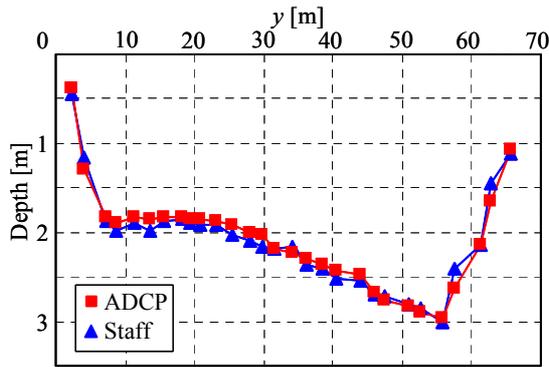


図-9 水深の横断分布 (Case 2, 2006/11/8, 江戸川・野田・横断面 No.3)

-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, 前述した ADCP 計測値の測定誤差 (=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. ただし, ここでの流況は低水時であり, 本来, 出水時における ADCP の流速計測精度を検証することは必須であり, 今後行う予定である.

(2) 水深 (Case 2)

ADCP による水深計測精度を検証するために, Case 2 の観測結果の一例として, 江戸川・野田の横断面 No.3 における水深横断分布を図-9 に示す. ここでは, 2006 年 11 月 8 日におけるスタッフ及び ADCP による計測結果が表示されている. これより, いくつかの地点では, 両者の計測結果に差は生じているものの, 全般的には, ADCP の測深結果はスタッフの計測値を概ねトレースしている. ADCP の計測誤差は大きくて 0.10~0.20m であり, その誤差は, 主として水深の浅い側岸付近に生じている. ADCP では, 図-1 に示すように超音波ビームの発信方向が鉛直方向から傾いているため, ADCP 直下の水深を直接計測できない. そのため, ADCP では, 水深の横断変化が大きい側岸部において, 測深誤差が顕著になったものと考えられる.

ADCP とスタッフによる水深計測値の差の平均と RMS 値を表-4 に示す. 算出手順は, 式 (6) で表される流速と同じである. これより, 誤差の平均値は-0.03m (-1.1%), RMS 値は 0.11m (9.2%) となっている. 後者の RMS 値は一般的な測深計の計測精度 (=0.1m) と比べて同程度であり十分小さい. これらのことから, 今回の観測条件の範囲

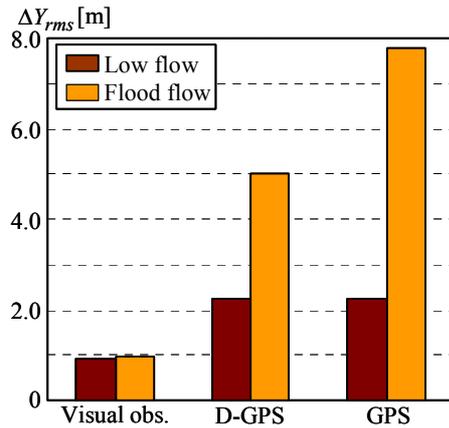


図-10 横断位置計測誤差の RMS 値 ΔY_{rms} の比較 (Case 3)

では, ADCP の測深精度が概ね良好であることが示された. なお, 相対誤差の RMS 値が 9.2% とやや大きいのは, 図-9 に示すように, 水深が小さい時にデータのばらつきが大きくなるためである.

(3) 横断位置 (Case 3)

目視による ADCP 横断位置の計測精度を検証するために, 目視と D-GPS, GPS により得られた横断位置 Y と参照用として用いられたセオドライトによる横断位置との差を求め, 式 (6) と同様に, その差の RMS 値 ΔY_{rms} を求めた結果を図-10 に表示している. ここでは, 低水時 (水位: 4.02 [Y.P.m]) と洪水時 (水位: 7.65 [Y.P.m]) における結果がそれぞれ示されている. これより, 目視における横断位置計測誤差 ΔY_{rms} は, 低水時・洪水時においてそれぞれ 0.93m, 0.95m となっている. 今回の観測では, 3.2 で記述しているように, 橋上の目印を 5m 間隔で設置しているため, 目視による位置の確認を 5m 毎にしか行っていないが, 目視による位置計測の誤差は目印間隔よりも十分小さい. 一方, 市販の D-GPS や GPS を用いた場合の ΔY_{rms} は, 低水時には共に 2.2m, 洪水時には 5.0m (D-GPS), 7.7m (GPS) となっており, いずれも目視の場合もより大きくなっている. 今回用いた D-GPS と GPS に関しては, 静止状態における計測精度がそれぞれ 3m, 5~15m であり, 移動状態でこれらのセンサーを使用していることを加味すると, D-GPS や GPS の ΔY_{rms} は概ね妥当である.

