

河川流量のモニタリング

*東京理科大学 理工学部

二 瓶 泰 雄†

River-Discharge Monitoring

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

1 はじめに

河川管理を行う上では、水位や流量の観測データは最も基礎的かつ重要な資料であり、我が国では明治時代より収集され始め、その一部はデータベース化されている¹⁾。水位計測は一般に高精度かつ容易であるのに対して、河川流量計測については、水位や断面形状、横断面全体の流速分布を把握する必要がある²⁾、水位計測と比べると計測困難な課題や精度上の問題点が多い。そのため、河川流量モニタリング手法としては、**図 1**のように様々な手法が提案されており、それらは対象地点に直接出掛けて流量観測を行う「単発観測」と何らかの方法により無人で自動連続的に流量観測を行う「連続観測」に分類される。

「単発観測」としては、浮子、プライス流速計、超音波ドップラー流速分布計 (ADCP)、電波流速計、画像解析法等による様々な調査が実施されている²⁻⁵⁾。これらの方法では、実際に河川に出掛けて流量調査の作業を行う必要がある、急激な出水時には現地河川への到着が遅れることや大規模な出水時における作業の危険性により、調査が行えず流量データを取得できない場合がある。また、出水時に行われる浮子観測には計測精度上の問題点も指摘されている⁶⁾。

一方、「連続観測」としては、流速計測を断面全体にわたり完全にカバーし得る流速計が存在しないことから、①水位などから間接的に流量を算出する「間接法」と、②断面内の一部にて得られた流速計測値を何らかの形で空間補間し、それから流量を推定する「準直接法」に大別される。このうち間接法では、一般には、単発観測で得られた流量データと水位の関係式 ($H-Q$ カーブ) を作成し、それと水位観測値

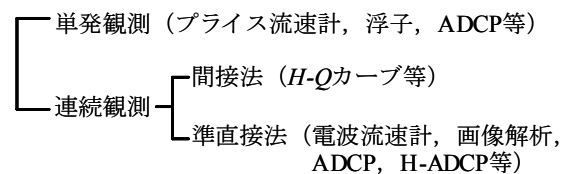


図 1 河川流量観測法の分類

から時々刻々の流量を間接的に算出しており、一般的な流量連続観測法として採用されている。しかしながら、 $H-Q$ カーブそのものに精度上の問題があることや、潮汐の影響により単一の $H-Q$ カーブが得られない感潮域などには間接法は原理的に適用し得ない²⁾。このため、流速計測値から何らかの方法で流量を推定する準直接法は極めて有望であり、そこでは前述した画像解析法や電波流速計、ADCPに加えて、水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler)⁷⁾ 等が用いられている。これらの方法では、断面内の一部の流速を計測し、それを断面全体に何らかの形で内外挿して流量を算出しているため、流速の内外挿手法が流量推定精度に大きな影響を及ぼしている。しかしながら、既存の研究では、典型的な流速鉛直分布 (べき乗則や対数則) や経験的な更正係数を援用しており^{4, 7)}、このような単純な空間補間操作では、流量の算定精度が大きく低下してしまう可能性が指摘されている⁸⁾。

このような状況を解決するためには、近年著しく進展している数値解析技術と前述した現地観測技術を融合した新しい流量モニタリングシステムが有用であると期待される。本報では、著者らが取り組んでいるデータ同化技術をベースとした、流速計測技術と数値解析技術を融合した河川流量モニタリング手法⁹⁾ について紹介する。ここでの流速計測技術と

*〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

† E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

しては、上述した流速観測法の中で比較的計測範囲が広く連続観測が容易であり、一台で流速横断分布計測を可能とする H-ADCP を用いる。この H-ADCP により得られた流速「線」データを断面全体の「面」データに内外挿する数値解析技術としては、流体力学条件を満たした上で横断面内における流速の内外挿操作を実現し得る力学的内外挿法（Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, 以下、**DIEX 法**と呼ぶ）を適用する。以下では、本流量モニタリングシステムの概要や基礎方程式系について記述するとともに、実河川における適用事例を紹介する^{9,10)}。

