

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

A NEW MONITORING TECHNIQUE FOR RIVER DISCHARGE WITH RADIO CURRENT METER MEASUREMENTS AND DIEX METHOD

柏田仁¹・二瓶泰雄²・山下武宣³・山崎裕介⁴・市山誠⁵

Jin KASHIWADA, Yasuo NIHEI, Takenori YAMASHITA, Yusuke YAMASAKI
and Makoto ICHIYAMA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

²正会員 博(工) 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)

³正会員 修(工) 国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所長 (〒278-0005 千葉県野田市宮崎134)

⁴正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

⁵正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

We present a new technique for evaluation of cross-sectional velocity and discharge from point-velocity measured by radio current meter using a dynamic interpolation and extrapolation method (DIEX) method recently developed by the authors. In this technique, velocity is separated into “drift current component” and “other component” in which the former is evaluated with vertically 1D current model using measured wind velocity, and the latter is interpolated and extrapolated using the DIEX method. The present method was applied to flood-discharge monitoring with a radio current meter and an anemometer in the middle reach of the Edogawa River. The results indicate that the present method performs higher accuracy than the previous method in which effects of drift current may not be explicitly incorporated.

Key Words : discharge, DIEX method, radio current meter, data assimilation, drift current

1. 序論

河川流量計測を念頭に置いた現地河川用流速計測技術としては、プライス流速計や浮子に加え、電波流速計やADCP等による手法が実用化されつつある^{1)~9)}。これらの流速センサーのうち電波流速計^{4)~6)}は、空中より河川水表面に向かって電波を照射し、ドップラー原理を用いて水表面流速を計測するものである。このため、電波流速計は他のセンサーと異なり“非接触”計測が可能な機器であり、最近では可搬タイプで取り扱いが容易な機種も市販されており、今後、より広範な条件下における河川流量観測への適用が期待される。

このような電波流速計の計測値は、水表面上におけるある局所エリアにおける「点」データと見なされるため、この「点」データから断面流速分布や流量を換算するには、流速鉛直・横断分布を何らかの形で内外挿する必要がある。これまでは、一般に、水深平均流速と表面流速の比である更正係数¹⁾を用いて、電波流速計の計測値から水深平均流速を求め、それを浮子測法と同じく区分求積法により流量を算定している。表面流速に関する更正係数は、当然のことながら、吹送流の影響を大きく

受けるため、更正係数を標準的な値(=0.85)¹⁾で一定値とすると、流量推定精度が大幅に低下する恐れがある。そのため、室内実験結果等に基づいて、風速の影響を考慮した更正係数も提示されている⁶⁾。しかしながら、河川法線形が蛇行・湾曲により変化するのが一般的であるため、風向と流向が流下方向に大きく変化し、結果として、実河川における吹送流構造は複雑であり、検討事例すら非常に少ない。そのため、これまでの手法では、電波流速計の流速データを吹送流の影響を適切に考慮した形で横断面内に内外挿しているとは言い難い。

それに対して、著者らは、H-ADCPにより計測される流速横断分布という「線」データを「面」データに内外挿するための数値解析技術である力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and Extrapolation method, DIEX法)を提案し、その有効性・汎用性を検証している^{10)~14)}。さらに、近年では、このDIEX法をH-ADCP以外の流速計測技術である浮子による「点」流速データから「面」流速データ推定にも応用し、それらの有効性を示している¹⁵⁾。DIEX法は、複数地点の「点」流速データから「面」データを推定でき、かつ、複雑な力学条件を取り込むことが原理的に可能であるので、電波流速計の

表層流速計測値の内外挿技術として適した手法になり得るものと期待できる。

そこで本研究では、電波流速計の計測精度・特性を検証するとともに、電波流速計による表層流速計測技術と力学的内外挿法（DIEX 法）による数値解析技術を融合した流量推定手法を提案する。具体的には、①実河川における洪水時に電波流速計と ADCP、風向風速計による同時観測を行い、電波流速計の流速計測精度やその風速依存性を検証する。次に、②吹送流の影響を考慮した形で電波流速計による表層流速データの内外挿技術として適用できるように DIEX 法を改良し、この DIEX 法と電波流速計の計測技術を融合した本手法の「面」流速や流量推定精度を検証する。

