

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

AN APPLICATION OF A MONITORING SYSTEM WITH AN H-ADCP
MEASUREMENT AND DIEX METHOD INTO A FLOOD-FLOW MEASUREMENT

木水啓¹・二瓶泰雄²・北山秀飛³

Akira KIMIZU, Yasuo NIHEI and Hideto KITAYAMA

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

²正会員 博（工） 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科（同上）

³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（同上）

As an accurate and continuous river-discharge monitoring system at low cost, we have already developed a new system with an H-ADCP measurement and river-flow simulation. To evaluate river discharge from the velocities measured with the H-ADCP, in the present simulation, we use a DIEX (Dynamic Interpolation and EXtrapolation) method, newly presented by the authors, which may accurately interpolate and extrapolate the velocity in a cross section with satisfying dynamic principles. To check the fundamental applicability of the present system to a flood-discharge monitoring, the H-ADCP measurement has been done at the Edo River and the river discharge has been evaluated with the present method. The calculated river discharge was compared with the results measured with an ADCP, showing that the present monitoring system has high accuracy for evaluations of flood discharge.

Key Words : discharge measurement, H-ADCP, DIEX method, flood flow, data assimilation

1. 序論

河川流量データは、河川工学のみならず、水文学、湖沼工学、陸水学、海岸工学、沿岸海洋学等という水に関わる多岐の分野にわたり用いられる最も基礎的な観測資料の一つである。このため、河川工学上重要な異常渇水や計画高水流量に相当する大規模出水の時の流量のみならず、日々の河川流量データを高精度かつ自動連続的に計測・収集することは不可欠である。

このような要請に応える方法の一つとして、水平設置タイプの超音波ドップラー流速分布計（Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler, H-ADCP）による計測技術が挙げられる。H-ADCPは、水平方向に超音波を発信し水中の散乱体からの反射波のドップラーシフトを利用して、わずか1台で水平方向における流速分布を計測し得る機器である^{1,2)}。この場合流速横断分布という流速の「線」データを取得できるが、単独でH-ADCPを用いるだけでは横断面内における流速の「面」データや流量を算出することはできない。そこで、鉛直方向に移動可能な自動昇降装置にH-ADCPを取り付けて、各高さにおける流速横断分布を計測し、流量を算出するシステムが提案されている¹⁾。このシステムは既に実用化され、鶴見川や大橋

川等における流量観測に適用されている^{1,3)}。しかしながら、このH-ADCPと自動昇降装置を含む計測システムは、非常に高価であり、かつ、大掛かりな設置工事を必要とするため、一般に普及する可能性は高くない。

それに対して、著者らは、固定設置するH-ADCP観測と数値計算技術を融合して、低コストで精度の良い新たな河川流量モニタリングシステムを構築している^{4,5)}。このシステムでは、H-ADCPにより得られる「線」流速データを、河川流解析を介して、流体力学条件を満足した形で横断面全体に内外挿し、流速の「面」データや流量を算出している。その数値解析では、上記の要件を満たすことが可能な力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)を用いる。木水・二瓶⁴⁾では、本システムを江戸川中流部の野田橋付近の流量連続観測に適用し、低水時を対象として本システムによる流量推定精度を調べた。その結果、本システムの流量推定誤差は既存の標準的な低水流量観測法⁶⁾と同程度に小さいことが確認された。しかしながら、そこでの観測期間中には洪水が生じなかったため、洪水流量観測に対する本システムの適用性については未検討のみである。

本研究では、著者らが提案している新しい河川流量計測システムの有用性を幅広く検討するために、洪水流量

観測への本システムの適用性を調べる．ここでは，江戸川において本システムによる流量モニタリングを実施したところ，観測期間中に小規模出水が発生した．ここで得られる洪水流量の推定結果と同時に行われた ADCP による流量観測結果との比較を通して，本システムの妥当性について検討する．

