

技術研究開発テーマ名	河川流速の力学的内外挿法（DIEX法）に基づく流速・流量・粗度推定手法の構築	
研究代表者		
氏名	所属・役職	
二瓶 泰雄	東京理科大学工学部土木工学科 准教授	
共同研究者		
氏名	所属・役職	
高島 英二郎	前 関東地方整備局江戸川河川事務所・事務所長	
山下 武宜	関東地方整備局江戸川河川事務所・事務所長	
武藤 健治	前 関東地方整備局江戸川河川事務所・調査課長	
山川 良徳	前 関東地方整備局江戸川河川事務所・調査係長	
柏田 仁	パシフィックコンサルタンツ株式会社・技師	
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>背景・課題</p> <p>(1) 流量観測と流速計測法の現状と課題</p> <p>(2) 流速内外挿技術の現状と課題</p> <p>技術研究開発の目的</p> <p>技術研究開発の内容・成果</p> <p>(1) 「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の導入</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 基本構成 2) DIEX法の概要と改良 3) 模擬浮子データの作成方法 <p>(2) 本手法と従来法による流速・流量の推定精度</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 検証成果 ~ Referenceケースにおける結果と考察 ~ 2) 検証成果 ~ 浮子投下本数が流量推定精度に与える影響 ~ <p>(3) 電波流速計の計測精度・特性に係る検証、及び電波流速計とDIEX法による流量推定手法</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 電波流速計の概要とその課題 2) 電波流速計による観測値を用いたDIEX法の改良ポイント 3) 基本構成 4) 吹送流成分の算出法 5) 現地観測・数値計算の概要 6) 結果と考察 <p>今後の課題・展望</p> </div>		
背景・課題		
(1) 流量観測と流速計測法の現状と課題		
<p>流量を算出する際、河床形状、水位、流速横断面分布の観測データが必要である。このうち、河床形状と水位に対しては、以下の仮定をしている（図-1）。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 河床形状は洪水時のリアルタイム計測が現状では困難であるため洪水前後で変化しない ● 流量を算出する横断面における水位は横断方向に一様である 		

