

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 ～

A RIVER-DISCHARGE MONITORING IN A TIDAL REACH
WITH AN H-ADCP MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION

原田靖生¹・二瓶泰雄²・北山秀飛¹・高崎忠勝³

Yasuo HARADA, Yasuo NIHEI, Hideto KITAYAMA and Tadakatsu TAKASAKI

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(同上)

³正会員 東京都土木技術センター(〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

We have recently developed a new river-discharge monitoring system with an H-ADCP measurement and numerical simulation in which a DIEX method is used to accurately interpolate and extrapolate the observed velocities in a cross section with satisfying dynamic principles. In the present study, we attempt to apply this system into the discharge monitoring in the tidal reach of the Sumida River. The measuring accuracy of the H-ADCP is strongly influenced by vertical density stratification and high turbidity conditions, showing that the range of the data assimilation in the DIEX method must be changed due to these conditions. The simulated discharge with the present system gives acceptable agreements with the observed results, indicating the fundamental applicability of the present system into the discharge monitoring in tidal rivers.

Key Words : discharge measurement, H-ADCP, DIEX method, Sumida River, tidal reach

1. 序論

時々刻々の河川流量は、一般的に、各地点における水位流量曲線(H - Q カーブ)と水位観測値から算出される¹⁾。このように水位から流量を間接的に求める方法では、水位 H と流量 Q が一意的な関係とならない感潮域や背水区間の流量を計測することが原理的に困難である。そのため、一般的な流量観測点は、河口から離れた順流域にしか設けられておらず、河口を含む感潮域の流量データは上流側の順流部の流量値を用いて推定せざるを得ない²⁾。このようなことから、河川感潮域における流量モニタリング手法を確立することは急務の課題であると言える。

このためには、 H - Q カーブを用いずに、流速を直接計測する方法が必要不可欠であり、超音波ドップラー流速分布計(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)や水平設置型 ADCP(H-ADCP)、超音波流速計等を用いて感潮域の流量計測が試みられている^{3)~6)}。このうち、1台で流速横断分布計測が可能な H-ADCP に関しては、横断面全体の流速分布を得るために、鉛直昇降装置に取り付けられた形で感潮流量計測に適用され、その計測精度が良好

であることが検証されている⁴⁾。しかしながら、この鉛直昇降装置付きのシステムは、高価で、かつ、大掛かりな設置工事を必要とする、という問題点を有する。

一方著者らは固定設置された H-ADCP により計測されるある高さの「線」流速データから、力学的内外挿法(DIEX法)による河川流計算を介して、流速の「面」データや流量を算出する、という新しい流量モニタリングシステムを提案した^{7), 8)}。このシステムを江戸川中流部の流量計測に適用した結果、洪水流を含む長期間の流量推定精度が良好であることが示された^{7), 8)}。この流量モニタリングシステムは、江戸川中流部のような順流域のみならず、感潮域の流量計測にも有用であると期待できる。

本研究では、著者らが提案している H-ADCP 計測技術と数値解析技術を融合した新たな河川流量モニタリングシステムに基づいて、感潮域における河川流量計測を行い、その流量計測精度を検証する。対象サイトは、流量観測データが皆無な感潮河川である隅田川である。本システムによる流量推定結果と別途行われた ADCP 移動観測法⁹⁾による流量観測結果を比較して、感潮域の流量モニタリングに対する本システムの有用性を検討する。

2. 本流量モニタリングシステムの概要

(1) 各サブシステムについて

図-1は、本流量モニタリングシステムの基本構成を示す⁷⁾。本システムは、固定設置されたH-ADCPによる流速観測システム、簡易テレメータを用いたデータ転送システム、DIEX法に基づく河川流計算システム、得られた流速分布や流量をリアルタイムで公表するためのWEBシステム、という4つのサブシステムから構成される。まず、H-ADCPを河川内に水平になるように固定設置し、ある高さの流速横断分布を連続計測する。

