

# 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

FLOOD-DISCHARGE MONITORING IN A COMPOUND CHANNEL  
WITH H-ADCP MEASUREMENT AND RIVER-FLOW SIMULATIONS

岩本演崇<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>

Hiroataka IWAMOTO and Yasuo NIHEI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

We attempt to apply a new discharge monitoring system with H-ADCP measurement and numerical simulations, presented by the authors, into flood-discharge monitoring in a compound channel. In the numerical simulation, we introduce two types of numerical procedures for data assimilation using an additional term  $Fa$  (previous) and Manning's roughness  $n$  (new), called as DIEX- $f$  and DIEX- $n$  methods, respectively. The present method with two models was applied to flood-discharge monitoring in the middle reach of the Edogawa River. The results indicate that the present method with DIEX- $f$  and DIEX- $n$  methods give better performance for discharge monitoring under large flood conditions than the index-velocity method, showing the applicability of the present method into flood-discharge monitoring in a compound channel.

**Key Words** : discharge measurement, H-ADCP, DIEX method, compound channel, data assimilation

## 1. はじめに

河川・湖沼・沿岸管理を行う上では、河川流量データは重要な観測資料の一つである。それには、順流域や感潮域において、湧水時から洪水時にわたる時々刻々の流量を高精度かつ自動連続的に計測可能な流量観測システムを開発することが望ましい。これまで多くの河川では、地点毎の水位流量曲線( $H$ - $Q$ 式,  $H$ : 水位,  $Q$ : 流量)と水位観測値から流量の時間変化を計測しているが、洪水時や感潮域では水位 $H$ と流量 $Q$ が一価の関係とならない等、 $H$ - $Q$ 式を用いる手法にはある程度の限界がある<sup>1)</sup>。

この問題を解決する流量計測法としては、超音波流速計測技術を用いた手法が近年脚光を浴びつつある<sup>2)~6)</sup>。これらの計測法の中でも水平設置型超音波ドップラー流速分布計(Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler: H-ADCP)は、わずか一台である高さの流速横断分布計測を行うことが可能であるので、流量計測法としてH-ADCPは極めて有望な機器である<sup>4)~6)</sup>。このH-ADCPを固定設置する場合、ある高さの流速横断分布という流速の「線」データを計測できるものの、横断面全体の「面」流速データは直接的には取得できず、横断面内に未計測エリアが

残ってしまう。また、高濁度時には超音波の減衰が大きな問題となり、H-ADCPの流速計測範囲が減少し、未計測エリアが拡大する結果が報告されている<sup>7)</sup>。このような横断面内の未計測エリア問題を解決するために、H-ADCPを自動鉛直昇降装置に取り付けて、横断面全体の流速分布を計測する試みが行われている<sup>4)・5)</sup>。しかしながら、この計測システムは大掛かりで高価なため、一般に普及する可能性は低いものと考えられる。

このH-ADCPの未計測エリア問題を低コストな手段で解決するために、著者らは、固定設置したH-ADCP計測技術と河川流計算技術を融合した河川流量モニタリングシステムを構築している<sup>7)~10)</sup>。本手法の大きな特徴としては、河川流計算において力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)を用いて、H-ADCPにより得られた「線」データを力学条件を満たした形で内外挿して、「面」流速データや流量を算定することである。本手法は、複断面河道を有する江戸川・野田橋にて適用され、低水時や高水敷がほとんど流れない小規模出水時における本手法の流量計測精度が概ね5%程度となっている<sup>8)~10)</sup>。さらに、感潮域である隅田川の流量計測にも本手法を適用し、その計測精度が概ね

良好であることが示された<sup>7)</sup>。以上より本手法の基本的な妥当性は検証されているものの、複断面河道における大規模出水の流量計測に対する本手法の適用性についてはこれまで検証されていない。

