

# 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

二瓶泰雄<sup>1</sup>・木水啓<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)  
E-mail:nihei@rs.noda.tus.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 日本工営(株) (〒060-0005 札幌市中央区北5条西6-2)

低コストで高精度な自動河川流量計測システムとして、一台で流速の横断分布計測が可能な H-ADCP 計測技術と河川流計算技術を融合した流量モニタリングシステムを新たに構築した。ここでの河川流計算法として、H-ADCP による流速の「線」データから「面」流速データや流量を得るために、流体力学条件を満たした形で横断面内の流速の内外挿操作が可能な力学的内外挿法 (DIEX 法) を開発した。本手法の基本特性を調べるために、江戸川において約 3 ヶ月間の H-ADCP 観測を実施し、流量を算出した。別途行われた ADCP 等による流速・流量観測結果と比較した結果、本手法による流速分布や流量の計算結果は観測結果と良好に一致し、また本手法の流量推定精度は単純に内外挿する方法 (単純法) よりも高く、本手法の基本的な有効性が検証された。

**Key Words:** discharge, H-ADCP, data assimilation, DIEX method, river flow

## 1. 序論

治水・利水・環境に配慮した河道整備・管理を進めるためには、最も重要な水理量の一つである流量を高精度かつ自動・連続的にモニタリングすることは不可欠である。これまでの河川流量の自動・連続モニタリング手法としては、[1]浮子等により計測した流量  $Q$  と水位  $H$  の関係式 ( $H$ - $Q$  カープ) を求め、水位から流量を間接的に算出する方法 (間接法) <sup>1)~8)</sup> と、[2]固定設置された流速計により得られる流速値から流量を直接的に求める方法 (直接法) <sup>9)~13)</sup>、という 2 つの方法に大別される。現状の流量観測の多くは [1]の  $H$ - $Q$  カープに基づく間接法により実施されている。

この [1]における  $H$ - $Q$  カープ作成時に必要な流量の観測には、洪水時には浮子、低水時にはプライス流速計等を用いた調査法が実施される <sup>1)~5)</sup>。最近では、流速鉛直分布計測が可能な超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) による調査も実施されている <sup>6)~8)</sup>。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り、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 <sup>4)</sup>。また、浮子を用いた流量観測では計測精度上の問題も指摘されており <sup>14)</sup>、実際の洪水流量に関して 2 割程度の誤差があることも報告されている <sup>8)</sup>。さらに、 $H$ - $Q$  カープそのものに関しては、非

定常性の大きな洪水時における増水期と減水期では同一の水位-流量関係にならず、一つの洪水中に水位-流量関係がループを描くことは良く知られている <sup>1)</sup>。それに加えて、感潮域や背水区間では水位と流量は一意的関係にならず、この場合間接法を流量算出に適用することは難しい <sup>2)</sup>。

このように水位から流量に換算する間接法では、計測精度や適用範囲に問題がある。そのため、流速計測値から流量を求める直接法が有力視される。この直接法で用いられる流速計としては、PIV 等の画像解析法 <sup>9), 10)</sup> や電波流速計 <sup>11)</sup>、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) <sup>12), 13)</sup> 等が挙げられる。このうち、H-ADCP はわずかに一台で流速横断分布を計測できるため、流量の直接計測法として極めて有望である。ただし、H-ADCP はある水深の流速横断分布という「線」データしか取得できないため、単独で H-ADCP 計測を行うだけでは、流速の「面」データの取得や流量の算定は難しい。そこで、H-ADCP を自動昇降装置に取り付けて定期的に鉛直移動させて、各高さの流速横断分布を計測し、流速の「面」データや流量を算出する方法が開発されており、実際に鶴見川等で運用されている <sup>12), 15)</sup>。しかしながら、H-ADCP と自動昇降装置を含む流量観測システムは、大掛かりで高価なため、この方法が一般に普及する可能性は高くない。また、H-ADCP により得られる流速横断分布データをべき乗則等により横断面全体に内外挿す

ることも考えられるが<sup>13)</sup>、単純な空間補間・補外操作では、力学条件が満たされずに流速の内外挿が行われるので、流量の算定精度が大きく低下する可能性がある<sup>16), 17)</sup>。

流体力学条件を満足しつつ流速の「線」データを「面」データに変換するには、流速観測値を合理的に取り込んだ形で河川流計算を実施することが有効である。そのためには、観測結果を数値モデルに反映させるためのデータ同化手法が必要であるが、気象・海洋計算<sup>18)~20)</sup>と比べて、河川流計算におけるデータ同化手法に関する研究事例は少ない<sup>21)</sup>。一方、著者らは新しいデータ同化手法を組み込んだ河川流モデル（力学的内挿法）を構築し、横断面内において離散的に観測された流速値から流量を精度良く算出することに成功している<sup>16), 17)</sup>。この手法を応用・発展させることにより、H-ADCPにより得られた流速の「線」データについて、流体力学条件を満足した形で横断面全体にわたり内外挿することが可能になると期待できる。

そこで本研究では、H-ADCPによる観測技術と河川流シミュレーション技術を融合して、低コストで高精度な自動流量モニタリングシステムを新たに開発することを試みる。ここでは、H-ADCPにより流速横断分布を計測して、得られた流速の「線」データを取り込んだ河川流シミュレーションを行い、流速の「面」データや流量を算定する。データ同化手法を組み込んだ河川流モデルとして、著者らの方法<sup>16), 17)</sup>をベースとして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施する**力学的内外挿法**（Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, 以下、**DIEX法**と呼ぶ）を新たに開発する。また、本流量モニタリングシステムの基本特性や精度を検証するために、江戸川中流部において約3ヶ月間にわたりH-ADCPによる連続観測を実施した<sup>22)</sup>。そこで得られたH-ADCPデータを用いて河川流計算を実施して流量を算出し、その結果と別途行われたADCPやプライス流速計による流量観測結果<sup>23)</sup>を比較する。

なお、類似した手法として、中川ら<sup>24)</sup>は超音波を用いた流速計測技術と数値計算を組み合わせた流量算定法を提案している。そこでは、超音波の水中伝播時間を利用する超音波流速計を用いて横断平均流速を計測し、別途行われる河川流シミュレーションから得られる更正係数（横断面の平均流速と超音波流速計の計測範囲内での平均流速値の比）を用いて流量を算出する。しかしながら、この方法では、超音波流速計の送受信機が大掛かりで高価であること、また、河川流計算には観測結果は全く反映されておらず、数値計算結果がどの程度実現象を再現できているかは不明である。

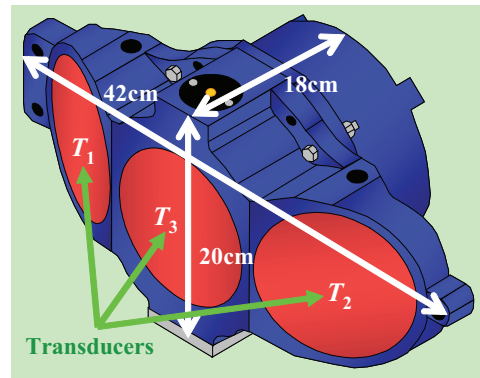


図-1 H-ADCP (Workhorse 600kHz, Teledyne RDI 製)の概観

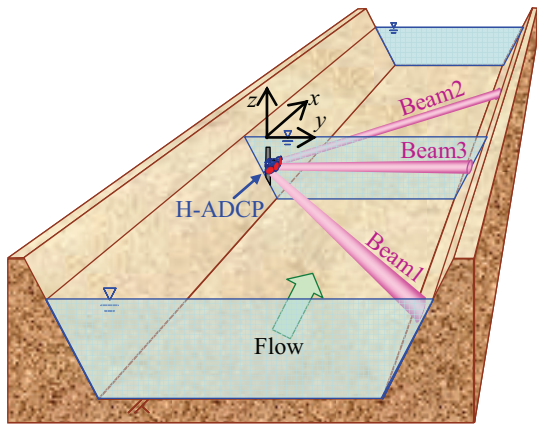
## 2. 本流量モニタリングシステムの概要

### (1)H-ADCP について

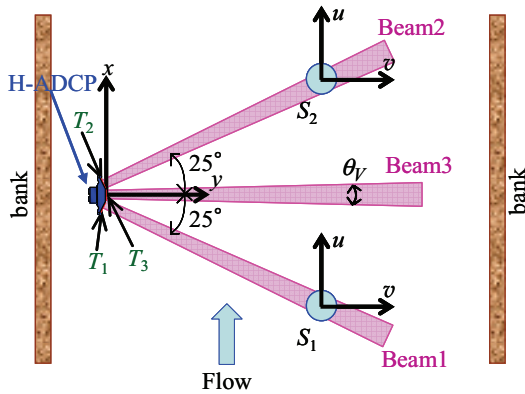
本研究の根幹をなすH-ADCPの概要を記述する。まず、超音波ドップラー流速分布計 ADCP は、超音波を放射して水中の散乱体からの反射波のドップラーシフトを利用して流速の鉛直分布を計測する機器である。これまで主として海洋観測分野で利用されてきたが<sup>25)~27)</sup>、最近では、浅水流計測に適した機器の開発等により河川流観測への適用例が増えつつある<sup>6)~8), 28), 29)</sup>。このような超音波ドップラー流速計測技術を発展させて、水平方向に超音波の送受信を行える水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP が開発され、水平面内における流速分布計測が可能となっている<sup>12), 13)</sup>。

H-ADCP において採用されている超音波の周波数は 300kHz, 600kHz, 1200kHz であり、計測範囲は一般的にはそれぞれ 300m, 100m, 20m 程度となり、周波数が高いほど超音波の減衰が大きいため計測範囲が短い。本研究では、コスト面と後述する江戸川での低水路幅が約 70m であることを考慮して、図-1 に示すように、周波数 600kHz の機器 (Workhorse 600kHz, Teledyne RDI 製)を用いる。この機器は、横幅 42cm, 高さ 20cm, 奥行き 18cm のコンパクトなサイズであり、河川内へ H-ADCP を固定設置する際には、前述した自動昇降装置<sup>12), 15)</sup>のような大掛かりで特別な架台等は不要である。また、超音波を送受信するトランスデューサーは 3 つ存在する (図中  $T_1 \sim T_3$ )。H-ADCP の基本性能としては、最小層厚は 0.25m, 最大層厚は 128, 流速測定範囲は最大で 10m/s (標準) である。