このようなことから，洪水時の高水流量観測は，実質的には，流速観測とも考えられる．

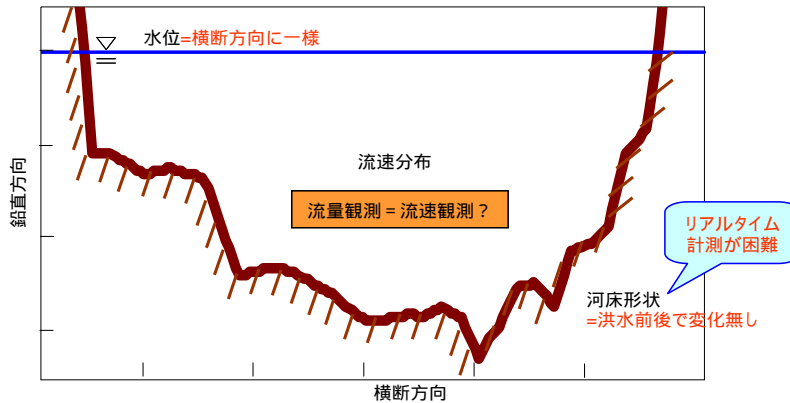


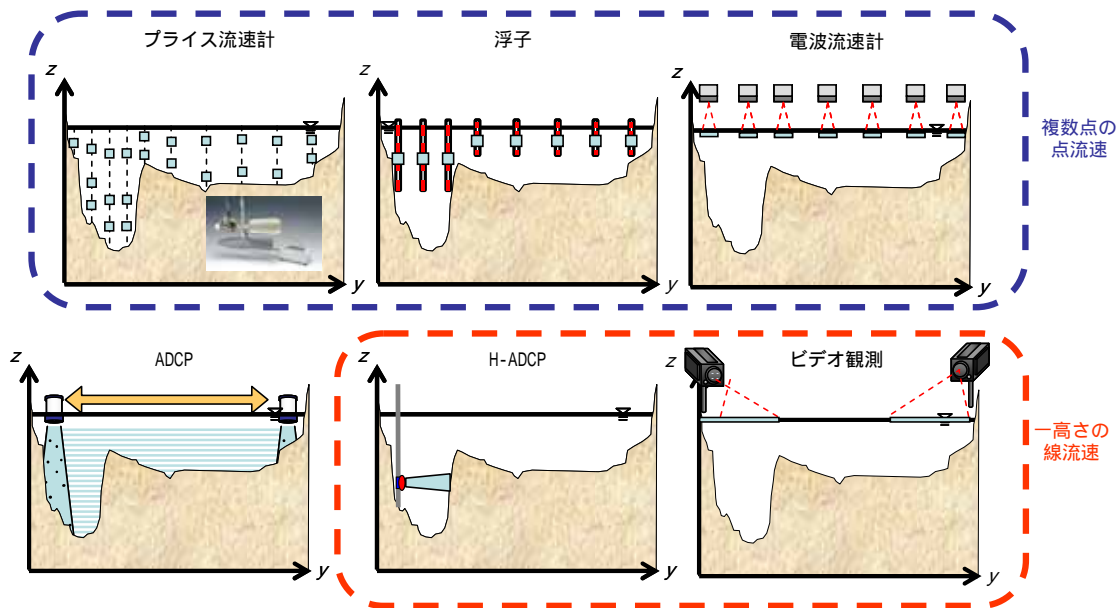
図 - 1 流量観測に必要な項目

現在の一般的な「流速」観測法は，以下のように大別される（図 - 2）．

- 複数点の「点」流速を計測（プライス流速計，浮子，電波流速計など）
- 一高さの「線」流速を計測（H-ADCP，ビデオ観測）
- ほぼ全ての横断面内の「面」流速を計測（ADCP）

高水流量観測において得られた「点」流速データあるいは「線」流速データから，「面」流速データを求める必要がある．

このようなことから，流量を算出するには，流量観測と流速内外挿法を共に考える必要がある．



「点」 or 「線」流速データ → 「面」流速，流量

図 - 2 一般的な「流速」観測法

(2) 流速内外挿技術の現状と課題

流速の内外挿法では、流速データの鉛直分布と横断分布を考える必要がある。鉛直分布に対しては、『河川砂防技術基準（案）同解説 調査編』に基づいて、区分断面の水深によって使用する浮子の種類や、浮子流下速度から対象とする区分の水深平均流速を算出するための更正係数値が定められている（表 - 1）。一方、流速の横断分布に対しては、区分断面内で（水深平均）流速は一樣であるという仮定をしている（図 - 3）。

表 - 1 更正係数

浮子番号	1	2	3	4	5
水深 (m)	0.7 以下	0.7 ~ 1.3	1.3 ~ 2.6	2.6 ~ 5.2	5.2 以上
吃水 (m)	表面浮子	0.5	1.0	2.0	4.0
更正係数	0.85	0.88	0.91	0.94	0.96

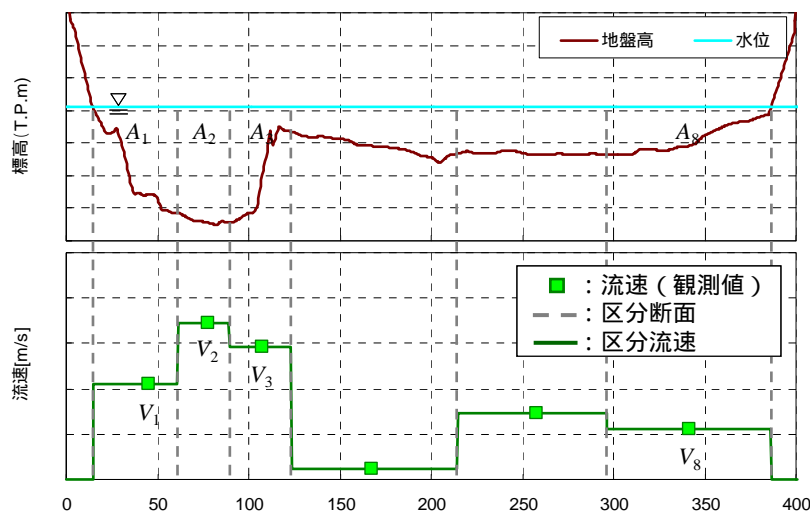


図 - 3 現行の流速横断分布の内外挿法（区分求積法）

これまでの流量観測技術は流速計測機器の開発に重点が置かれており、これまで流速計測技術に多くの技術者や計測機器メーカーが精力的に検討している。しかしながら、観測で得られた「点」流速あるいは「線」流速の内外挿技術に対する研究事例は限定されている。

このようなことから、観測で得られた「線」流速あるいは「点」流速を「面」流速に内外挿でき、かつ、その「面」流速が水理学的条件を満たすような内外挿手法が必要である。

技術研究開発の目的

研究代表者らは、図 - 2 に示した 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（平成 20 年度土木学会論文賞受賞）。このように、流速観測値と数値解析の融合技術は今後の河川管理技術の大きな柱になるものと考えられ、DIEX 法はそのための有力なツールの一つになるものと期待される（図 - 4）。

一方、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、その有用性を検証した。具体的には、以下のとおりである。

- (1) DIEX 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．
- (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．
- (3) 近年実務の高水流量観測において浮子以外の流速計測手法として多く用いられている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，実河川における洪水時にて電波流速計と 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，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．