本研究では、複断面河道における洪水流量計測に対して本手法を適用し、その計測精度を検証する。上述した複断面河道を有する江戸川・野田橋では、本手法により2006年から現在まで長期間流量観測を実施しており、この期間中高水敷において顕著な流れが起こる大規模洪水イベントが2回生じた。本論文では、その大規模洪水イベントに対する本手法の適用性を検討する。この際には、これまでの DIEX 法におけるデータ同化手法についても検討・改良し、その効果についても合わせて検証する。また、H-ADCP による流量算出時によく用いられる Index Velocity 法<sup>11)</sup>の流量推定精度も合わせて比較する。

## 2. 本流量モニタリング手法の概要

### (1) 基本構成

本流量モニタリング手法は、図 - 1 に示すように、H-ADCP による流速計測と、力学的内外挿法に基づく河川流シミュレーション、という2つのサブシステムから構成されている。ここでは、1台のH-ADCPにより低水路内におけるある高さの流速横断分布を計測し、得られた流速の「線」データを河川流シミュレーションを介して低水路・高水敷を含む横断面全体における流速の「面」データを算出する。なお、著者らは、現地観測データを数値計算用PCまで転送し、その結果をWEB上にアップロードするテレメータサブシステムを別途構築しており、江戸川では適用していないが、隅田川における流量のリアルタイムモニタリングデータをWEB上に公開している (<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~hydrolab/vortex.htm>)。

### (2) 力学的内外挿法の改良

#### a) 改良前

上記の河川流シミュレーションのベースとなる力学的内外挿法<sup>8) - 10)</sup>では、H-ADCPによる流速観測値を同化データとして取り込んで流量を求める。そこでは、横断面 ( $y$ : 横断方向,  $\sigma$ : 鉛直方向) を計算対象領域とし、次式のように移流項や非定常項等を省略して簡略化された主流方向運動方程式を基礎方程式として用いる。

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

ここで、 $u$  は主流方向流速、 $A_H$  と  $A_V$  は水平・鉛直渦動粘性係数、 $g$  は重力加速度、 $I$  は水面勾配、 $D$  は水深、 $a$

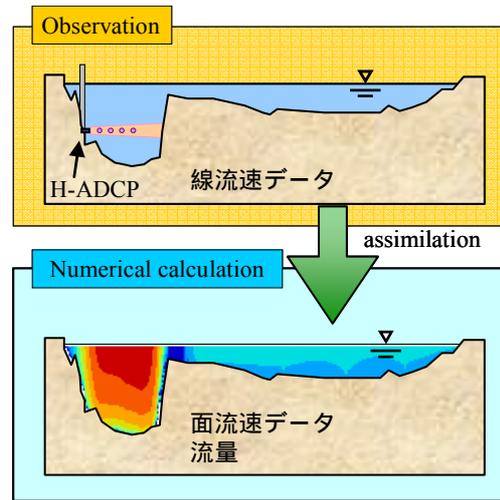


図 - 1 本流量モニタリング手法の概要

と  $C_b$  は植生密度とその抵抗係数を表す。上式では、省略された移流項や非定常項の代わりとして、新たに付加項  $F_a$  を導入している。この付加項  $F_a$  を介してデータ同化を行っており、その際には式 (1) を水深平均した次式を用いる。

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

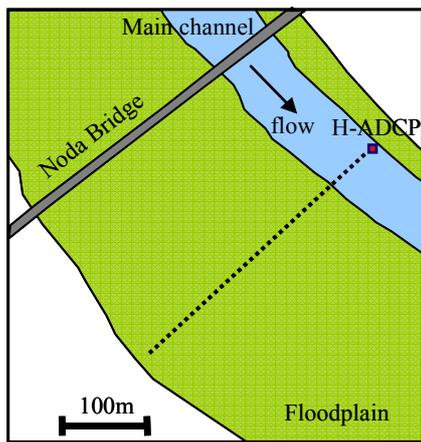
ここで、 $\overline{A_H}$  は水深平均された水平渦動粘性係数、 $C_f$  は底面摩擦係数 ( $= gn^2/D^{1/3}$ ,  $n$ : マニングの粗度係数) であり、また付加項  $F_a$  は鉛直方向に一様と仮定している<sup>8)</sup>。この方法では、観測値のある範囲では付加項を式(2)より求められるが、観測値の無い範囲では付加項を何らかの形で外挿する必要がある。そのため、図 - 1 のような観測状況において複断面河道の流量計測を行うと、観測値が低水路の一部しか存在しないので、計算精度が付加項の外挿方法に大きく依存してしまう。このようなことから、上述したDIEX法をそのまま複断面河道の流量モニタリングに適用するのは問題がある可能性があり、付加項を用いるデータ同化手法を改良する必要がある。