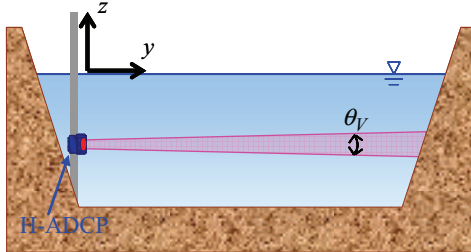
H-ADCPによる流速計測に関する模式図を図-2に示す。水平二方向流速の横断分布計測を行うために、H-ADCPは対岸側に向けて水平に設置される。このH-ADCPのトランスデューサー  $T_1, T_2, T_3$  から、それぞれ超音波ビーム Beam1, 2, 3 が発信され、各々のビーム軸方向の流速が計測される。実際に水平方向流速を算出する際には、トランスデューサー  $T_1, T_2$  の計測値のみを用いる<sup>22)</sup>。な



(a) 鳥瞰図



(b) 平面図 ( $S_1$  と  $S_2$  は超音波ビーム 1, 2 上の散乱体を示す)



(c) 横断面図

図-2 H-ADCPの流速計測に関する模式図 (図中には各トランスデューサーからの超音波ビームの発信方向も示す)

お、この時、「トランスデューサー  $T_1$  と  $T_2$  から等距離の位置における水中散乱体  $S_1$ ,  $S_2$  の速度が同一である」という仮定に基づいている (同図 (b))。また、超音波はある程度の広がりを持って水中を伝播しており、周波数 600kHz の場合、その角度  $\theta_V$  (ビーム幅) は約 1 度である。この場合、トランスデューサーからの距離とともに H-ADCP の計測範囲は広がり、その範囲内に水面や河床面が含まれると超音波が境界面で反射して計測障害の要因となる。

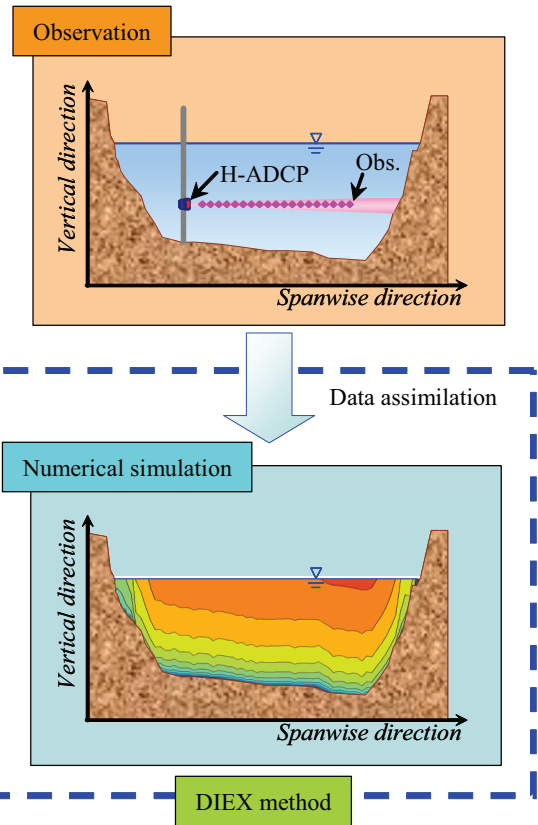


図-3 本流量モニタリング手法の基本構成

## (2) 基本構成

この H-ADCP を用いる本流量モニタリングシステムは、図-3 に示すように、[1] H-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。

まず、[1] の H-ADCP による流速計測システムでは、H-ADCP を図-2 のように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] の河川流シミュレーションを実施する。その際、観測結果を数値解析に取り込むためには、データ同化手法の導入が必要となる。ここでは、著者らにより提案された力学的内挿法<sup>16), 17)</sup>をベースとして、観測データの補間・補外操作について、力学条件を満足した形で行うことが可能な力学的内外挿法 (DIEX 法) を採用する。これにより、H-ADCP により計測された「線」流速データが横断面全体の「面」流速データに変換される。図-3 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。なお、リアルタイムで流

量データを取得するためには、[1]の H-ADCP データをインターネット経由で転送するためのテレメータシステムが必要となる。著者らは PC や携帯電話等の既存ハードウェアのみを組み合わせることで自動データ送信が可能な簡易テレメータシステムの開発に着手しているが<sup>30</sup>、その詳細は別途報告する。

### 3. 力学的内外挿法 (DIEX 法) の概要

#### (1) 基本コンセプト

前述したように、H-ADCP により得られる流速横断分布データから流量を算出するために、河川流シミュレーションを実施する。そのための数値モデルとして具備すべき条件としては、

- [1] ほぼリアルタイムで流量算定を実現するために、低計算負荷でかつ短時間で計算結果を出力できること
  - [2] H-ADCP による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こと
- という 2 点が挙げられる。一般的な三次元計算モデルを導入すると、計算負荷や CPU 時間が著しく増大する。計算負荷を低減させた形で流量計算を実施するには、横断面内の流速分布や流量の算定に不可欠な項のみを抽出して、流体運動の基礎方程式系を簡略化する必要がある。また、観測データを数値モデルに取り込むためのデータ同化手法として、流速を直接的に同化するナッジングスキームなどを用いると、少ない観測データの場合には適切にデータ同化を行うことが難しく<sup>16), 19), 31)</sup>。何らかの工夫を施すことがキーとなる。

これらの要件を満たすためには、簡略化した運動方程式に基づいてデータ同化手法を組み込んでいる力学的内挿法<sup>16), 17)</sup>が有効である。力学的内挿法とは、離散的で疎らな観測点での水深平均流速を横断方向に内挿して、水深平均流速の横断分布や流量を算出する、という河川流解析法である。そこでは、観測データを数値計算に合理的に取り込むために、簡略化された運動方程式に新たな項(付加項)を加えている。付加項の導入により、力学的内挿法では、ナッジングスキームとは異なり、観測結果の影響を計算対象領域にスムーズに反映させることが可能となる<sup>16), 17)</sup>。しかしながら、力学的内挿法では水深平均流速のみを求めており流速鉛直分布の計算を行っていないこと、また、何らかの誤差を含む観測値をそのまま同化データとして使用すること、という問題点を含んでいる。そのため、本流量モニタリングシステムの河川流モデルとして、力学的内挿法をそのまま用いることは困難である。

そこでここでは、力学的内挿法の二つの問題点に対して改良を加えた数値モデルを考案する。まず一つ目としては、横断面内の流速分布を得るために、水深平均流速のみを求

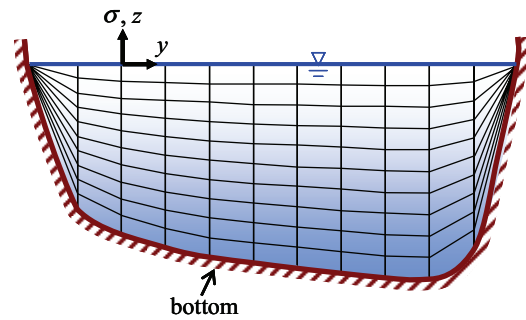


図-4 DIEX 法における座標系と計算格子

める力学的内挿法を横断面内の流速鉛直・横断分布計算に適用できるように拡張する。その際には、力学的内挿法のコンセプトを踏襲して、三次元流動場の運動方程式を簡略化しつつ、その代わりに付加項を導入し、その付加項を介して力学条件を満たした形でデータ同化を実施する。二つ目としては、同化データである観測値には多かれ少なかれ計測誤差が含まれるので、その誤差を最小化し得る方法を組み込み、データ同化手法の精度向上を図る。これらにより、H-ADCP により計測される流速の「線」データを横断面全体に内外挿して、流量を精度良く算出することが可能となる。観測値の「内挿」操作のみを行う力学的内挿法と異なり、この計算法では、横断面全体にわたり観測データの「内外挿」操作を実施することから、力学的内挿法と区別する意味で、この方法を**力学的内外挿法 (DIEX 法)**と呼ぶ。以下では、DIEX 法の基礎方程式系や計算手順について述べる。

#### (2) 基礎方程式系の導出

DIEX 法では、横断面内における流速の「面」データや流量を取得することを目的としているので、計算対象領域は、図-4 に示すような横断面とする。このような計算領域における流速分布を求めするために必要な基礎方程式系を記述する。まず、三次元流動場を解析するのに必要となる主流方向の運動方程式は、複雑な河床形状を簡便で適切に表現することが可能な  $\sigma$  座標系<sup>32)</sup>を用い、また、静水圧近似を採用すると、次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  $x, y, \sigma$  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

それぞれ表している。ここで用いられる  $\sigma$  座標系の定義としては、一般に採用される次式を用いる。

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

ここで、 $z$  は鉛直方向座標、 $\eta$  は水位である。なお、式 (1) 中の乱流拡散項に関しては、既往の計算例<sup>33), 34)</sup>と同様に、 $\sigma$  座標系変換時に生じる高次項を小さいものとして省略している。また、横断面内に植生が存在する場合には、植生による流体抵抗項を式 (1) に加える必要があるが、本論文における計算対象では植生抵抗が存在しないため、ここでは植生抵抗項を省略している。

本手法で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、これらの項を省略すると、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、非定常項も省略されている。これは、非定常項自体の大きさが、その他の水面勾配項等よりも 2, 3 オーダー小さいためである。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ため、力学的内挿法<sup>16), 17)</sup>を参考にし、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、本手法による河川流計算を実施する。

この式 (4) を解くには、乱流モデルを与える必要がある。このうち、鉛直渦動粘性係数  $A_V$  には、次の 0 方程式モデルを採用する。

$$A_V = \kappa U_* z' \left( 1 - \frac{z'}{D} \right) \quad (5)$$

ここで  $\kappa$  はカルマン定数 (=0.41)、 $U_*$  は摩擦速度、 $z'$  は底面からの高さをそれぞれ表す。また、水平渦動粘性係数  $A_H$  に関しては、河川流のような浅い乱流場特有の乱れの非等方性を考慮するために、次式により与える<sup>34)</sup>。

$$A_H = \beta A_V \quad (6)$$

ここで  $\beta$  は乱れの非等方性に関する係数であり、1~10

程度で設定される。なお、本論文では、計算負荷を減らした形で数値モデルを簡便化するために乱流モデルとして 0 方程式モデルを採用しているが、本数値モデルを精緻化する上では、今後乱流モデルを改良する必要がある。

