

# 統一された流速内外挿法に基づく 様々な流速計測技術の流量推定精度

ACCURACY FOR DISCHARGE MONITORING OF VARIOUS VELOCIMETRIC  
TOOLS USING A UNIFIED TECHNIQUE FOR INTERPOLATION AND  
EXTRAPOLATION OF VELOCITY

柏田仁<sup>1</sup>・藤田一郎<sup>2</sup>・本永良樹<sup>3</sup>・萬矢敦啓<sup>4</sup>・二瓶泰雄<sup>5</sup>・中島洋一<sup>6</sup>・山崎裕介<sup>7</sup>  
Jin KASHIWADA, Ichiro FUJITA, Yoshiki MOTONAGA, Atsuhiro YOROZUYA, Yasuo NIHEI,  
Yoichi NAKAJIMA and Yusuke YAMASAKI

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-6018 新宿区西新宿6-8-1)

<sup>2</sup>正会員 学術博 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305 つくば市南原1-6)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305 つくば市南原1-6)

<sup>5</sup>正会員 博(工) 東京理科大学理工学部土木工学科 (〒278-8510 野田市山崎2641)

<sup>6</sup>非会員 横河電子機器株式会社 (〒151-0051 渋谷区千駄ヶ谷5-23-13)

<sup>7</sup>非会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-6018 新宿区西新宿6-8-1)

Various velocimetric tools like ADCP, image-processing technique, radio current meter and electro-magnetic sensor were used to conduct simultaneous measurement of river discharge in Uono River. The comparison of measurement accuracy of the above tools was conducted by using two unified interpolation and extrapolation techniques of point-velocities like DIEX (Dynamic Interpolation and EXtrapolation) method and a previous method. The results indicated that 1) the surface velocity measured by the above velocimetric tools gave good agreements with the ADCP data, 2) the relative errors of discharge in the previous method was large due to the treatment of lateral velocity profile near banks and float coefficients, and 3) the relative errors of discharge in the DIEX method may remain low even with a few measured velocities.

**Key Words :** discharge, DIEX method, ADCP, Image processing technique, radio current meter, electro-magnetic sensor

## 1. 序論

流量観測精度の高精度化のために、現地河川用の流速計測技術の開発が積み重ねられてきた結果、従来使用されてきたプライス流速計や浮子に加え、ADCP、電波流速計、画像解析等による新しい計測技術が確立されつつある<sup>1)~12)</sup>。平成24年7月に改定された河川砂防技術基準調査編においても多種多様な流速計測技術の例示がなされており<sup>1)</sup>、今後、それらの新技術が実際の流量観測に応用されていくものと予想される。

これらの流速計のうち、ADCPを除くと横断面全体の流速分布をほぼ瞬時に計測可能なものはなく、流量算出にあたっては、横断・鉛直方向に流速の内外挿操作を行う必要がある。これまで、一般に、水深平均流速と流速観測値の比である更正係数<sup>1), 2)</sup>を用いて水深平均流速を求め、水深平均流速を区分断面内に一様に与える区分求積法により流量を算定している。しかしながら、更正係数自体は、観測機材も十分無い戦後直後に設定され

た標準値が使用されており、最近では、この標準値が実洪水データとずれがあると指摘されている<sup>13)</sup>。また、区分求積法の流量推定精度は、横断面内の区分の設定に大きく依存している。そのため、既往の各流速計測技術の検証においては、「流速計そのものの観測誤差」と「流速内外挿操作の誤差」が混在する中で、流量推定精度の議論がなされてきた。

一方、著者らの一部は、H-ADCPにより計測される流速横断分布という「線」データを、力学条件を満足した形で「面」データに内外挿するための数値解析法・力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and Extrapolation method, DIEX法)を提案し、その有効性を示した<sup>14)~18)</sup>。さらに、近年では、このDIEX法を浮子や電波流速計による「点」流速データから「面」流速データ推定にも応用し、その有用性を検証している<sup>19), 20)</sup>。