#### b) 改良後

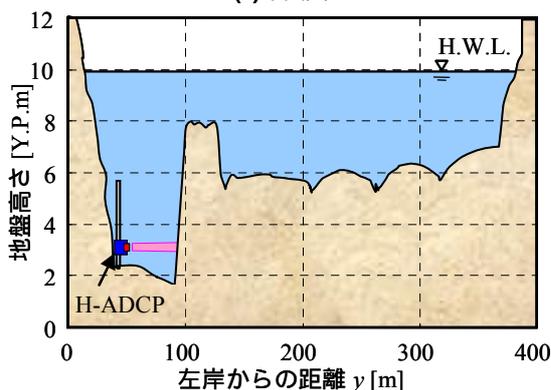
そこで、データ同化用の変数として、付加項よりも物理的意味が明確で、データ同化範囲以外の地点においても設定し易いマニングの粗度係数  $n$  を用いて、DIEX法を改良する。具体的には、まず、基礎方程式としては、式 (1) から付加項  $F_a$  を消去した次式を用いる。

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

また、データ同化を行う際には、同様に、式 (2) より付加項を除いた式を用いており  $n$  を計算できるように整理すると以下のように与えられる。



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-2 研究対象サイト(江戸川・野田橋下流200mの横断面)

$$n = \sqrt{\frac{4}{D^3} \left( gl + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{-}{A_H} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{aC_b}{2} u^{-2} \right)} \quad (4)$$

このように、式(3)、(4)を用いて、マンニングの粗度係数 $n$ を介してデータ同化を行う計算法をDIEX- $n$ 法と呼ぶことにし、これまでの付加項 $F_a$ を同化データとする計算法を便宜的にDIEX- $f$ 法と呼ぶことにする。なお、DIEX- $n$ 法における計算手順としては、基本的にはDIEX- $f$ 法で用いられる手順と同じである。異なる部分は前述した基礎式のみである。

### 3. 複断面河道における洪水流量計測への適用

#### (1) 現地観測方法

##### a) 観測概要

本論文では、複断面河道における洪水流量計測に本手法を適用するために、複断面河道を有する江戸川・野田橋の下流200m地点においてH-ADCP(Workhorse 600kHz, Teledyne RDI製)を設置している。このモニタリング自体は2005年9月~12月、2006年6月から現在まで実施し、本手法の計測精度の検討結果の一部を既に報告している<sup>8)-10)</sup>。