目視による全計測値に対する誤差の平均と RMS 値を表-4 に示す. 図-10 の結果と同様に, 平均値 (=0.36%) や RMS 値 (=2.1%) の値は十分小さい. また, これらの目視による横断位置データに基づいて算出された流量を, セオドライトの結果を用いたときの流量と比べたところ, その相対誤差が 1% 程度に抑えられていることが確認されている. これより, 目視という簡単な方法により ADCP の横断位置計測を行っても, ADCP 横断位置や流量の計測誤差を十分低く抑制し得ることが示された. なお, 上記の

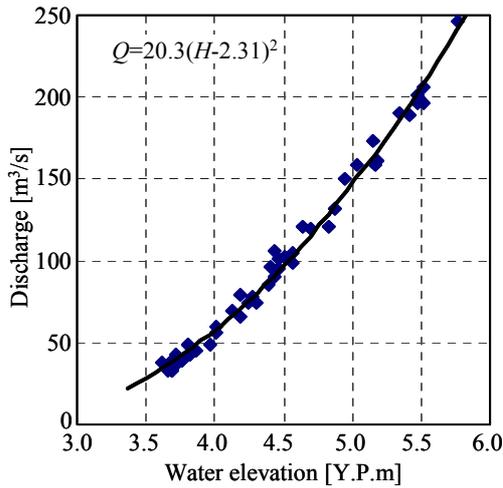


図-11 江戸川・野田橋における水位と流量の相関図（こゝでの流量はプライス流速計の観測値である）

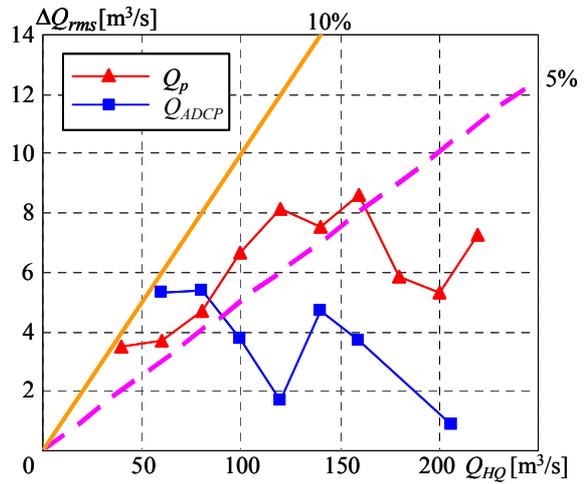


図-13 流量誤差のRMS値 ΔQ_{rms} と流量の関係（Case 4, 図中の点線と実線は観測誤差5, 10%を示す）

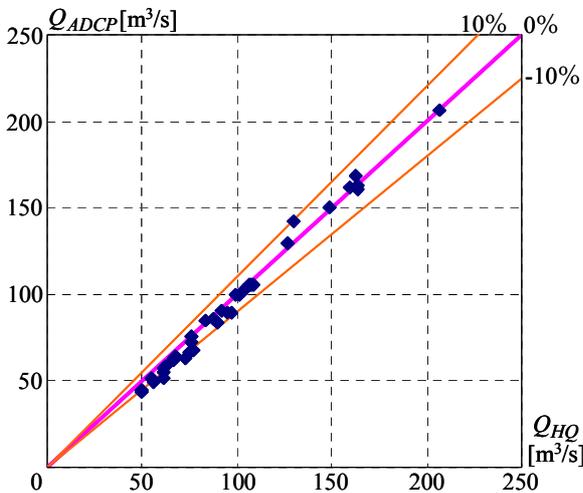


図-12 ADCP移動観測法による流量値 Q_{ADCP} と $H-Q$ 式による流量値 Q_{HQ} の比較（Case 4, 図中の太線と細線はADCP移動観測法による観測値の誤差0, $\pm 10\%$ を示す）