では、H-ADCPと陸上に設置された簡易テレメータ(Watch-ADCP_Jr, ㈱ハイドロシステム開発製)を専用ケーブルで接続し、テレメータによるメールシステムを介して、H-ADCPによる計測データを所定のメールアドレスに送信する。さらに、において、送られてきた観測データを取り込んだ形で河川流シミュレーションを実施し、横断面内全体の流速分布や流量を算定する。その際には、力学条件を満たした形で「線」流速データを横断面全体の面データに内外挿し得るDIEX法を用いる。最後のでは、のサブシステムで得られた流速分布や流量をホームページ上に順次公開する。

本システムの特徴としては、H-ADCPでは計測できない領域の流速を、河川流解析により流体力学条件を満たして内外挿し得ることである。力学条件を満たさずに、単純に線形補間などで流速値を内外挿すると、DIEX法を用いた内外挿結果よりも流量推定精度は低下し、その低下量は、観測データの範囲が小さいほど顕著となる。一方、DIEX法により流速値の内外挿操作を行うと、観測データの範囲を変化させても、流量推定精度に大きな影響は見られない⁷⁾。後述するように、本観測では、H-ADCPの計測範囲が環境条件により大きく増減していたので、DIEX法を含む本システムの適用は、流量算定には必須である。

(2) DIEX法

上記の河川流解析のベースとなるDIEX法の概略を記述する。DIEX法では、計算精度・負荷を勘案してほぼリアルタイムに流量を算出するために、 y , σ を横断、鉛直方向とする横断面を計算対象として、簡略化された主流方向速度 u に関する次の運動方程式を基礎式とする。

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

ここで、 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。上式では、省略された移流項等に代わって運動方程式を満たすために付加項 F_a を導入し、また、この F_a を介してH-ADCPによる観測データの同化を行う。この式(1)を用いて「横

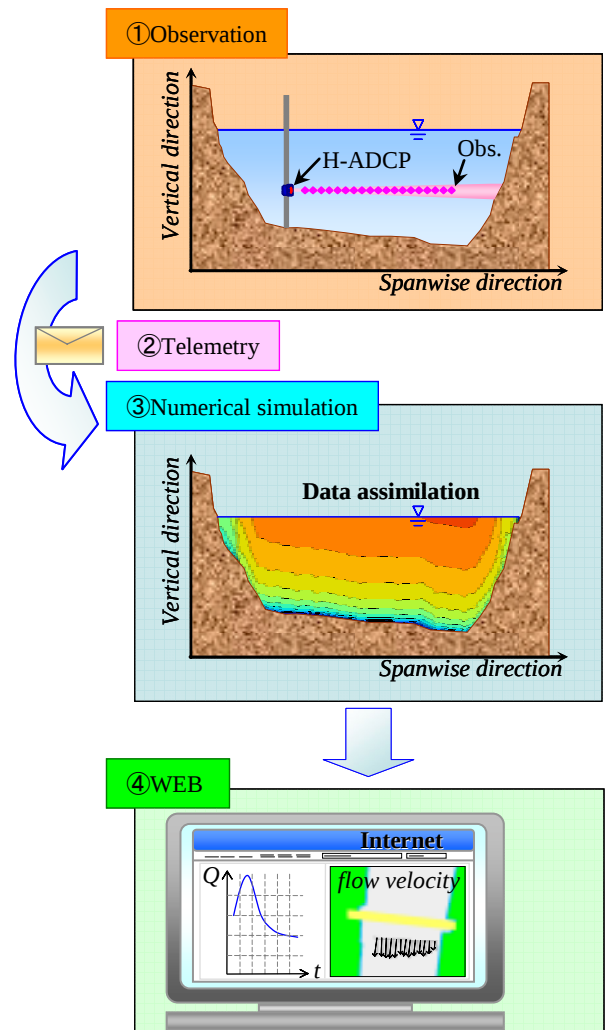


図-1 本流量モニタリングシステムの基本構成⁷⁾

断面」二次元解析を行い、横断面内の流速分布を求める。DIEX法の特徴としては、基礎式が大幅に簡略化されているので、CPU時間が極めて小さく(汎用PCを用いた場合、0.3秒/計算ステップ⁷⁾)、リアルタイムで流量を算定することは可能である。また、河川流解析では事例の少ないデータ同化手法が組み込まれており、その際には独自に付加項を導入している。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⁷⁾を参照されたい。