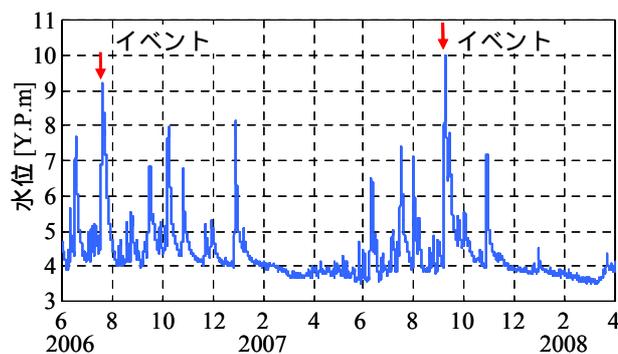


図-3 江戸川・野田橋における水位の時間変化

H-ADCPの設置位置の平面図と横断面図を図-2に示す。このように、H-ADCPが設置された断面は、右岸側に幅の広い高水敷を有する複断面形状となっており、また、やや右岸寄りに湾曲した形となっている。H-ADCPはこの横断面の低水路左岸側( $y=46.5\text{m}$ ,  $y$ : 左岸側堤防天端からの横断方向距離), Y.P.3.4mの高さに固定設置されている。ここで用いた周波数600kHzのH-ADCPは本来70~100mを計測可能であるが、設置高さの関係で、ここでの計測範囲は最大でH-ADCP設置位置から低水路右岸側までの40m強となる。H-ADCPの設定としては、層厚0.5m、層数128層(2008年8月から100層)、不感帯幅2.0m、計測時間間隔10分であり、この設定における理論上の計測誤差は1.1cm/sである。また、H-ADCPと共に、自記式濁度計(Compact-CLW, JFEアレック株製)も合わせて設置し、高濁度時におけるH-ADCPの計測状況を検討する。その他の詳細は著者らの論文<sup>8)-10)</sup>を参照されたい。

図-3は、H-ADCP設置期間である2006年6月から2008年4月までの野田水位観測所において計測された水位の時間変化を示す。図中の矢印で表示されているように、水位が横断面全域を冠水する高さ(Y.P.8.0m)を大幅に上回り、高水敷に顕著な流れが観測された大洪水はこの期間中2回観測された。一つ目は2006年7月19~22日にかけて発生し、最大水位はY.P.9.2mまで達した。このとき、江戸川の上流域に当たる利根川の流量観測基準点(栗橋)から上流域の平均雨量は約130mmであった。二つ目は、関東地方に上陸した台風0709号による出水であり、最大水位はY.P.10.0mである。この時の栗橋上流域の平均雨量は230mmであった。この水位は戦後9番目の記録である。以下、これらの出水をイベントと呼ぶ。

本手法の流量推定精度を検証するために、ADCP(Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI製)を用いて流量観測を行った。この観測ではH-ADCP設置断面の上流に位置する野田橋・下流側において、専用浮体に取り付けられたADCPを橋上からロープで引っ張り横断方向に移動させる、というADCP移動観測法を採用している<sup>12)</sup>。この観測をイベントにおいて実施し、この結果を検証用データとして用いる。

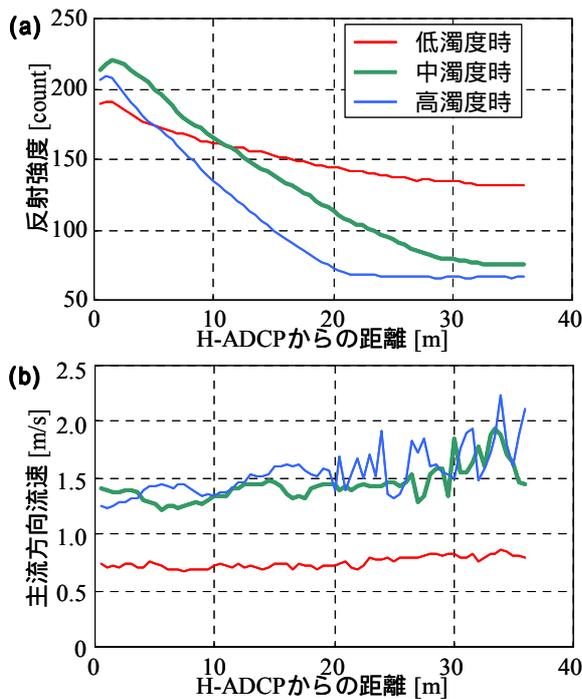


図-4 H-ADCPにより計測された超音波反射強度(a)と主流方向流速(b)の横断分布(出水イベント)