こうした中、土木学会水工学委員会流量観測高度化研究小委員会では、様々な流速計測技術による合同流量観測を2012年4月に魚野川にて、5月に石狩川にて実施した。

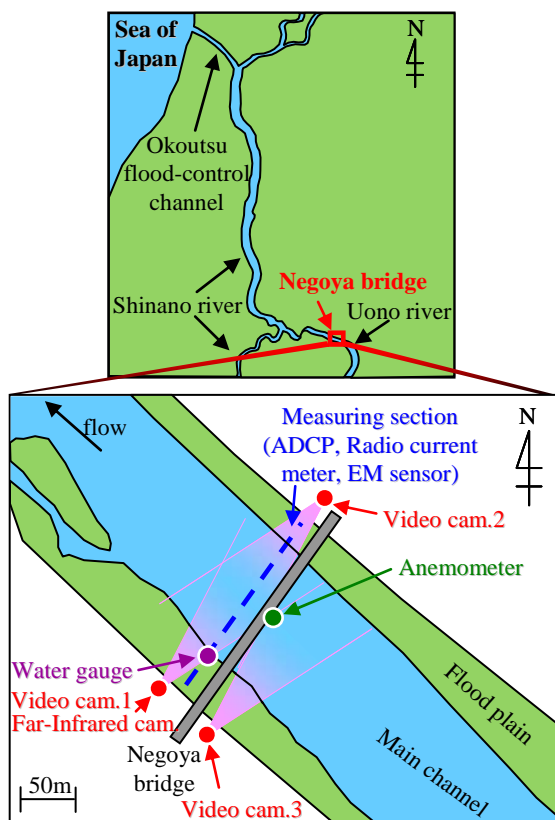


図-1 観測対象サイトと流速計測状況

ここでは、浮子やADCP、画像解析（STIV法<sup>4)</sup>）、電波流速計、一次元電磁流速計の同時計測が行われ、貴重な比較観測が実施された。本研究では、様々な観測技術による流速データに対して、統一された内外挿手法を適用した形で流量推定精度を検証することを試みる。ここでは、魚野川での観測結果を対象として、流速計測法としてはADCP、画像解析、電波流速計、電磁流速計を用い、内外挿法としては、更正係数と区分求積法による方法（従来法）とDIEX法（本手法）の2つを用いることとし、最も信頼性の高いADCPによる観測データをリファランスとして、3つの流速計データに対して2つの内外挿法を適用した結果を検討する。また、これらの流量算定精度に及ぼす計測範囲・データ数の影響も合わせて検証する。

## 2. 合同流量観測の概要

多様な流速計測技術の計測性能やDIEX法と併用した場合の流量観測精度を検証するため、実河川における洪水時にて、ADCP、ビデオカメラおよび遠赤外線カメラによるSTIV、電波流速計、電磁流速計による同時流量観測が行われた。観測対象サイトは、図-1に示すように、信濃川水系魚野川根小屋橋（堀之内水位流量観測所、信濃川合流部より10.8km）である。なお、同図中には、後述する計測機器の配置や計測エリアを合わせて図示している。観測期間は融雪出水期（2012/4/20～22）であり、計測状況の詳細は表-1のとおりである。以下では、各測

表-1 各流速計の流量計測回数 $n$

Velocimetric tool	$n$
ADCP	31
STIV with Far-Infrared camera	10
Radio current meter	15
Electro magnetic sensor	5

器の計測概要を記述する。

### a) ADCP

ADCP（Workhorse1200kHz、Teledyne RDI製）を高速流対応型ボート（高速セーフティサーベイヤー、(株)ハイドロシステム開発製）に鉛直下向きに取り付け、橋上からロープで牽引し、横断方向に移動させた。追加機器としてRTK-GPS、外部コンパス、データ転送装置を用いた。ADCPの観測方法の詳細は萬矢ら<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>、ADCPデータからの流量算出方法は二瓶ら<sup>10)</sup>を参照されたい。本論文では、ADCPによる流速・流量データをリファランスとして、後述の観測法の結果の精度を検証する。なお、ADCPの計測精度に既往論文を参照されたい<sup>10)</sup>。