これまで順流域のみに用いられたDIEX法を感潮域に適用するには、数値モデルに密度成層効果を組み込む必要があり、少なくとも0方程式モデルを採用している乱流モデルを修正する必要がある。その際、単純には局所リチャードソン数の関数として鉛直渦動粘性係数を表記することが考えられる¹⁰⁾。しかしながら、それには、水温・塩分濃度の鉛直分布計測を詳細に行う必要があり、対応する計測器を用意しなければならない。そのため、ここでは、これまでと同様に成層効果を加味しない0方程式モデルを用い、今後、必要に応じて感潮域の河川流量算出に適したDIEX法のモデル改良を行う。

3. 隅田川における流量計測の概要

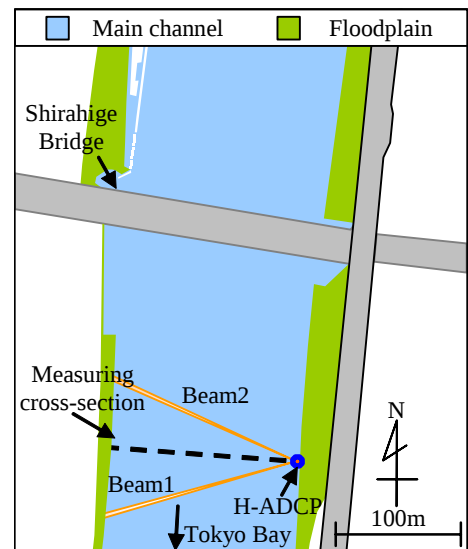
(1) 本モニタリング手法について

対象サイトは、荒川からの分流と新河岸川の合流点に端を発し、東京湾に流入する隅田川である。観測地点は、図-2(a)に示す白鬚橋付近（河口より約9km）であり、潮汐の干満の影響を受ける感潮域に位置する。この地点の横断面形は、同図(b)に示すように、両岸に幅約8.0mの高水敷を含む複断面であるが、高水敷まで冠水することとはほとんど無く、基本的に単断面河道と見なされる。

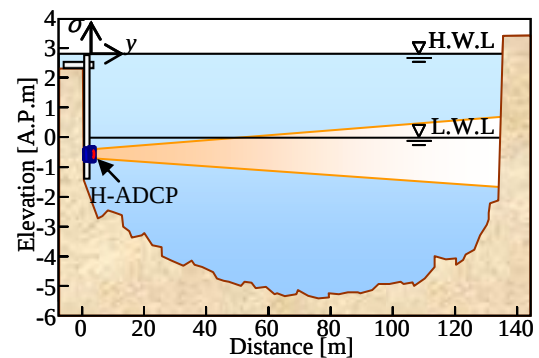
この横断面の低水路左岸側において、周波数 600kHz の H-ADCP (Workhorse 600kHz, Teledyne RDI 製) を高さ A.P.-0.7m の位置に右岸向きに設置した。この周波数の H-ADCP の計測範囲は、標準では 70~100m である。この横断面における低水路幅は H-ADCP の設置高さでは 130m 強となるため、対岸まで H-ADCP の計測を行うことが困難であると予想された。実際の観測では、後述するように、低水時には対岸近傍まで計測できたが、出水時には高濁度水による超音波減衰により計測範囲が縮小した。H-ADCP の設定としては、層厚は 3.0m、層数は 50、不感帯幅は 2.5m、サンプリング間隔は 10 分である。観測期間は 2007 年 7 月 12 日から現在である。