### (3) 付加項 $F_a$ の算出方法

前述した式 (4) に基づいて河川流計算を行う際に、何らかの形で H-ADCP による計測結果を数値計算に同化する必要がある。そこで本手法では、流速データ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。この付加項  $F_a$  を求める際に、前述した河川流場の基礎式 (式 (4)) をそのまま用いることは難しい。その理由としては、本計測法では 1 台の H-ADCP を用いてある高さにおける同化用の流速観測値を取得しているため、この基礎式を用いると同化データのない高さにおける付加項を算出することが必要となる。しかしながら、得られる解が底面や水面における境界条件の設定方法に大きく依存するため、付加項の鉛直分布を算出することは難しい。そこで本論文では、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  $\overline{F_a}$  を算出することとする。その際には、式 (4) に対して水深平均操作を施して得られる次の運動方程式を用いる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{A_H} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \overline{u}^2 + \overline{F_a} = 0 \quad (7)$$

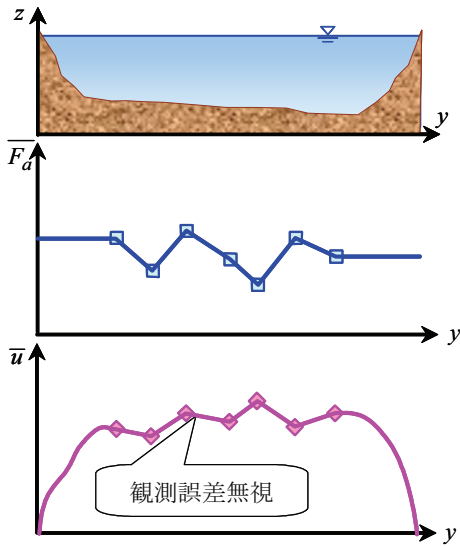
ここで、 $\overline{u}$  は水深平均された主流方向流速であり、 $\overline{A_H}$  と  $C_f$  は水深平均された水平渦動粘性係数、底面摩擦係数を各々表す。なお、水深平均操作の際には、最も一般的な方法と同じく<sup>35)</sup>、水表面上の応力を考慮せず、水平渦動粘性係数  $A_H$  の鉛直分布を無視している。式 (7) の  $\overline{A_H}$  と  $C_f$  は次のように与えられる。

$$\overline{A_H} = \beta \kappa U_* \frac{D}{6} \quad (8)$$

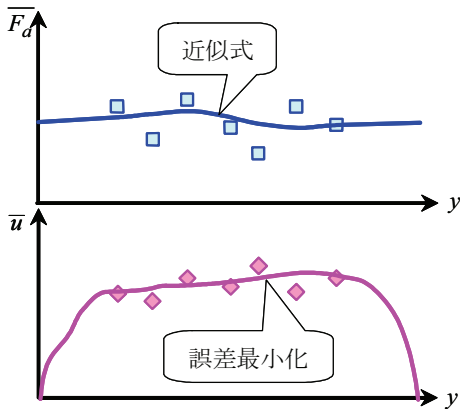
$$C_f = \frac{gn^2}{D^{1/3}} \quad (9)$$

ここで、 $n$  はマンニングの粗度係数である。なお、上述した付加項の鉛直一様性に関する仮定の妥当性を検証することは必須であるが、そのためには、複数の高さにおける流速横断分布を計測する必要があり、現段階では、そのような計測データを有していない。今後、複数の H-ADCP による流速計測を行い、付加項の鉛直・横断分布を算出し、この仮定の検証を行う予定である。

この式 (7) から付加項の水深平均値  $\overline{F_a}$  を求めるには、後述するように、式 (7) に対する差分式を用いる。このとき、観測値が与えられている横断位置において  $\overline{F_a}$  をそ



(a) 観測データをそのまま同化させる場合



(b) 観測データの誤差を考慮する場合

図-5 本手法における付加項  $F_a$  の算出方法

のまま求めると、図-5 (a) に示すように、ある程度の観測誤差を含む流速データの影響を受けて、付加項  $F_a$  の横断分布にはばらつきが生じる。結果として、流速の推定値も観測誤差の影響を受けて、ばらつきのある横断分布となる。データ同化手法としては、「観測誤差を最小化した形で観測データを同化する」ということが大きなキーポイントとなるので、図-5 (a) 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限界がある。そこでDIEX法では、観測誤差を考慮した形でデータ同化を行うために、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、図-5 (b) に示すように、観測値から計算された付加項  $F_a$  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おり、本手法により、観測される流速の「線」データから

「面」データを高精度に推定することが可能になると期待できる。

(4) 差分式

このような基礎方程式系の数値解法として、有限差分法を適用する。その際に、各変数が全て計算格子の中心に配置されるコロケート格子を採用する。この場合、基礎式(式(4))に対する差分式は、乱流拡散項に対して二次精度中央差分を用いると、以下ようになる。

$$\frac{A_{H_{i+1/2,j}}(u_{i+1,j} - u_{i,j}) - A_{H_{i-1/2,j}}(u_{i,j} - u_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} + \frac{A_{V_{i,j+1/2}}(u_{i,j+1} - u_{i,j}) - A_{V_{i,j-1/2}}(u_{i,j} - u_{i,j-1})}{(D_i \Delta \sigma)^2} + gI + F_{a_i} = 0 \quad (10)$$

ここで添え字  $i, j$  は横断、鉛直方向の格子番号、 $\Delta y, \Delta \sigma$  は横断、鉛直方向の格子間隔を表し、水面勾配  $I$  は横断方向に一定とする。また、上式中の水平・鉛直渦動粘性係数については、次のように与えられる。

$$A_{H_{i+1/2,j}} = \frac{A_{H_{i,j}} + A_{H_{i+1,j}}}{2} \quad (11a)$$

$$A_{V_{i,j+1/2}} = \frac{A_{V_{i,j}} + A_{V_{i,j+1}}}{2} \quad (11b)$$

同様に、水深平均された主流方向運動方程式(式(7))に対する差分式は以下のとおりである。

$$gI + \frac{\overline{A_{H_{i+1/2}}}(u_{i+1} - u_i) - \overline{A_{H_{i-1/2}}}(u_i - u_{i-1})}{(\Delta y)^2} - \frac{C_{f_i} u_i^{-2}}{D_i} + \overline{F_{a_i}} = 0 \quad (12)$$

なお、本論文では、付加項の鉛直分布を一様としているので  $F_{a_i} = \overline{F_{a_i}}$  となるが、ここでは区別して記述している。この式より水深平均付加項  $\overline{F_{a_i}}$  を求める際には、観測データの同化を行うため、流速観測データがある格子  $i$  における水深平均流速  $\overline{u_{oi}}$  を用いると、次式のように与えられる。

$$\overline{F_{a_i}} = -gI + \frac{C_{f_i} \overline{u_{oi}}^{-2}}{D_i} - \frac{\overline{A_{H_{i+1/2}}}(u_{i+1} - \overline{u_{oi}}) - \overline{A_{H_{i-1/2}}}(u_{oi} - u_{i-1})}{(\Delta y)^2} \quad (13)$$

ここでは、格子  $i$  のみ観測値が存在し、両隣の格子  $i-1, i+1$  では観測値がないケースの式となっているが、これらの格子において観測値がある場合には、その観測値を代入

すればよい。

(5) 初期・境界条件の設定

横断面内における流速の初期条件を設定するためには、まず、ある高さにおける流速観測値を用いて、流速鉛直分布を与える必要がある。別途行った ADCP による現地観測結果より、流速鉛直分布には対数則が概ね成り立っていることが確認されているので、ここでは次式に示す対数分布則を与える。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z'}{k_s} + A_r \quad (14)$$

ここで、 $A_r$  は普遍定数 (=8.5) であり、また、 $k_s$  は壁面粗度を表しており、マンニングの粗度係数  $n$  を用いると、以下のように与えられる<sup>36)</sup>。

$$k_s = \left( \frac{n}{0.0417} \right)^6 \quad (15)$$

この対数分布則に観測された流速値  $u_o$  とその計測高さ  $z'_o$  を代入して摩擦速度  $U_*$  を求め、その  $U_*$  と式 (14) より流速鉛直分布や水深平均流速  $\bar{u}_{oi}$  が得られる。

また、流速観測値がない横断位置に関しては、水深平均流速  $\bar{u}_{oi}$  を横断方向に線形補間し、再び対数則を用いて流速鉛直分布を与える。このような手順により横断面内における流速分布の初期条件を設定する。

流速の境界条件としては、側岸部では no-slip 条件を与えている。また、水表面上では流速の鉛直方向勾配を 0 とし、底面上では簡便のため no-slip 条件を課している。

(6) 計算フロー

以上のことに基づいて、具体的な計算手順をまとめたものを図-6 に示す。本計算ルーチンは、初期条件の設定と主計算に大きく分類されるため、各々に分けた形で記述する。

(初期条件設定)

- [1] 流速計測点と一致する格子  $i$  における流速観測値から、対数分布則 (式 (14)) を仮定して流速鉛直分布や水深平均流速  $\bar{u}_{oi}$  を求める。
- [2] [1]より求められた  $\bar{u}_{oi}$  を横断方向に内外挿して、 $\bar{u}_i$  の横断分布を求める。
- [3] 得られた  $\bar{u}_i$  に対して対数分布則により流速鉛直分布を求めて、横断面内の計算格子  $(i, j)$  上の流速  $u_{i,j}$  を求める。

(主計算)

- [4]  $u_{i,j}$  を鉛直方向に平均して  $\bar{u}_i$  (観測値のある部分では  $u_{oi}$ ) を求める。
- [5] [4]より得られた  $\bar{u}_i$  や  $u_{oi}$  を式 (13) に代入して、流

