

〔特集・実河川における洪水観測技術〕

## 流速内外挿法に着目した河川流量観測技術の展開

\*東京理科大学 理工学部

二瓶 泰雄†

パシフィックコンサルタンツ株式会社

柏田 仁

## A New Monitoring Technology for River Discharge Based on an Interpolation and Extrapolation Technique of Velocity

Yasuo NIHEI, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

Jin KASHIWADA, River Department, Pacific Consultants Co., Ltd.

## 1 はじめに

河川計画・管理を行う上では、流量は最重要指標の一つである。そのため、古くから河川流量観測が継続的・連続的に行われている<sup>1)・2)</sup>。ある断面を単位時間あたりに通過する流体の体積である流量を計測・算定する上では、対象横断面における断面積と「流速」データが必要であり、前者の断面積を求めるには「水位」と「河床形状」の横断分布を知る必要がある。

このうち、水位計測は上記の三項目の中で最も容易であり、多くの河川において自動連続モニタリングが行われている。ただし、「水位は横断面内で一様である」という仮定・前提に立ち横断面内の一地点のみで計測されるのが一般的であるが、洪水時の水位横断変化の存在も報告されている<sup>3)・4)</sup>。また、河床形状については、横断面全体での自動連続計測技術が確立されていないため、定期的に行われる横断測量結果が与えられることが多い。そのため、洪水時の流量算定にあたり、大きく変化しているものと考えられる河床高さ変化は考慮されないのが一般的である。このように、水位・河床形状計測には、その精度や技術、計測方法に問題が存在するが、これらの扱いは現在の流量観測では概ね共通している。このため、「流量」観測方法を分類することは、残りの「流速」観測方法の分類を意味する。

**表1**は河川流量観測に用いられる主な流速計の計測原理と測定対象を示す。我が国における標準観測法としては、低水時ではプライス流速計や電磁流速計、洪水時では浮子が用いられる<sup>2)</sup>。また、近年の計測技術の進展により、画像解析法や電波流速計、ADCP、H-ADCP、超音波流速計等が実用化されつつある<sup>5)~17)</sup>。これらの流速計の技術開発や精度検証については、様々な研究者や技術者、計測機器メーカーが精力的に実施している。河川流量計測には、横断面全体にわたる断面直交方向の流速分布を必要とするが、ADCP移動観測法<sup>10)~12)</sup>を除くと、これらの流速計の計測範囲は「点」もしくは「線」流速である。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「面」流速データを推定する「流速内外挿法」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。このように、流量観測では「流速計測」と「流速内外挿操作」という二つの技術開発とその高度化が必要となるが、これまでは「流速計測」一辺倒の技術開発に拘っていた感は否めず、「流速内外挿操作」に関する本格的検討は十分なされていないとは言い難い。その結果、様々な流速計による流量計測精度を比較する上でも、統一的な流速内外挿操作に基づいて行われている事例は非常に少なく<sup>18)</sup>、既往の各流速計の精度検証では、「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。

本報では、一般的に用いられる既存の流速内外挿操作の手順やその問題点を整理すると共に、著者ら

\*〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

† E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

表1 流量観測用流速計測法の分類

観測手法	計測原理	測定対象
プライス流速計 (回転式流速計)	測定部のカップ回転速度を流速に換算する。	点流速
電磁流速計	測定部周辺の人工磁界が流水により変化し、それにより生じる電圧を計測する。	点流速
浮子	橋上などから浮子を投下し、橋下流の二断面間を浮子が通過する時間を計測し、流速を求める。	ある横断地点の表層平均流速
画像解析法	水表面のトレーサーをビデオカメラにより撮影し、PIVやSTIV等により画像解析して表面流速を計測する。	水表面上の流速分布
電波流速計	水表面に電波を発射し、ドップラー効果を利用して表面流速を計測する。	水表面上の点流速
ADCP	超音波のドップラー効果を利用し流速鉛直分布を計測する。	流速鉛直分布
H-ADCP	水平設置型ADCPであり、ある高さの流速横断分布を計測する。	流速横断分布
超音波流速計	超音波の送受信機を河川兩岸に設置し、超音波伝播時間差から送受信装置間の平均流速を計測する。	送受信装置間の平均流速