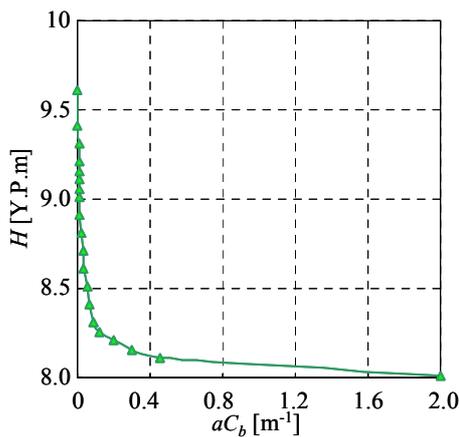


図-5 植生パラメータ  $aC_b$  の設定

#### b)高濁度時におけるH-ADCPの計測状況

高濁度が観測された出水イベント時におけるH-ADCPの計測状況を確認するために、H-ADCPにより計測された超音波反射強度と主流方向流速の横断分布を図-4に示す。ここでは、出水イベントを例として、低濁度時(2007年9月6日1時、濁度7.8FTU)、中濁度時(9月6日16時、濁度296FTU)、高濁度時(9月7日17時、濁度1004FTU)の結果を表示している。この超音波反射強度は、水中の超音波減衰等の補正を施していない生データであり、単位は独自に基準化されているcountであり、その最大値は255である。なお、図の横軸は、H-ADCPからの横断距離である。これより、どの濁度においても、反射強度はH-ADCPからの距離と共に減少するものの、その減少量は濁度と共に急激に増加している。特に、高濁度時には、反射強度が一定値となる部分が広範囲に見られ、高濁度状況に

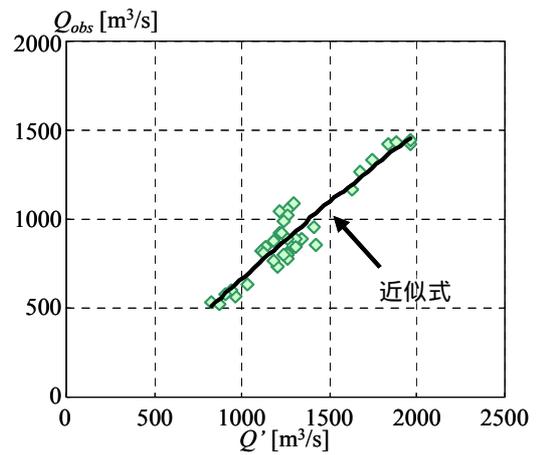


図-6 Index Velocity法における  $Q' (= V_{Hadcp} * A)$  と検証用流量観測値  $Q_{obs}$  の相関関係

より超音波が著しく減衰していることが分かる。これに対して流速横断分布は、低濁度時にはノイズがほぼ無いデータが計測されているが、中・高濁度時には、対岸付近を中心に流速データに大きなノイズが見られる。その様子は高濁度時ほど顕著であり、有効な計測範囲は15~20m程度である。このような計測ノイズが顕著になるのは、反射強度がおよそ100よりも小さいところで見られる。類似の現象は隅田川でも確認されており<sup>7)</sup>、高濁度時にH-ADCPデータを用いて流量を算定するには、データ同化範囲の選定に注意を要する。

#### (2) 計算諸条件

本手法では、H-ADCP計測データを用いてDIEX-*f*法とDIEX-*n*法により流量を算出する。計算範囲は低水路、高水敷を含む全横断面である。横断方向の格子幅と格子数は0.5m、825、鉛直方向の格子数は100とする。両手法で用いる計算パラメータとしては、植生密度  $a$  と植生抵抗係数  $C_b$  の積については、観測された流量を参考にして、水位  $H$  の関数として図-5のように設定した。ここでは、植生は高水敷に一樣に繁茂しているものとして、これらの植生パラメータを高水敷に一樣に与えた。また、マンングの粗度係数としては、DIEX-*f*法では、低水路と高水敷においてそれぞれ0.035、0.041m<sup>-1/3</sup>sとして与えた。また、DIEX-*n*法では、同化用データが無い高水敷ではDIEX-*f*法と同じく粗度係数を0.041m<sup>-1/3</sup>sと設定した。