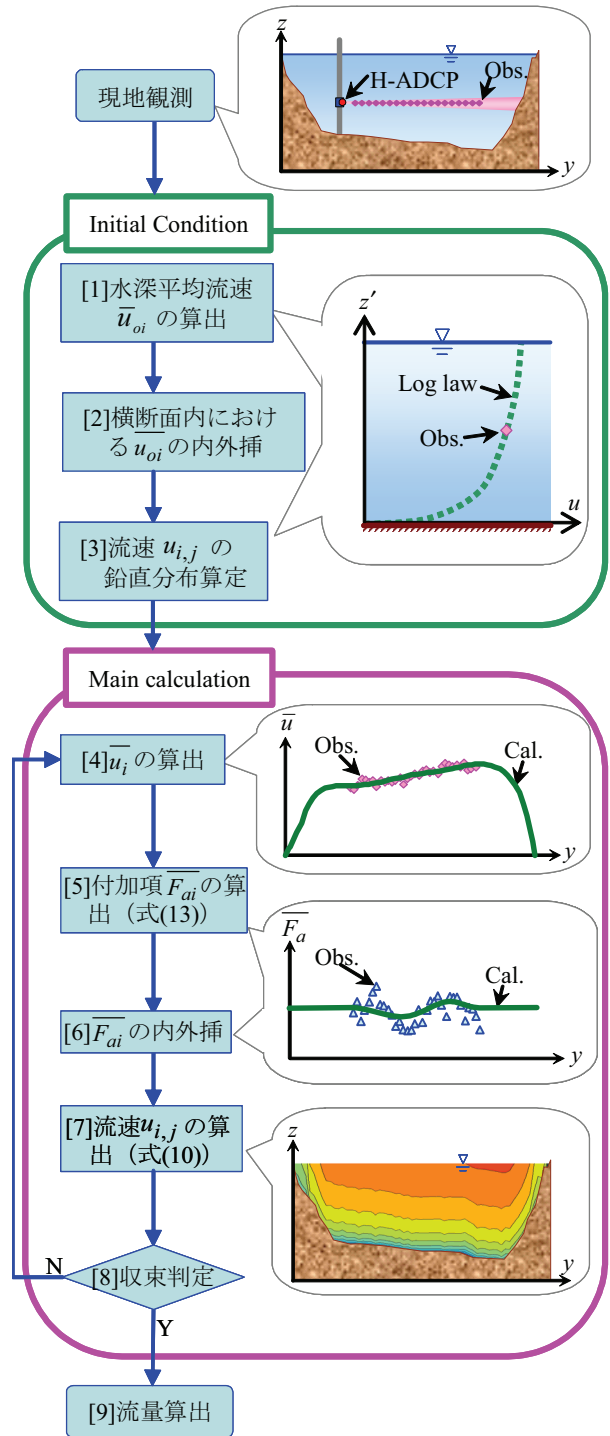


図-6 DIEX 法の計算フロー

速計測点と一致する格子  $i$  における付加項  $\bar{F}_{ai}$  を求める。

- [6] [5]より得られた  $\bar{F}_{ai}$  の横断分布に対して最小二乗法を適用し、得られた近似曲線(三次関数)より水深平均付加項の横断分布を算出する。
- [7] [6]より得られた付加項横断分布を式 (10) に代入して、流速  $u_{i,j}$  の断面分布を求める。
- [8] SOR 法により流速  $u_{i,j}$  や付加項  $\bar{F}_{ai}$  の解が収束するまで、[4]~[7]の手順を繰り返す。

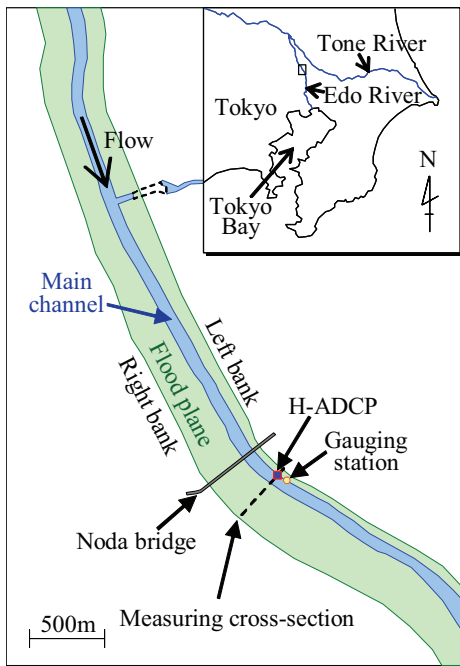
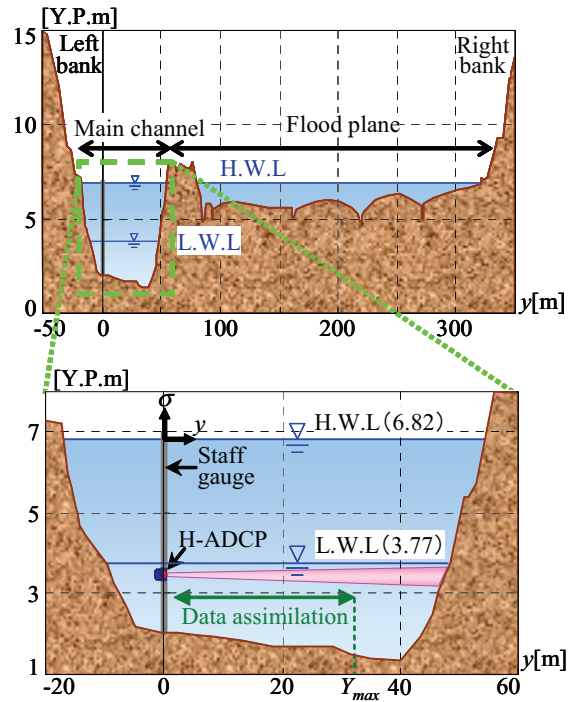


図-7 研究対象サイトの平面図



(a) 横断面形状

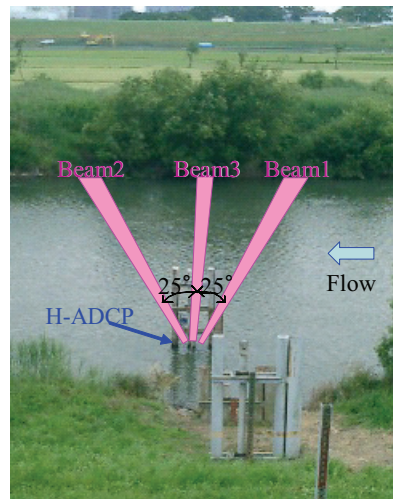
[9] 解が収束した後、流速 $u_{i,j}$ を断面積分して流量 $Q$ を算出する。

このように、本論文で提案されているDIEX法は、簡略化された運動方程式を基礎式とし、上記のような簡便な計算手順に基づく河川流モデルとなっている。このようなことから、DIEX法の計算負荷は、一般的な三次元河川流モデルと比較して、大幅に低減されているものと考えられる。

#### 4. 本システムに基づく実河川流量モニタリング

##### (1) 対象サイト

上述された本流量モニタリングシステムの基本特性や流量推定精度を明らかにするために、本システムに基づいて実河川における流量の自動・連続モニタリングを実施する。研究対象サイトは、図-7に示すように、千葉県野田市関宿において利根川から分派して東京湾に注ぐ江戸川の中流部に位置する野田水位観測所付近（河口より39km地点）とする。H-ADCPの設置場所は、野田橋の下流側約200mの横断面における低水路左岸側である。この位置における低水路は右岸側へ緩やかに湾曲した平面形状をなしている。図-8は、H-ADCPの設置位置における横断面形状とその様子を示しており、ここでは堤間幅約400m、低水路幅約70mの複断面となっている。この地点付近では低水路が左岸側に寄っているため、右岸側の高水敷幅の方が左岸側よりも顕著に大きい。



(b) 様子

図-8 H-ADCPの設置地点

##### (2) 観測方法及び結果の概要

###### a) H-ADCP 観測について

H-ADCP観測は2005年9月5日16時から12月6日10時まで実施された。本観測期間中における最高・最低水位は図-8(a)中に示すとおりである。H.W.L.の時には、高水敷は冠水するものの、低水路と右岸側高水敷は分断されているため、高水敷では有意な流れは生じなかったものと考えられる。なお、 $y=0$ 地点はH-ADCPのセンサー面と一致し、右岸向きを正とするように座標系を設定している。

H-ADCPは低水路左岸側に設置されている水位標に対岸向き（右岸向き）に固定されている。H-ADCPの設置高さはY.P.3.4mであり、高水敷上の地盤高さよりも十分低い



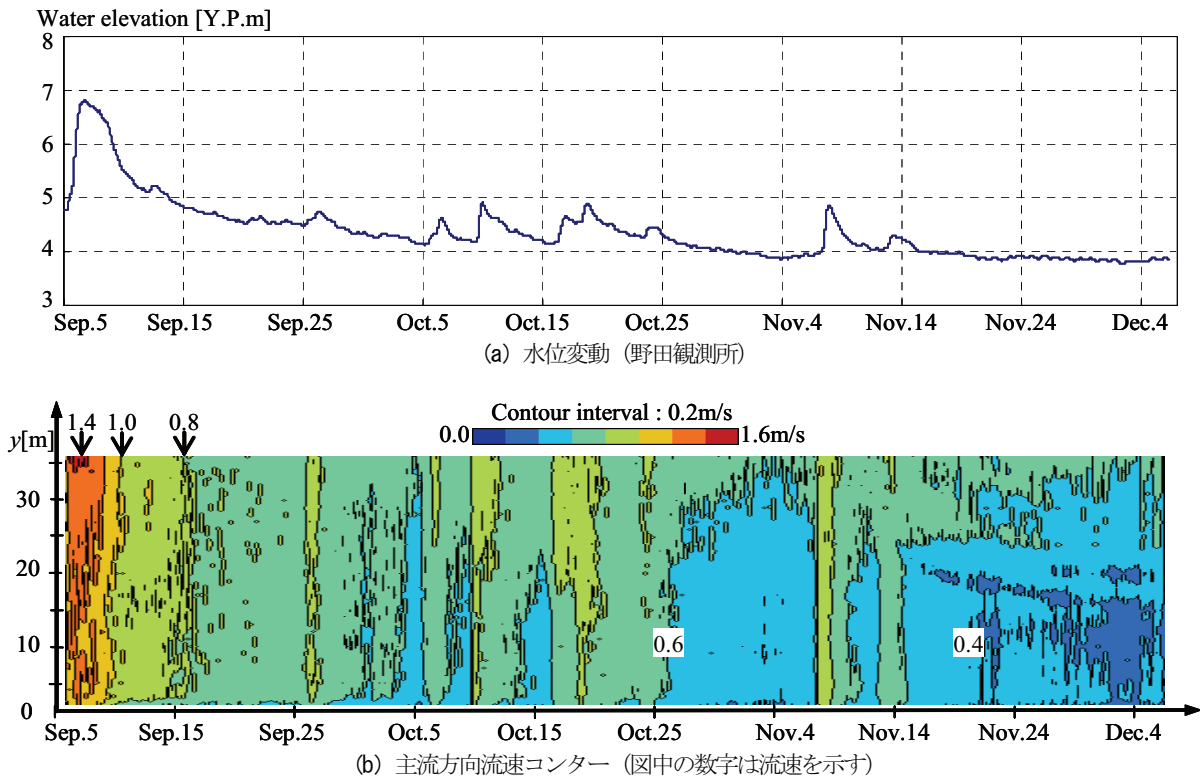


図-9 全観測期間中における水位と主流方向流速横断分布の時間変化

ため、計測範囲は低水路内に限定される (図-8 (a) 中ピンク色のハッチ部分)。また、前述したように、本観測で用いる H-ADCP のビーム幅は 1 度であるので、超音波ビームが対岸に到達する  $y=46\text{m}$  地点では、超音波ビームの鉛直幅は約  $0.8\text{m}$  まで広がる。なお、設置作業の関係上、H-ADCP は約  $10^\circ$  上流向きに固定設置された。