が長年開発に取り組んでいる流速内外挿技術である力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and Extrapolation method, DIEX法)<sup>15)・16)</sup> に関して紹介する。このDIEX法は、後述するように、様々な「点」もしくは「線」流速計に対応可能な形に応用されており、今後の展開が期待できる手法と考えられる。

2 流速内外挿技術について

2.1 従来手法

一般的な流量観測では、流速内外挿操作として、**図1**に示すように、短冊状の流速分布を積分する手法 (ここでは、区分求積法と称する) が一般に用いられる。この区分求積法では、まず、Step1にて横断面をいくつかに分け、区分断面面積  $A_i$  を算出する (図中では  $i=1\sim6$  の場合を例示する)。次の Step2では、各区分断面における流速  $v_i$  を計測する。その際、用いる流速計により計測位置が異なり、**表1**に

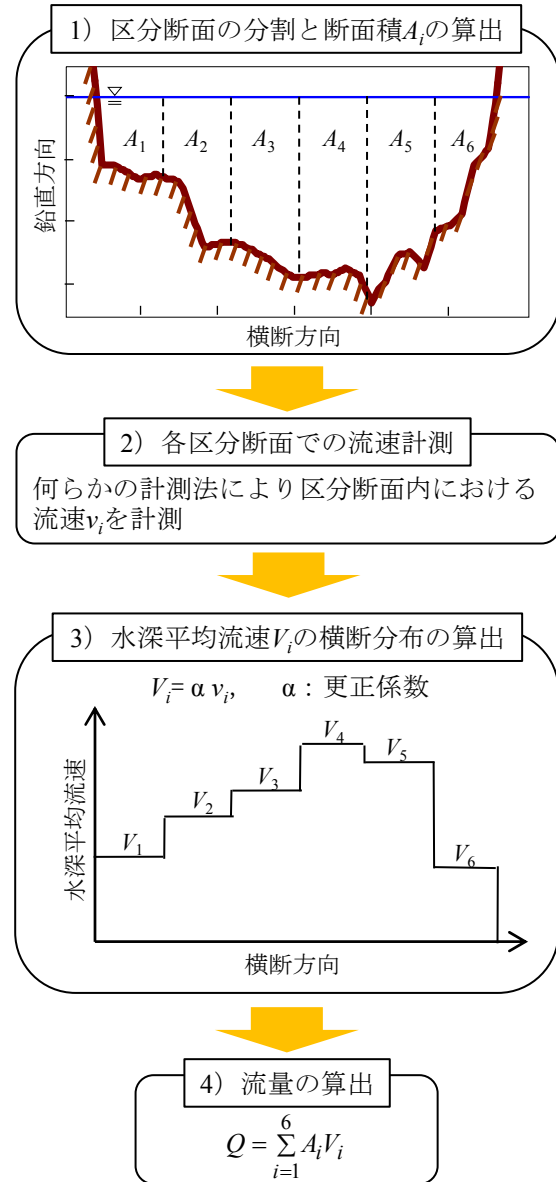


図1 従来の流量算定手順

表2 現行の更正係数 ( $h$ : 水深,  $l$ : 計測範囲)<sup>1)</sup>

$h$ [m]	$l$ [m]	$\alpha$
~0.7	表面	0.85
0.7~1.3	0.5	0.87
1.3~2.6	1.0	0.91
2.6~5.2	2.0	0.94
5.2~	4.0	0.96

示すように、プライス流速計や電磁流速計では点流速、浮子では表層平均流速、画像解析法や電波流速計では水表面流速となる。これらの結果から流量算定に必要な「水深平均流速  $V_i$ 」を求めるために、Step3では流速計測値  $v_i$  に更正係数  $\alpha$  を乗じる。この更正係数  $\alpha$  の与え方は、**表2**に示すように、対象とする計測高さ範囲  $l$  により異なる。この更正係数は、表