### b) 画像解析（STIV）

画像解析では、右岸・左岸の堤防天端にビデオカメラ（HDR-XR500およびHDR-HC1、SONY製）と遠赤外線カメラ（SR-334、FLIR System Inc. 製）を設置し、水面および評定点の撮影を連続して行った。取得したデータは研究室に持ち帰り、STIV法<sup>4)</sup>による解析を実施し、流速横断分布を得た。なお、本論文では遠赤外線カメラによる全10期間の観測結果のうち、午前から夜間にかけての4期間を解析対象とした。STIVの詳細については、Fujita et al.<sup>4)</sup>を参照されたい。

### c) 電波流速計

電波流速計としては、可搬式電波流速計（RYUKAN、横河電子機器(株)製）を用い、横断方向に移動しながら各計測地点において1～2分間固定して計測を行った。なお、サンプリング周波数は1Hzとし、下流向きに設置した。横断面内における計測地点数は8点とした。

### d) 電磁流速計

電磁流速計としては、一次元電磁流速計（AEM-1D、JFEアドバンテック(株)製）を用いて、電波流速計と同様に、橋上から電磁流速計をロープで吊り下げる形で横断方向を移動し、各計測地点において1分間の計測を行った（測定地点数15点）。サンプリング周波数は1Hzとし、10秒間平均値を記録した。

### e) その他

後述するように、DIEX法により表層流速データから流量を算定するには、風速データが必要となる。この風速データとしては、マルチ環境測定器（LM-8102、アズワン(株)製）を用い、橋梁中央部において1分間計測した。現地で風速データが取得できなかった期間について

