

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

A NEW TECHNIQUE FOR EVALUATION OF CROSS-SECTIONAL VELOCITY FROM POINT-VELOCITY USING DIEX METHOD

柏田仁¹・二瓶泰雄²・高島英二郎³・山崎裕介⁴・市山誠⁵
Jin KASHIWADA, Yasuo NIHEI, Eijiro TAKASHIMA, 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非会員 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)

This study is to present a new technique for evaluation of cross-sectional velocity and discharge from point-velocity data using a dynamic interpolation and extrapolation (DIEX) method, which has been developed to evaluate cross-sectional velocity from line-velocity measured with an H-ADCP. We apply the present method to evaluate cross-sectional velocity and discharge from simulated float velocity at several points which are given from cross-sectional velocity measured with ADCP in Edogawa River under high-flow conditions. The results indicate that the relative errors of velocity and discharge evaluated in the present method are appreciably lower than those in previous method. It should be noted that the relative errors in the present method may keep low even in case of a few number of floats.

Key Words : discharge, DIEX method, float, data assimilation, river flow

1. 序論

我が国の河川流量計測としては、低水流観用のプライス流速計 (もしくは電磁流速計) や高水流観用の浮子測法が 50 年以上にわたり標準法として使用されている^{1), 2)}. これらの方法の採用以降の社会情勢変化や国内外の流速計測技術の大幅な進展により、LSPIV 等に代表される画像解析法や電波流速計, 超音波流速計, ADCP, H-ADCP 等を用いた様々な流量観測手法が提案され, その一部は十分実用化の域に到達しつつある^{3) ~12)}.

このように流速計測技術やその精度については, これまで多くの技術者, 計測機器メーカー, 研究者が精力的に検討している. 流量観測では, 横断面全体にわたり断面直交方向の流速分布を計測する必要があるが, これまでの流速計測技術では, ADCP 移動観測法を除き上記の要請を満たす計測法は存在しない. そのため, 横断面内の限られた範囲の流速データから断面全体の流速分布推定に必要な流速内外挿技術を検討する必要があるが, その研究事例は限定されている.

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に力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and

Extrapolation method, DIEX 法) を提案するとともに, その有効性を河川順流域や感潮域の平常時・出水時において示している^{13) ~17)}. 流速計測技術としては, H-ADCP のような「線」流速計よりは「点」流速計の方が一般的であるため, 複数地点の「点」流速データから「面」データに変換する内外挿技術の開発が強く望まれ, この DIEX 法は有望な手法であると考えられる.

本研究では, DIEX 法の更なる高度化・汎用化を目指して, H-ADCP 以外の様々な流速計測技術に対応させるために, DIEX 法に基づく「点」から「面」流速データ推定法を構築し, その有用性を検証する. 具体的には, ①DIEX 法に, 浮子や電波流速計等による「点」流速データから「面」データに内外挿するためのデータ同化アルゴリズムを導入する. 次に, ②大出水をもたらした台風 0709 号時の江戸川における ADCP による断面流速データ¹⁷⁾ から, 模擬的に浮子が計測した時に得られる「点」流速データを作成し (以下, 模擬浮子データ), この模擬浮子データを用いて本手法により点流速データから面データを算出し, 本手法や区分断面の面積と流速の積の総和を流量とする従来法による流速・流量の推定精度を示す.