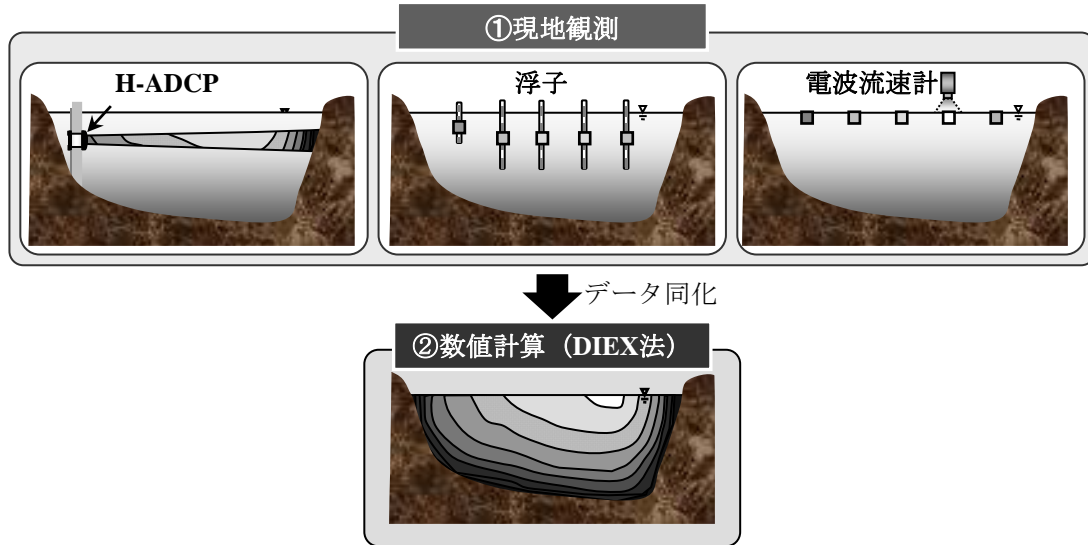


図2 DIEX法による流量観測技術の基本フロー

面もしくは表層流速を対象とする電波流速計や画像解析法、浮子による計測値に対して用いられる。一方、プライス流速計や電磁流速計等の「点」流速計を用いる場合には、鉛直方向に数点計測することが一般的であり、このケースでは更正係数を用いずに2点法等<sup>1)</sup>の考え方により水深平均流速を算出する。また、流速鉛直分布を直接計測する ADCP を用いる場合にも更正係数は不要である。最後の Step4 では、各区分断面における断面積  $A_i$  と水深平均流速  $V_i$  を掛け、その総和を流量  $Q$  として算出する。

この区分求積法の問題点・課題としては、「流速横断分布」と「更正係数」の取り扱いが挙げられる。まず、前者の流速横断分布としては、図1に例示するように、流速計測値が各区分断面の“平均流速値”になるため、短冊状の流速分布パターンとなる。そのため、区分断面の解像度が高ければ問題ないが、浮子観測では“低解像度”計測の事例が多く（例えば、数百 m の川幅に対して区分断面数が 5, 6 個しかない）、流速計測値の代表性や流速横断分布の信頼性に疑問が残る。また、更正係数は、限られた実測値しかない状況下で戦後直後に表2に示す“暫定値”が決められたが、その後、改訂が進んでおらず現在では“標準値”と見なされている。しかしながら、著者らによる ADCP による最新の実洪水流の観測結果から、表2に示される更正係数が 0.05~0.10 大きく設定されていることが報告されており<sup>19)</sup>、今後の見直しが必要な項目である。