データ同化条件としては、高濁度時に有効計測範囲が減少することを考慮するために、有効計測範囲の判定条件として反射強度の閾値 (=110count) を設定し、その閾値を上回る地点のデータを同化計算に採用する。また、同化範囲外のところで同化用変数 (DIEX-*f*法では付加項  $F_a$ 、DIEX-*n*法では粗度係数  $n$ ) を外挿する際には、同化データに対する近似曲線を用いていたが<sup>8)</sup>、高濁度時のように同化範囲が著しく狭いと外挿結果が不自然となる。

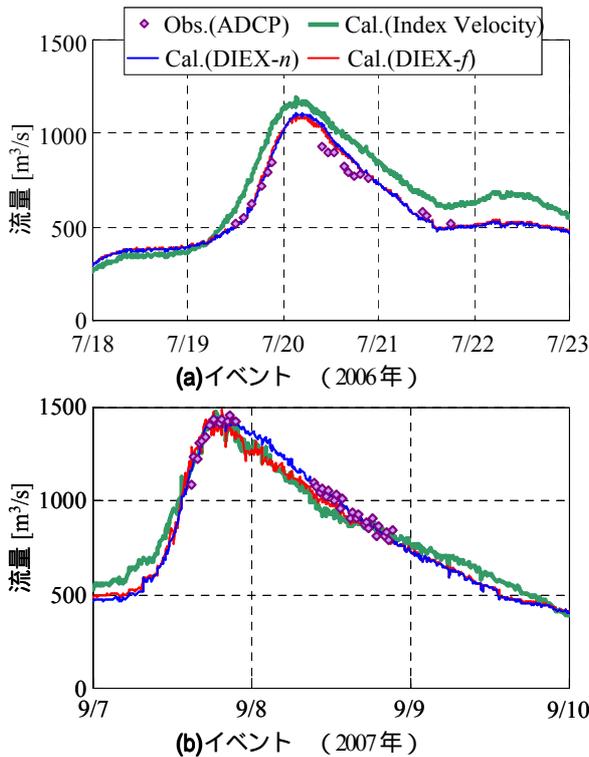


図-7 各方法による流量推定結果の時間変化

そこで、最もシンプルな方法として、DIEX-f法では、同化範囲内で得られた付加項  $F_a$  の平均値を求め、その平均値を横断面全体に一樣に与える。同様に、DIEX-n法においても同化範囲内における粗度係数  $n$  の平均値を計算し、それを低水路全体に与える。

また、上記の2つの方法と共にH-ADCPによる流速データを指標として流量を算出するIndex Velocity法により流量を推定する。ここでは、各時刻のH-ADCPにより計測される流速の平均値  $V_{Hadcp}$  (20層平均) とそのときの断面積  $A$  の積を仮想的な流量  $Q' (= V_{Hadcp} \times A)$  とし、それと検証用流量  $Q_{obs}$  の相関関係を用いて時々刻々の流量を求める。この両者の相関図を図-6に示す。これを見ると、 $Q'$  と  $Q_{obs}$  の間は一意的な関係とならず、洪水時特有のループ現象が確認されている。これらのデータに対する近似曲線として図に示す二次曲線を算出し、これを用いて時々刻々の  $V_{Hadcp}$  と断面積  $A$  から流量を算出する。

### (3) 流量推定結果と考察

本手法による複断面河道の洪水流量推定精度を調べるために、まず、DIEX-f法とDIEX-n法、Index Velocity法により得られた流量推定値の時間変化を図-7に示す。ここでは、二つの出水イベントを対象とすると共に、検証用の流量観測値  $Q_{obs}$  を合わせて示している。これを見ると、イベントではDIEX-f法とDIEX-n法の計算結果はほぼ一致するため、図中では線が重なっている。また、両者の結果と観測値を比べると、全体的な傾向はトレースできているものの、減水期では計算結果はやや過大評価とな