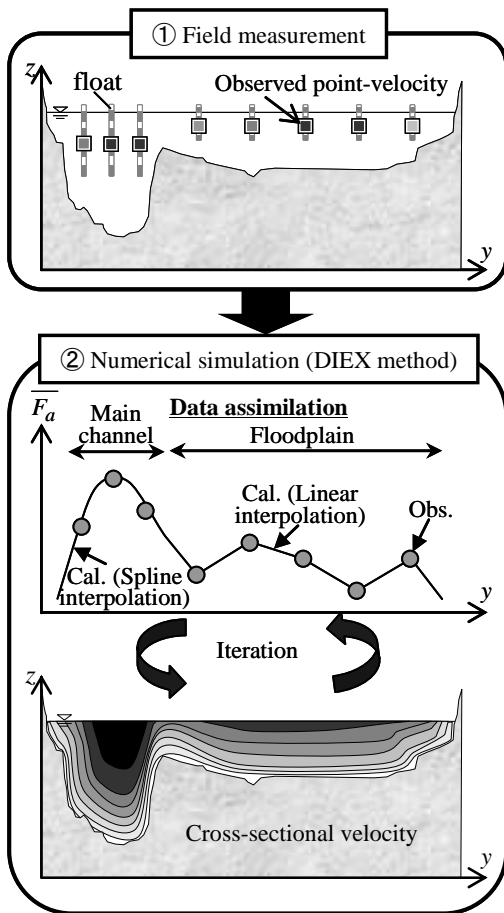


図-1 本手法による流量算定手順

2. 本手法の概要

(1) 基本構成

図-1は、本手法による流量算定までの基本手順を示している。まず、①の流速計測では、浮子や電波流速計等により、横断面内の複数地点における「点」流速を計測する。同図中には、浮子により計測される表層流速の点データが示されているが、例えば電波流速計の場合にはこれが表面流速に代わることになる。次に、②の数値計算では、①で得られた「点」流速データを同化データとし、DIEX法に基づいて横断面内を対象とする河川流シミュレーションを行い、横断面全体の「面」流速データや流量を算定する。

(2) DIEX法の概要と改良

上記②において用いるDIEX法の概要やその改良点について、以下に記述する。DIEX法では、横断面を計算対象範囲とし、基礎方程式としては、簡略化された3次元運動方程式として、省略された項を補うために付加項 F_a を導入する¹³⁾。この付加項 F_a を算出するには、水深平均された運動方程式を用いる。

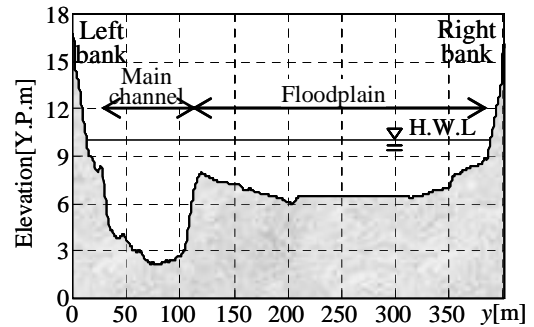
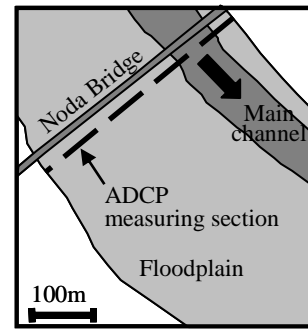


図-2 対象サイト (江戸川・野田橋)

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

ここで、 y は横断方向、 \bar{u} は主流方向水深平均流速、 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。本研究では、低水路、高水敷それぞれのマンニングの粗度係数を $n=0.025, 0.040 \text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。付加項 F_a の鉛直分布は一律とする。この式 (1) 中に流速観測値を代入し求められた付加項を横断面内で内外挿し、観測範囲内外の付加項を算出している。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¹³⁾を参照されたい。

これまでのDIEX法では、「線」流速データを同化していたが、本論文では複数地点の「点」流速データを同化させるために、データ同化のアルゴリズムを改良する必要がある。まず、同化データの鉛直高さを、「点」流速データの計測位置に変更する。本論文で対象とする浮子流速の計測高さとしては、浮子の吃水中央とする。次に、空間的に粗な「点」流速データの同化手法としては、上記と同じく式 (2) より付加項を求めるため、横断面に内外挿する際には、全断面にわたりそのまま内外挿すると不自然な結果が生じる。そこで、内外挿範囲を低水路と高水敷に分け、図-1に示すように低水路ではこれまでと同様に3次スプライン補間を行うが¹³⁾、高水敷では線形補間を施す。これは、高水敷では低水路と比べて