## 2.2 DIEX 法

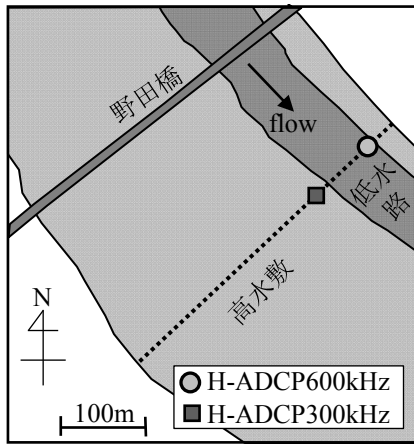
横断面内の限られた「点」もしくは「線」流速データから「面」流速データや流量を力学条件を満足

した形で内外挿するため、著者らは、力学的内外挿法 (DIEX 法) を提案した<sup>15), 16)</sup>。DIEX 法は、当初、ある高さの流速横断分布の計測が可能な H-ADCP を対象として、「線」流速データの内外挿技術として開発され<sup>15), 16), 20) ~22)</sup>、その後、浮子や電波流速計等の「点」流速計用にも応用された<sup>18), 23), 24)</sup>。

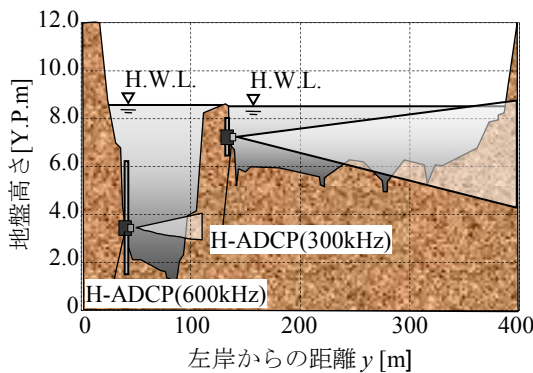
この DIEX 法を用いた流量観測技術における流量算定フローを図2に示す。まず、①の流速計測では、H-ADCP や浮子、電波流速計等により、横断面内の複数地点における「線」もしくは「点」流速を計測する。これら以外の流速計（例えば、画像解析法）にも応用可能である<sup>18)</sup>。次に、②の数値計算では、①で得られた「点」もしくは「線」流速データを同化データとし、DIEX 法に基づいて横断面内を対象とする河川流シミュレーションを行い、横断面全体の「面」流速データや流量を算定する。DIEX 法では、リアルタイム流量観測をも念頭に置いて計算負荷を抑制するために、横断面 ( $y, \sigma$ : 横断、鉛直方向) を計算対象とし、そこでの基礎式は以下の主流方向運動方程式である。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_a = 0 \quad (1)$$

ここで、 $u$  は主流方向速度、 $g$  は重力加速度、 $I$  は水面勾配、 $A_H$  と  $A_V$  は水平・鉛直渦動粘性係数、 $D$  は水深である。式 (1) では省略された移流項等に代わりに付加項  $F_a$  を導入し、運動方程式を満たすように工夫している。この  $F_a$  を用いて、流速観測値のデータ同化を実施する。なお、上述した計算方法や手順の詳細に関しては、二瓶・木水<sup>15)</sup> を参照されたい。



(a) 平面図



(b) 横断面図

図3 H-ADCP 観測サイト (江戸川・野田橋)

### 3 H-ADCP の適用例<sup>22)</sup>

#### 3.1 観測・計算条件

H-ADCP 計測法と DIEX 法による数値計算の融合技術に基づく流量モニタリング例を示す。本結果の一部は「ながれ」に紹介しているが<sup>25), 26)</sup>、本報では、洪水時における複断面河道の流量計測結果を示す。対象サイトは、江戸川中流部・野田 (河口から 39km) である (図 3)。ここでは堤間幅が約 400m、低水路幅が約 100m の複断面河道であり、幅広の右岸側高水敷では樹木群や植生群落が存在する。この横断面に H-ADCP を低水路と高水敷に各々 1 台ずつ設置した (低水路: H-ADCP600kHz, 高水敷: 同 300kHz, Teledyne RDI 製)。H-ADCP は一般に低周波タイプの機器ほど計測範囲が長く、300kHz では最大 400m、600kHz では 140m である。この場合、H-ADCP 2 台により本サイトの横断面全体を概ねカバーできるが、洪水時における超音波の減衰や超音波ビームの広がりに伴う水面・河床面への到達により、河道全体の計測は難しい (図 3 (b))。対象期間は台風 1112 号接近時 (2011/9/2~7) であり、この出水の最高水位 H.W.L. は 8.69Y.P.m であった。