また、H-ADCP 観測と同期する形で、水位、水温、塩分濃度、濁度を計測する。ここでは、水位と水温にはそれぞれ自記式水位計 (U20 Water Level Logger) と水温計 (Water Temp Pro, 共に Onset 社製)、塩分濃度及び濁度にはワイパー付水温塩分計 (Compact-CTW) と濁度計 (Compact-CLW, 共にアレック電子株製) を用いる。測器の設置高さは、水温計については 4 つの高さ (A.P.1.63, 1.15, 0.62, 0.19m) とし、それ以外の測器については H-ADCP とほぼ同じ高さとする。この水温センサーにより、成層状態の一部を把握する。また、濁度計を設置することにより、H-ADCP の流速計測範囲と濁度の関係を調べると共に、土砂輸送量モニタリングも合わせて行う。

流速・水位の計測値を用いて DIEX 法により流量を推定する。解析対象期間は 2007 年 7 月 12 日から 9 月 10 日までとし、この期間中には台風 4 号及び 9 号による出水が発生した。この期間の最高水位は図-2(b)に示すとおりであり、このときには横断面全体が冠水したものの高水敷では明確な流れは生じなかった。そのため、計算領域は低水路のみに限定する。計算格子数は横断方向 271、鉛直方向 100 である。横断方向の格子間隔は 0.5m であり、一方、鉛直方向について、 σ 座標系を採用しているので、各地点の水深を格子数 (=100) で等分割されたものが格子幅となる。計算パラメータは木水ら⁸⁾と同じとする。データ同化範囲としては、後述するように、成層状況と洪水時の濁水状況を勘案して、最大範囲を 4m (第 1 層)



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-2 研究対象サイトの平面・横断面図

y 43m (第 14 層) とし、この範囲内で反射強度の閾値 (=90count) を上回るデータしか用いないこととする。

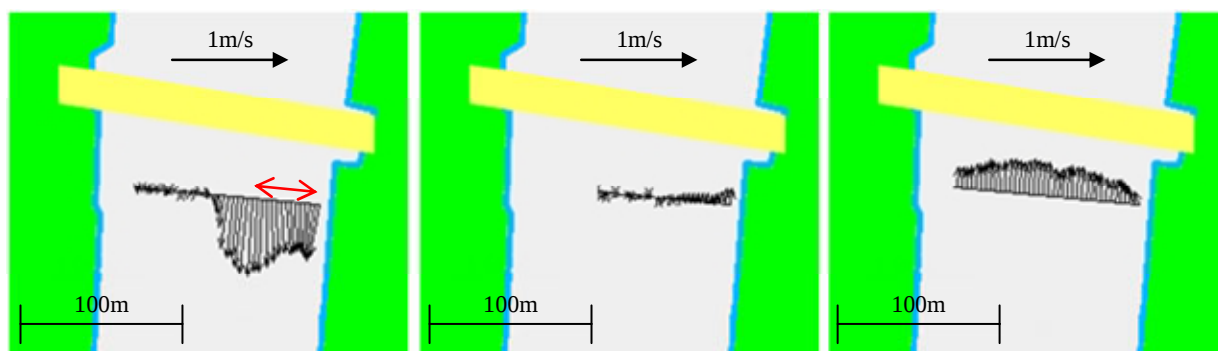
(2) 検証用観測について

本流量モニタリングシステムの検証用データを取得するために ADCP (Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI 製) を用いて流量観測を行った。ここでは、H-ADCP の観測断面から約 140m 上流に位置する白鬚橋において、橋上より鉛直下向きにして水面付近に浮かべられた ADCP を横断方向に移動させて、横断面全体の流速分布や流量を計測する、という ADCP 移動観測法⁹⁾を実施した。観測日は、低水時 (大潮, 2007 年 8 月 14 日) と台風 0709 号による出水時 (2007 年 9 月 7~8 日) である。なお、低水時には密度成層状況を把握するために、STD センサー (Compact-STD, アレック電子株) を用いて、水温と塩分濃度、濁度の鉛直分布を計測した。