H-ADCP の設定条件としては、サンプリング間隔は 10 分、計測層数は 80、測定層厚は  $1.0\text{m}$  であり、不感帯幅 (H-ADCP のトランスデューサー面から計測対象第一層目までの距離) は  $1.0\text{m}$  である。この設定条件において、超音波の送受信に関わる計測誤差を流速に換算すると  $1.04\text{cm/s}$  である。また、H-ADCP の計測データをリアルタイムで見られるようにするために、H-ADCP 本体と繋がる長さ  $100\text{m}$  の通信・電源供給用ケーブルを設置地点近くの水位観測所内まで敷設し、簡易テレメータを用いてデータ転送を実施した。その際には、市販の装置 (Watch-ADCP\_Jr, (株) ハイドロシステム開発製) かもしくは著者らにより自作された PC と PHS のみを用いる簡易テレメータシステム<sup>30)</sup> を使用している。なお、本観測の詳細に関しては、二瓶ら<sup>22)</sup> を参照されたい。

b) 検証用データについて

本モニタリング手法による流量推定精度を検証するために、別途行われた流速・流量に関する二種類の観測結果を検証用データとして使用する。まず一つ目としては、著者らが実施した ADCP (Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI

製) による流速・流量観測データである<sup>23)</sup>。この観測は、H-ADCP の観測断面にて 3 回 (2005/9/13, 10/13, 10/26) とその断面より  $200\text{m}$  上流の野田橋にて 12 回、計 15 回行われた。これらの調査日はいずれも低水時であった。調査方法としては、ADCP を専用ボート (RiverBoat, Teledyne RDI 製) に取り付けて水面付近に鉛直下向きに浮かべ、流速鉛直分布と水深の同時計測を行う。この ADCP を横断方向に移動させることにより、横断面内における流速分布や流量が得られる。なお、一般的には、ADCP による流量の観測精度は十分検証されていない。しかしながら、著者らが行った観測結果では、 $H-Q$  カーブにより得られた流量を基準とした時 (この流量  $Q$  はプライス流速計による観測値)、ADCP による流量の計測誤差は  $4.7\%$  程度となっており、プライス流速計を用いる標準的な低水流量観測法と同程度の高い計測精度を示している<sup>23)</sup>。

二つ目の検証用データとしては、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所が実施したプライス流速計による低水流量観測結果である。この観測はおよそ月 3 回のペースで実施されており、本観測期間中では合計 9 回の観測が実施された。観測手法としては、水深に応じて 2 点法 (2 割, 8 割水深) と 1 点法 (6 割水深) が用いられる標準的な低水流量観測法 (今村ら<sup>5)</sup> における河川局標準法) が採用されている。

c) 主な観測結果

H-ADCP により得られた主な観測結果について説明す

表-1 計算条件 (DIEX 法)

	CaseA-1	CaseA-2	CaseA-3	CaseA-4
Grid number	73×100			
$n [m^{-1/3}s]$	0.035	0.010~0.050	0.035	0.035
$\beta$	1	1	1~10	1
$Y_{max} [m]$	36	36	36	10~46

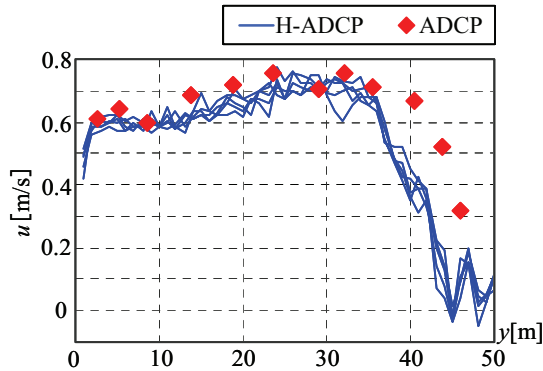


図-10 H-ADCP 計測高さにおける H-ADCP と ADCP の主流方向流速横断分布の比較 (2005 年 10 月 13 日)

る。図-9 は、全観測期間における水位変動 (野田観測所) と H-ADCP により得られた主流方向流速コンターを示す。これを見ると、本観測期間は、初期の 9 月 5 日から 12 日までの小出水時を除いて、顕著な水位変動は生じておらず、その大部分は低水時であったことが分かる。H-ADCP データに関しては、水位変動と応答する形で流速変化が見られる。また、縦横断形状と対応するように、左岸側より右岸側の流速値が全体的に大きい。このような H-ADCP データは全期間にわたり良好に取得されており、データ欠測は全く生じなかった。

H-ADCP による流速の計測精度について調べるために、H-ADCP と ADCP により計測された主流方向流速の横断分布を図-10 に示す。ここでは、2005 年 10 月 13 日における結果を図示する。ADCP データに関しては、H-ADCP の計測範囲における平均値が表示されている。また、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 回分の測定結果が示されている。これを見ると、全体的には、両者の流速値は類似しているものの、対岸側 (右岸側) の  $y > 36m$  のところでは、ADCP の流速値は H-ADCP の計測結果よりも大きい。このような傾向は、他の 2 回の観測結果においても確認されている。この流速差の要因は、H-ADCP がやや上流向き (約  $10^\circ$ ) に設置されたため、「2 つのトランスデューサーで計測する散乱体の速度が同一である」という仮定が対岸近傍で成り立たなかったためである<sup>22)</sup>。また、H-ADCP 近傍の  $y=1m$  地点における流速は、水位標や H-ADCP による流体抵抗の影響を受けて、周囲と比べて低下している。このように、H-ADCP による流速値には、設置状況に起因した計測誤差

が含まれることから、流量算出に際して採用する流速データの選定には注意を要する。

(3) 計算条件

H-ADCP により計測された流速データを用いて、DIEX 法に基づいて時々刻々の流量を算出する。本観測期間中では、高水敷において有意な流れが生じる出水イベントが発生しなかったことを考慮して、計算対象領域は低水路のみとする。詳細な計算条件は、表-1 に示すとおりである。計算格子数は横断方向 73、鉛直方向 100 とし、横断方向の格子幅は 1.0m の等間隔とする。また、ここでは、CaseA-1 を基準の計算条件とし、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  $\beta$ ) やデータ同化範囲  $Y_{max}$  を変化させ、合計 4 ケースの条件を設定する。なお、データ同化を行う範囲としては、水位標の影響を取り除くために、 $2m \leq y \leq Y_{max}$  (図-8 (a) 参照) とする。

基準の条件である Case A-1 では、 $n=0.035m^{-1/3}s$ 、 $\beta=1.0$ 、 $Y_{max}=36m$  とする。ここで  $Y_{max}=36m$  とするのは、前節で述べたように、 $y > 36m$  において H-ADCP の流速計測精度が低下するためである。ここでのマンニングの粗度係数の設定は、江戸川における河川流シミュレーション結果<sup>34)</sup>を参考にしている。次に、Case A-2, A-3 では、DIEX 法に含まれる計算パラメータである  $n$  や  $\beta$  を広範囲に変化させて、これらのパラメータの設定が流量算定結果に及ぼす影響を調べる。また、CaseA-4 では  $Y_{max}$  を 10~46m まで変化させて、同化データの範囲が推定結果に及ぼす効果を検討する。なお、式 (4) 中に含まれる水面勾配  $I$  については、実測値がある 2005/9/5~9/10 の期間にはその実測値を与え、それ以外の時にはこの地点の平均河床勾配 ( $=1/3700$ ) を与える。このときの水面勾配の実測値としては、野田橋及びその 4km 下流に位置する玉葉橋における水位観測値を用いて算出される。本来、水面勾配は運動方程式中に最も卓越する項の一つであるので、実測データが無い場合の水面勾配の設定については検討すべき点が多い。しかしながら、本手法では、水面勾配を変化させても、式 (7) により算出される付加項の横断平均値が変化しただけであるので、今回のような水面勾配の設定には数値計算上問題は生じない。

さらに、DIEX 法による流速の内外挿操作の有用性を定

表-2 計算条件 (単純法)

	CaseB
Grid number	73×100
$b$	1/6
$Y_{max}$ [m]	10~46

量的に検証するために、流体力学条件を考慮せずに、H-ADCP により得られる流速値を単に内外挿する方法(以下、単純法と呼ぶ)に基づいて流量を推定する。ここでは、Wang&Huang<sup>13)</sup> において採用されている手法をベースとする。まず、流速鉛直分布としては、次式のべき乗則を採用する。

$$u = az'^b \tag{16}$$

ここで  $b$  は比例係数であり、開水路流れで提唱されている値 (=1/6) を与える<sup>37)</sup>。また、上式中の  $a$  は横断 ( $y$ ) 方向にのみ変化する係数であり、流速観測値  $u_o$  とその計測高さ  $z'_o$  を式 (16) に代入して各横断位置における  $a$  を算出する。

$$a = \frac{u_o}{z'_o{}^b} \tag{17}$$

この時、観測データのある横断位置 ( $2m \leq y \leq Y_{max}$ ) では式 (17) により  $a$  を求め、それ以外の横断位置 ( $y < 2m$ ,  $Y_{max} < y$ ) では線形補間により  $a$  を与える。この単純法における計算条件を表-2 に示す。格子数や格子幅は DIEX 法の条件と同一とし、同化範囲  $Y_{max}$  を 10~46m と変化させる。