結果は、目視を用いた場合における ADCP 横断位置の計測精度が十分高い、ということを示しているが、目視の計測精度が必ずしも GPS や D-GPS よりも良いとは限らないことに注意されたい。本論文で用いた GPS や D-GPS センサーよりも高精度のものは多く市販されており、それらの高精度センサーを用いれば、より精度の高い横断位置計測が実現できるものと考えられる²²⁾。

(4) 流量計測精度 (Case 4)

ADCP 移動観測法における流量計測精度を調べる際には、プ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、プライス流速計による観測が ADCP 移動観測法と同時にされていないため、ここでは、プライス流速計による流量値 Q_p と水位 H から $H-Q$ 式を

作成し、ADCP 移動観測法が行われたときの検証用流量を求める。図-11は、水位と流量 Q_p の相関図を示し、観測が行われた低水時のみのデータが表示されている。これらの観測データに対する相関式として、以下の式が得られた。

$$Q = 20.3(H - 2.31)^2 \tag{7}$$

ここでの単位としては、流量 Q は m^3/s 、水位 H はY.P.mである。なお、上記の $H-Q$ 式は低水時のみ有効である。ADCP 移動観測法により得られた流量 Q_{ADCP} と、ADCP 移動観測法が行われた時刻の水位観測値及び $H-Q$ 式(式(7))から算出された流量 Q_{HQ} の相関図を図-12に示す。この ADCP 移動観測法の結果に関しては、往路と復路の流量を平均した値を採用している。また、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、今村ら⁵⁾と同様に、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(6)と同様に求めた結果について図-13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 $20m^3/s$ 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%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 $6m^3/s$ 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伺える。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-4)、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、図-9に示すよう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なるものと推察される。

(5) ADCP の移動方向及び往復回数の影響 (Case 5)

ADCP の移動方向が流量計測精度に及ぼす影響を調べるために、ADCP 移動観測法で行われている往路 (左岸→右岸) と復路 (右岸→左岸) における流量を比較する。図-14は、往路と復路の流量差 ΔQ (=往路流量-復路流量) をこの平均値 Q_{ADCP} で無次元化した結果を表示している。ここでは、江戸川、多摩川、荒川に関する結果が含まれており、流量範囲は $25\sim 1850\text{m}^3/\text{s}$ であり、低水時と洪水時の結果が示されている。これを見ると、流量差は大きくて $\pm 7\%$ 程度であり、観測値の大部分 (94%) では流量差が5%以内となっている。このように、往路と復路の流量にはほとんど差はなく、低水時のみならず洪水時においても、ADCP 移動観測法による流量計測の再現性が高いことが伺える。また、この結果より、観測中における ADCP の移動方向の違いにより、流量計測精度はほとんど変化しないことが分かる。

次に、ADCP の往復回数を2回とした時の計測データを

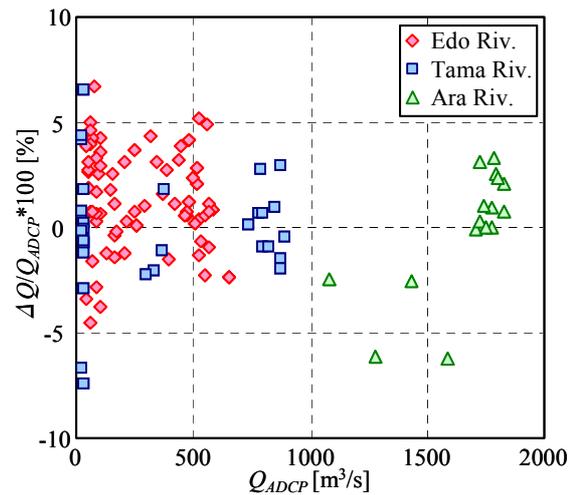


図-14 往路と復路の流量差 ΔQ (Case 5)

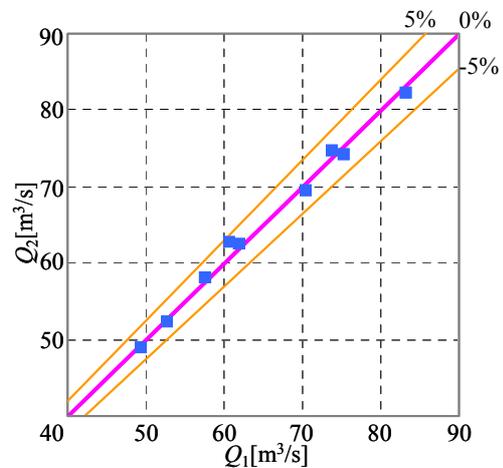


図-15 1 往復目の流量 Q_1 と 2 往復目の流量 Q_2 の比較 (Case 5, 江戸川・野田橋, 実線は両流量の相対差 $0, \pm 5\%$ を示す)