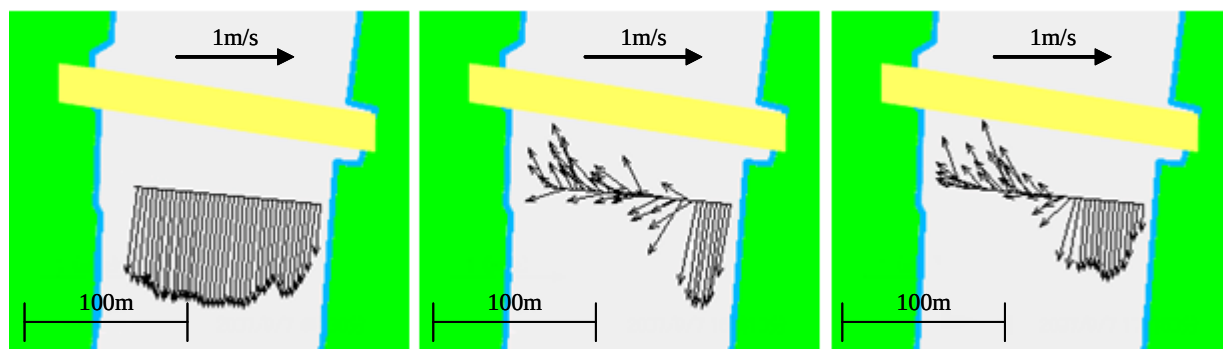
4. 結果と考察

(1) H-ADCP の計測状況

H-ADCP による流速分布の計測状況を調べるために、



(a) 低水時 (2007年8月14日, 左から順に下げ潮時 (7:30), 干潮時 (13:10), 上げ潮時 (18:00))



(b) 洪水時 (2007年9月7日, 左から順に増水期 (4:30), 流量ピーク期 (16:10), 減水期 (17:50))

図-3 H-ADCP 計測高さにおける水平流速ベクトルの横断分布 (図中の赤矢印は正常な計測範囲例を示す)

H-ADCP 計測高さにおける流速ベクトルの横断分布を図-3に示す。ここでは、低水時として ADCP と STD 観測が行われた 2007 年 8 月 14 日を対象とし、下げ潮時 (7:30), 干潮時 (13:10), 上げ潮時 (18:00) の結果を示す。また、出水時に関しても ADCP 観測が行われた 2007 年 9 月 7 日の増水期 (4:30), 流量ピーク期 (16:10), 減水期 (17:50) の結果を表示する。なお、低水時の干潮時に関しては、H-ADCP からの超音波ビームが水表面に当たるため、水表面に到達する前までの流速ベクトルを表示している。

低水時に関しては、干潮時や下げ潮時では、想定される計測範囲内において流速計測が良好に行われている。一方、下げ潮時には、左岸側と右岸側における流速分布パターンは大きく異なる。流れが強い下げ潮時であることを考慮すると、H-ADCP から相対的に離れている右岸側の結果が不自然である。なお、隅田川では船の往来が多く、その影響が計測結果に何らかの影響を及ぼすことも考えられたが、この時には船の通過はないことを確認している。そこで、このときの密度成層状況を調べるために、水温と塩分濃度から算出される σ_t の鉛直分布を図-4に示す。これより、干潮時と上げ潮時には密度成層はないのに対して、下げ潮時には明確な鉛直成層が形成されている。このように、密度成層がある場合、超音波の伝播速度が鉛直位置により異なるので、水中に発信されて扇状に広がる超音波が屈折し、流速計測範囲が成層が無い時と比べて変化する。その結果、H-ADCP から離れた右岸側の流速ベクトルに大きな誤差が生じたものと考え

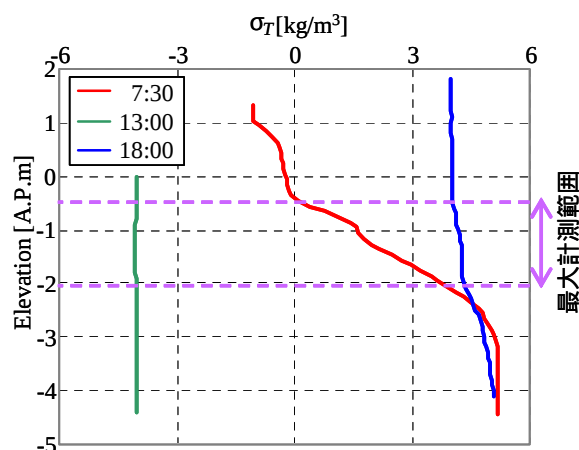


図-4 σ_t の鉛直分布 (2007 年 8 月 14 日)