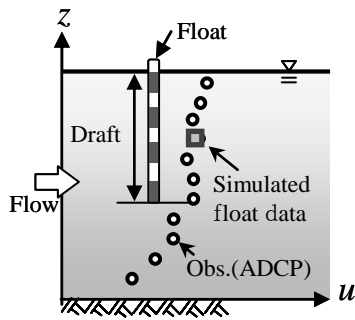


図-3 模擬浮子データの作成要領

観測データの横断間隔が極めて粗く、かつ、植生の繁茂状況により流速横断構造が複雑に変化しているため、これまでと同様に付加項の内外挿をスプライン補間で行うと不自然な付加項の横断分布となってしまう。それを回避するため、ここでは高水敷において付加項の線形補間を施すこととする。なお、低水路と高水敷の境界部においても、付加項を線形補間する。

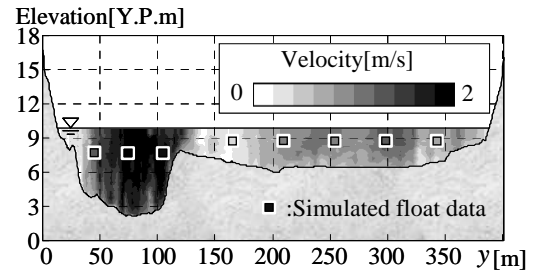
3. 模擬浮子データの作成方法

本手法の有効性を詳細に検証するために、実際の浮子観測データを用いずに、ADCP移動観測法による断面流速データ¹⁷⁾から模擬浮子データを作成し、本手法の流速・流量推定精度を検証する。ADCP移動観測が行われた対象サイトは、図-2に示す江戸川中流部・野田橋(河口より39.5km地点)である。ここでは大出水をもたらした台風0709号(2007/9/7, 8)を対象として、ADCP移動観測法による断面流速データ及び流量データが取得された(データ数 $n=37$)。なお、観測方法の詳細については二瓶ら¹⁰⁾を参照されたい。

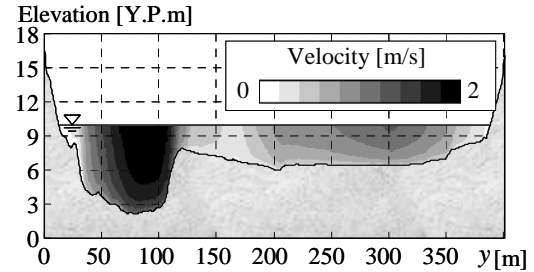
このADCPデータから、模擬浮子データを作成する際には、図-3のように、浮子の吃水以浅の流速値を平均したものを浮子流速とし、その測定高さは前述したように吃水中央とする。なお、浮子長さより修正係数は、水深に合わせて変化させている¹⁾。浮子の投下本数の設定としては、本観測サイトの緊急法と標準法において用いられる浮子本数を参考にして、低水路では3, 4, 5, 6本の4ケース、高水敷では右岸側のみ3, 5, 8, 14本の4ケース、全ての組み合わせを対象とした計16ケースとし、浮子流速データの空間解像度の影響を抽出する。このうち、低水路3本、高水敷5本のケースをreferenceケースとして詳細に検討する。

このような模擬浮子データを用いて、DIEX法及び従来法による流速・流量推定を行い、データ作成に用いたADCPデータの流速および流量と比較する。この従来法では、修正係数を用いて浮子流速から水深平均流速を算出し、各区断面内において流速を一様に与える。

4. Referenceケースにおける結果と考察



(a) 観測値



(b) 本手法による推定値

図-4 横断面内の流速コンター (2007/9/7 20:35)

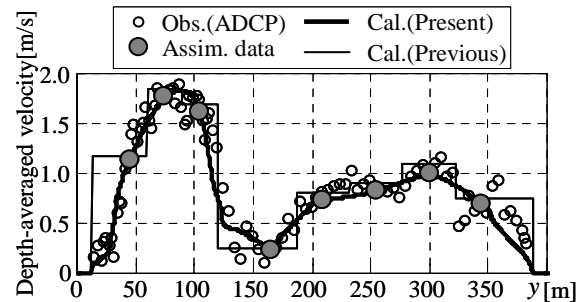


図-5 水深平均流速横断分布の観測値と推定値の比較 (2007/9/7 20:35)