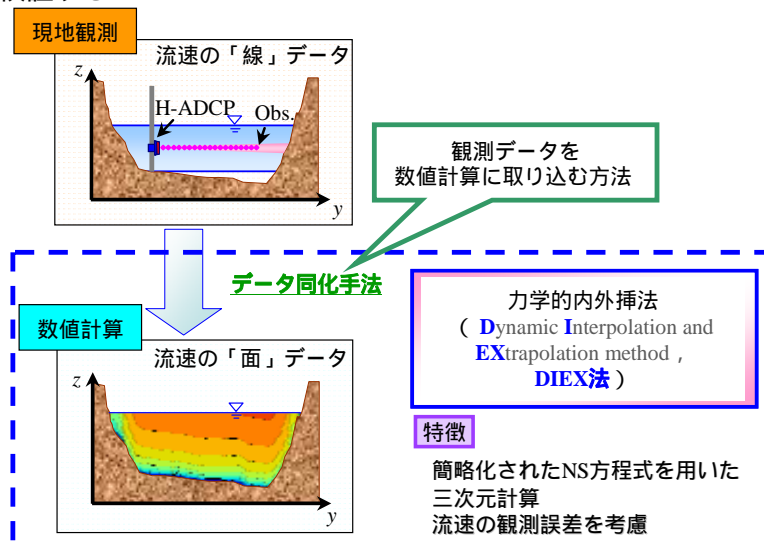


図 - 4 DIEX 法と H-ADCP による流量モニタリング手法の基本構成

技術研究開発の内容・成果

(1) 「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の導入

1) 基本構成

図 - 5 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，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，の数値計算では，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．

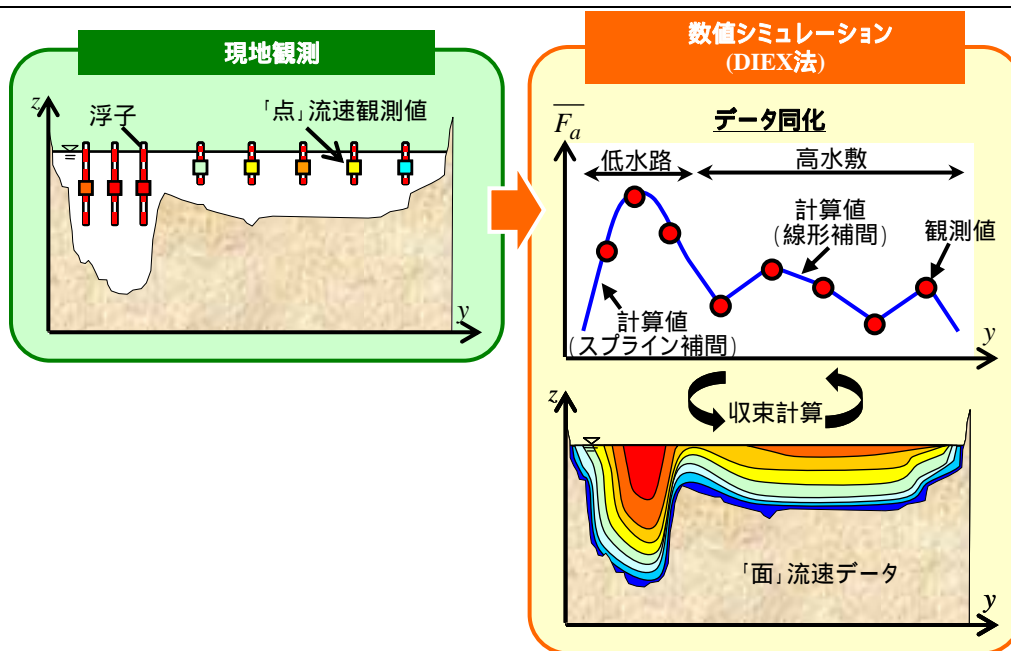


図 - 5 浮子による「点」流速を用いた流量算定手順

2) DIEX 法の概要と改良

上記において用いる 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。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。

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

ここで、 y は横断方向、 \bar{u} は主流方向水深平均流速、 \bar{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 Manning 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。上式(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³⁾を参照されたい。

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.

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-5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、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になってしまう。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 - 6** 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 $n=37$ ）。

この ADCP データから、模擬浮子データを作成する際には、**図 - 7** 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、浮子長さや修正係数は、水深に合わせて変化させている。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、各区分断面内において流速を一様に与える。