2. 本流量計測システムの概要

(1) 基本構成

本研究で用いる流量計測システムは H-ADCP の流速観測技術と DIEX 法に基づく河川流計算技術を融合した方法であり，その基本構成を図 - 1 に示す⁴⁾．このように，本システムは H-ADCP による流速横断分布計測システムと，得られた流速データを断面全体の流速分布や流量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成り立つ．

H-ADCP 流速計測システムでは，H-ADCP を低水路側岸部に固定設置し，ある高さの流速横断分布を連続計測する．本論文では，計測可能距離が最大 70～100m である周波数 600kHz の H-ADCP (Teledyne RDI 製) を用いる．ここでの観測サイトでは対岸まで約 50m であり，十分計測可能である．河川流シミュレーションシステムでは，H-ADCP により得られた流速データを取り込んだ形で河川流解析を実施し，横断面内における流速分布や流量を算出する．ここでは，流速横断分布という「線」流速データを力学条件を満たした形で横断面全体に内外挿するために，力学的内外挿法 (DIEX 法) を適用する．この DIEX 法では，河川流解析では適用例が極めて少ないデータ同化手法が導入されており，観測データを数値計算に合理的に取り込むことが可能である．

(2) DIEX 法の概要

高精度なりリアルタイム流量モニタリングを実現するために，三次元計算固有の計算負荷を大幅に低減しつつ，観測データを合理的に取り込むことが可能なデータ同化手法を組み込んでいる DIEX 法が提案されている．この DIEX 法では，三次元計算の計算負荷を減らすために，横断面内の流速分布推定に不可欠な項のみを抽出し，それ以外の項を省略した運動方程式を基礎式としており，その式形は，次に示すとおりである．

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

ここで， t は時間， y ， σ は横断，鉛直方向， u は主流 (x) 方向流速， 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．ここでは，移流項や主流方向乱流拡散項等が省略されている代わりに，付加項 F_a を導入し力学バランスを満足させている．

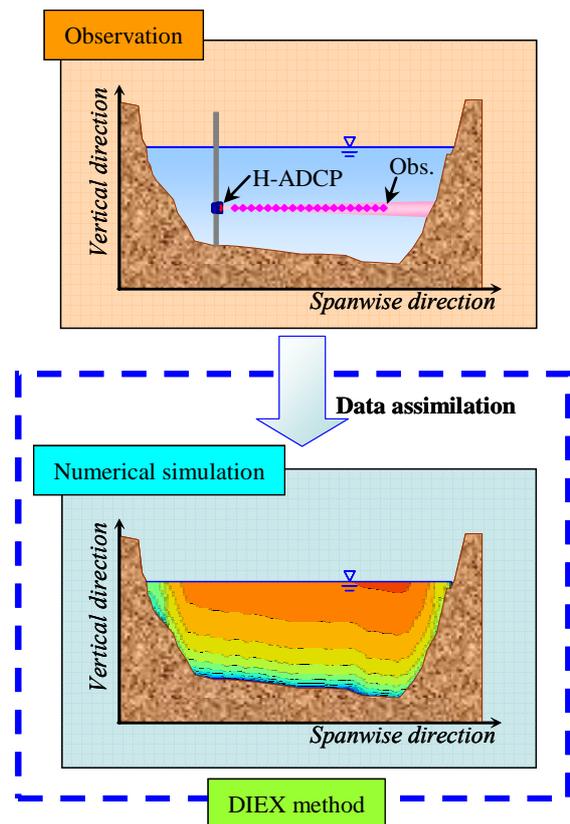


図 - 1 本流量計測システムの基本構成⁴⁾

また，データ同化に際しては，ナッジングスキーム⁷⁾のように流速値を直接同化するのではなく，付加項 F_a を介して同化作業を実施する．これにより，ナッジングスキームとは異なり，観測データをスムーズに計算結果に反映させることが可能となる．さらに，同化データとなる観測値には一般に誤差が含まれているため，ここでは，観測誤差を最小化する数値アルゴリズムをデータ同化手法に導入している．