(1) 流速

本手法の有効性を検証するために、referenceケース(浮子本数が低水路3本、高水敷5本)を例に、本手法による流速・流量推定精度を詳細に示す。まず、本手法の流速推定精度を調べるために、台風0709号出水のピーク流量時(1,459 m^3/s , 2007/9/7 20:35)における横断面内の流速コンターの観測値及び本手法による推定値を比べたものを図-4に示す。また、図中の観測値には、模擬浮子データ作成に用いられた位置とその流速の大きさも合わせて図示されている。この観測値を見ると、低水路内における流速は右岸側がやや大きく、また、高水敷では流速レベルの空間変化が大きい。本手法による流速分布の推定値は、空間解像度の粗い「点」データを横断面全体にスムーズに変化する「面」データに変換できている。ナッジングスキーム等の同化手法では、空間解像度の粗い観測値をスムーズに同化できないケースが多い¹⁸⁾。DIEX法ではこれまで「線」データを「面」データにスムーズに内外挿し得たことに加えて¹³⁾、本論文では上記のように「点」データから「面」データへも良好に内外挿することに成功していることが分かる。また、観測値と推定値の流速分布パターンを比べると、低水路では

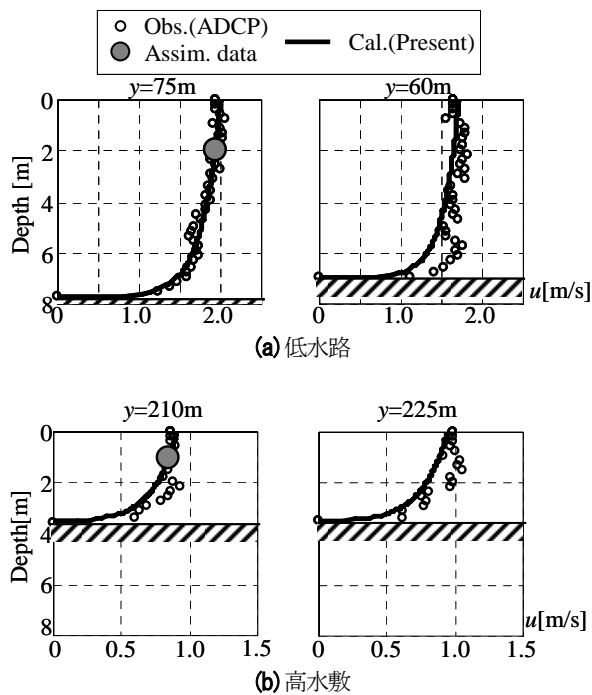


図-6 流速鉛直分布の観測値と推定値 (2007/9/7 20:35)

両者は概ね類似しているものの、高水敷では推定値は観測値ほどの空間変動状況を再現できていない。

より詳細に観測値と推定値の流速分布を比較するために、図-4と同じ流量ピーク時における水深平均流速の横断分布を図-5に示す。ここでは、観測値と本手法による推定値と共に、従来法による推定値も表示している。また、観測値のうち同化データに用いられたものは大きな○印で図示している。これより、本手法による推定値は、高水敷ではやや過小評価しているものの、低水路ではほぼ一致している。一方、従来法では、区分された8つの断面において同化データの流速が一樣となるため、流速の不一致が目立ち、特に、低水路左岸側や高水敷右岸側の水際付近などで顕著となっている。この実測値に対する本手法と従来法の相対差のRMS (Root Mean Square) 値を計算すると、本手法では0.15m/s、従来法では0.33m/sとなり、本手法による流速推定誤差が従来法の半分以下となっている。

また、同時刻における流速鉛直分布の観測値と推定値を図-6に示す。ここでは、低水路と高水敷において、同化データのある地点(横断距離 $y=75, 210\text{m}$)と無い地点($y=60, 225\text{m}$)の結果を例示している。これより、同化データのある地点では流速鉛直分布の推定値は観測値と概ね一致している。また、同化データの無い地点では、水深平均流速が若干ずれる場合があるものの、鉛直分布形状は概ね一致している。以上より、本手法の流速推定精度は、横断・鉛直分布共に概ね良好である。