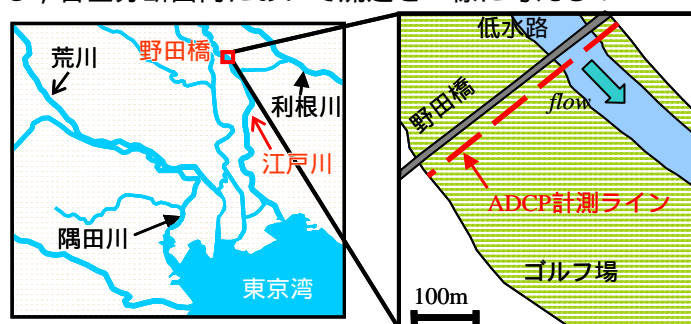


図 - 6 観測対象サイト（江戸川 野田橋）

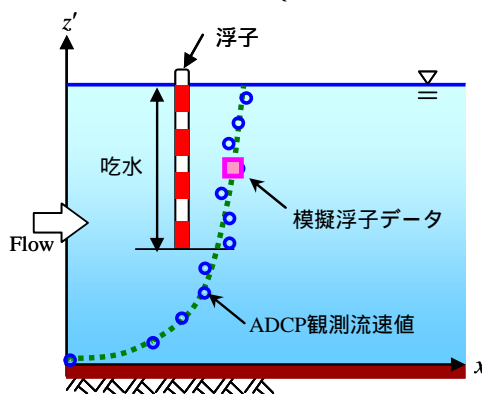


図 - 7 模擬浮子データの作成要領

(2) 本手法と従来法による流速・流量の推定精度

1) 検証成果 ~ Reference ケースにおける結果と考察 ~

(ア) 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（ $1,459\text{m}^3/\text{s}$ ，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 - 8** に示す。また、同図中の観測値には、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。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、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。

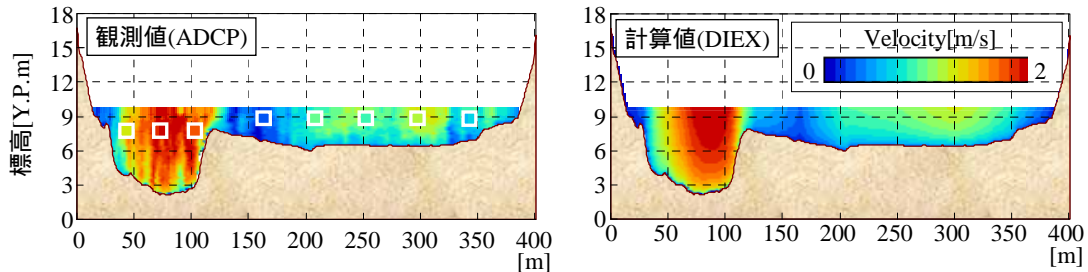


図 - 8 横断面内の流速コンター (2007/9/7 20:35)

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 - 8 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 - 9 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。

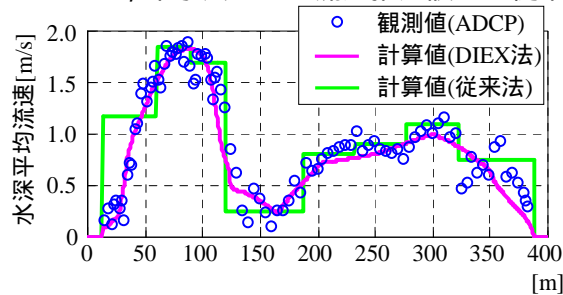


図 - 9 水深平均流速横断分布の観測値と推定値の比較

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 - 10 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。

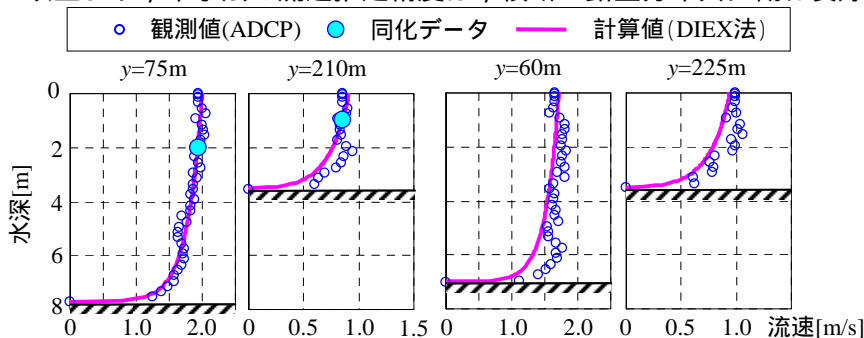


図 - 10 流速鉛直分布の観測値と推定値 (2007/9/7 20:35)

(イ) 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 - 11 に示す。

ここでは、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 - 12 に示す。ここでも、断面全体と低水路、高水敷に分け、誤差 0、±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±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。