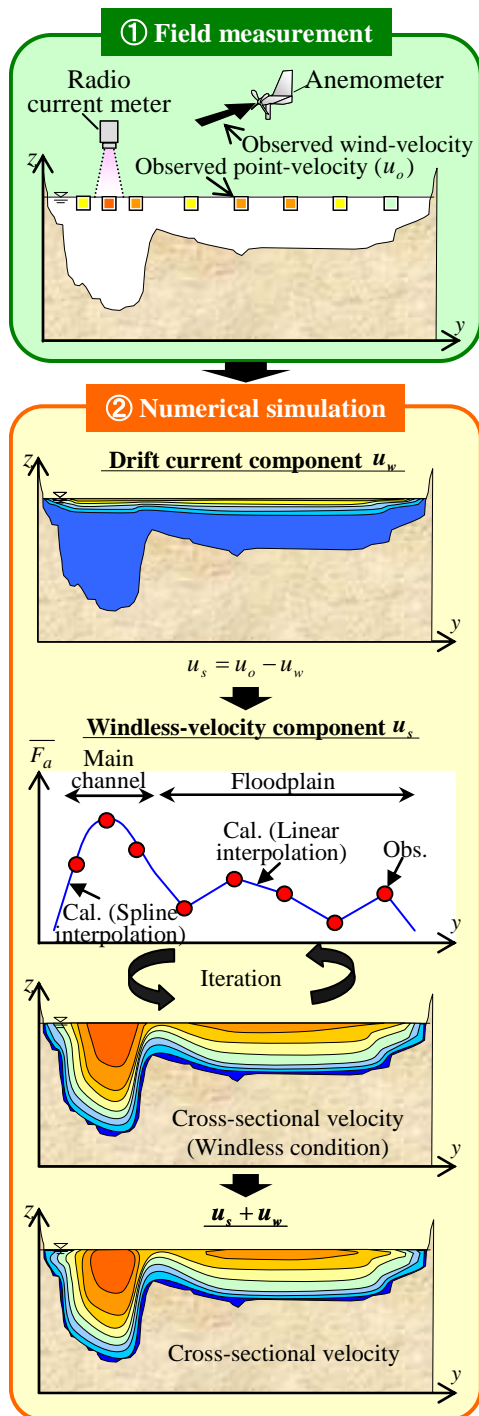


図-2 DIEX法による流速内外挿法の手順（吹送流を考慮する場合）<sup>20)</sup>

では、小出アメダス観測所（観測地点から直線距離約3km）における実測値を援用した。

### 3. 流速内外挿法の概要

#### (1) DIEX法

DIEX法は、横断面内を計算対象とした二次元解析法であり、簡略化した主流方向運動方程式を基礎式とし、

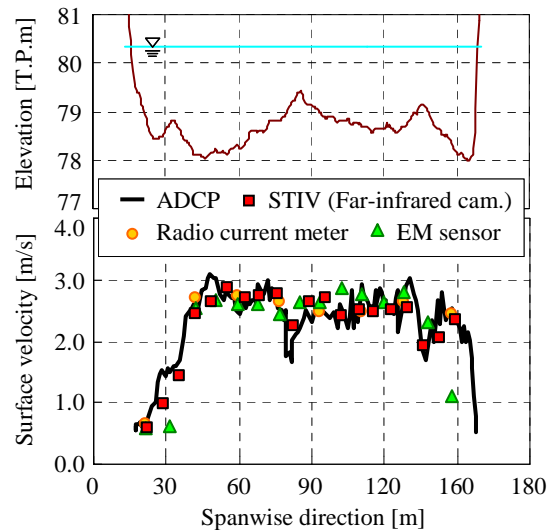


図-3 横断面図（上）と表層流速横断分布（下）（2012/4/21 14:00）

流速観測値をデータ同化している手法である<sup>13)</sup>。今回、内外挿対象となる流速計は表面（表層）流速用なので、DIEX法による表層「点」流速の内外挿法の手順を図-2に示す。まず、主流方向流速成分を「吹送流成分 $u_w$ 」と「無風時の流速成分 $u_s$ 」に分け、①鉛直次元モデル（Delft3Dモデル）により吹送流成分 $u_w$ を求め、次に、②吹送流成分 $u_w$ と実測値の差から得られる無風時の流速成分 $u_s$ を同化データとしてDIEX法による流速内外挿操作を行う。最後に両成分の和を取り、面流速データや流量を算出する。なお、DIEX法の計算方法や手順、係数設定等の詳細に関しては、二瓶・木水<sup>14)</sup>を、吹送流に関する計算の詳細には柏田ら<sup>20)</sup>を参照されたい。

#### (2) 従来法

従来法では、観測された任意の水深の「点」流速データを修正係数より水深平均流速に変換し、その水深平均流速を区分断面内で横断方向に一律に与え、流速の内外挿操作を行っている。ここでの修正係数としては、表面流速に対応する0.85を用いた<sup>1)</sup>。

### 4. 結果と考察

#### (1) 流速計測精度

各々の流速計測技術の計測状況を確認するために、すべての流速計による主流方向表面流速の横断分布を図-3に示す。ここで、全測器の同時観測が行われた期間（4/21 14:00、ADCP流量448m<sup>3</sup>/s）における結果を例示しており、この時の風向は北向き、主流方向に換算した風速は平均1.3m/sであった。ADCPは、最表層の計測値（水面下0.27m）を表示している。電磁流速計は、ここでは流速絶対値のみを計測していたため、ADCPデータから得られた流向を用いて主流方向流速に補正している。この図を見ると、STIVや電波流速計、電磁流速計による観測値はADCP観測値と概ね一致している。ただし、