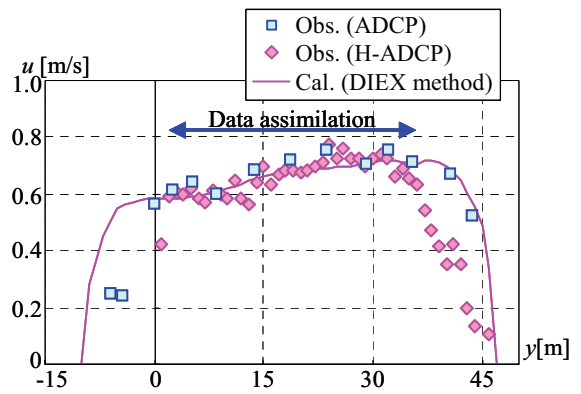
(4) 計算結果

a) CPU 時間

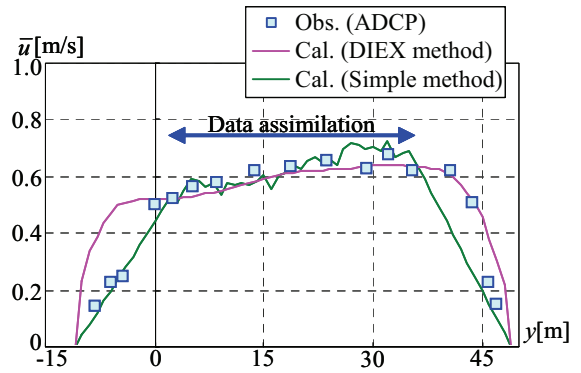
DIEX 法の計算負荷を示すために、本計算における CPU 時間について述べる。ここでは、1つの時刻における H-ADCP データを読み込み、流速の「面」データや流量を求め、それらの結果を出力するまでの CPU 時間を求めた。その結果、汎用 PC (CPU : Pentium4 2.8GHz, メモリ : 1GB) を用いたときの CPU 時間は約 0.3s となり、極めて短時間で数値シミュレーションを実施できることが確認された。この結果より、DIEX 法は、計算負荷が少なく短時間で流量算出が可能な河川流モデルであることが示された。

b) 流速横断・鉛直分布の再現性

DIEX 法による流速横断・鉛直分布の再現性を確認するために、基準の計算条件 (CaseA-1) における計算結果と観測結果を比較する。まず、同化データが計算結果にどのように反映されているかを見るために、H-ADCP 計測高さにおける主流方向流速  $u$  の横断分布として、H-ADCP と ADCP の実測値及び DIEX 法による計算結果を図-11 (a)



(a) H-ADCP 計測高さの流速  $u$



(b) 水深平均流速  $\bar{u}$

図-11 主流方向流速の横断分布 (2005年10月13日11時20分, DIEX法 (CaseA-1, (a) と (b)) と単純法 (CaseB, (b) のみ) の計算結果を示す)

に示す。ここでは、H-ADCP データの実測値及び計算結果は2005年10月13日11時20分における結果であり、ADCP データもその時間帯に行われた結果である。これを見ると、流速の計算結果は H-ADCP の観測結果をスムーズに反映しており、ナッジングスキームのように不自然にデータ同化した結果<sup>16)</sup> は見られない。ADCP の観測結果と本計算結果を比べると、左岸側の一部の領域 ( $y < 0m$ ) を除いて、全体的には概ね一致している。特に、同化データの存在しない右岸側においても、両結果は良好に一致している。なお、左岸側 ( $y < 0m$ ) や右岸側水際近傍において DIEX 法による計算結果が ADCP の流速観測値とずれる要因は、数値モデルにおいて横断方向の運動量混合過程が正確に表現できていないためであり、今後、水平渦動粘性係数のモデル化について見直す必要がある。また、H-ADCP の実測値と本計算値の誤差を比較するために、各々の流速値と ADCP の実測値の差に関する RMS (Root Mean Square) 値を求めた。データ同化を行った範囲 ( $2 \leq y \leq 36m$ ) を対象とした場合、H-ADCP の実測データに関する RMS 値は 5.2cm/s であるのに対して、本計算結果については 4.1cm/s であり、本計算法により H-ADCP の計測誤差が減少している。これにより、DIEX 法で導入している観測誤差最小

化アルゴリズムが計測誤差を減らした形でデータ同化を行っていることが示された。

次に、図-11 (a) と同時刻、同条件における主流方向の水深平均流速  $\bar{u}$  に関する横断分布を図-11 (b) に示す。ここでは、ADCP の計測結果と DIEX 法の計算結果を図示している。また、比較のために、単純法 (CaseB,  $Y_{max}=36\text{m}$ ) により推定された流速分布も表示する。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おり、H-ADCP 計測高さの流速分布と類似した傾向が見られる。また、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。しかしながら、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、同化データのある高さの流速値のみならず、水深平均の流速値についても良好に観測結果を再現している。その上、DIEX 法による流速の再現精度は、単純法の場合よりも良いことが示された。

一方、DIEX 法による流速鉛直構造の再現性を検証するために、横断面内における主流方向流速コンターを図-12 に示す。ここでも、図-11 と同様に、2005 年 10 月 13 日 11 時 20 分を対象とした計算結果 (CaseA-1) と ADCP による観測値を図示している。この計算結果は、図-11 (a) の H-ADCP による計測結果から DIEX 法により得られたものであり、流速の「線」データが「面」データに良好に変換されている様子が分かる。この流速コンター図を見ると、観測結果と計算結果には、横断面内のやや右岸寄りの表層において流速ピークが生じていることなどの共通点が見受けられる。より詳細に検討するために、 $y=3, 19, 41\text{m}$  地点における主流方向流速の鉛直分布を図-13 に示す。ここで、同化範囲内に位置する  $y=3, 19\text{m}$  の結果には、H-ADCP の計測結果も合わせて示す。これを見ると、DIEX 法による計算結果は、ADCP による観測結果と概ね一致している。特に、同化データのない  $y=41\text{m}$  の結果に関して、他の 2 地点と同じように、計算結果は観測結果を概ね再現している。これらの結果より、DIEX 法により内外挿された流速の計算結果は横断・鉛直分布ともに ADCP の実測値と良好に一致しており、DIEX 法による流速内外挿操作が精度良く行われていることが示された。

c) 流量推定精度

本モニタリング手法による流量推定精度を検証するために、全観測期間中における流量の時系列変化を図-14 に示す。ここでは、基準条件 (CaseA-1) の下での DIEX 法による計算結果とプライス流速計及び ADCP による観測結果をそれぞれ図示している。これを見ると、流量の計

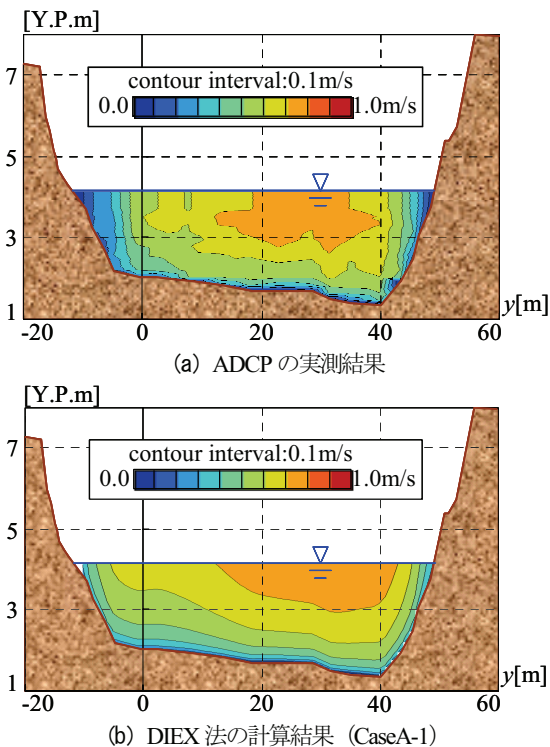


図-12 主流方向流速コンター (2005 年 10 月 13 日 11 時 20 分)

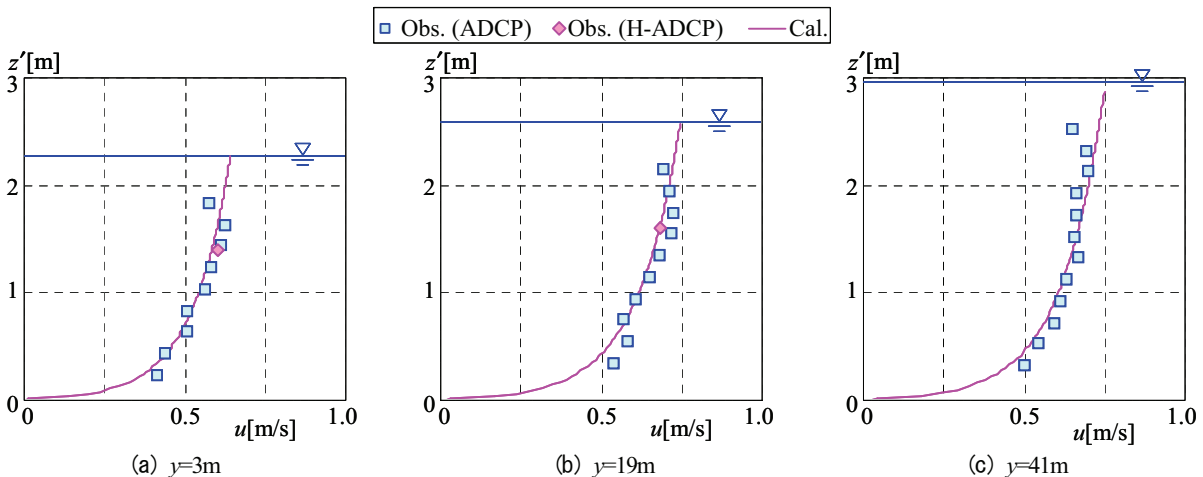


図-13 主流方向流速  $u$  の鉛直分布 (2005 年 10 月 13 日 11 時 20 分, CaseA-1)