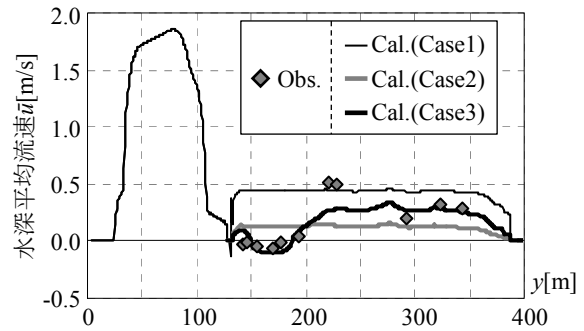


図4 水深平均流速横断分布の推定値と観測値の比較 (H-ADCP, 2011年9月4日18時)

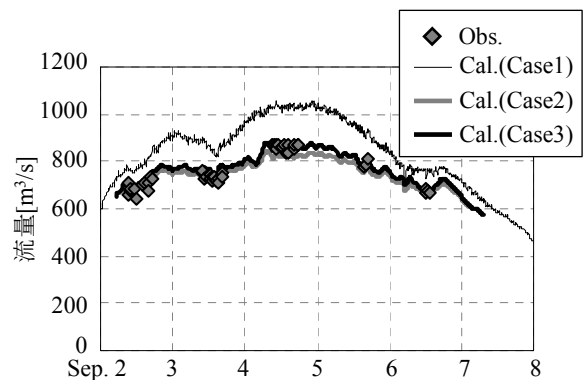


図5 流量の時系列変化 (H-ADCP)

DIEX 法では、H-ADCP 流速データを同化する際に必要となる付加項  $Fa$  の内外挿操作として、「三次スプライン補間法」と「一様法」がある。対象出水は、横断面にて低水路と高水敷が完全に繋がらず、分断したため、付加項の補間操作も低水路と高水敷について別々に行う。このことに加えて H-ADCP の設置台数の影響を調べるために、H-ADCP1 台 (低水路のみ) で一様法を用いる Case1, H-ADCP2 台 (低水路と高水敷) で一様法を用いる Case2, 同じく 2 台で補間法は低水路では一様法、高水敷では三次スプライン補間法を用いる Case3 を設定する。

#### 3.2 結果

DIEX法による流速分布再現性を見るために、水深平均流速横断分布に関する推定値と ADCP による観測値 (高水敷のみ) を図4に示す。なお、低水路では、どの推定結果も同じになることに注意されたい。これより、H-ADCP 1 台のみの Case1 では、高水敷の流速が過大評価され、観測値とのずれが最も大きい。一方、H-ADCP 2 台の場合には、高水敷での流速レベルは観測値と概ね一致するが、その精度は付加項に対して三次スプライン補間法を用いる Case3 の方が高い。この時の H-ADCP 計測範囲 (=同化範囲) は高

水敷では約100mであるので、同化範囲内外においてDIEX法は流速分布を良好に推定できている。

流量推定精度を検証するために、対象出水時における流量の時系列変化を図5に示す。H-ADCP1台のみのCase1では、流速同様に流量を過大評価している。一方、H-ADCP2台のCase2と3では概ねADCPによる観測値と一致し、三次スプライン補間法を用いたCase3の方がやや精度が高い。観測値と推定値の間の誤差のRMS値を算出した結果、Case1, 2, 3では各々17.1, 3.8, 3.3%となり、H-ADCP2台を用いたCase2, 3の精度が極めて高い。このように河道内に適切にH-ADCPを配置することで、本手法は複断面河道における洪水流量モニタリングを精度高く実施可能であることが示唆された。