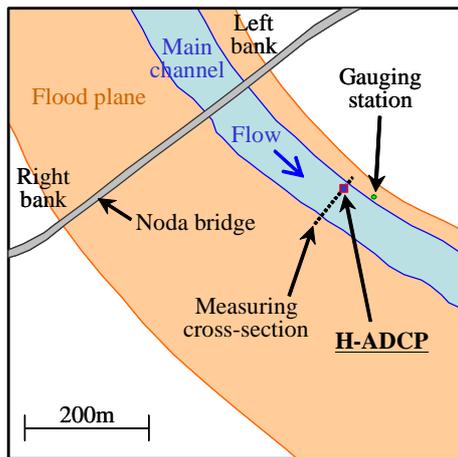
別途行った検討結果から，DIEX 法の CPU 時間は汎用 PC を用いても 1 計算ステップ 0.3 秒と極めて小さく，リアルタイムで流量を算定することは十分可能である．また，DIEX 法による流速鉛直・横断分布の推定結果は，同化対象となる観測値のある部分のみならず，観測値のない部分においても良好である．このように，DIEX 法では，低計算負荷で高精度に流速・流量を推定することが可能な河川流計算法である．なお，上述した計算方法や手順の詳細に関しては，木水⁸⁾を参照されたい．

3. 江戸川における洪水流量モニタリングに対する本システムの適用

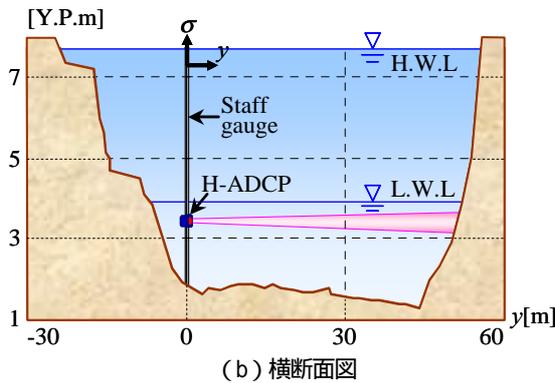
(1) 観測方法及び結果

a) 観測概要

H-ADCP を用いた観測は，木水・二瓶⁴⁾と同様に，江戸川中流部・野田橋 (河口より 39km) において行われた．



(a) 平面図



(b) 横断面図

図 - 2 観測サイトの位置と平面・横断面形状

H-ADCP の設置位置の平面図と横断面図を図 - 2 に示す。実際には、図 - 3 に示すように、左岸側に位置する水位標に H-ADCP を固定設置し、その設置高さは Y.P.3.4m である。H-ADCP では、超音波ビームを 3 本発信しており⁹⁾、各ビームの発信方向は図 - 3 の通りである。観測は 2006 年 6 月 6 日に開始し現在でも継続しているが、本論文では、観測開始時から 7 月 16 日までの約 40 日間についてデータ解析を行う。この期間中の 6 月 16 日から 21 日にかけて小規模出水が発生した。この時の最高水位は図 - 2 (b) に示すとおりであり、横断面全体が冠水したものの、高水敷では冠水するのみで明確な流れは生じなかった。H-ADCP の設定としては、層厚は 0.5m、層数は 128、不感帯幅は 2.0m、サンプリング間隔は 10 分である。この時の計測誤差は理論上 1.04cm/s である。また、H-ADCP 観測と同時に、自記式濁度計を用いて濁度観測を実施している。これは、H-ADCP 観測の適用範囲を考慮する際に大きな影響因子となる濁度データを取得することと、流量のみならず土砂輸送量モニタリングを行うためである。そのため、ここでは、ワイパー付き光学式濁度計 (Compact-CLW, アレック電子株) を H-ADCP センサーと同じ高さに設置した。

また、本計測システムによる流量推定精度を検証するために、H-ADCP による観測断面の約 200m 上流に位置する野田橋 (図 - 2(a)) において、ADCP (Workhorse 1200kHz,