2 本流量モニタリングシステムの概要

2.1 基本構成⁹⁾

本流量モニタリングシステムの基本構成としては、**図 2** のように、①H-ADCP による「線」流速横断分布計測システムと、②「線」流速データから「面」流速データに変換するための河川流シミュレーションシステム、という 2 つのサブシステムから構成される。①の流速計測システムでは、H-ADCP を水路側岸付近に水平方向に設置し、ある高さにおける主流・横断方向流速の横断分布を連続計測する。この横断面内において計測された流速データを内外挿するために、②の DIEX 法に基づく河川流シミュレーションを行い、「線」流速データを横断面全体の「面」流速データに変換する。なお、**図 2** に示すように、H-ADCP データは全ての横断位置をカバーしておらず、H-ADCP の背後や対岸付近では流速データが存在しない。しかしながら、本シミュレーションでは横断面全体を計算対象とするため、H-ADCP データが存在しない横断位置においても流速を推定することが可能であり、最終的に流量が算出される。

2.2 DIEX 法

a) 基礎方程式系

本システムの核となる DIEX 法に求められる基本要件は、リアルタイムモニタリングを実現するために低計算負荷であることに加えて、「数値シミュレーション上に H-ADCP による流速観測データを取り込む」というデータ同化手法を導入する、の 2 点である。そのため、流体運動の基礎方程式系を大幅に簡略化するとともに、観測データが不自然に同化されることが多いナッジングスキーム等を用いずに独自の同化手法を組み込む。

この DIEX 法における基礎方程式系について記述する。まず、三次元流動場用の主流方向運動方程式は、複雑な河床形状を簡便で適切に表現することが

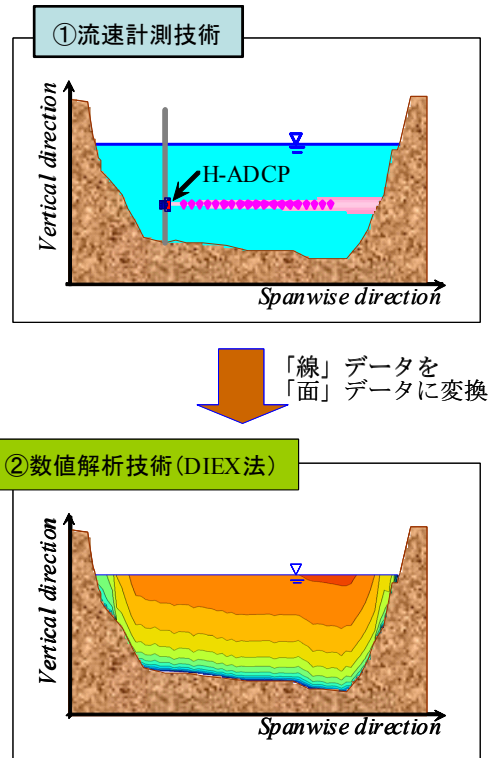


図 2 本流量モニタリング手法の基本構成⁹⁾

可能な σ 座標系を用い、また静水圧近似を採用すると、次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \\ = gI + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 x, y は主流、横断方向、 u, v, w は x, y, σ 方向流速、 g は重力加速度、 I は水面勾配、 A_H は水平渦動粘性係数、 A_V は鉛直渦動粘性係数、 D は水深をそれぞれ表している。この σ 座標系の定義式は、次のように与えられる。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \quad (2)$$

ここで、 z は鉛直方向座標、 η は水位である。

DIEX 法では、前述したように計算負荷を減らす必要があるため、式 (1) で表わされる三次元流動場の計算をそのまま行うことは難しい。また、用いる同化データは、H-ADCP によるある高さの流速値であるので、限られた同化データだけでは、式 (1) に含まれる全ての移流項や主流方向の乱流拡散項を算定することは難しい。そこで、本システムの計算対象領域を **図 3** に示すように横断面のみとして、上記の