2. 本手法の概要

(1) DIEX法の改良ポイント

電波流速計による「点」表層流速データから「面」流速を推定できるように力学的内外挿法（DIEX 法）を改良する。DIEX 法とは、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、流速観測値をデータ同化している手法である。今回の改良ポイントとしては、主流方向流速 u を「吹送流成分 u_w 」と「無風時の流速成分 u_s 」の二成分に分離する。このうち吹送流成分 u_w については、DIEX 法とは別の鉛直一次元モデルによる実測風応力下の流速鉛直分布の計算結果を与える。一方、電波流速計の実測値には吹送流の効果が反映されているので、この電波流速計の実測値から上記の吹送流成分 u_w を引いたものを「無風時の流速成分 u_s 」と見なし、これを同化データとして DIEX 法に組み込み、流速内外挿操作を行う。最後に、両成分の和から流量を推定する。このような形で、吹送流効果を簡便に取り込むものとする。

(2) 基本構成

図-1 は、電波流速計による点流速計測と DIEX 法による数値計算技術を融合した本手法における流量算定までの基本手順を示す。まず、①の現地観測では、横断面内の複数地点において、可搬タイプの電波流速計により表層流速を計測する。また、後述する吹送流計算に必要な風向・風速を橋上において風向風速計を用いて計測する。②の DIEX 法による数値計算としては、まず鉛直一次元モデルにより吹送流成分 u_w を求める。ここでは、汎用的な河川流・海水流動モデルとして知られる Delft3D¹⁶⁾ を用いる。次に、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している。