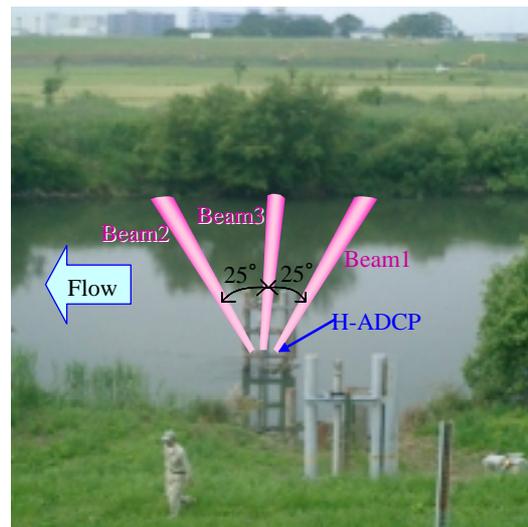


図 - 3 観測場所の様子

Teledyne RDI 製) を用いた流速・流量観測を行った。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ことにより、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。この観測は、上述した出水時に 26 回、低水時に 5 回行われた。さらに、6 月 21 日には、H-ADCP の計測断面において、同じ ADCP を用いた観測を行い、横断面における河床形状や流速分布を取得している。これらの観測方法や流量推定精度の詳細に関しては、別途行われている著者らの研究¹⁰⁾を参照されたい。

b) 観測結果

図 - 4 は対象期間中における水位変動と主流方向流速コンターを示している。ここで、水位データは野田水位観測所における観測結果である。また、主流方向流速コンター図の縦軸は、H-ADCP からの横断距離 y を示しており、図中上端が右岸側に相当している。水位変動データより、6 月 16 日頃には 1.5 日間で水位が約 3m 上昇する出水イベントが発生している。一方、主流方向流速は、出水前は 0.8 ~ 1.0m/s 程度であったが、この出水時には水位変動と共に大きく増加し、最大 1.8m/s 強まで達している。また、全般的に左岸側よりも中央部や右岸側の流速が大きい。

H-ADCP による流速計測精度を調べるために、H-ADCP 計測高さにおける H-ADCP と ADCP による主流方向流速の横断分布を図 - 5 に示す。ADCP データに関しては、H-ADCP 計測範囲の平均値を示し、H-ADCP データについては、ADCP 計測期間中及びその前後合わせて 5 回分の測定結果が表示されている。ここでは 2006 年 6 月 21 日の結果を示す。なお、主流方向とは、H-ADCP の計測断面に対して垂直な方向である。これを見ると、ADCP 計測結果は計測範囲では概ね一様であり、右岸境界近傍の $y > 40m$ においても 0.9 ~ 1.0m/s の流速となっている。それに対して、H-ADCP データについては、低水路中央付近