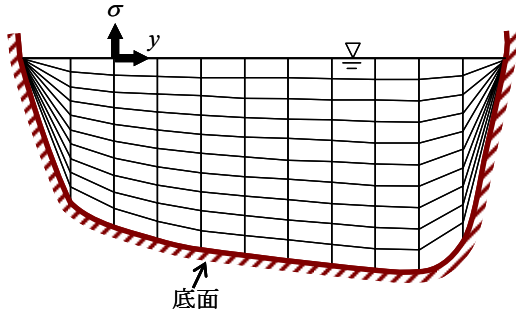


図3 DIEX法における座標系と計算格子

項を省略すると、次のような簡略化された運動方程式が得られる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) = 0 \quad (3)$$

ここでは、移流項と主流方向の乱流拡散項に加えて、他の項と比べて小さいことが確認されている非常項も省略されている。式(3)のままでは、省略された項を含めた力のバランスは満たされないので、Nihei&Kimizu⁸⁾を参考にして、式(3)に付加項 F_a を加えて、この付加項 F_a を通してデータ同化を行うことを試みる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_a = 0 \quad (4)$$

この付加項 F_a は、式(3)において省略された項や式(4)中に含まれる各項の見積もり誤差、同化データの観測誤差を含んだものに相当している。この式(4)を基礎方程式として、DIEX法における河川流計算を実施する。なお、式(4)中の乱流モデルとしては、最も簡便な0方程式モデルを与える⁹⁾。

b) 付加項の算出方法

式(4)から横断面内の流速分布を算出する際には、付加項 F_a を何らかの形で与えるとともに、H-ADCPによる計測結果を数値計算に同化する必要がある。そこで、ナッジングスキームのように流速計測値を直接的に同化させるのではなく、前述したように、式(4)に導入された付加項 F_a を介してデータ同化を行う。その際、同化データとなるH-ADCP計測値はある高さの流速分布しか存在しないため、式(4)をそのまま用いることは難しい。そのため、付加項の鉛直分布が一様であると仮定し、水深平均された付加項 $\overline{F_a}$ を算出するために、式(4)を水深平均操作した次式を用いる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{A_H} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \overline{u}^2 + \overline{F_a} = 0 \quad (5)$$

ここで、 \overline{u} は水深平均された主流方向流速、 $\overline{A_H}$ は水深平均水平渦動粘性係数、 C_f は底面摩擦係数(= $gn^2/D^{1/3}$, n : マニングの粗度係数)をそれぞれ表している。

上式から付加項の水深平均値 $\overline{F_a}$ を求めるために、式(5)の差分式を作成する。このとき、観測値が与えられている横断位置において得られた $\overline{F_a}$ をそのまま用いると、流速推定値も観測誤差の影響を含んだ形となる。データ同化手法としては、観測誤差を最小化する必要があるため、このように観測誤差を含んだデータをそのまま同化する手法には問題がある。そこでここでは、付加項を介して、同化する流速データの観測誤差の最小化を行う。具体的には、観測値から計算された付加項 $\overline{F_a}$ の横断分布のバラツキが観測誤差に相当すると見なして、付加項の横断分布に対して最小二乗法により近似曲線を適用し、観測誤差を最小にすることを試みる。ここでは、近似曲線として、三次関数を選択する。このように、本手法では、観測誤差を最小にした形でデータ同化を行うことが可能な河川流モデルとなっている。なお、DIEX法の詳細は著者らの文献⁹⁾を参照されたい。