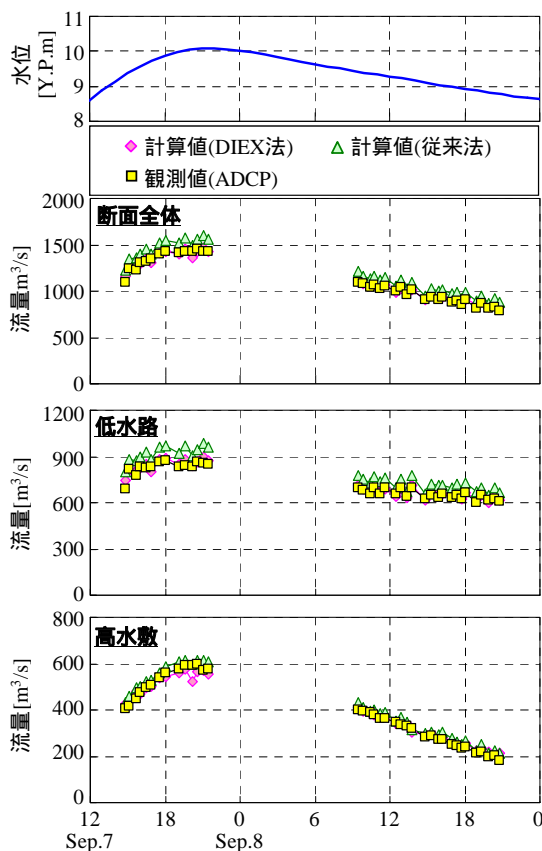


図 - 11 流量の時間変化

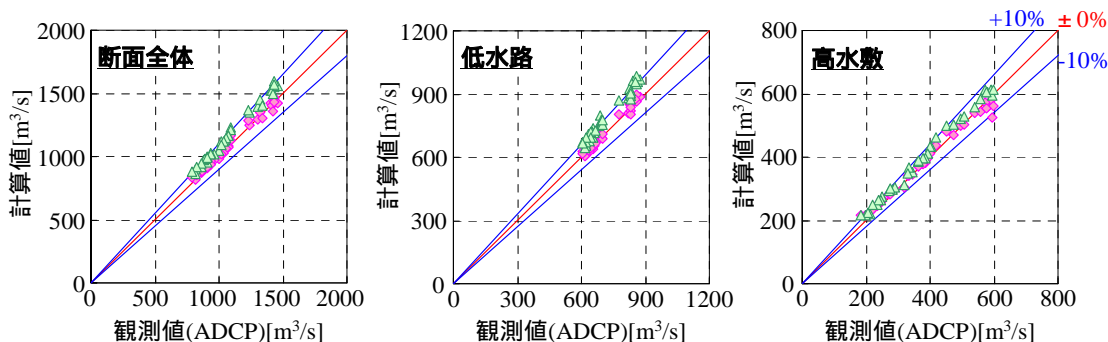


図 - 12 流量に関する観測値と計算値の相関図

2) 検証成果 ~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-13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、全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-8, 9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。

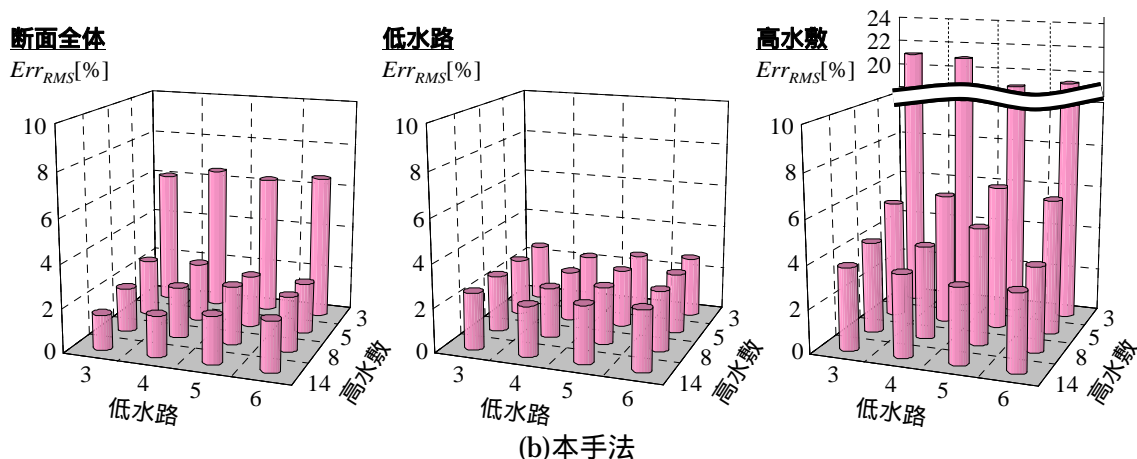
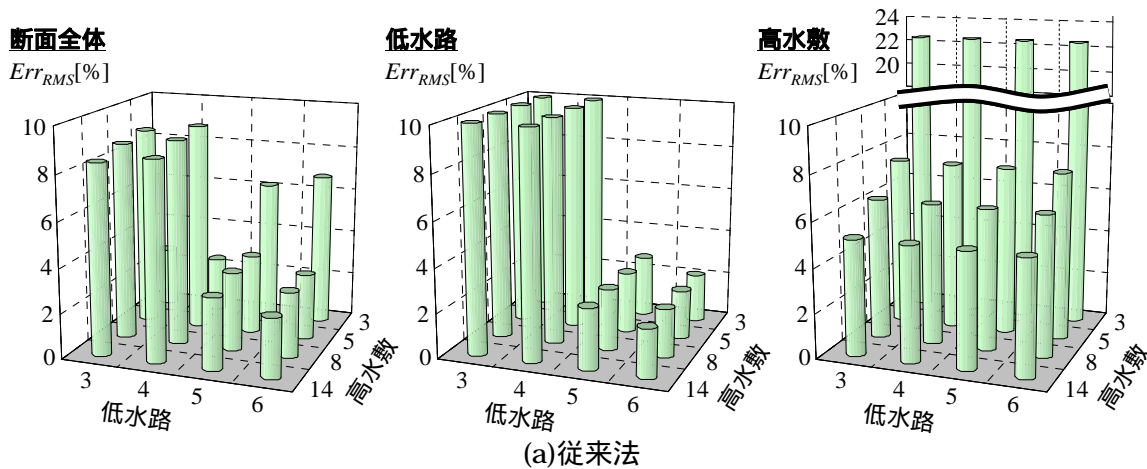