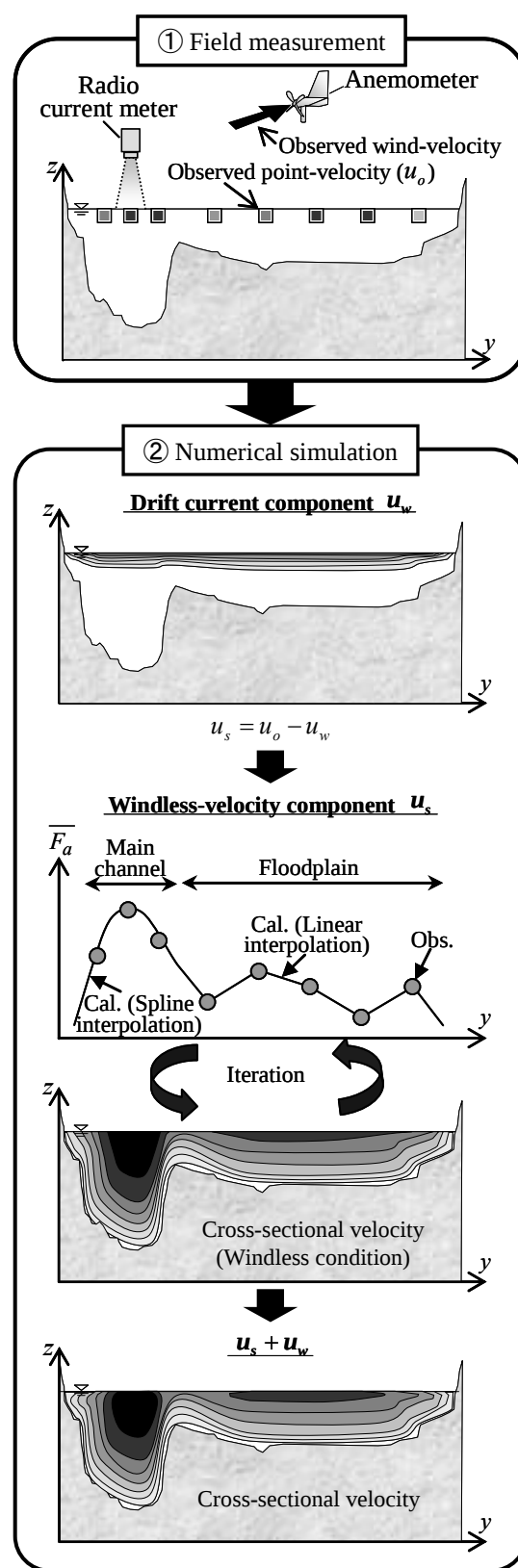


図-1 本手法による流量算定手順

(3) 吹送流成分の算出法

上記②におけるキーとなる吹送流成分の計算手順を記述する。ここでは、元々3次元流動モデルである Delft3D を用いて、実測の風速のみ外力として与えた鉛

直一次元計算を行う。実際には、様々な風応力と水深条件下における吹送流計算を事前に行い、計算結果をデータベース化する。得られたデータベースを用いて、実測の風速条件と各横断位置の水深条件に近い吹送流成分を抽出し、それらを内挿して、各横断位置の吹送流成分を与える。なお、このDelft3Dでは、鉛直方向渦動粘性係数用の乱流モデルとして、 $k-\epsilon$ モデルを用いており、適切な格子サイズさえ確保すれば、詳細な吹送流の鉛直分布を記述することには問題ない。また、電波流速計における流速計測高さは、水表面もしくはその直下が想定されるが、ここでは、簡単のため、水表面上として取り扱う。

(4) DIEX法の概要

DIEX法における基礎方程式として、3次元運動方程式を簡略化し、その際、省略された項を補うために付加項 F_a を導入している¹⁰⁾。この付加項 F_a を算出し、データ同化を行うために、水深平均された運動方程式を用いる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{A_H} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \left(\frac{C_f}{D} + \frac{aC_b}{2} \right) \bar{u}^2 + F_a = 0 \quad (1)$$

ここで、 y は横断方向、 $\bar{u}$ は主流方向水深平均流速、 $\overline{A_H}$ は水深平均された水平渦動粘性係数、 D は水深、 C_f は底面摩擦係数（ $=gn^2/D^{1/3}$ 、 n ：マンニングの粗度係数）、 I は水面勾配、 g は重力加速度、 a は植生密度パラメータ、 C_b は植生の抵抗係数をそれぞれ表す。複断面河道を計算対象としており、ここでは、低水路と高水敷におけるマンニングの粗度係数 n をそれぞれ0.025、0.040 $m^{-1/3}s$ としている。また、先行研究に倣い¹⁰⁾、付加項 F_a の鉛直分布は一様として扱う。

これまでのDIEX法では、観測データの存在する横断位置の付加項 F_a を求める際には、観測データをそのまま代入しているが、ここでの同化データとしては、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 を用いる。そのため、このDIEX法における計算では、水表面上における風応力は課しておらず、無風時の流速成分を横断面全体に内外挿することになる。また、ここで得られた無風時の「面」流速データに、上記で求めた「吹送流成分」を加算して、吹送流を考慮した「面」流速データや流量を算出する。なお、上述した計算方法や手順、係数設定等の詳細に関しては、二瓶・木水¹⁰⁾を参照されたい。

3. 現地観測・数値計算の概要

電波流速計の計測性能や本手法の有効性を検証するため、実河川における洪水時に電波流速計とADCPによる同時流量観測を行う。観測対象サイトは、図-2に示すように、江戸川中流部・野田橋（河口より

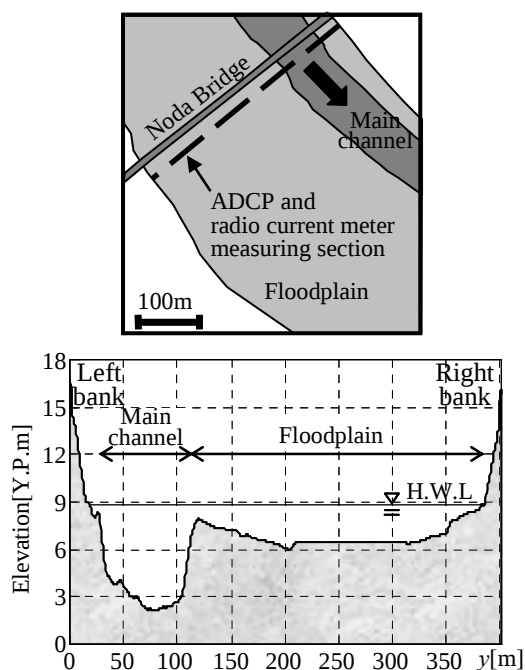


図-2 研究対象サイト（江戸川・野田橋）

表-1 吹送流計算における計算条件範囲

Numerical parameter		Number of case
Wind speed [m/s]	1.0~15.0	15
Depth [m]	0.2~8.0	40
$n [m^{-1/3}s]$	0.025, 0.040	2
Total		1200