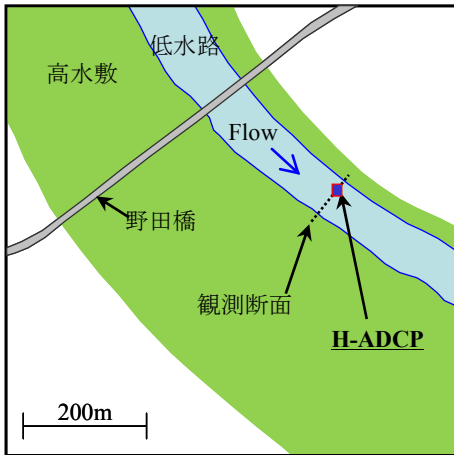
3 実河川流量モニタリングへの適用

3.1 現地観測の概要

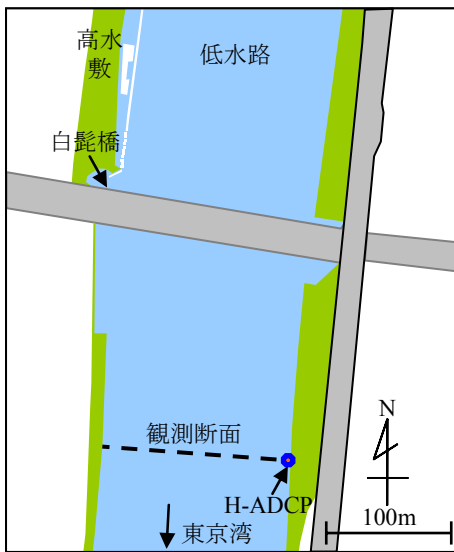
本流量モニタリングシステムの有効性を検証するために、本システムを実河川の流量計測に適用する。観測サイトは、図4に示すように、順流域の江戸川・野田橋(河口より+39km)と感潮域の隅田川・白髭橋(同+9km)である。設置場所は両河川ともに低水路側岸付近である。設置されたH-ADCPはWorkhorse 600kHz (Teledyne RDI製)であり、低水時では低水路の対岸まで超音波が到達することを確認している。H-ADCPの基本設定としては、測定層厚は、江戸川では0.5m、隅田川では3.0mであり、サンプリング間隔は両河川ともに10分である。

観測期間としては、江戸川では2005年9月5日から12月6日、2006年6月6日から現在まで、隅田川では2007年7月12日から現在までである。このH-ADCP観測と同時に、自記タイプの光学式濁度計(Compact-CLW, JFEアドバンテック(株)製)を用いて濁度観測も実施している。これは、H-ADCPによる流速計測範囲に大きな影響を与える水中の濁度データを取得するためである。

本システムの流速・流量推定精度を調べるために、両観測地点の直上流に位置する橋もしくはH-ADCP計測断面において、ADCP (Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI製)を用いた流速・流量観測を行った。



(a) 江戸川・野田橋



(b) 隅田川・白髭橋

図4 観測サイト

ここでは、ADCPを鉛直下向きに水面付近に浮かべ、ある一定速度(=約0.17m/s)でADCPを横断方向に移動させる、というADCP移動観測¹¹⁾を行い、横断面全体の流速分布と水深を同時計測し、最終的に流量が得られる。また、H-ADCP計測断面における横断測量も別途実施している。これらの観測方法の詳細に関しては、著者らの文献⁹⁻¹¹⁾を参照されたい。

3.2 DIEX法における計算諸条件

H-ADCPにより計測された流速データより、DIEX法を用いて流量を連続的に算出する。計算対象領域としては、H-ADCPが設置された横断面内であり、ここでは低水路内のみ限定する。計算格子数としては、江戸川では横断方向160、鉛直方向100とし、隅田川では横断方向271、鉛直方向100とする。横断方向の格子幅は、両河川ともに0.5mの等間隔とする。

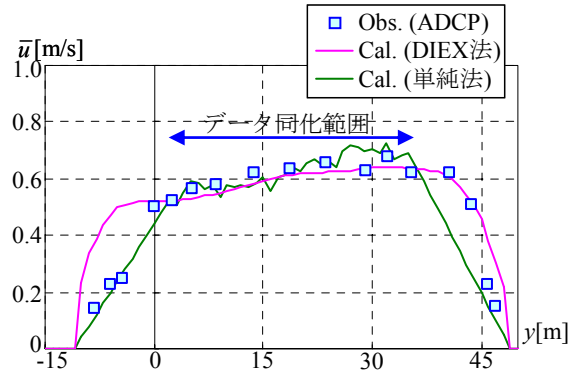


図5 主流方向水深平均流速の横断分布(江戸川・野田橋, 2005年10月13日11時20分)