用いて得られた 1 往復目の流量 Q_1 と 2 往復目の流量 Q_2 の相関図を図-15 に示す。ここでは両者の相対的な差が分かるように、相対差 $0, \pm 5\%$ の線も表示されている。これより、1 往復目と 2 往復目の流量に大きな差は見られず、この相対差の絶対値平均は 1.9% と小さい。このように、USGS で推奨するように往復回数を2回としても、往復回数が1回のとくと流量計測誤差は大きく変化しないことが分かる。感潮域や洪水流の非正常性が大きい河川を対象とする場合には、1回の流量計測を短時間で終わらせる必要があり、この場合には、ADCP の往復回数は1回で十分であると言える。

(6) ボトムトラッキング機能の影響 (Case 6)

BT 機能の使用が流量計測精度に及ぼす影響を調べるために、まず、Case 6における全データに対する水深平均流速 \bar{u} と対地速度 u_{bt} の相関図を図-16 に示す。ここでは、江戸川で観測された全データが示されている。これより、

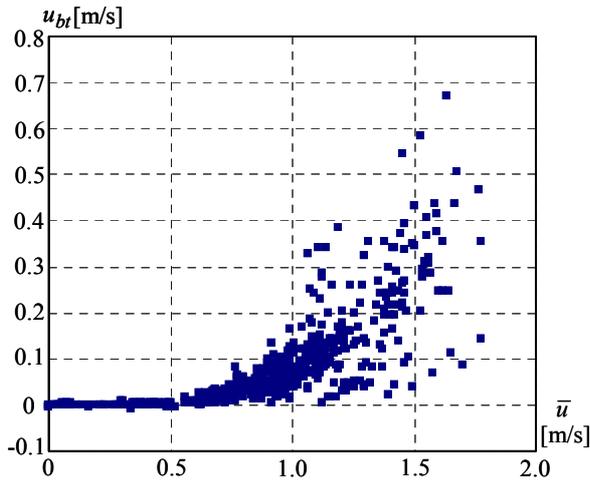


図-16 水深平均流速 \bar{u} と対地速度 u_{bt} の相関図 (Case 6)

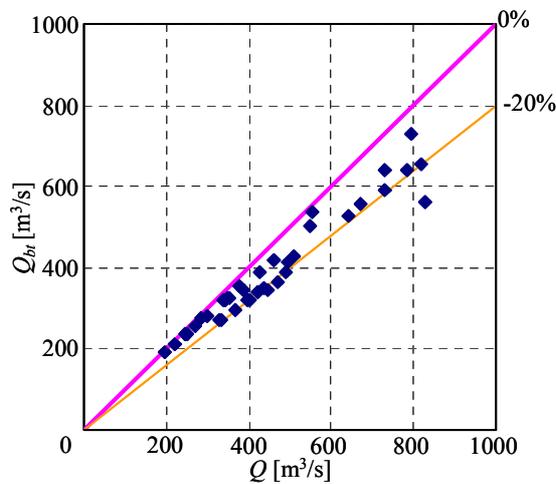
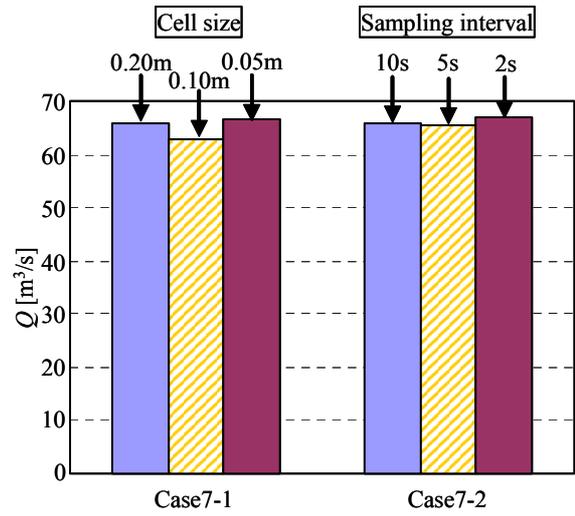