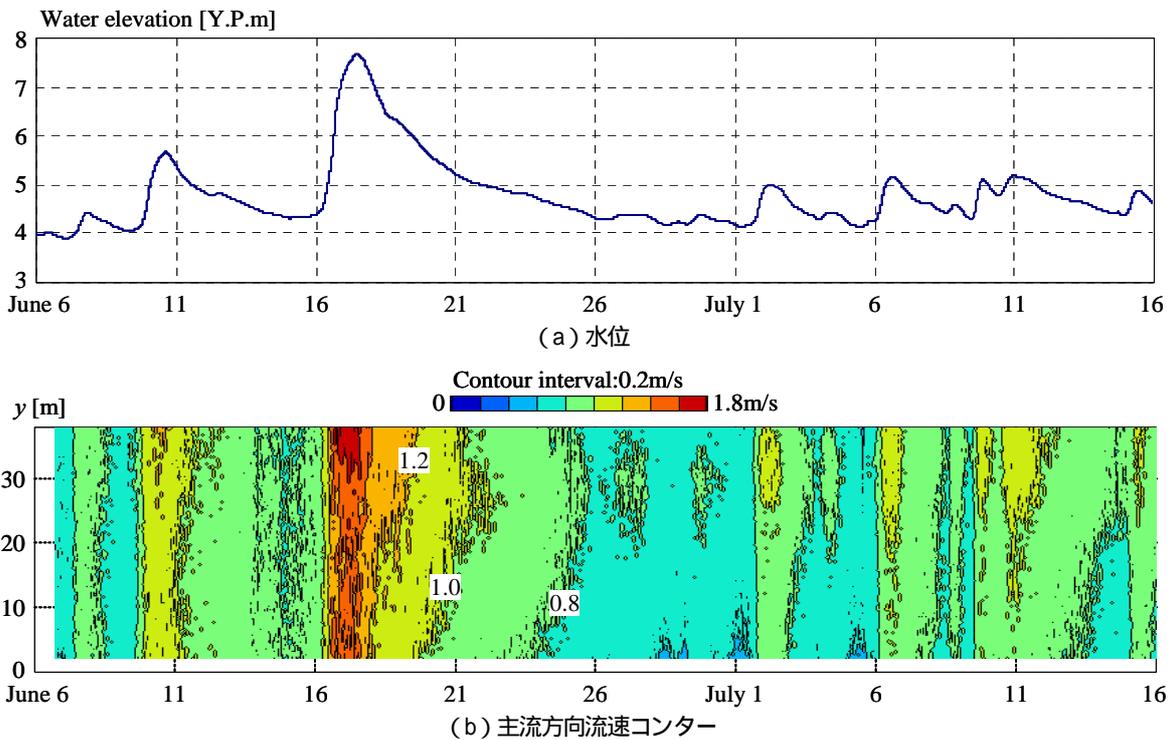


図 - 4 2006年6月6日から7月16日までの水位と主流方向流速の時間変化

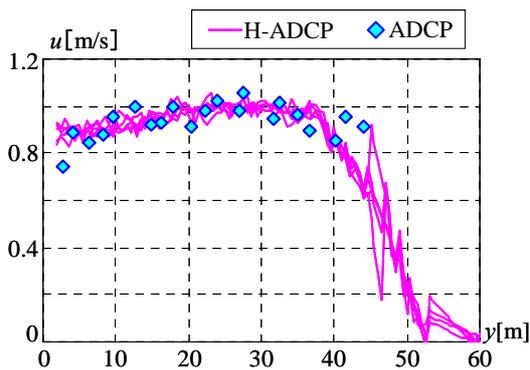


図 - 5 H-ADCP計測高さにおけるH-ADCPとADCPによる主流方向流速横断分布の比較(2006年6月21日13時)

では ADCP 観測結果と良好に一致するものの、 $y > 38\text{m}$ では流速が急激に減少している。H-ADCP では、機器の設置角度により対岸近傍における流速計測誤差が生じることが分かっており⁹⁾、今回も類似した結果が現れているものと考えられる。

(2) DIEX法の計算条件

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。計算領域は、H-ADCPが設置された横断面内である。その断面形状は図-2(b)に示すとおりであり、これは2006年6月21日において測量された結果である。計算格子数は横断方向160、鉛直方向100とし、横断方向の格子幅は0.5mの等間隔とする。数値モデル上の計算パラメータ(マンニングの粗度係数 n や乱れの非等方性指標 β)としては、 $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $\beta=1.0$ とす

る。データ同化範囲については、前節の観測結果を参考にし、 $2\text{m} < y < 38\text{m}$ とする。なお、式(1)中に含まれる水面勾配 I については、この地点の平均河床勾配($=1/3700$)を一定値として与える。

(3) 流量推定結果と考察

a) 本システムの流量推定精度

解析対象期間中において、本流量計測システムにより得られた流量推定結果の時系列変化を図-6に示す。また、図中には、野田橋において行われたADCPによる流量観測結果も合わせて表示している。6月16日~17日の小規模出水時におけるADCP観測は、朝から夕方過ぎまでは概ね1時間間隔で行われているが、夜間等では実施されていないため、この出水時全体にわたり満遍なく観測データは得られていない。この図を見ると、本システムによる流量推定結果は、図-4(a)に示す水位変動に追従して変化しており、全期間にわたり流量を良好に算出している。H-ADCPによる流速観測やDIEX法による流量推定を連続的に実施できており、本流量計測システムにおける一定のロバスト性が示された。ただし、別の観測サイトや様々な洪水流条件での検討を行うことは必須であり、今後実施していく予定である。