(2) 流量

次に、本手法の流量推定精度を検証するために、流量の観測値と計算値の時間変化を図-7に示す。ここでは、

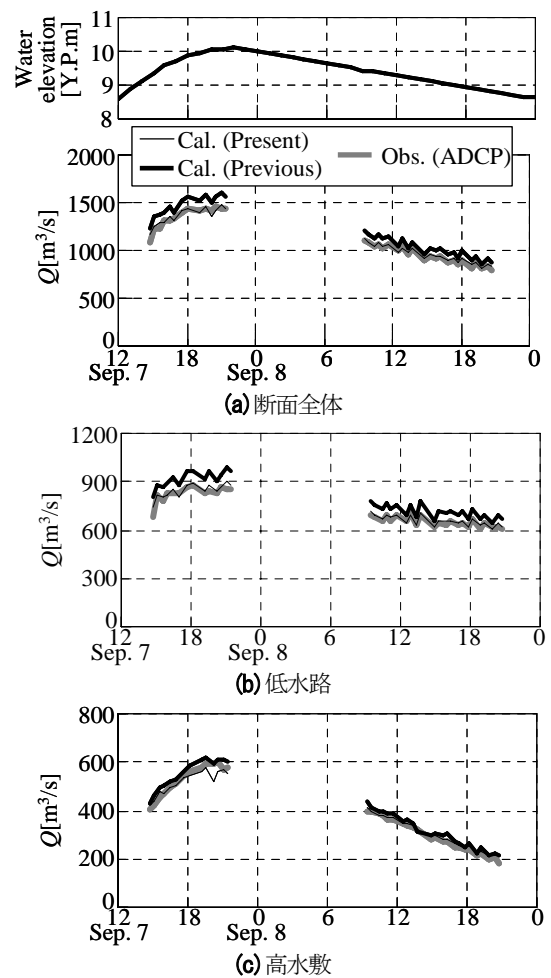


図-7 流量の時間変化

断面全体及び低水路、高水敷に分けており、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、断面全体では、本手法の推定値は観測値と概ね良好に一致しているものの、従来法はやや過大評価していることが分かる。類似した傾向は低水路の流量推定値では顕著となっている。一方、高水敷では、両方の推定値の差は相対的に小さくなっている。

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。ここでも、断面全体と低水路、高水敷に分けて、誤差0, $\pm 10\%$ に相当する実線も合わせて図示している。これより、断面全体の流量については、従来法の推定値は概ね $\pm 10\%$ 以内の相対差に入っているものの、本手法の推定値の方が誤差0%実線の周辺にプロットされている。これらの全体データに対して求められた流量推定誤差のRMS値は、本手法では2.6%、従来法では8.9%となり、本手法により大幅に推定精度が向上している。同様に、低水路と高水敷における流量推定誤差のRMS値は、本手法では低水路2.6%、高水敷5.4%、従来法では低水路10.3%、高水敷7.5%となっている。これより、本手法における流量推定精度は低水路と高水敷共に従来法よりも高いことが分かる。特に、本手法では低水路における流量推定精度の向上が顕著であり、このことが、本手法における断面全体