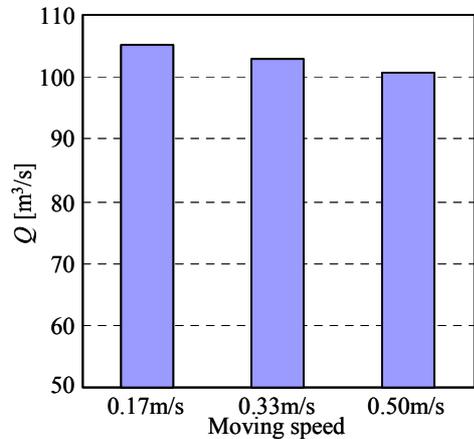
図-17 BT 機能を用いる時の流量 Q_{bt} と用いない時の流量 Q の比較 (Case 6, 図中の太線と細線は誤差0, -20%を示す)

水深平均流速が 0.5m/s 以下では対地速度はほぼ 0 であるが、水深平均流速が 0.5m/s を超えると対地速度は水深平均流速と共に増加し、最大で 0.6m/s を超える。江戸川における底質の粒径は $0.5\sim 1.0\text{mm}$ であり、無次元限界掃流力を 0.05 とすると、限界せん断力に相当する水深平均流速は $0.4\sim 0.5\text{m/s}$ と試算される。この値は、対地速度が増加し始める水深平均流速の閾値と概ね一致する。これより、限界せん断力を大幅に上回るせん断力が河床に作用して掃流砂が顕著になるため、対地速度が 0.5m/s を超える大きな値になるものと考えられる。

次に、BT 機能を用いて補正された流速値 ($=\bar{u} - u_{bt}$) に基づいて得られる流量 Q_{bt} を算出し、その結果とボトムトラッキング機能を用いないで算出した流量 Q を比較したものを図-17 に示す。後者の算出法が、本論文で採用している方法に相当している。これを見ると、BT 機能を用いた時の流量 Q_{bt} は、用いない場合の流量 Q よりも概ね小さくなっており、 $10\sim 20\%$ 程度過小評価されている。



(a) 鉛直層厚 (Case 7-1) とサンプリング間隔 (Case 7-2, 両ケースとも 2006 年 8 月 30 日に実施)



(b) ADCP 移動速度 (Case 7-3, 2006 年 10 月 5 日に実施)

図-18 様々な ADCP 設定条件下における流量計測精度

これは、前述したように、対地速度を用いて流速を補正することにより、流速が過小評価されるためである。

以上の結果より、BT 機能を採用するとき前提となる「河床面が静止している」という仮定は、限界せん断力を上回るせん断力が作用する洪水時の低水路内では成立していないと見なされる。このことから、限界せん断力を上回る底面せん断力が作用して掃流砂が顕著な場合には、ADCP における BT 機能を使わないことが望ましい。なお、洪水時においても、底質粒径が大きく、掃流砂が活発に形成されない条件では、BT 機能は有効である。また、対地速度の計測状況は超音波の周波数により変化しており、本論文で用いた周波数 1200kHz の ADCP よりも低周波の ADCP を用いることにより、BT 機能が有効に使える場合が存在することに注意されたい。

(7) 様々な ADCP 設定条件の検討 (Case 7)

ADCP 設定条件のうち、鉛直層厚 (Case 7-1) とサンプ

リング間隔 (Case 7-2), ADCP の移動速度 (Case 7-3) を変化させた時の流量観測結果を図-18 に示す。ここで、Case 7-1 と Case 7-2 は2006年8月30日、Case 7-3 は同年10月5日に実施された結果である。いずれも、各ケースの観測を行っている最中には、水位変化が生じていなかったことを確認している。Case 7-1 に関しては、層厚 0.2m の結果を基準とすると、他の層厚の時の流量差は大きくて $2.9\text{m}^3/\text{s}$ (相対誤差では 4.4%) とそれほど大きな差は生じていない。また、サンプリング間隔を 10s (基準), 5s, 2s と変えた Case 7-2 の場合には、流量差では最大 $1.1\text{m}^3/\text{s}$ (相対誤差では 1.7%) となっており、こちらの場合もわずかな差となっている。以上の結果から、本論文において採用している表-1 の設定よりも層厚やサンプリング間隔を小さくしても、流量計測精度はほとんど変わらないものと考えられる。