数値モデル上の計算パラメータとしては、 $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とする。データ同化範囲としては、流速計測精度や密度成層状況(隅田川のみ)を勘案して、江戸川では最大横断距離を38m、隅田川では43mとしている。また、出水時には高濁度水塊による超音波減衰が顕著となるため¹⁰⁾、H-ADCPで記録される反射強度値が閾値(=90count)を上回るデータしか用いないこととする。なお、単断面河道の隅田川では、計算領域が河道全体をカバーしているが、複断面河道の江戸川では、計算領域に高水敷は含まれていない。そのため、ここでは、高水敷まで冠水する大規模出水を対象外とするが、それらの検討結果については岩本・二瓶¹²⁾を参照されたい。

3.3 結果

a) 江戸川

DIEX法による流速分布再現性を示すために、主流方向水深平均流速 \bar{u} の横断分布に関する計算結果とADCPによる実測値を図5に示す。ここでは、江戸川・野田橋において2005年10月13日11時20分の結果を例示している。計算結果としては、DIEX法による結果に加えて、べき乗則による方法(単純法)⁷⁾の結果を図示している。横軸yはH-ADCPからの横断距離であり、計算上のデータ同化範囲も表示している。これを見ると、DIEX法による水深平均流速の計算結果は観測結果と良好に一致している。一方、単純法による計算結果に関しては、H-ADCPデータが存在する範囲ではADCPの観測結果と良好に一致しているものの、それ以外の部分では、全体的に流速を過小評価しており、DIEX法よりも流速推定精度が低下している。このように、DIEX法による推定結果は良好に観測結果を再現している。

同じ地点における本システムによる流量推定結果の時間変化を図6に例示する。図中には、ADCPによる流量観測結果も合わせて表示している。これより、

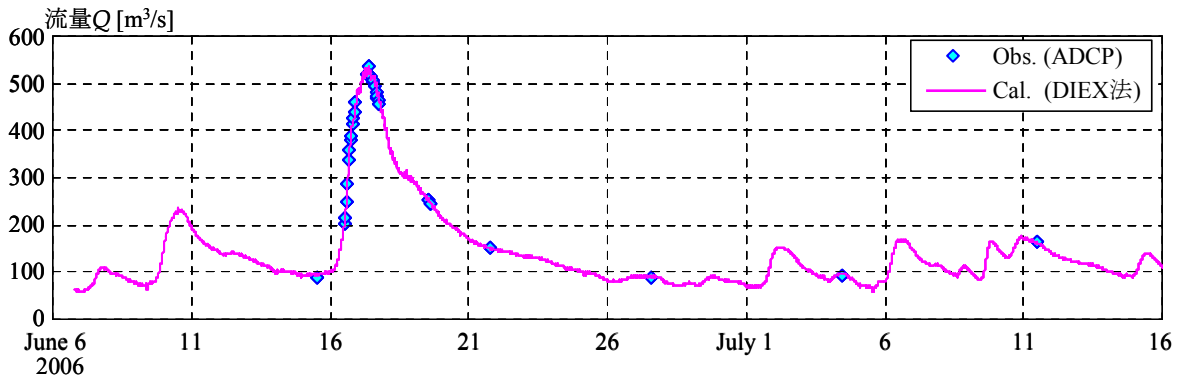


図6 本システムに基づく流量推定結果及び ADCP 観測流量の時間変化 (江戸川・野田橋)