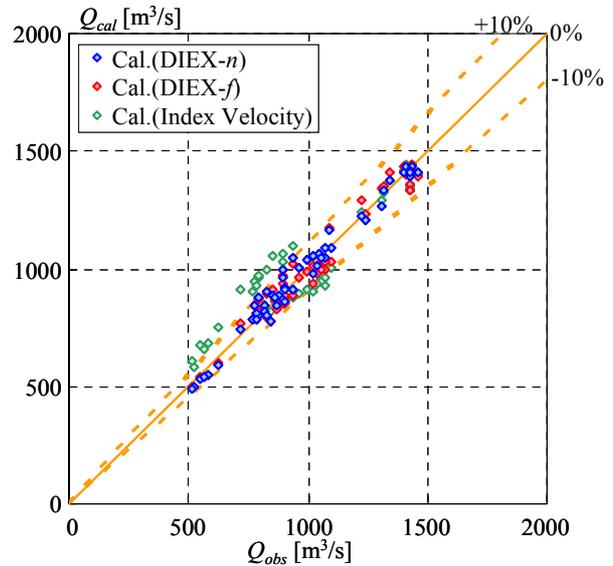


図-8 流量の推定値  $Q_{cal}$  と観測値  $Q_{obs}$  の相関図 (イベントと の結果を対象)

っている。それに対して、より大きな流量が観測されたイベントでは、両計算手法ともに、流量推定値は概ね観測値と一致している。また、両計算結果の違いは、流量ピーク付近から減水期に見られる。一方、Index Velocity法に関しては、イベントでは過大評価、イベントでは過小評価の傾向が見られ、本手法よりも流量推定値と観測値の差が大きい。

より詳細に各手法の流量推定精度を検討するために、二つの出水イベント時における流量の推定値と観測値の相関図を図-8に示す。ここでは、DIEX-n法とDIEX-f法、Index Velocity法の推定結果が含まれる。また、図中には、推定値と観測値の差を見やすくするために相対差  $\pm 10\%$  の線も表示する。DIEX-n法とDIEX-f法の推定結果は全て相対差  $\pm 10\%$  に収まっているのに対して、Index Velocity法では相対差  $\pm 10\%$  を超える結果が見られる。これらの結果を用いて相対差のRMS (Root Mean Square) 値を計算すると、このRMS値はDIEX-n法では4.4%、DIEX-f法では5.0%、Index Velocity法では12.0%となった。これより、本研究で改良したDIEX-n法の流量推定精度が最も良いが、元々用いていたDIEX-f法も相対差5.0%と良好な結果が得られていることが分かる。前述したように、同化データ (粗度係数  $n$  もしくは付加項  $F_a$ ) の横断方向の外挿操作はそれほど流量推定精度を低下させていないことが示唆された。また、DIEX-n法やDIEX-f法は、両方とも、Index Velocity法よりも十分高精度であり、DIEX-n法やDIEX-f法により力学条件を満たした形で流速の線データを面データに変換する操作が極めて有効であることが示された。

図-9は、出水イベントにおける水位と流量の関係を示す。図中には、検証用観測データと共に、DIEX-n法とDIEX-f法、Index Velocity法による流量推定値が表示されている。これより、検証用観測データに見られる水位と流