39.5km地点）である。観測期間は、広範囲で大きな洪水をもたらした台風1112号（2011/9/2～9/4）とする。用いる機器と計測方法としては、電波流速計では、可搬タイプのRYUKAN（横河電機㈱製）を用い、橋上に同機器を設置し、計測地点において1分間、サンプリング周波数1Hzで表層流計測を行う。横断面内における計測地点数は最大20としている。なお、この機器の流速計測範囲は0.5～20m/sとなっており、水際付近や植生群落、高水敷等のような流速の遅い地点における計測には不適である。ADCPとしては、Workhorse1200kHz（Teledyne RDI製）を用い、これを専用ボードに下向きに付け、それを横断方向に移動させて、横断面全体の流速分布データを取得する⁹⁾。同期間中において、横断面全体にわたり同時観測を実施できたのは、合計17回である。また、吹送流成分の計算に必要な水深にはADCPデータを与え、風向風速データとしてはマルチ環境測定器（LM-8102、アズワン㈱製）を用いて、橋上の複数の横断位置において1分間の風向風速実測値を与えている。

また、吹送流成分算出時における計算条件は、現地河川の状況を鑑みて、表-1のように設定している。計算ケース数は計1200ケースである。

得られた電波流速計データ及び吹送流計算結果を用い

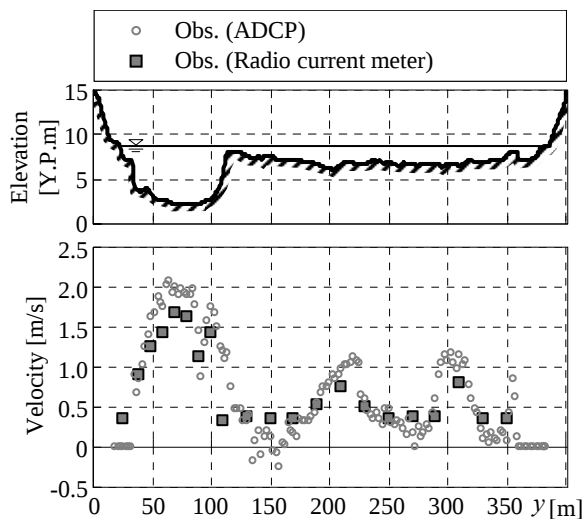


図-3 電波流速計およびADCPによる主流方向表面流速の横断分布 (9/4 11:15, 風向: 上流向き, 風速: 9.1m/s)

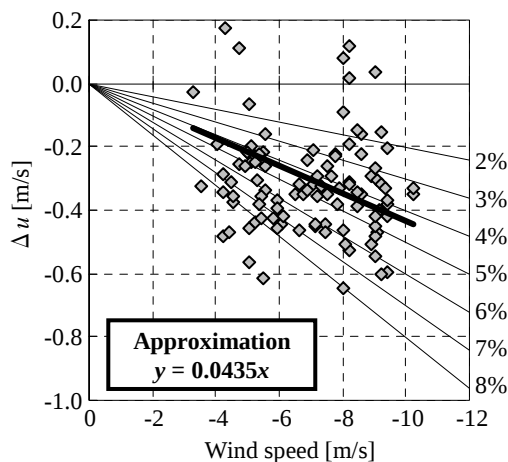


図-4 流速差 Δu (=電波流速計観測値-ADCP観測値) と風速の相関図

て、DIEX法による流速内外挿操作と流量算定を行う。ここでは、本論文で提示しているように吹送流成分を陽に考慮した本手法と、単純に電波流速計の流速値をそのままデータ同化する方法（以下、従来法と称す）という二種類の計算条件を実施する。なお、電波流速計の計測結果より、高水敷の植生群落内や背後のエリアでは、後述するように計測範囲以下（0.50m/s以下）となる。これらの地点における計測結果は同化データとして用いず、岩本・二瓶¹⁴⁾を参考にして植生抵抗を与えている。