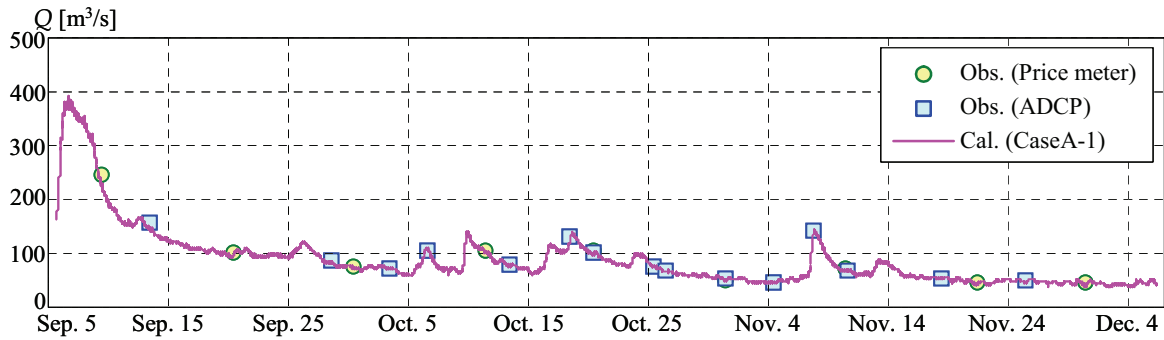


図-14 全観測期間中における流量の時系列変化

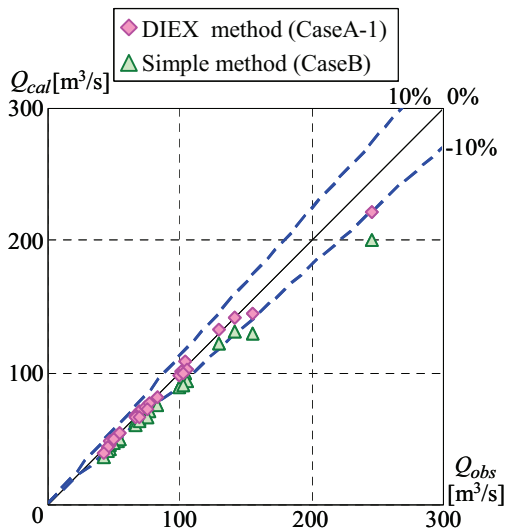
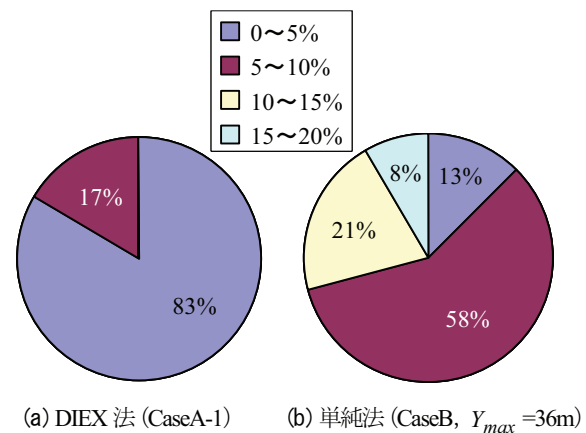


図-15 流量の観測結果 $Q_{obs}$ と計算結果 $Q_{cal}$ の比較 (図中の実線, 点線は推定結果の誤差0,  $\pm 10\%$ を示す)

算値は、水位変動 (図-9 (a)) に追従する形で変化している。また、計算結果はプライス流速計や ADCP による流量の実測値と良好に一致している様子がうかがえる。

本手法による流量の算定精度をより詳細に検討するために、流量の観測結果 $Q_{obs}$ と計算結果 $Q_{cal}$ の相関図を図-15 に示す。ここでは、基準条件 (CaseA-1) における DIEX 法による計算結果に加えて、単純法 (CaseB) による推定結果も図示する。CaseB での同化範囲は、CaseA-1 と合わせるために、 $Y_{max} = 36m$  とする。また、図中には流量推定値の誤差が分かるようにするために、誤差 0,  $\pm 10\%$ に相当する直線 (実線, 点線) も表示している。これを見ると、DIEX 法の計算結果は観測値と類似しており、全て誤差 $\pm 10\%$ 以内となっている。それに対して、単純法による計算結果は、DIEX 法の結果よりも観測値との差が大きく、 $\pm 10\%$ の誤差を上回る結果が多く見られる。また、単純法の流量推定値は全体的に観測値よりも小さい。これは、図-11 (b) に示したように、流速の内外挿を行う部分において流速を過小評価しているためである。

図-16 は流量計算結果の相対誤差  $Err$  の頻度分布を示



(a) DIEX 法 (CaseA-1) (b) 単純法 (CaseB,  $Y_{max} = 36m$ )

図-16 流量推定結果の相対誤差 $Err$ の頻度分布

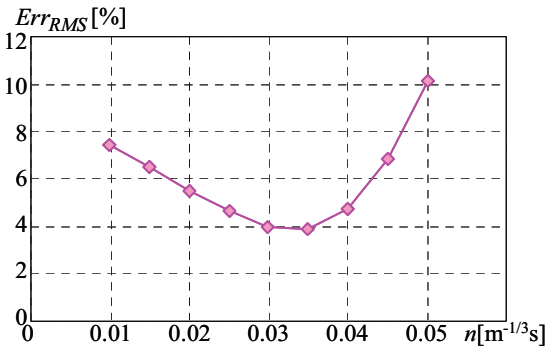
す。ここで、相対誤差  $Err$  は次のように定義される。

$$Err = |Q_{cal} - Q_{obs}| / Q_{obs} \quad (18)$$

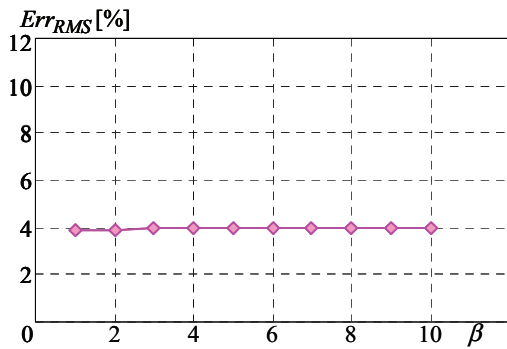
図中では、相対誤差が 0~5%, 5~10%, 10~15%, 15~20%に分けて表示している。また、ここでの計算条件は図-15 と同じである。DIEX 法では、計算結果の 83%は相対誤差 5%以下であり、10%以上の相対誤差は存在しない。一方、単純法の計算結果については、相対誤差 5%以下はわずか 13%であり、相対誤差 10~15%と 15~20%はそれぞれ 21%, 8%にも達している。これらの相対誤差の RMS (Root Mean Square) 値  $Err_{RMS}$  を全データ ( $N=24$ ) について求めたところ、DIEX 法では 3.9%であるのに対して、単純法では 9.7%である。今村ら<sup>5)</sup>によると、標準的な低水流量観測法 (河川局標準法) の流量計測結果に関する  $Err_{RMS}$  は 4.6%である。この結果と本研究における結果を単純に比べることはできないが、本流量モニタリング手法による流量推定精度は概ね良好であると言える。このように、DIEX 法は流量を精度良く推定しており、その相対誤差の RMS 値は 4%以下となり、力学条件を考慮しない単純法の場合よりも十分低く、本流量モニタリング手法の有効性が示された。

d) 各パラメータが流量推定精度に及ぼす影響

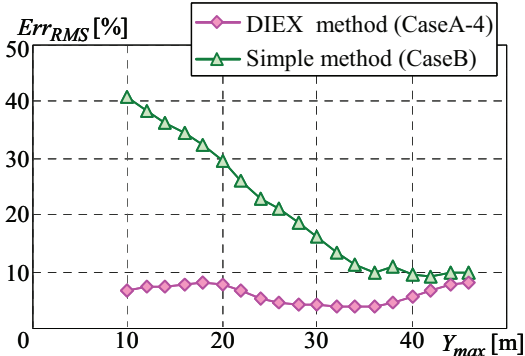
本手法に含まれる計算パラメータなどの設定が流量推



(a) マニングの粗度係数  $n$  (CaseA-2)



(b) 乱れの非等方性指標  $\beta$  (CaseA-3)



(c) 同化範囲  $Y_{max}$  (CaseA-4, CaseB)

図-17 様々なパラメータ条件下における流量推定誤差  $Err_{RMS}$

定精度に及ぼす影響について調べる。まず、計算パラメータ  $n$  や  $\beta$  を変化させた CaseA-2, A-3 における流量推定結果の相対誤差  $Err_{RMS}$  を図-17 (a), (b) に示す。 Manning の粗度係数  $n$  を  $0.005 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  毎に変化させた場合、相対誤差  $Err_{RMS}$  は  $3.9 \sim 10.2\%$  となり、  $Err_{RMS}$  の最小値は  $n=0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  において現れている。このように、  $n$  により流量推定精度が変化するため、高精度に流量推定を行う上では、計算対象毎に  $n$  をチューニングする必要があり、今回の計算対象では  $n=0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  が最適値となっている。この  $n$  の最適値は著者ら<sup>34)</sup>が行った江戸川における数値シミュレーションの結果と近い値である。一般に採用されることが多い  $n=0.02 \sim 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  の範囲では、流量の推定誤差  $Err_{RMS}$  は最大  $5.5\%$  であり、この  $n$  の範囲における流量推

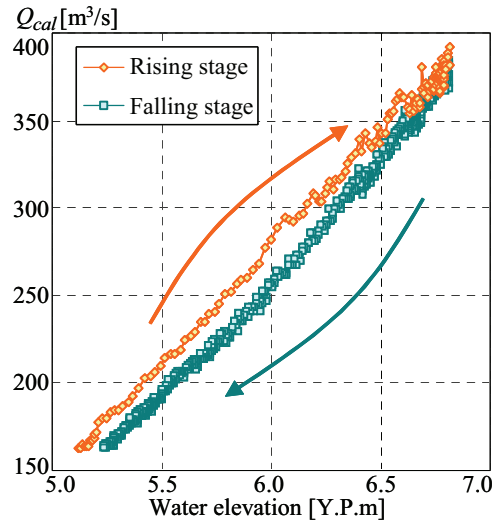


図-18 小出水時における水位-流量関係 (2005年9月5日16時~11日0時)