次に、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。低水時については、両者の結果は良好に一致している。一方、小規模出水時においても、両者は類似した変化を辿っており、良好に一致している様子が分かる。この時の最大流量は、ADCP観測結果では $538\text{m}^3/\text{s}$ 、本システムの推定結果では $539\text{m}^3/\text{s}$ となっている。さらに、

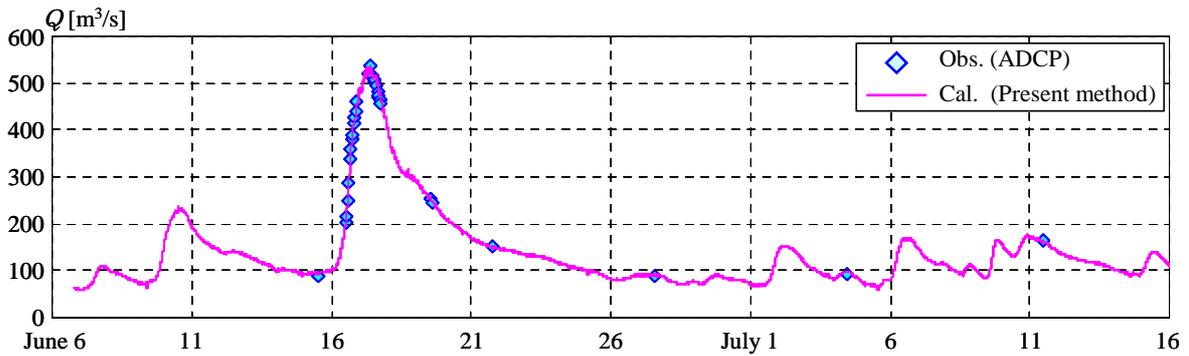


図 - 6 本システムに基づく流量推定結果及び ADCP 観測流量の時間変化

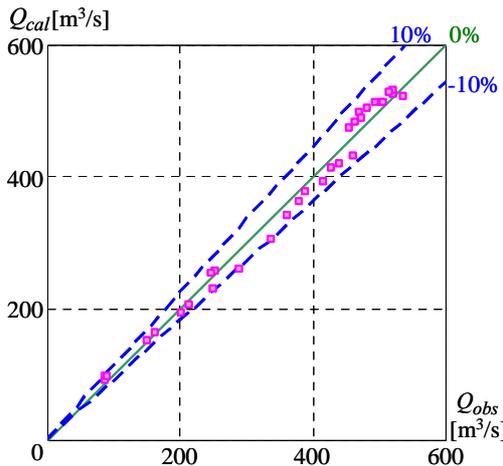


図 - 7 ADCP による流量観測結果 Q_{obs} と本システムによる流量推定結果 Q_{cal} の比較 (図中の実線, 点線は推定結果の誤差 0, $\pm 10\%$ を示す)

本手法による流量推定精度を詳細に検討するために、ADCPによる流量観測結果 Q_{obs} と本システムによる流量推定結果 Q_{cal} の相関図を図 - 7 に示す。同図中には、誤差 0, $\pm 10\%$ に相当する実線, 点線を表示している。これを見ると、本システムによる流量推定結果の大部分は誤差 0% の実線周りに分布しており、全ての結果に関して $\pm 10\%$ の相対誤差の範囲に収まっていることが分かる。そこで、小規模出水中の推定結果に対して相対誤差 Err ($= |Q_{cal} - Q_{obs}| / Q_{obs}$) の RMS (Root Mean Square) 値を求めたところ 4.8% となり、標準的な低水流量観測精度 (-4.6%) と同程度となっている。以上のことから、洪水流量モニタリングに対して、H-ADCP観測技術とDIEX法による数値計算技術を融合している本システムの基本的な有効性及適用性が明らかとなった。

b) 出水時における水位 - 流量関係

出水時における水位 H と流量 Q の関係を見るために、小規模出水時での本システムの流量推定結果と水位観測値の相関図を図 - 8 に示す。ここでも、ADCP観測結果について合わせて表示している。また、小規模出水時(2006年6月16日12時~6月20日12時)のデータを増水期と減水期に分けて図示している。まず、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