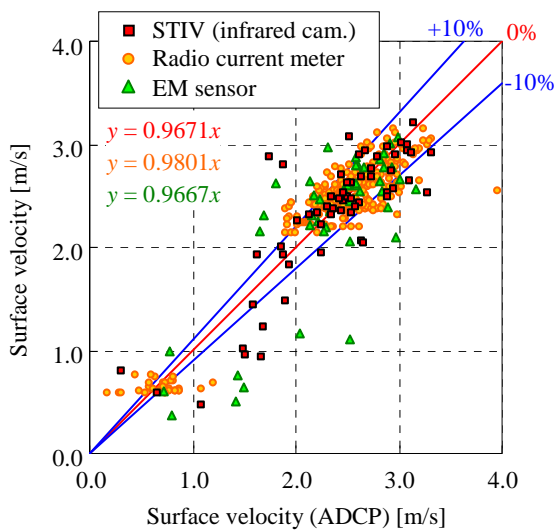


図-4 表層流速データに関するADCPと他計測法の相関図

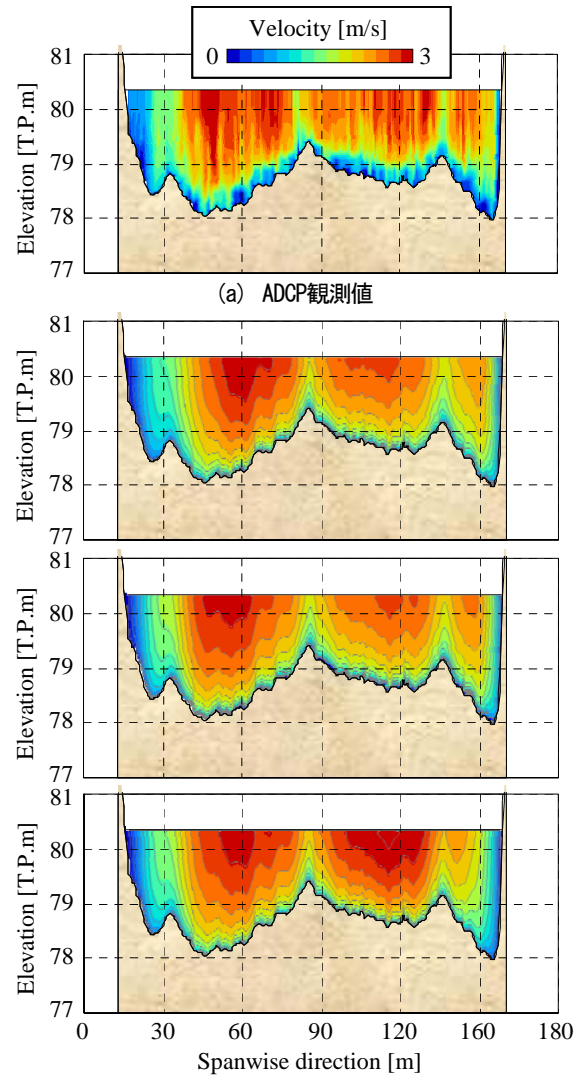
河岸近傍の流速が比較的小さい範囲においては、ADCPとその他の流速計による観測値の差は大きい。

次に、全観測期間におけるSTIV、電波流速計、電磁流速計の計測値とADCP観測値（最表層）の相関図を図-4に示す。同図中には、相対誤差0%および±10%に相当する実線及びADCPデータと各データの近似直線を示す。流速が2m/sを上回る範囲では、各表層流速計の観測値は概ね±10%の範囲にプロットされている。一方、2m/s未満の流速の場合、どの流速計についてもADCP観測結果との差が大きく、そのばらつきは相対的に大きい。

## (2) DIEX法による流速・流量推定結果の比較

ADCP以外の各流速観測値に対してDIEX法による「面」流速推定を行った結果の一例として、横断面内の主流方向流速コンターを図-5に示す。ここでは、前節の結果を踏まえて、河岸近傍の低流速値（2m/s未満）はデータ同化しない形で流速推定を行っている。流速の断面コンターを見ると、流速計測技術を問わず、DIEX法により離散的な「点」データから滑らかな「面」流速データが推定されている。これらの推定結果は、ADCPデータに見られる流速空間変化パターンを概ね良好に再現している。より詳細に検討するために、同時刻の主流方向水深平均流速の横断分布に関するADCP観測値と推定値を図-6に示す。データ同化範囲内では、同化データの大小により推定値が変化しているものの、流速の横断変化を概ね良好に推定している。また、データ同化範囲外においても、流速推定値はADCP観測値に概ね一致しており、本手法の流速外挿精度は概ね高いと言える。