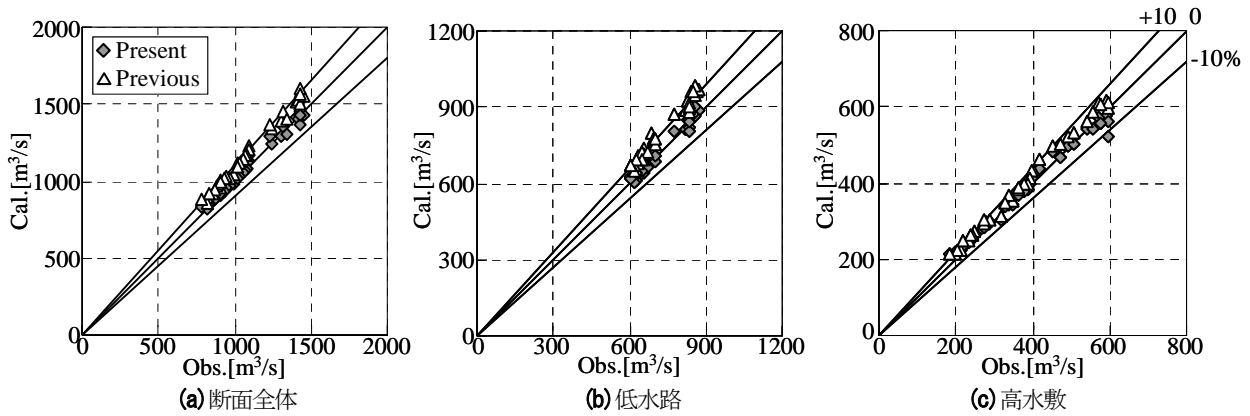


図-8 流量に関する観測値と計算値の相関図

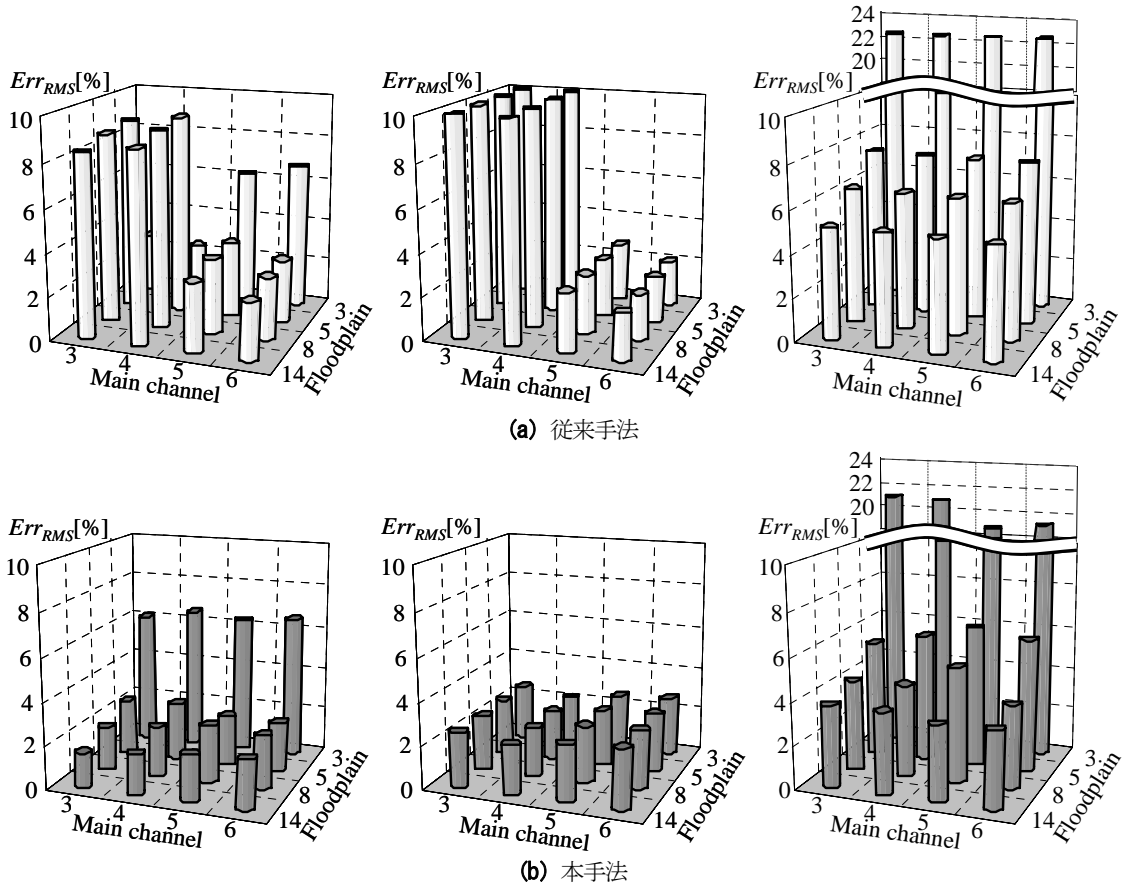


図-9 様々な浮子投下本数条件における流量推定誤差 Err_{RMS} (左から断面全体, 低水路, 高水敷の結果)