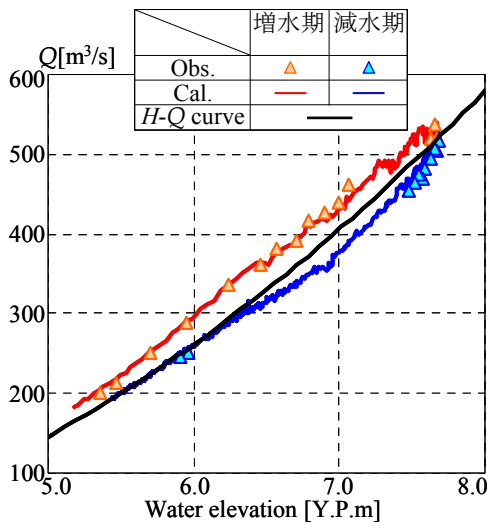


図7 小規模洪水時における水位と流量の関係 (江戸川・野田橋, 2006年6月16日~20日)

本システムによる流量推定が欠測なく連続的に実施できている。また、図示している期間以外や隅田川においても流量データの欠測は無く、本システムのロバスト性が確認された。本システムによる流量推定結果とADCP観測結果を比較すると、低水時及び出水時(2006年6月16~20日)において、両者は良好に一致している様子が分かる。これらの流量推定結果の相対誤差のRMS (Root Mean Square) 値を求めたところ、概ね4~5%となり、標準的な低水流量観測精度と同程度となり、本システムの流量推定精度が高いことが示された。

上記の出水時における水位 H と流量 Q の関係を見るために、本システムの流量推定結果と水位観測値の相関図を図7に示す。ここでも、ADCP観測結果を併せて表示している。また、出水時データを増水期と減水期に分けて図示している。本システムによる流量推定結果では、同一の水位に対して、増水期の流量が減水期よりも大きい、というよく知られた水位-流量関係のループを描いている。本システムの推定結果と良好に一致しているADCP観測結果においても、水位-流量関係のループは概ね確認できる。

このような出水イベント中の流量の非定常変化は、最も一般的に用いられる流量算定法である $H-Q$ カーブでは当然再現できない。そのようなことから、出水中の時々刻々の洪水流量評価を行う上では、本流量計測システムの有用性が示唆された。

b) 隅田川

$H-Q$ カーブが適用できない感潮河川における本システムの流量計測精度を調べるために、隅田川・白髭橋における本システムによる流量推定値とADCPによる検証用データの時間変化を図8に示す。ここでは、低水時(大潮時, 2007年8月14日)と出水時(2007年9月6, 7日)における流量の時間変化が図示されている。なお、流量の符号としては、下流(海)向きを正とする。これより、低水時では、本システムによる流量推定値は観測値と概ね一致している。特に、密度成層が形成されていたことが確認された8月14日6時から9時においても、流量推定値は観測値と一致しており、本システムの有効性が伺える。出水時に関しては、観測値の流量ピーク付近(図中矢印の範囲)を除いて、本システムの流量推定値と観測値は良好に一致している。一方、この矢印の範囲では、流量推定値は観測値よりも小さい。この時、濁度は700FTUを超え、超音波反射強度が閾値以上となる有効計測層数 N_{th} は10以下となることが確認されている。このため、低水路中央付近の高流速部分を計測できず、結果として流量を過小に推定してしまったものと考えられる。なお、H-ADCPの種類を周波数600kHzからより低周波数のものに変えれば、高濁度時の流速計測状況は改善され、それにより流量推定精度も向上するものと考えられる。また、付加項の取り扱いについても改良の余地が十分あり、現在検討中である。