えられる。似た状況は他の時点で確認されており、流速誤差はいずれも低水路中央部から右岸側の部分で見られ、相対的に H-ADCP に近い左岸側では概ね良好に流速が計測されていた。この結果を踏まえ、本論文では、後述する流量算定に用いる H-ADCP 計測データの同化範囲として、前述したように、最大 $y=43\text{m}$ (第 14 層) と設定する。

洪水時の流速ベクトル (図-3(b)) に着目すると、増水期には対岸の右岸側近傍まで良好に流速を計測できている。それに対して流量ピーク期や減水期では、全体的に流速ベクトルは散乱し、H-ADCP 近傍の左岸側の側岸付近においてのみ下流向きの流速ベクトルとなっている。この要因を調べるために、H-ADCP にて計測される超音

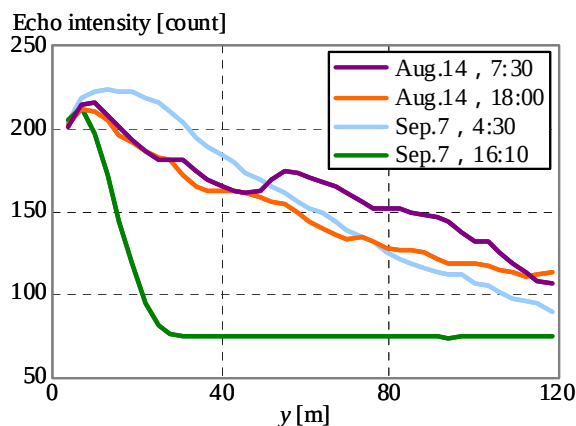


図-5 超音波反射強度の横断分布（低水時：8/14，出水時：9/7）

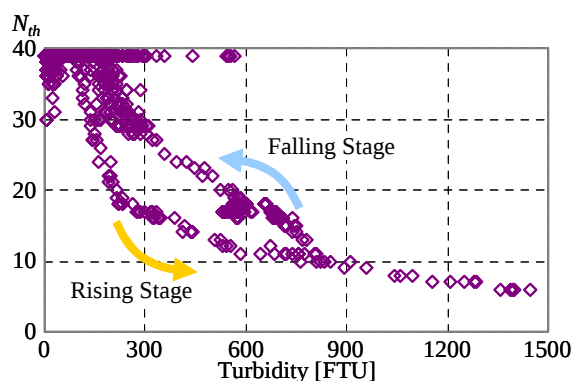
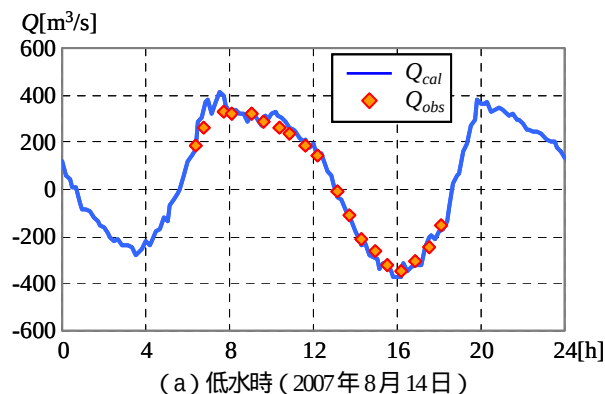
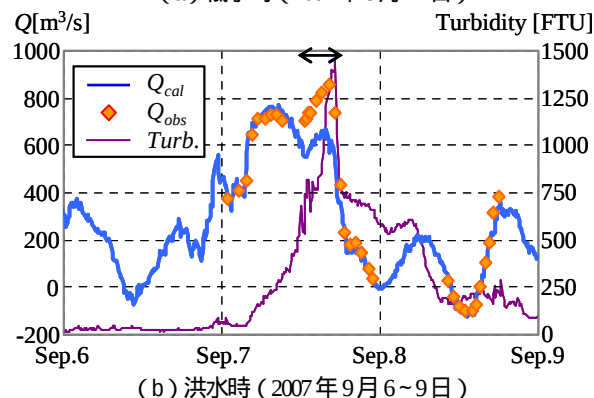