図-13 様々な浮子投下本数条件下における流量推定誤差 Err_{RMS} (左から断面全体, 低水路, 高水敷の結果)

(3) 電波流速計の計測精度・特性に係る検証，及び電波流速計と DIX 法による流量推定手法

1) 電波流速計の概要とその課題

河川流量計測を念頭に置いた現地河川用流速計測技術のうち電波流速計は，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（写真-1）．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ている．



写真-1 可搬タイプの電波流速計による観測の様子

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，一般に，水深平均流速と表面流速の比である更正係数を用いて，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）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．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．

そこで，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（DIX 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，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，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 DIX 法を改良し，この DIX 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) 電波流速計による観測値を用いた DIX 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（DIX 法）を改良する．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，DIX 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 DIX 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．

3) 基本構成

図-14 は，電波流速計による点流速計測と DIX 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，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となる風向・風速を橋上において風向風速計を用いて計測する．この DLEX 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 Delft3D 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 DLEX 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．

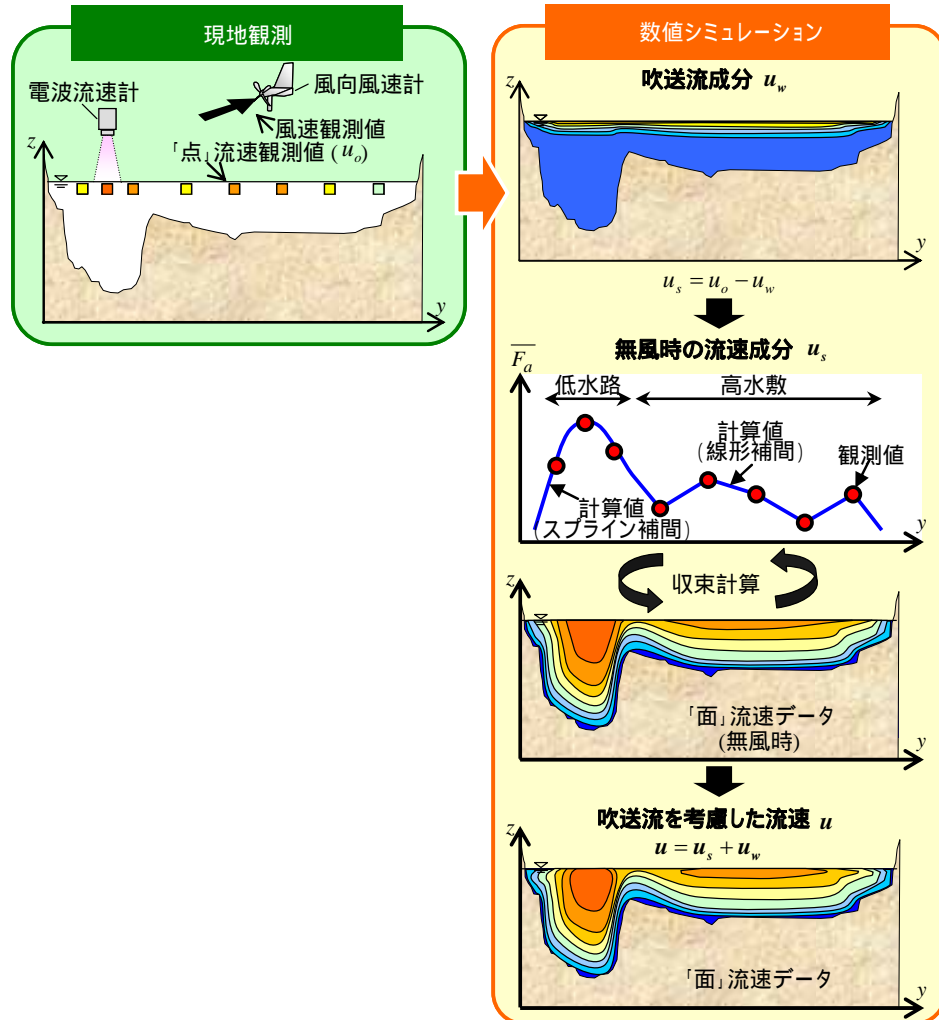


図 - 14 吹送流を考慮した流量推定手法の算定手順

4) 吹送流成分の算出法

上記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， $k-\varepsilon$ 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．