4. 結果と考察

(1) 電波流速計とADCP観測結果の比較

電波流速計の流速計測状況を確認するために、電波流速計とADCP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、両測器の同時観測が行われたピーク時（9/4 11:15, 流量 874m³/s）における結果を例示しており、この時の風向は上流向き、風速は平均 9.1m/s, 最大 11.5m/sである。水表面に浮かべられてい

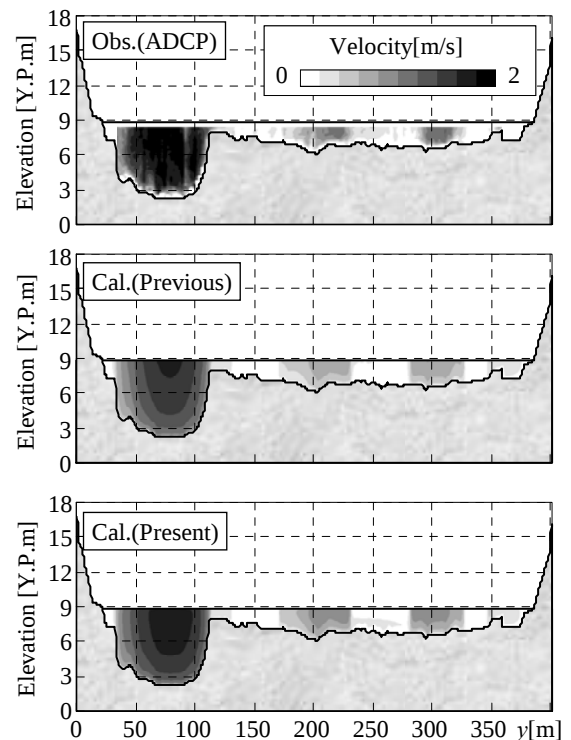


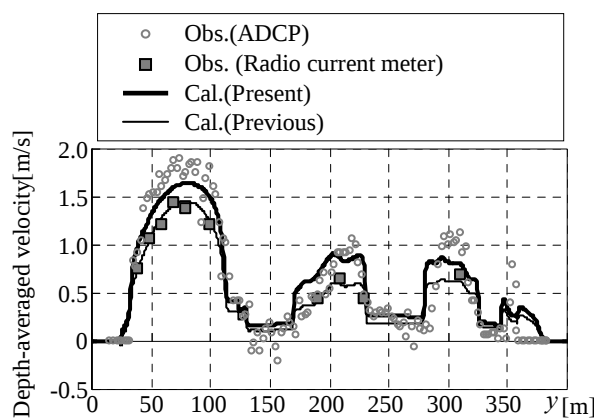
図-5 横断面内における主流方向流速の観測値（ADCP）と推定結果（従来法と本手法, 2011/9/4 11:15）

るADCPは、ADCP自身の喫水分とセンサー近傍の未計測範囲（不感帯⁹⁾）を考慮して、水面下 0.35mにおける計測値を採用している。これより、電波流速計の計測値はADCPデータを概ね下回っており、河川流の向きと逆の風応力を受けて、表面流速が減速している様子が伺える。また、右岸側高水敷上において、ADCPデータが 0.5m/sを下回る地点では、電波流速計は計測限界のため、このように低速域を含んだ形で流量算定には、電波流速計以外の流速計を用いるか、流速内外挿法の適切な利用が必要となる。