図-6 濁度と有効計測層数 N_{th} の関係

波の反射強度に関する横断分布を図-5に示す。ここでは、低水時（2007年8月14日7:30, 18:00）と出水時（2007年9月7日4:30, 16:10）の結果が表示されている。超音波の反射強度はH-ADCPからの距離と共に減衰し、低水時や出水時増水期（9月7日4:30）では対岸近傍まで概ね一様に減衰している。一方、出水時流量ピーク期（9月7日16:10）では反射強度は横断距離と共に急激に減衰し、 $y=25\text{m}$ 付近ではほぼ一定値となる。この結果と流速ベクトルを比べると、反射強度がおおよそ90count以下の部分では流速ベクトルに大きな誤差が含まれており、出水時には十分な反射強度が得られない地点において流速誤差が顕著になっている。超音波反射強度を減衰させる大きな要因として濁度を調べたところ、この出水時には1000FTUを超える高濁度状況が生じていた。そこで、全観測期間中の濁度と有効計測層数 N_{th} （反射強度が90count以上となる計測層数）の相関図を図-6に示す。なお、元々の計測層数の最大値は39層である。これより、濁度が大きくなると、有効計測層数 N_{th} は減少し、濁度最大値付近では $N_{th}=6$ まで減少している。また、増水期と減水期とでは N_{th} と濁度の関係はループを描く。増水期と減水期では浮遊土砂粒径が異なることが確認されており、これが上記のループの一因と考えられる。これより、H-ADCPの流速計測値を同化データとして用いる際には、高濁度条件下における流速計測状況を反映する必要があり、本論文



(a) 低水時（2007年8月14日）



(b) 洪水時（2007年9月6～9日）

図-7 流量の実測値と推定値の比較（(b)のみ濁度も示す）

では、反射強度90countを閾値として、それ以下の計測地点では同化データとして流速値を採用しないこととする。

（2）本モニタリングシステムの流量推定結果

感潮河川における本流量モニタリングシステムの流量計測精度を調べるために、本システムによる流量推定値 Q_{cal} と検証用データとしてADCP移動観測法により取得された流量実測値 Q_{obs} の結果を図-7に示す。ここでは、ADCP観測が行われた低水時と出水時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、低水時には、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。出水時に限っては、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大幅に小さくなっている。この時、濁度は700FTUを超え、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、今回用いたH-ADCPは周波数600kHzの機器であるが、周波数300kHzを用いることにより、高濁度時における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¹¹⁾。