次に、ADCP の移動速度を変化させた場合には、移動速度を増加させると、基準としている移動速度 0.17m/s の流量値と比べて差が大きくなる傾向が見られる。ここでは、最も移動速度が大きい 0.50m/s のケースでも、基準値との差は $4.5\text{m}^3/\text{s}$ (相対誤差では 4.2%) となっており、それほど大きな誤差は生じていない。実際の観測では、ADCP の移動速度が 0.17m/s や 0.33m/s の場合には、観測者が十分な余裕を持って作業を行うことが可能である。一方、移動速度が 0.50m/s の場合では、流量計測精度はそれほど低下していないものの、観測作業上 ADCP 移動速度を一定に保つのに困難な時が存在した。このことより、ADCP 移動観測法では、ADCP の横断方向移動速度としては最大でも 0.33m/s と設定することが望ましいものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) を用いた河川流量計測法を確立することを目的とし、その第一歩として、観測法自体やその計測精度について検討した。そこで得られた主な成果をまとめると共に、ADCP を用いた流量観測法の適用範囲を以下に示す。

(1) まとめ

1) ADCP を用いた河川流量観測法として、ADCP を鉛直下向きにして水面付近に浮かべ、それを橋上より横断方向に移動させる、という ADCP 移動観測法を具体的に提示した。そこでは、ADCP の姿勢安定化のために専用浮体を用いること、洪水時には掃流砂が顕著となるため横断位置計測に用いられることが多いボトムトラッキング機能を採用せず、目視により ADCP の横断位置計測を行うこと、水面・底面・側面におけるデータ欠測部分において流速データの内外挿を

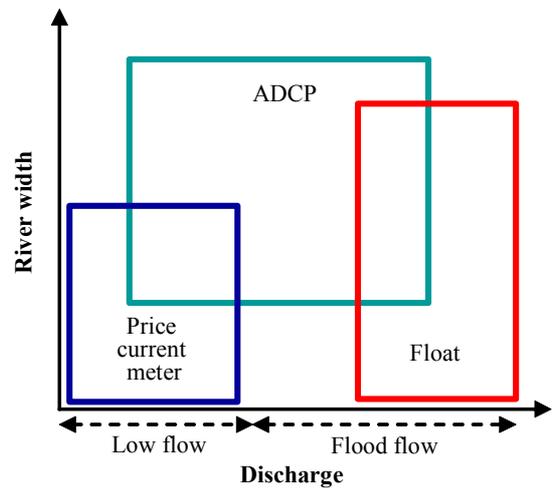


図-19 ADCP 移動観測法の適用範囲の概念図

実施することなどを示した。

- 2) ADCP 移動観測法における流速、水深、ADCP の横断位置という個別項目の計測精度を把握するために、現地観測を行った。その結果、流速に関しては、比較用として用いた電磁流速計の計測データのばらつきの範囲内に ADCP の計測値が存在した。また、水深誤差の RMS 値は 0.11m となり、一般的な測深計の計測精度と同程度であることが示された。さらに、目視による ADCP 横断位置の誤差の RMS 値は 1m 以下となり、流量算定における誤差を十分に低く抑制していた。以上より、ADCP 移動観測法における流速・水深・横断位置の計測精度が、概ね良好であることが示された。
- 3) ADCP 移動観測法の流量計測精度を検証するために、プライス流速計による流量算定結果と比較した。その結果、ADCP 移動観測法の流量計測精度は、流量が小さい場合には低くなるものの、ある流量値 (ここでは $100\text{m}^3/\text{s}$) 以上では高くなり、その時の誤差の RMS 値は 5% 以下となった。全データに対する ADCP 移動観測法における誤差の RMS 値は、プライス流速計による結果と同程度であった。これより、ADCP 移動観測法が高精度流量計測を実現していることが示された。
- 4) ADCP 移動観測法における往路と復路の流量を比べたところ、これらの流量差は概ね 5% 以下となっていた。これより、ADCP の移動方向による流量誤差は小さいことが示された。
- 5) 静止した ADCP により対地速度を計測した結果、洪水時には 0.5m/s を超える大きな対地速度が観測された。それより、BT 機能を採用するとき前提となる「河床面が静止している」という仮定は、限界せん断力を上回るせん断力が作用する洪水時の低水路内では成立していないと見なされる。このような状況下において BT 機能を用いた時の流量は、用いない場合と比べて 10~20% 過小評価されることが示された。