次に、観測期間中の全データに関する流量推定値とADCP観測値の相関図を図-7に示すと共に、ADCPに対する流量推定結果の誤差のRMS（Root Mean Square）値を表-2に示す。ここでの推定値としては、本手法と従来法の結果を表示している。これより、従来法の流量推定精度は、横断面内での測線数が相対的に多いSTIVで



(b) DIEX法による推定値（上からSTIV、電波流速計、電磁流速計）

図-5 主流方向流速の断面コンター（2012/4/21 14:00）

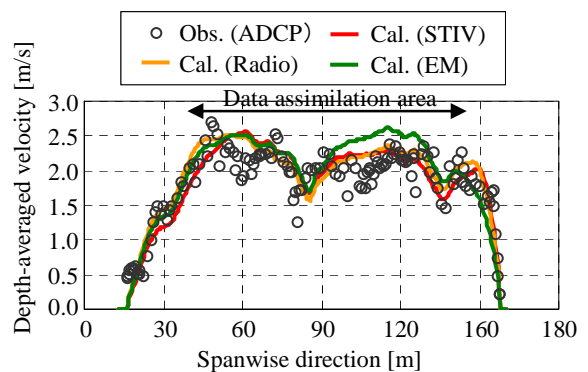


図-6 主流方向の水深平均流速横断分布（2012/4/21 14:00）

1.3%、電磁流速計で3.0%と十分小さいが、測線数が少ない電波流速計では6.8%とやや大きい。一方、本手法による流量推定精度は3つの流速計測法ともに5%以内であり、測線数に寄らず流量推定精度が高いことが分かる。

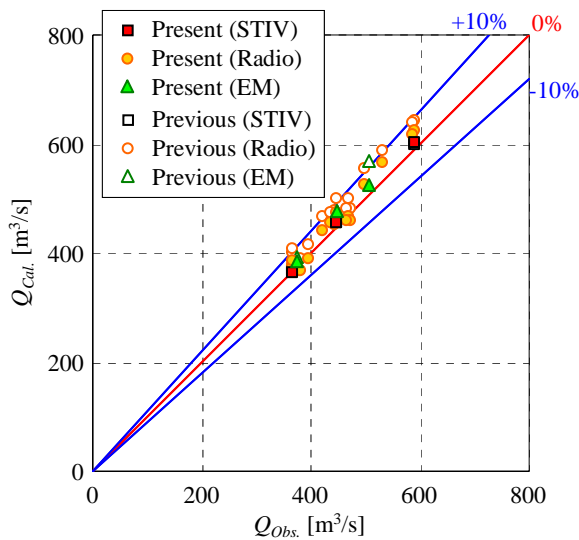


図-7 流量に関する観測値と推定値の相関図

表-2 流量推定誤差のRMS値 (単位: %)

Method	Present	Previous
STIV	1.9	1.3
Radio	4.1	6.8
EM	4.7	3.0

### (3) 従来法における流量推定誤差の要因

前述したように、従来法は、本手法よりも流量誤差が大きくなるケースが見られた。その要因を考察するために、流速横断・鉛直分布の推定状況を検討する。まず、流速実測値毎の区分断面における流量推定誤差の横断分布を図-8に示す。ここでは、本手法と従来法による区分断面の流量推定結果から同一区分断面のADCPデータを引いたものを表示している。これより、どの計測法に関しても、本手法の推定値の方が従来法よりも誤差が小さく、流速計測精度が低い側岸付近では従来法の推定精度が低くなっており、この傾向は電波流速計に顕著である。