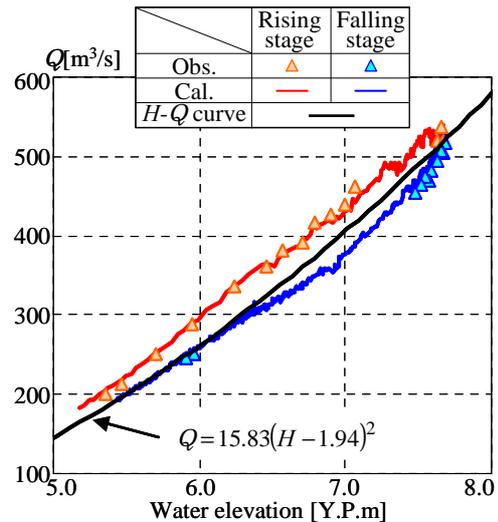
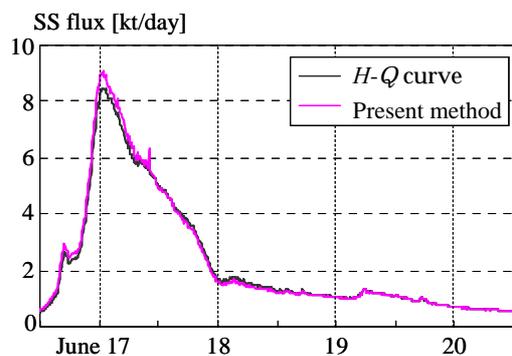


図 - 8 小規模洪水時における水位と流量の関係 (2006年6月16日12時~6月20日12時)

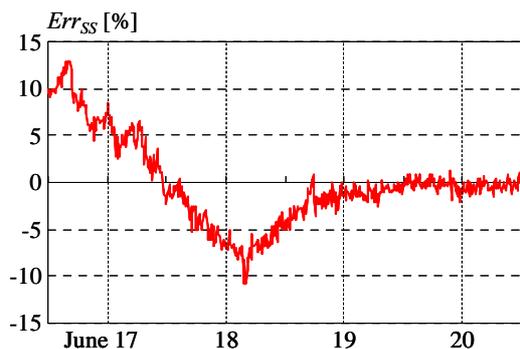
水期よりも大きい、というよく知られた水位 - 流量関係のループを描いている。本システムの推定結果と良好に一致している ADCP 観測結果においても、水位 - 流量関係のループは概ね確認できる。このような出水イベント中の流量の非定常変化は、最も一般的に用いられる流量算定法である $H-Q$ 式では当然再現できない。そのようなことから、出水中の時々刻々の洪水流量評価を行う上では、本流量計測システムの有用性が示唆された。

c) 浮遊土砂輸送量評価

上述したように、 $H-Q$ 式では出水中の時々刻々の流量算定に限界があることに加えて、出水中に大きく変化する土砂、栄養塩、有機物濃度の輸送量評価においても、 $H-Q$ 式を用いると誤差を生む可能性がある。そこで、本計測システム及び $H-Q$ 式により得られた 2 つの流量データと同地点で観測された SS 値の積をそれぞれ求め、得られた 2 種類の浮遊土砂輸送量データを図 - 9 (a) に示す。ここでは、小規模出水時における浮遊土砂輸送量の時間変化を示しており、そこでの SS は濁度データから換算されたものである。また、 $H-Q$ 式は、図 - 8 に示されている本システムによる流量推定値を対象に算出しており、その結果を図 - 8 中実線 (黒色) で示す。また、本システムによる流量を用いた場合を真値とし、 $H-Q$ 式より得