(2) ADCP 移動観測法の適用範囲

本論文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-19 に示す。ここでは、藤田⁸⁾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。

なお、ここでは、適用範囲として定性的な流量規模や河川スケールを述べたに過ぎず、定量的な議論を行っていない。今後、本論文で示した検証と同じことを様々な河川で行うことを通して、各流量観測法の適用範囲を定量的に示す必要がある。また、ADCP 移動観測法における流速や水深、流量の計測精度に関しても、本論文の検証内容だけでは十分とは言えない。今後、多くの河川、流況条件下における観測データを蓄積し、ADCP 移動観測法の精度検証をより詳細に実施することは必須である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者：二瓶泰雄) の成果の一部である。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には、低水流量計測データをご提供して頂いた。また、現地調査実施やデータ解析に際して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の北山秀飛氏、江端萌奈美氏、前田裕一氏をはじめとする学生諸氏に多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省河川局, (社)日本河川協会編:改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編, pp.35-58, 1997.
- 2) 土木学会:水理公式集 [平成11年度版], 丸善, pp.75-86, 1999.
- 3) (社)日本河川協会:雨量・流量年表データベース, 2007 (CD-ROM).
- 4) 深見和彦, 天羽淳, 大手方如, 吉谷純一:流量観測に関する技術基準の課題と新しい技術開発への対応, 土木技術資料, Vol.45, No.2, pp.22-29, 2003.
- 5) 今村仁紀, 深見和彦, 天羽淳:河川における低水流量観測技術基準の再評価, 土木技術資料, Vol.48, No.1, pp.66-71, 2006.
- 6) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 7) 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.
- 8) 藤田一郎:非接触型流速計測法を用いた実河川流の計測と問題点, ながれ, Vol.26, No.1, pp.5-12, 2007.
- 9) 金子新, 伊東集通:ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol.3, No.5, pp.359-372, 1994.
- 10) 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, Vol.12, pp.133-138, 2006.
- 11) 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.
- 12) Muste, M., Yu, K., Pratt, T. C. and Abraham, D.: ADCP measurements at fixed river locations, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 13) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 木水啓, 飯田裕介:洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用 ~江戸川を例にして~, 水工学論文集, Vol.48, pp.763-768, 2004.
- 14) 酒井雄弘, 二瓶泰雄:ADCP データに基づく大河川洪水流の更正係数に関する検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.733-738, 2007.
- 15) 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.
- 16) Oberg, K. A., Morlock, S. E. and Caldwell, W. S.: Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers, U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183, 2005.
- 17) Mueller, D. S.: Field assessment of acoustic-Doppler based discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 18) 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).
- 19) 松浦達郎, 金木誠: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, 第53回土木学会年次学術講演会要旨集第2部, pp.782-783, 1998.
- 20) 二瓶泰雄, 木水啓, 植田雅康, 中岡亮, 望月健:陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析法に関する検討 ~江戸川を例にして~, 海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.
- 21) 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.
- 22) Rennie, C. D. and Rainville F.: Case study of precision of GPS differential correction strategies: influence on aDcp velocity and discharge estimates, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.132, No.3, pp.225-234, 2006.
- 23) 金源: 韓国の水文観測技術開発の現況, 土木技術資料, Vol.45, No.2, pp.52-57, 2003.
- 24) 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.
- 25) 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.
- (2007. 8. 17 受付)

STUDY ON RIVER-DISCHARGE MEASUREMENTS USING ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILERS

Yasuo NIHEI, Yuu IROKAWA, Kyohei IDE and Tomoyuki TAKAMURA

This paper presents the fundamental performance for measuring river discharge using an acoustic Doppler current profiler (ADCP) through field tests conducted in large-scale rivers. For measuring discharge, a down-looking ADCP near the water surface was moved across the river to collect data on the vertical distribution of horizontal velocities and water depth for the entire cross section. We compared water velocities and depths obtained with the ADCP and the lateral position of the ADCP with measurements obtained using conventional techniques and showed that the observed data obtained using the ADCP agreed well with data obtained using conventional methods. Discharge comparisons measured using the ADCP and a Price current meter revealed that the accuracy of the ADCP measurement was relatively lower and higher under conditions of low and high discharge, respectively. Based on these findings, we qualitatively clarified the application of the ADCP to the measurement of river discharge.