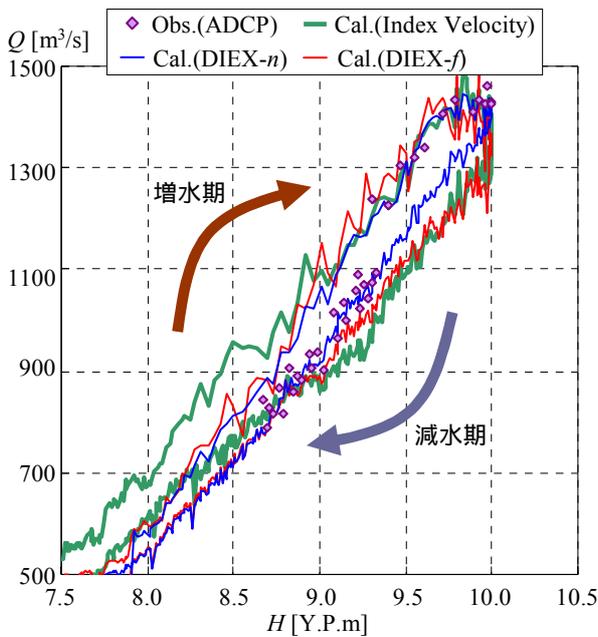


図-9 出水イベントにおける水位と流量の関係

量との関係性をDIEX- $n$ 法の推定結果が最も良くトレースできている。Index Velocity法では、 $H-Q$ 式による流量算定結果と異なり、水位と流量のループ自体は表現できるが、推定値と観測値の違いは、これらの3つの方法の中で最も大きい。このように、DIEX- $n$ 法は、複断面河道における洪水流量変化を概ね良好に推定できるとともに、水位と流量のループ関係もDIEX- $f$ 法よりも良好に再現できている。以上より、本論文で提案したDIEX- $n$ 法の基本的な有効性やその改良の効果が示された。

#### 4. おわりに

本研究ではH-ADCP計測と数値解析に基づく新たな河川流量モニタリング手法の適用性を拡張するために、本手法を複断面河道の洪水流量モニタリングに適用することを試みた。その際には、これまで数値モデルとして用いていたDIEX法を複断面河道に適したものにするために、データ同化時に用いた付加項 $F_a$ の代わりに(DIEX- $f$ 法)、物理的な意味が明確なマンニングの粗度係数 $n$ によりデータ同化を行う手法を構築した(DIEX- $n$ 法)。

本手法の適用性を検証するために、複断面河道を有する江戸川・野田橋において本手法による長期流量モニタリングを2006年より実施し、その期間中、高水敷まで明確な流れが形成される出水イベントが2回生じた。この出水イベントを対象として、DIEX- $n$ 法やDIEX- $f$ 法、一般に用いられるIndex Velocity法により流量を推定し、その結果と別途行われたADCPによる検証用観測結果を比較した。その結果、DIEX- $n$ 法やDIEX- $f$ 法は、Index Velocity法よりも流量の推定精度が高く、その推定誤差のRMS値はおおよそ4~5%であった。また、水位と流量のル-

ープ関係に関しては、DIEX- $n$ 法の方がDIEX- $f$ 法よりも相対的に良好に再現できており、本論文で示した数値モデルの改良が基本的には有効であることが示された。

今回は複断面河道に1台のH-ADCPしか用いていないが、複数台を用いてH-ADCPの計測範囲を拡大することにより、本手法の流量推定精度は向上するものと思われる。そのため、H-ADCPの配置を含む検討を今後行う。

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。また、ADCPによる洪水流量観測を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏に多大なる御助力を頂いた。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) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 3) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証, *水工学論文集*, Vol.50, pp.709-714, 2006.
- 4) 大東秀光, 上坂薫, 南修平, 劉炳義, 橋田隆史: 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.
- 5) 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*, Vol.11, pp.243-248, 2005.
- 6) 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.
- 7) 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*, Vol.52, pp.943-948, 2008.
- 8) 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.
- 9) 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観測への適用, *水工学論文集*, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 10) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, 2009 (in press).
- 11) Ruhl, C. A. and Simpson, M. R.: Computation of discharge using the index-velocity method in tidally affected areas, *U.S. Geol. Surv. Scientific Investigations Rep. 2005-5004*, pp.1-31, 2005.
- 12) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之: 超音波ドップラ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*, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.

(2008.9.30 受付)