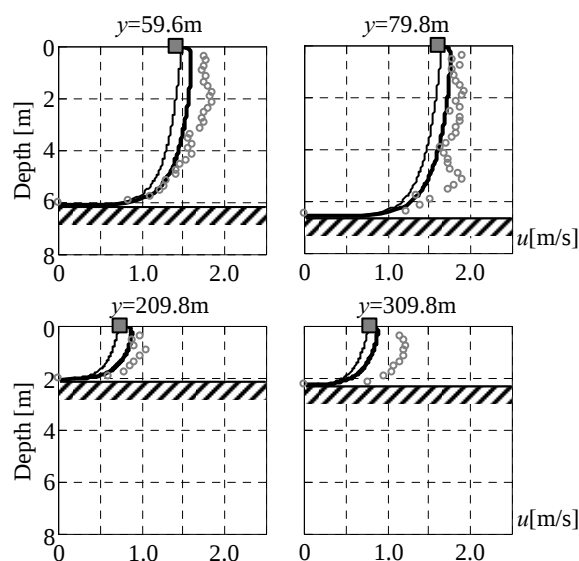
同一地点における電波流速計の流速計測値から ADCP データ（水面下 0.35m）を引いた流速差 Δu と風速の相関図を図-4に示す。ここでは、下流方向を正とし、流速レベルが 0.5m/s を越える低水路のみを対象とする。また、風速の 2～8%に相当する実線を同図中に示している。これより、観測期間中、上流向きの風向であったため、流速差 Δu は概ね負となっており、電波流速計データは 0.2～0.4m/s 程度も ADCP データより小さいことが分かる。これらのデータは風速レベルの概ね 3～6%の間に分布し、近似直線を適用したところ、その傾きが 0.0435 となっており、この流速差は概ね風速の約 4%程度となっているものと言える。

(2) 流速推定精度

本手法の流速推定精度を調べるために、台風 1112 号出水のピーク時（2011/9/4 11:15）における横断面内の主



(a) 水深平均流速の横断分布



(b) 流速鉛直分布 (上は低水路, 下は高水敷の結果)

図-6 主流方向流速の横断・鉛直分布に関する観測値と推定値の比較 (2011/9/4 11:15)

流方向流速コンターを図-5に示す。ここでは、ADCP による観測結果と従来法・本手法による推定結果が表示されている。これより、観測結果としては、低水路内では右岸側の流速が相対的にやや大きく、また高水敷では植生の抵抗を受けて流速の空間変化が大きくなっている。これと推定結果を比べると、従来法・本手法ともに、大まかな流速分布パターンは再現しているものの、従来法の流速値は全体に小さくなっている。これは、従来法では、吹送流の影響を受けて ADCP データよりも小さい電波流速計の計測値を同化データとしてそのまま用いているためである。

より詳細に検討するために、主流方向流速の横断・鉛直分布に関する観測値と推定値を図-6に示す。ここでは、同じ流量ピーク時を対象として、水深平均流速の横断分布及び低水路2地点・高水敷2地点における流速鉛直分布を表示している。これより、水深平均流速の横断分布に着目すると、従来法の推定結果は前述したように観測値よりも小さくなっており、その差は低水路において顕著である。一方、吹送流成分を考慮している本