これらの結果に基づいて、本システムによる流量推定

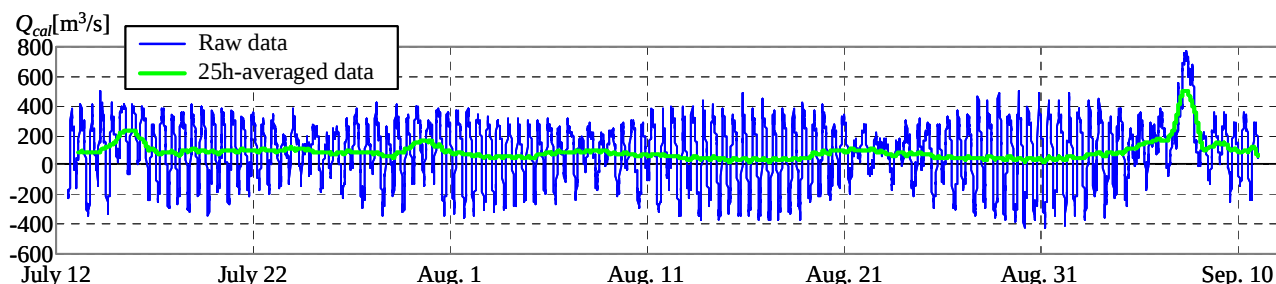


図-8 全期間における流量推定値の時間変化（生データと25時間移動平均値）

精度を定量的に算定する．流量推定結果の相対誤差（ $=|Q_{cal} - Q_{obs}| / Q_{obs} * 100$ ）を求めたところ，低水時と出水時の結果全てに対する相対誤差の平均値は12.9%となった．本システムによる順流域における流量推定精度が4, 5%であったので^{7), 8)}，それと比べると感潮域における流量推定精度は若干落ちる．しかしながら，H-ADCPの周波数を300kHzに変更することにより，出水時におけるデータ取得状況を改善することが可能となり，本システムの推定精度も向上するものと思われる．また，現段階では，DIEX法を感潮域用に改良していないため，今後，乱流モデルや圧力勾配項の取り扱いを精緻化し，モデル精度の改良に取り組む予定である．

図-8は全期間における本システムの流量推定値の時間変化を示す．図中には25時間移動平均値も図示している．これより，全体に流量を算出できており，潮汐による流量振幅は約400m³/sと大きい．また，25時間移動平均流量に着目すると，低水時には，平均的に30～50m³/sとなっている．この隅田川上流域の下水処理放流量の合計値は，年平均値として約25m³/sであり，低水時流量に対する下水放流量の割合は半分以上を占めることが明らかとなった．

5. 結論

H-ADCP計測と河川流解析に基づく新たな河川流量計測システムに基づいて，感潮河川である隅田川の流量モニタリングを実施し，ADCPによる流量観測結果と比較した．そこで得られた主な結論は，以下の通りである．

（1）感潮域では，低水時には密度成層により，洪水時には高濁度状況により，H-ADCPの流速計測値に誤差が生じていた．これらの流速計測誤差を考慮して，流量算定に用いる同化データを選定する必要性を示した．

（2）本システムによる流量推定結果をADCP観測結果と比べた結果，両者は，低水時と洪水時共に概ね一致しており，感潮河川の流量計測に対する本システムの基本的有効性が示された．

（3）洪水時の流量ピーク付近では，本システムによる流量推定精度は低下した．その要因としては，流量ピーク時には高濁度となり，H-ADCPの有効計測範囲が減少し，低水路中央部の高流速部分を計測できなかったため

である．これには，低周波数タイプのH-ADCPを用いることにより，流速計測状況を改善する必要性を示した．

今後，密度成層効果を含む乱流モデルなどを組み込む形でDIEX法を感潮域モデルに改良する予定である．

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．東京都第五建設局には，現地観測実施に際して便宜をはかって頂いた．（株）ハイドロシステム開発や（株）水文環境の皆様には，観測作業の一部を実施して頂いた．ここに記して深甚なる謝意を表します．

参考文献

- 1) 建設省河川局，（株）日本河川協会：改訂新版 河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，pp.33-58，1997．
- 2) 二瓶泰雄，高村智之，渡邊敬之：東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題 海岸工学論文集，Vol.54，pp.1221-1225，2007．
- 3) 横尾啓介，中津川誠，羽山早織，大熊正信：超音波式流速計の連続観測に基づく流量推定手法 - 河川感潮域を対象として - ，河川技術論文集，Vol.10，pp.369-374，2004．
- 4) 岡田将治，森章彦，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．
- 5) 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.
- 6) Lengright, J., Stephan, G. and Frey, W.: Venice lagoon monitoring with wireless acoustic transit time flowmeters synced by GPS and Bluetooth, Proc. 32nd Congress of IAHR, 10 pages, 2007(CD-ROM).
- 7) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP観測と河川流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．
- 8) 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．
- 9) 色川有，二瓶泰雄，北山秀飛：ADCPによる流量計測精度の基礎的検証，土木学会年次学術講演会講演要旨集，Vol.61，pp.433-434，2006．
- 10) 榎木亨監修：環境圏の新しい海岸工学，フジ・テクノシステム，pp.88-116，1999．
- 11) 土屋明訳：水中音響の原理，共立出版，pp.99-144，1978．

(2007.9.30 受付)