(a) 本システム及び $H-Q$ 式による浮遊土砂輸送量の比較



(b) 相対誤差 Err_{SS}

図 - 9 小規模出水時における浮遊土砂輸送量の推定結果

られる流量を用いたときの浮遊土砂輸送量の相対誤差 Err_{SS} を図 - 9 (b) に示す。これより、 $H-Q$ 式を用いて浮遊土砂輸送量を評価すると、本システムの流量推定値を用いた場合と比べて最大10%程度の誤差が生じていることが分かる。このように、浮遊土砂輸送量を含めて様々な物質輸送量・汚濁負荷評価を行う上では、時々刻々の流量を精度良く算定する必要があり、そのためには、本流量計測システムは有用であることが示唆された。

4. 結論

著者らが開発している H-ADCP 観測技術と DIEX 法に基づく河川流解析技術を融合した新しい河川流量計測システムの有用性を幅広く検討するために、江戸川・野田橋における洪水流量計測に対して本システムを適用し、別途行われた ADCP による流量観測結果と比較・検討した。そこで得られた主な結論は、以下の通りである。

(1) 本システムによる流量推定結果は、低水時のみならず、小規模出水時においても、ADCP 観測結果と良好に一致していた。本推定結果に対する相対誤差の RMS 値は 4.8% となり、本流量計測システムでは高精度に洪水流量を推定し得ることが明らかとなった。

(2) 出水時における水位・流量関係を検討したところ、よく知られる水位・流量関係のループを描いており、その結果は ADCP 観測結果と良好に一致していた。これより、最も一般的な流量算定法である $H-Q$ 式では得られな

い洪水時の流量変化を本システムでは良好に推定しており、本システムの有用性が示唆された。

(3) 洪水時における時々刻々の正確な流量評価が浮遊土砂輸送量を含む様々な物質輸送量・汚濁負荷量の高精度算定には重要であり、それに対して本システムが有効であることが示された。

なお、本論文で対象とした出水は $600\text{m}^3/\text{s}$ 弱の小規模であったため、より大きな出水時において本システムの流量推定精度を検証していく必要がある。特に、高水敷を含む複断面流れや、流木やゴミなどが大量に発生した時に、H-ADCP により連続計測が可能となるか疑問が残る。これと並行して、本システムの適用範囲を調べることも今後の重要な課題である。

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には、現地観測実施に際して様々な便宜をはかって頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 大東秀光, 上坂薫, 南修平, 劉炳義, 橘田隆史: H-ADCP を用いた河川流量観測システムの開発と現地試験観測結果について(3), 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, Vol.56, pp.454-455, 2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 木水啓, 二瓶泰雄: H-ADCP 観測と数値解析を融合した新しい河川流量推定システムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, Vol.61, pp.437-438, 2006.
- 5) 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, 2006 (投稿中).
- 6) 今村仁紀, 深見和彦, 天羽淳: 河川における低水流量観測技術基準の再評価, 土木技術資料, Vol.48, No.1, pp.66-71, 2006.
- 7) Robinson, A. R., Lermusiaux, P. F. J. and Sloan, N. Q.: Data assimilation in The SEA (eds. Brink, K. H. and Robinson, A. R.), John Wiley & Sons, Vol.10, pp.541-594, 1998.
- 8) 木水啓: H-ADCP に基づく河川流量自動モニタリングシステムのための新たな河川流計算手法の開発と応用, 東京理科大学大学院理工学研究科修士論文, 2006.
- 9) 二瓶泰雄, 北山秀飛, 江端萌奈美, 色川有: 江戸川における H-ADCP の流速連続モニタリング, 河川技術論文集, Vol.12, pp.139-144, 2006.
- 10) 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概要集第 2 部, Vol.61, pp.433-434, 2006.

(2006.9.30 受付)