#### 4 浮子の適用例<sup>23)</sup>

##### 4.1 計算条件

浮子の点流速データにDIEX法を適用する際には、ここでは実際の浮子観測データを用いず、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、DIEX法の流速・流量推定精度を検証する。江戸川・野田橋(図3)において大出水をもたらした台風0709号(2007/9/7, 8)を対象として行われたADCP移動観測法の流速・流量データを用いる。ADCPデータから模擬浮子データを作成する際には、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、その測定高さは吃水中央とする。

##### 4.2 結果

浮子本数が低水路3本、高水敷5本を例に、本手法(DIEX法)と従来手法(区分求積法)による流速・流量推定精度を示す。図6は流量ピーク時(2007/9/7 20:35)における水深平均流速の横断分布に関する観測値と本手法・従来手法による推定値を示す。図中の○印は観測値のうちデータ同化に用いられたデータである。これより、本手法の推定値は、高水敷ではやや過小評価しているが、低水路ではほぼ一致している。一方、従来手法では、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、その様子は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である。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7に示す。ここでは、低水路と高水敷に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( $y=60, 225\text{m}$ )の結果を例示する。これより、同化データのある地点では流速鉛直分布の推

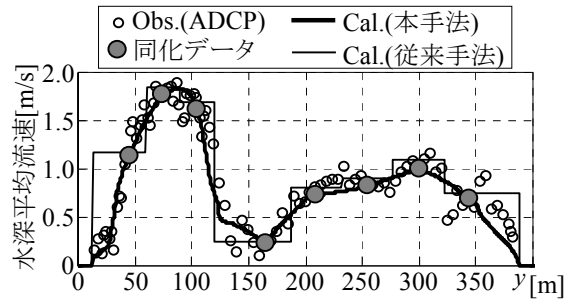
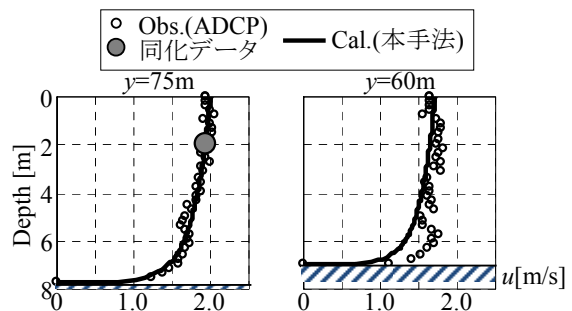
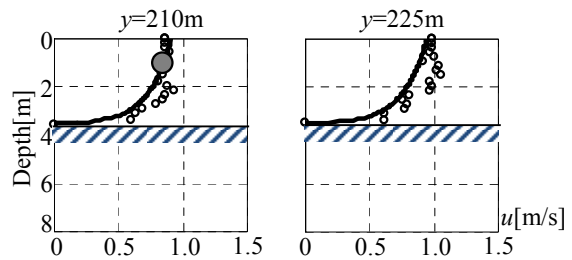


図6 水深平均流速横断分布の観測値と推定値の比較 (浮子, 2007/9/7 20:35)



(a) 低水路



(b) 高水敷

図7 流速鉛直分布の比較 (浮子)

定値は観測値と概ね一致した。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が、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。

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, ±10%に相当する実線も合わせて図示している。これより、従来手法の推定値は概ね±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%の線周辺にプロットされている。これらの全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%、従来手法では8.9%となり、本手法により流量の推定精度が大幅に向上している。この誤差を低水路と高水敷別に求めたところ、本手法では低水路2.6%、高水敷5.4%、従来手法では低水路10.3%、高水敷7.5%となっている。これより、本手法の流量推定精度は低水路と高水敷共に従来法よりも高い。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