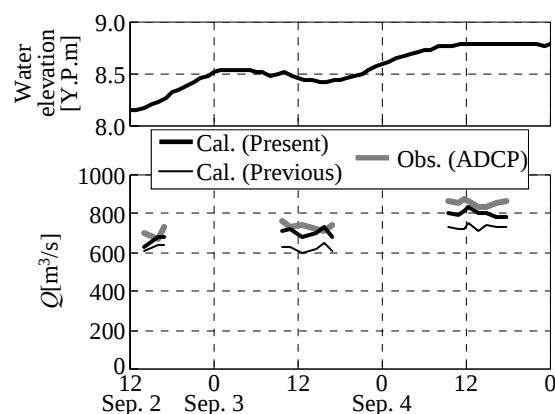


図-7 流量に関する観測値と推定値の時間変化

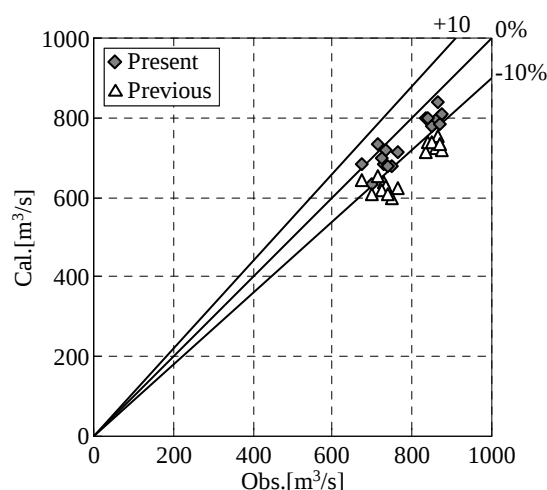


図-8 流量に関する観測値と推定値の相関図

手法では、従来法よりは観測値に近づいているものの、低水路では全般的に過小評価している。一方、流速鉛直分布に関しても、同様な観測値とのずれが従来法・本手法ともに見られる。このように、吹送流の効果を加味した本手法でも、ADCP 観測値と一定のずれが生じているのは、Delft3D による吹送流推定精度、もしくは電波流速計の計測精度が計測上の何らかの不具合があった可能性が考えられ、今後、室内実験も合わせて検討する予定である。以上より、吹送流を考慮することで流速横断・鉛直分布の再現性が向上することは示されており、本手法による流速推定精度は従来手法よりも横断・鉛直分布共に概ね良好であることが示された。

(3) 流量推定結果

次に、本手法における流量推定精度を検証するために、洪水中における流量の観測値と推定値の時間変化を図-7に示す。ここでも、観測値としてADCP移動観測法の結果を用い、推定値としては、従来法と本手法の結果を採用している。これより、従来法と本手法による流量推定結果は、観測値よりも過小評価しているものの、観測値との差は本手法の方が小さいことが分かる。また、観測期間中のピーク流量は、観測値では $874\text{m}^3/\text{s}$ である

のに対して、本手法では $810\text{m}^3/\text{s}$ 、従来法では $719\text{m}^3/\text{s}$ となり、それぞれ観測値よりも 7.3%、15.4%過小評価している。

より定量的に比較・検討するために、流量に関する観測値と推定値の相関図を図-8に示す。ここでは、誤差 0, $\pm 10\%$ に相当する実線を合わせて図示している。これより、従来法の推定値は概ね誤差-10%を下回る範囲にプロットされている。一方、本手法の推定値は誤差 0~-10%の範囲にプロットされている。これらの全てのデータに対して流量推定誤差の RMS (Root Mean Square) 値を計算すると、本手法では 6.5%、従来法では 14.5%となる。これにより、本手法における流量推定精度は従来法よりも高いことが分かる。

5. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 電波流速計による表層流速計測技術と力学的内外挿法 (DIEX 法) による数値解析技術を融合した流量推定手法を提案した。ここでは、吹送流の影響を考慮した形で電波流速計による表層流速データの内外挿技術として適用できるように DIEX 法に用いる同化データを改良している。

(2) 低水路における ADCP データ (水面下 0.35m) と電波流速計データを比べたところ、その差の絶対値 Δu は 0.2~0.4m/s となっており、それは風速 U_w の 4% 程度であることが示された。また、植生が繁茂する高水敷では、今回用いた電波流速計の計測範囲以下 (< 0.5m/s) の流速が生じてデータ欠測となるため、流量算定には、別の流速計を用いるか、流速内外挿法の適切な利用が必要となることが示された。

(3) 本手法における流量推定精度を検証するために、吹送流影響を加味せず電波流速計の計測値をそのまま同化データとして用いる従来法と本手法の流量推定結果と ADCP の観測値を比較した。その結果、従来法の推定値は概ね誤差-10%を下回るのに対して、本手法の推定値は誤差 0~-10%の範囲に入る。全データに対する流量推定誤差の RMS 値は、本手法では 6.5%、従来法では 14.5%となり、本手法における流量推定精度は従来法よりも高いことが明らかとなった。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省河川技術研究開発制度地域課題分野 (研究代表者：二瓶泰雄) によるものである。江戸川において ADCP を用いた現地観測を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生

諸氏、特に鈴木大樹氏、御厨純氏、中山朝陽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) (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.33-58, 1997.
- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 田中昌宏：内湾の生態系シミュレーション, ながれ, Vol.20, pp.354-364, 2001.

(2012. 4. 5受付)