4 おわりに

本稿では、準直接法の流量モニタリング手法として、H-ADCPによる流速計測技術とDIEX法に基づ

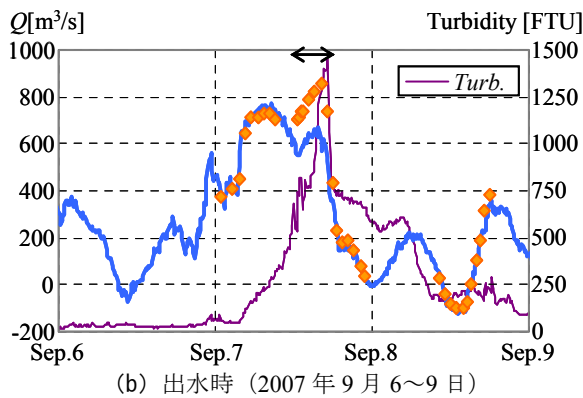
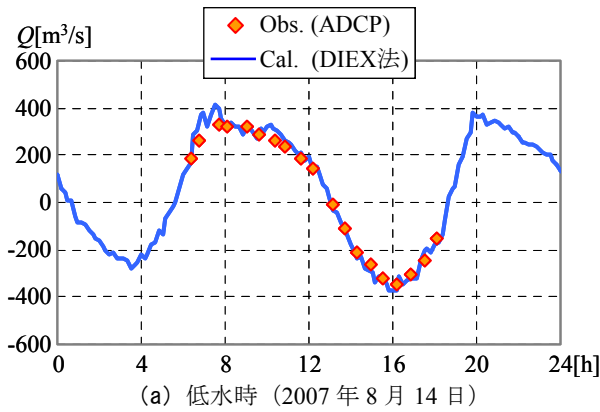


図8 隅田川・白髭橋における流量の実測値と推定値の比較 (b) のみ濁度も示す

く数値解析技術を融合した流量計測システムについて記述した。また、実河川における流量計測に本システムを適用し、低水時や出水時を含めて本システムの流量推定精度が概ね良好であることを示した。本システムに基づくリアルタイムモニタリングは既に稼働しており、その結果の一部をWEB上に公開している¹³⁾。

なお、ここでは、流速計測技術としてH-ADCPを選定したが、他の計測システムの流速データに対してDIEX法を適用することは容易である。さらに、同様な考え方を流速以外の項目の内外挿技術にも原理的には応用可能であり、既に浮遊土砂濃度について検討している¹⁴⁾。今後、気象・海洋分野に続いて、水工学分野においても、現地観測と数値解析の融合技術の大幅な進展が強く望まれており、本稿で紹介したDIEX法がその一助となれば幸いである。

謝辞：本研究は、NEDO・平成17年度産業技術研究助成事業（研究代表者：二瓶泰雄）の成果の一部である。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所

や東京都第五建設局、東京都土木技術センター・高崎忠勝氏には、現地観測の実施や流量データの提供に関して便宜を図って頂いた。また、本研究で示した現地調査やデータ解析の大部分は、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室卒業生である故木水啓氏、原田靖生氏、北山秀飛氏、岩本演崇氏に大変お世話になった。ここに記して深甚なる謝意を表します。

引用文献

- 1) (社)日本河川協会：雨量・流量年表データベース，(2007) CD-ROM.
- 2) (社)日本河川協会編：改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，(1997) 33-58.
- 3) 藤田一郎：非接触型流速計測法を用いた実河川の計測と問題点，ながれ，26 (2007) 5-12.
- 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，497/II-28 (1994) 41-50.
- 5) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, 115 (1989) 925-936.
- 6) 二瓶泰雄，木水啓，植田雅康，中岡亮，望月健：陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析法に関する検討 ～江戸川を例にして～，海岸工学論文集，52 (2005) 1106-1110.
- 7) 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*, 1 (2005) 319-328.
- 8) Nihei, Y. and Kimizu, A.: Evaluation of river velocity and discharge with a new assimilated method, *Int. J. River Basin Management*, 4(2006) 1-4.
- 9) Nihei, Y. and 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.
- 10) 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.
- 11) 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 (2008) 99-114.
- 12) 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.
- 13) <http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~hydrolab/vortex.htm>.
- 14) 二瓶泰雄，北山秀飛，木水啓，原田靖生：H-ADCP計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの提案，河川技術論文集，13 (2007) 225-230.