5) 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て電波流速計と ADCP による同時流量観測を行う．観測対象サイトは，図 - 6 に示すように，江戸川中流部・野田橋（河口より 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

(株製)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。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(株)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-2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。

表-2 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

得られた電波流速計データ及び吹送流計算結果を用いて、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)を参考にして植生抵抗を与えている。

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

6) 結果と考察

(ア) 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-15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)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不自然な一定値を取っていることが分かる。このため、このような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。

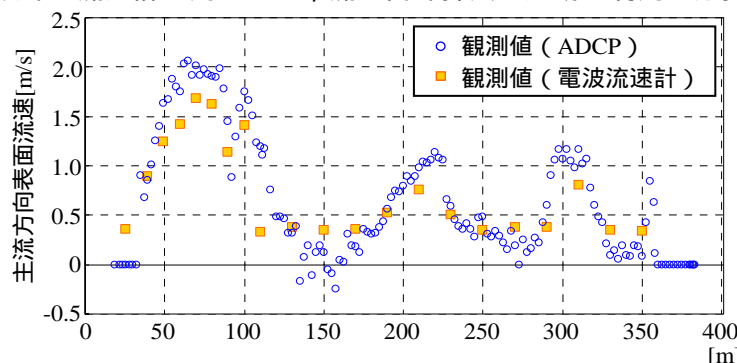


図-15 電波流速計及び ADCP による主流方向表面流速の横断分布 (9/4 11:15, 風向: 上流向き, 風速: 9.1m/s)

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 - 16 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。

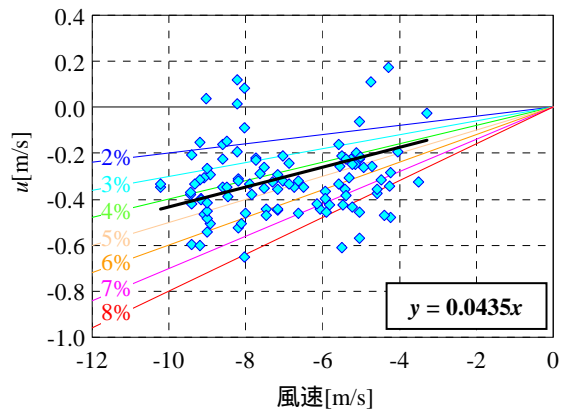


図 - 16 流速差 Δu （=電波流速計観測値 - ADCP 観測値）と風速の相関図

（イ）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流方向流速コンターを図 - 17 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。

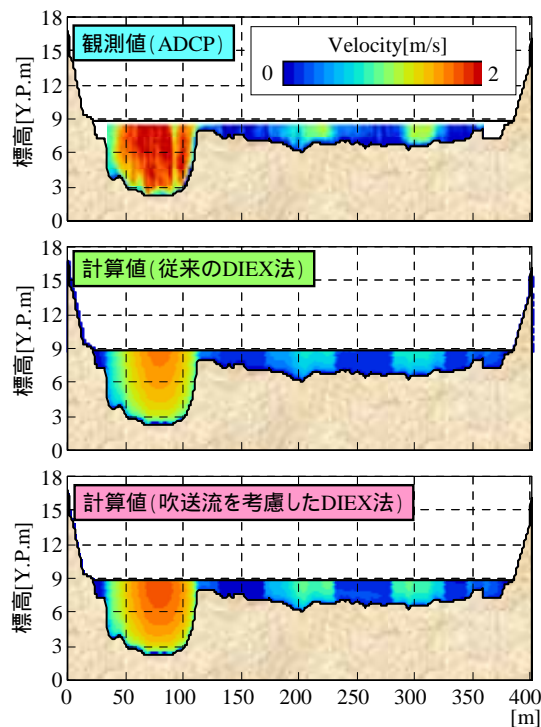


図 - 17 横断面内における主流方向流速の観測値（ADCP）と推定結果（従来法と本手法）（2011/9/4 11:15）

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 - 18 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。