の流量推定値の高精度化に大きく寄与しているものと考えられる。

5. 浮子投下本数が流量推定精度に与える影響

広範な条件下において本手法の有効性を検証するために、様々な浮子投下本数条件下の流量推定精度について検討する。図-9は、浮子投下本数を低水路で4ケースと高水敷4ケースを組み合わせさせた全16ケースにおける本手法と従来法の流量推定誤差のRMS値 Err_{RMS} を示している。ここでも、断面全体、低水路、高水敷と分けている。なお、従来法では、区分断面に分けて流量を算出しているため、低水路と高水敷の流量算定結果にはそれぞれ高

水敷や低水路の浮子本数は関係ないことに注意されたい。

従来法の結果に着目すると、断面全体の場合では、一般的には浮子本数が少ないほど流量推定誤差は大きく概ね8%以上となっている。このように浮子本数が少ないと流量推定誤差が増大する要因は、低水路の流量推定誤差が大きいことに起因している。また、浮子本数を低水路6本、高水敷14本という標準法に準拠した場合には流量推定誤差は2.6%と非常に小さく、従来法においても適切な浮子投下本数を確保すれば、より高精度の流量観測が実現できることが分かる。

一方、本手法に関しては、高水敷の浮子本数が3本の場合において、高水敷の大きな流量推定誤差に起因して断面全体の誤差が6%強となるが、それを除くと概ね2~

3%となり、流量推定精度は概ね高いことが分かる。高水敷の浮子本数3本の場合には、高水敷での流量推定誤差が20%を越えており、このことは従来法でも同様である。これは、図4、5に示したように、高水敷における流速の空間変動が大きいこと、幅250mに及ぶ高水敷においてわずか3本の浮子ではこれらの変動パターンを再現できていないためである。また、本手法における推定結果について特筆すべきことは、低水路の浮子本数に関わらず流量推定誤差が2~3%と極めて小さいことであり、それが従来法よりも大きく改善された部分である。このように、本手法により、「点」流速データを「面」データに良好に変換できると共に、流速・流量推定精度が良好であることから、本手法の有効性が検証されると共に、本手法の優位性は浮子本数の少ないときに大きく発揮されることが明らかとなった。

6. 結論

本論文では、これまでH-ADCP計測データの内外挿技術として開発されてきたDIEX法をH-ADCP以外の様々な流速計測技術に応用させるために、DIEX法に基づく「点」から「面」流速データ推定法を構築すると共に、本手法の有用性を検証した。得られた主な結論は、以下の通りである。

1) DIEX法において「点」流速データから「面」データを得るために、DIEX法における基礎方程式などはこれまでと同様であるものの、データ同化アルゴリズムを改良し、特にデータ同化時に求める付加項の空間内挿関数について修正し、「点」から「面」流速データの推定が可能なDIEX法を構築した。

2) 台風0709号時の江戸川において行われたADCP観測データから抽出された“模擬浮子データ”を用いて、本手法と従来法による流速・流量推定を実施したところ、referenceケースの流速推定誤差に関しては、本手法は従来法の半分以下となった。また、流量推定精度としては、同じreferenceケースでは、本手法の流量推定誤差のRMS値は2.6%であり、従来法の8.9%よりも大幅に減少しており、本手法により流速・流量推定精度が大きく向上していることが分かる。

3) 様々な浮子投下本数条件下における流量推定精度を調べた結果、従来法では浮子本数が少ないほど流速推定誤差が大きい。一方、本手法では、高水敷の投下本数3本のケースを除き、浮子投下本数と関係なく流量推定誤差は2~3%と小さく、本手法の有効性が明らかとなった。このことは、本手法により、わずかな「点」流速データでも高精度に「面」流速データや流量を推定できることを示しており、本手法は今後の流量観測の省コスト化や高効率化、高精度化に大きく寄与するものと考えられる。

度地域課題分野（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである。ここに記して謝意を表す。

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) 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.
- 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) 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.
- 12) 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, 河川技術論文集, Vol.11, pp.243-248, 2005.
- 13) 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.
- 14) 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, WOOD20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) Nihei, Y. and Kimizu, A.: Evaluation of river velocity and discharge with a new assimilated method, *Int. J. River Basin Management*, Vol.4, No.1, pp.1-4, 2006.

謝辞：本研究の一部は、国土交通省河川技術研究開発制

(2011.5.19受付)