また、流速鉛直分布推定に用いられた更正係数の妥当性を検証するために、有効なADCPデータ (ADCPの超音波反射強度が十分大きく、GPSデータの取得状況が良好な場合、 $n=5484$ ) を用い、更正係数 (水深平均流速と最表層 (第一層) 観測値の比) と水深の相関図及び更正係数の頻度分布を図-9に示す。更正係数は水深にほとんど依存せず、その平均値は0.820であった。採用した標準値 (0.85) は観測データの平均値の1.036倍であり、この結果は単純には各区分断面にて3.6%の平均的誤差を生んでいることに相当している。このように、流速横断・鉛直分布の推定に当たり、従来法では、河岸近傍での横断分布評価や更正係数による鉛直分布の扱いにより、流量推定結果に誤差が生まれていることが示唆された。

### (4) 流量算定時の流速データ数を模擬的に減らした場合の流量推定精度

これまで、観測時に得られた流速実測値をそのまま用

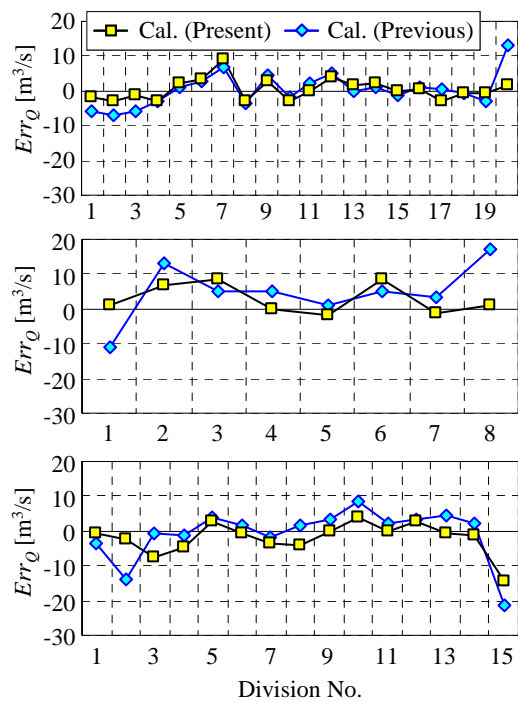


図-8 各区分断面の流量推定誤差 (上からSTIV, 電波流速計, 電磁流速計) (2012/4/21 14:00)

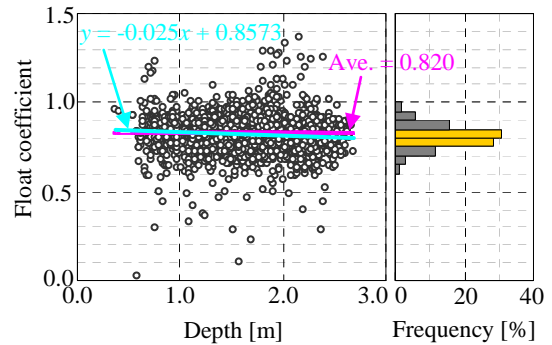


図-9 ADCP観測に基づく表面流速の更正係数

い、従来法と本手法の流量推定精度を検証した。様々な流速計測状況を想定すると、劣悪な観測環境下では3つの流速計のデータ数が減少する場合も想定される。このような流速データが減少した場合における本手法・従来法の流量推定精度を検証するために、模擬的にSTIVの計測範囲、電波流速計・電磁流速計の計測点数を減少させた場合における本手法による推定値およびADCP観測による水深平均流速横断分布を図-10に示す。図中には、流速内外挿に用いたデータの範囲を矢印で表示する。これより、外挿範囲の大きいSTIV法に対する推定結果は、右岸側で若干過大評価しているものの、その他の本手法の流速推定値はADCP観測値と概ね一致している。

これらの結果に対する流量推定相対誤差のRMS値を表-3に示す。これより、従来法では、データ数が少ないため流量推定誤差が大幅に増大し、10~24%の誤差となった。一方、本手法では、データ数が実測値そのままの場合 (表-2) よりも誤差は大きくなったものの、最大で5.6%であった。このように、従来手法の場合には、