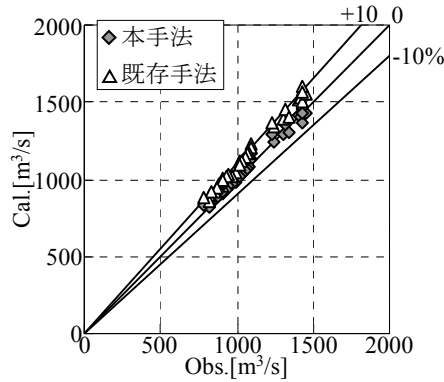


図8 流量の観測値と計算値の相関図（浮子）

の高精度化に大きく寄与しているものと考えられる。

## 5 まとめ

本報では、流量観測技術高度化の旨点とも言える“流速内外挿技術”に着目して、著者らが開発している力学的内外挿法（DIEX法）の概略や、「線」流量データ（H-ADCP）や「点」流速データ（浮子）への応用事例を示した。DIEX法導入により、従来法（区分求積法）と比べて、流速分布や流量の推定精度が大幅に向上することが示された。DIEX法は、高精度で低コスト・省力化した流量観測技術の確立に大きく寄与するものと期待される。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省河川砂防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。ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- 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, (1997) 33-58.
- 2) 土木学会：水理公式集 [平成11年版], 丸善, (1999) 75-86.
- 3) 後藤岳久, 福岡捷二, 兒子真也, 中須賀淳：複断面蛇行河川における洪水流による樹木群の倒伏・破壊機構と樹木管理への活用, 土木学会論文集 B, 66/1 (2010), 47-65.
- 4) 中山朝陽, 二瓶泰雄：出水時複断面河道における横断方向水位変動特性の解明, 土木学会論文集 B1(水工学), 69/4 (2013) I\_733-I\_738.
- 5) Fujita, I., Muste, M. & Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *J. Hydraulic Research*, 36(1998) 397-414.
- 6) Muste, M., Fujita, I. & Hauet A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resour. Res.*, 44(2008) W00D19, doi:10.1029/2008WR006950.
- 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, 497/II-28(1994) 41-50.
- 8) 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, 45/2(2003) 22-29.
- 9) 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, 45/2(2003) 36-45.
- 10) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, 115/7 (1989) 925-936.
- 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, 11/5(1998) 460-471.
- 12) 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, 64/2(2008) 99-114.
- 13) Wang, F. & 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*, (2005) 319-328.
- 14) 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, 11(2005) 243-248.
- 15) 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, 63/4(2007) 295-310.
- 16) Nihei, Y. & Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resour. Res.*, 44(2008) W00D20, doi:10.1029/2008WR006970.
- 17) Le Coz, J., Pierrefeu, G. & Paquier A.: Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler, *Water Resour. Res.*, 44(2008) W00D09, doi:10.1029/2008WR006967.
- 18) 柏田仁, 藤田一郎, 本永良樹, 萬矢敦啓, 二瓶泰雄, 中島洋一, 山崎裕介：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, 土木学会論文集 B1 (水工学), 69/4 (2013), I\_739-I\_744.
- 19) 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, 66/2 (2010) 104-118.
- 20) 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, 52 (2008) 943-948.
- 21) 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, 53 (2009) 1009-1014.
- 22) 御厨純, 二瓶泰雄, 鈴木大樹, 中山朝陽：2 台の H-ADCP 計測と DIEX 法に基づく複断面河道の洪水流量計測～台風 1112 号出水を例に～, 土木学会論文集 B1 (水工学), 68/4 (2012) I\_1345-I\_1350.
- 23) 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, 17 (2011) 23-28.
- 24) 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, 18 (2012) 393-398.
- 25) 二瓶泰雄：超音波ドップラー流速分布計に基づく実河川流速・流量モニタリング, ながれ, 26/1 (2007) 13-20.
- 26) 二瓶泰雄：河川流量のモニタリング, ながれ, 29/3 (2010) 187-192.