定精度は概ね良好である。一方、  $\beta$  を変化させたケースでは、  $Err_{RMS}$  は  $3.9 \sim 4.0\%$  であり、ほぼ一定であると見なされる。このように、DIEX法に含まれる計算パラメータ  $n, \beta$  を一般に用いられる範囲で変えても、推定誤差  $Err_{RMS}$  は大きく変化せず、流量推定精度が良好な状態を保つことが示された。

次に、H-ADCP 計測データの同化範囲  $Y_{max}$  を変化させたときの流量推定結果を見るために、DIEX法 (CaseA-4) 及び単純法 (CaseB) における推定誤差  $Err_{RMS}$  を図-17 (c) に示す。これを見ると、DIEX法の計算結果における  $Err_{RMS}$  は  $3.9 \sim 8.2\%$  となっており、  $Y_{max}=36\text{m}$  において  $Err_{RMS}$  は最小となる。このように、  $Y_{max} > 36\text{m}$  において  $Y_{max}$  とともに  $Err_{RMS}$  が増加するのは、図-10に示しているように、  $y > 36\text{m}$  においてH-ADCPの計測値に大きな誤差が含まれるためである。また、同化範囲が狭い、すなわち  $Y_{max}$  が小さいと流量推定精度が低下するのは、数値計算による推定部分が相対的に増加するためである。それに対して、単純法における推定誤差  $Err_{RMS}$  は、全ての  $Y_{max}$  においてDIEX法における  $Err_{RMS}$  を上回っており、その差は  $Y_{max}$  が小さい場合において顕著である。このように、両手法ともに、同化範囲が狭くなると流量測定精度は低下するものの、その程度はDIEX法の方が小さいことが分かる。これは、DIEX法では、力学条件を満たすように流速分布の内外挿を行っているためであると考えられる。本観測ではH-ADCPの計測範囲が対岸側まで到達していたが、様々な応用事例を想定すると、H-ADCPの観測範囲よりも川幅が大きくなるケースは多々存在するものと予想される。そのような場合には、単純法と比べて、DIEX法による流速内外挿操作がより有効となる。

e) 小出水時における水位-流量関係

本観測期間中に唯一生じた小規模出水時 (2005年9月5

日 16 時～11 日 0 時)における流量推定結果について記述する。図-18 はこの小出水時における水位と流量の相関図を示している。ここでは、増水期と減水期に分けて結果を表示している。これを見ると、水位と流量の関係は一意とはならず、同一水位に対して、増水期の流量が減水期の流量よりも大きい、というよく知られたループを描いている。このような水位-流量関係のループは、通常  $H-Q$  カーブでは再現できないことから、本流量モニタリング手法の有用性的一端が示唆された。なお、本観測期間では、大きな出水が生じておらず、また、それに対応した ADCP 等による検証用流量観測も行われていないので、本手法による洪水流量の算定精度については今後早急に行うべき課題である。現在、これに対応した調査とデータ解析を実施している最中である。

## 5. 結論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 河川計画・管理に不可欠な流量を低コストで高精度に連続モニタリングするために、一台で流速の横断分布計測が可能な H-ADCP 観測技術及び河川流シミュレーション技術を組み合わせた新しい河川流量モニタリングシステムを構築した。
- (2) H-ADCP により観測される流速の「線」データから「面」流速データや流量を算出するために、データ同化手法を組み込んだ河川流モデルである力学的内外挿法 (DIEX 法) を新たに開発した。ここでは、計算効率性と計算精度を勘案して、簡略化された運動方程式に付加項を導入し、この付加項を介してデータ同化を行っている。さらに、データ同化の際には、観測値に含まれる計測誤差を最小化する数値アルゴリズムを導入している。
- (3) 本手法の流量推定精度を検証するために、江戸川中流部において約 3 ヶ月間にわたり H-ADCP による連続観測を実施し、別途行われた ADCP 等による流量観測結果と比較・検討した。その結果、本手法により、流速横断・鉛直分布や流量が精度良く再現されていることが確認された。また、本手法による流量推定値の相対誤差の RMS 値 (=3.9%) は、標準的な低水流量観測法と同程度であり、かつ、力学条件を考慮しない単純法の場合 (=9.7%) よりも十分小さいことから、本流量モニタリング手法の基本的な有効性が明らかとなった。
- (4) 以上の結果より、本研究で提案している H-ADCP 計測技術と河川流計算技術を融合した高規格自動流量モニタリングシステムの実現が有望であることが示された。

なお、本論文で対象とした観測サイトは、複断面河道であったが、高水敷が冠水する出水が無かったため、実質上、ここでは単断面河道における流量の推定を行ったこととなる。そのため、今後は、高水敷が冠水する程度の出水時を対象として、本システムの流量推定精度を検証する必要がある。また、出水時に卓越する河床変動や流木、河川水の高濁度化により、本手法による流量推定精度が大きく低下する可能性があるため、より多くの適用事例を増やすことにより、本システムの適用範囲を調べる予定である。

**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。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には、現地観測実施や流量データ提供に関して様々な便宜をはかって頂いた。現地調査の実施には、(株) ニュージェック・北山和典氏、(株) ハイドロシステム開発・橋田隆史氏、(株) SEA・中川拓朗氏、疋田真氏には多大な御助力を頂いた。本研究で用いた H-ADCP は (株) ハイドロシステム開発からお借りしたものである。3 名の査読者の方から有益なご指摘を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) (社) 日本河川協会編: 改訂新版建設省河川砂防技術基準 (案) 同解解説 調査編, pp.33-58, 1997.
- 2) 土木学会: 水理公式集 [平成 11 年版], 丸善, pp.75-86, 1999.
- 3) (社) 中部建設協会: 絵で見る水文観測, 水谷印刷, pp.130-217, 2001.
- 4) 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, Vol.45, No.2, pp.22-29, 2003.
- 5) 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.
- 6) 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, Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.
- 7) Mueller, D. S.: Use of acoustic Doppler instruments for measuring discharge in streams with appreciable sediment transport, *Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, 2002 (CD-ROM).
- 8) 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, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.
- 9) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 10) 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, Vol.45, No.2, pp.36-45, 2003.
- 11) 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, No.497/II-28, pp.41-50, 1994.
- 12) 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.
- 13) 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.
  - 14) 山口高志: 洪水流速および流量観測 —その1—, 水文・水資源学会誌, Vol.15, No.6, pp.625-635, 2002.
  - 15) 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.
  - 16) 二瓶泰雄, 木水啓: 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.155-160, 2005.
  - 17) Nihei, Y. and Kimizu, A.: Evaluation of river velocity and discharge with a new assimilated method, *Int. J. River Basin Management*, Vol.4, No.1, pp.1-4, 2006.
  - 18) Lorenc, A. C.: Analysis methods for numerical weather prediction, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.112, pp.1177-1194, 1986.
  - 19) 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.
  - 20) 小守信正, 石川洋一, 淡路敏之: データ同化の原理と手法, 月刊海洋, Vol.33, No.2, pp.69-75, 2001.
  - 21) Sulzer, S., Rutschmann, P. and Kinzelbach, W.: Flood discharge prediction using two-dimensional inverse modeling, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.128, No.1, pp.46-54, 2002.
  - 22) 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.
  - 23) 色川有, 二瓶泰雄, 北山秀飛: ADCP による流量観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.
  - 24) 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.
  - 25) Pinkel, R.: Observations of nonlinear internal motion in the open sea using a range-gated Doppler sonar, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.9, pp.675-680, 1979.
  - 26) Pettigrew, N. R., Beardsley, R. C. and Irish, J.D.: Field evaluations of a bottom-mounted acoustic Doppler profiler and conventional current meter moorings, *IEEE*, pp.153-162, 1986.
  - 27) 金子新, 伊東集通: ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol.3, No.5, pp.359-372, 1994.
  - 28) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 木水啓, 飯田裕介: 洪水観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用 —江戸川を例にして—, 水工学論文集, Vol.48, pp.763-768, 2004.
  - 29) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCP を用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, Vol.12, pp.133-138, 2006.
  - 30) 北山秀飛, 二瓶泰雄: H-ADCP 用簡易テレメータシステムの構築, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, Vol.61, pp.93-94, 2006.
  - 31) Anthes, R. A.: Data assimilation and initialization of hurricane prediction models, *J. Atmos. Sci.*, Vol.31, pp.702-719, 1974.
  - 32) Phillips, N. A.: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. Meteor.*, Vol.14, pp.184-185, 1957.
  - 33) Blumberg, A. F. and Mellor, G. L.: Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.C8, pp.4579-4592, 1983.
  - 34) 二瓶泰雄, 加藤祐一, 佐藤慶太: 広域河川流計算のための新たな三次元流動モデルの開発と洪水計算への応用, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.115-131, 2005.
  - 35) 関根正人: 移動床流れの水理学, 共立出版, pp.1-19, 2005.
  - 36) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善, pp.138-152, 1983.
  - 37) Chen, C.: Unified theory on power laws for flow resistance, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.117, No.3, pp.371-389, 1991.

(2006. 9. 8 受付)

## A NEW MONITORING SYSTEM FOR RIVER DISCHARGE WITH AN H-ADCP MEASUREMENT AND RIVER-FLOW SIMULATION

Yasuo NIHEI and Akira KIMIZU

To realize an accurate and continuous monitoring for river discharge at low cost, a new monitoring system with an H-ADCP measurement and river-flow simulation is developed. The H-ADCP can measure velocity profile at a horizontal line. In the numerical simulation, the measured velocities are interpolated and extrapolated in a cross section with satisfying dynamic principles. The present computational method is therefore referred to as a dynamic interpolation and extrapolation (DIEX) method. To confirm the fundamental performance of the present monitoring system, the H-ADCP measurement was done at the middle reach of the Edo River and the river discharge was evaluated with the present method. The simulated velocity and discharge were compared with the results measured with an ADCP and a price current meter. The results indicate that the simulated velocity and discharge give good agreements with the observed data, demonstrating the fundamental validity of the present monitoring system for river discharge.