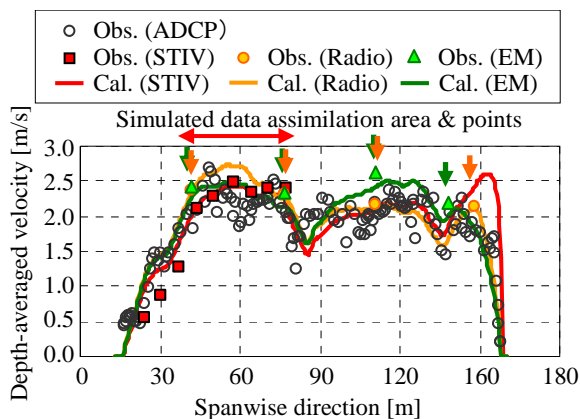


図-10 主流方向の水深平均流速横断分布 (2012/4/21 14:00, 流速データ数を模擬的に減らした場合)

表-3 流量推定誤差のRMS値 (流速データ数を模擬的に減らした場合, 単位: %)

Method	Present	Previous
STIV	3.3	10.1
Radio	5.6	17.6
EM	5.2	23.7

適切なデータ数が揃っていない場合には、各区分における観測値の代表性が低下するため流量推定誤差が大きくなるが、本手法では、少ないデータセットでも力学条件を満足した形で流量推定を行うため高精度が維持されており、本手法の有効性が検証された。

## 5. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 融雪洪水を対象として、ADCP, 画像解析 (STIV法), 電波流速計, 電磁流速計による流速同時観測を実施した。すべての流速計の観測値は、河岸近傍の低流速域を除いて概ね良好に一致した。

(2) ADCPを除く表層流速観測値にDIEX法を適用し、流速の「面」データを算出した。本手法は、離散的な「点」データから滑らかな「面」データを推定していた。その結果、流量推定誤差はすべての流速計で5%以下となった。

(3) 従来法では河岸近傍での横断分布評価や更正係数による鉛直分布の扱いにより、流量推定結果に誤差が生じることが示された。

(4) 劣悪な観測環境を念頭にして流速データ数を模擬的に減少させて流量推定を行ったところ、従来法では流量推定誤差が増大したが、本手法では高い精度が維持されており、本手法の優位性が示された。

謝辞: 本研究は、土木学会水工学委員会流量観測高度化研究小委員会 (委員長: 藤田一郎) によるものである。魚野川における数多くの流速計を用いた現地観測、デー

タ解析を行う際には、(株)ハイドロシステム開発、(株)水文環境、神戸大学および東京理科大学の学生諸氏には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) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, pp.51-85, 2012.
- 2) 土木学会: 水理公式集 [平成11年版], 丸善, pp.75-86, 1999.
- 3) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 4) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 大手方如, 深見和彦, 吉谷純一, 東高德, 田村正秀, 和田信昭, 淀川巳之助, 中島洋一, 小松朗, 小林範之, 佐藤健次: 非接触型流速計測法の開発, 土木技術資料, Vol.45, No.2, pp.36-45, 2003.
- 8) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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, 河川技術論文集, Vol.16, 2010.
- 12) 菅野裕也・萬矢敦啓, 深見和彦: 外部コンパスを併用したADCP観測に関する提案, 河川技術論文集, Vol.17, 2011.
- 13) 二瓶泰雄, 酒井雄弘: 実河川洪水流における浮子の更正係数, 土木学会論文集B, Vol.66 No.2, pp.104-118, 2010.
- 14) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP観測と河川流量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.63 No.4, pp.295-310, 2007.
- 15) 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.
- 16) 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観測への適用, 水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 17) 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.
- 18) 岩本演崇, 二瓶泰雄: H-ADCP計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング, 水工学論文集, Vol.53, pp.1009-1014, 2009.
- 19) 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法) 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.
- 20) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠: 電波流速計による表層流速計測とDIEX法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, Vol.18, pp.393-398, 2012.

(2012. 9. 30受付)