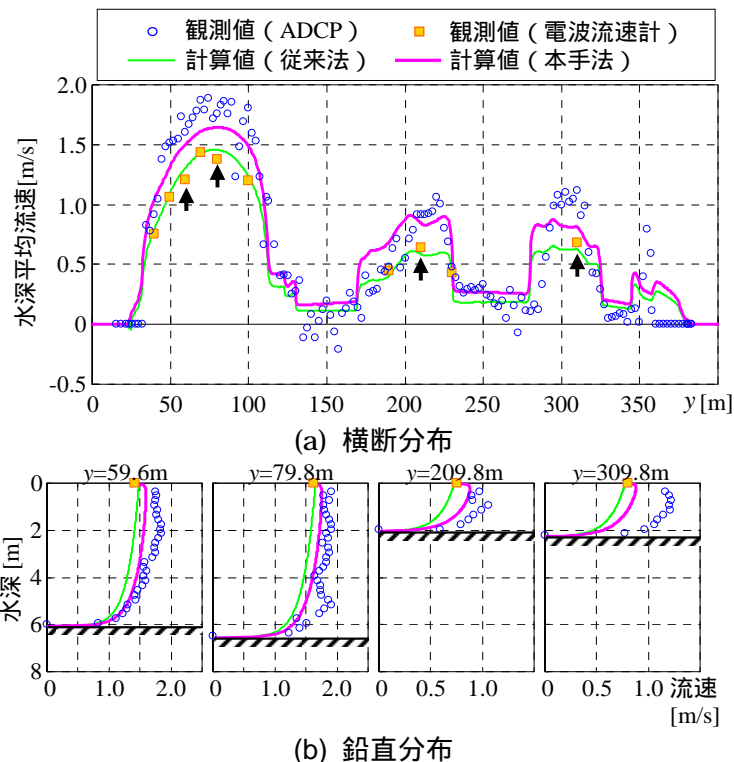


図 - 18 主流方向流速の横断・鉛直分布に関する観測値と推定値の比較 (2011/9/4 11:15)

(ウ) 流量推定精度

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 - 19 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。

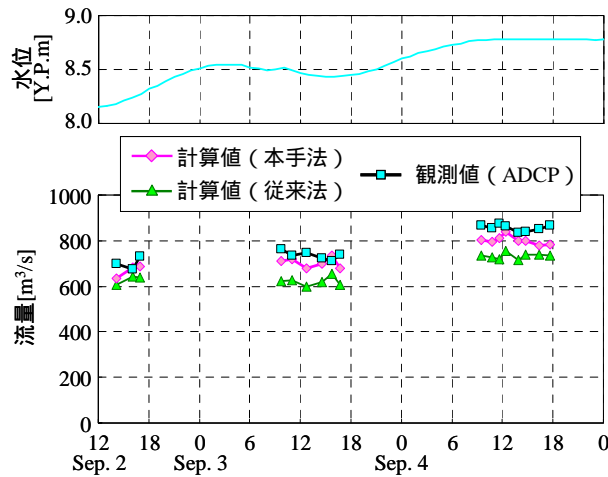


図 - 19 流量に関する観測値と推定値の時間変化

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 - 20 に示す。ここでは、誤差 0, ±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。

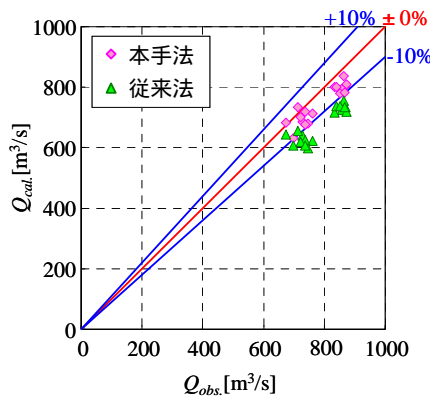


図 - 20 流量に関する観測値と推定値の相関図

今後の課題・展望

本技術研究開発において、高水流量観測時に用いられている浮子や電波流速計といった流速計測機器から得られた「点」流速から水理学的条件を満足する「面」流速を得る内外挿手法を開発した。本手法によって、現行の高水流量観測手法を変えることなく、高精度な流量を算出することが可能になると考えられる。

一方、多くの直轄河道での高水流量観測において、河道内の樹林化が大きな課題になっている。河道内の樹林化は全国的に進行しており、流下阻害や礫河原喪失などの様々な問題が生じている。そのため、河道内樹林化に対応した河川管理を行う必要があり、その一つに河道内樹林化を考慮した流量観測法の見直しが挙げられる。樹木群内や背後では死水域が形成され、流速横断分布はより複雑なものになるため、洪水流量観測法として標準的な浮子は死水域を流下できないという根本的な問題があり、流速横断分布を正確に捉えられず、結果として流量計測精度は低下する恐れがある。類似した問題は、低流速時の計測限界があるポータブル電波流速計にも当てはまる。この問題を解決するには、ADCP を用いて断面全体の流速計測を行うことが考えられるが、実務ベースでは ADCP 導入はコスト面で難しい。

このため、安価で計測が容易な浮子や電波流速計を活用しつつ、河道内樹林化に対応した流量観測技術の高精度化・高効率化が必須である。今後、浮子や電波流速計による流速計測法と DLEX 法を組み合わせ、樹林化した河川に適した高精度・高効率性の流量観測技術を開発することが求められている。