

# 8年間にわたるH-ADCP流量モニタリング システムの運用と精度検証

APPLICATION OF DISCHARGE MONITORING SYSTEM WITH H-ADCP  
DURING 8 YEARS AND ITS VALIDATION

中村友洋<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・根岸大介<sup>3</sup>

Tomohiro NAKAMURA, Yasuo NIHEI and Daisuke NEGISHI

<sup>1</sup>非会員 学(工) 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻修士課程  
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 東京理科大学 理工学部土木工学科教授  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 清水建設(株)  
(〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)

We have recently developed a new monitoring system using H-ADCP measurements and river flow simulation based on a DIEX method. This system has been applied to continuous discharge monitoring in the middle reach of the Edo River over 8 years. This study presents the fundamental validity and applicability of this system. The results indicate that this system can completely evaluate river discharge without the conditions of unexpected accident for H-ADCP and low water elevation in which H-ADCP can not measure river velocities. The comparison of the calculated and observed discharges shows that the averaged relative error of the calculated discharge is 4.8 %. These facts suggest the high accuracy and robustness of this system for automatic continuous monitoring of river discharge.

**Key Words :** river discharge, H-ADCP, DIEX method, Edo River, automatic continuous monitoring

## 1. はじめに

流量や水位, 雨量を始めとする水文・水理観測法では, 様々な計測技術が発展しているものの, 従来までの観測手法との整合性の観点から河川管理レベルまでの適用に至らないケースが多かった. しかしながら, 昨今, 新技術を河川砂防技術基準等に反映する機運が醸成されつつある. 特に, 流量観測が最も必要な大規模出水時において, 観測自体が危険で困難となる浮子法<sup>1, 2)</sup> やADCP移動観測法<sup>3)</sup> に代わり, 無人で自動連続的な流量観測技術の開発が急務の課題となっている. 自動連続観測用の流速計測技術としては, 経済性や実績の面から, 非接触型では画像解析手法<sup>4)</sup> や電波流速計<sup>5)</sup>, 接触型では水平設置型超音波ドップラー流速分布計H-ADCP (Horizontal-ADCP) <sup>6, 7)</sup>を用いたものが有力である.

わずか一台である高さの流速横断分布を自動連続計測できるH-ADCPに着目したところ, H-ADCPのみにより全断面の流速データを取得するには, H-ADCPを上下に

動かすハードウェアが必要となるが<sup>6)</sup>, それは非常に高価であり, 様々な河川に導入するのは現実的ではない. そこで著者らは, H-ADCPによる「線」流速計測技術と, 流体力学条件を満足した形で「面」流速データを推定するための力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法) を用いた新たな流量観測システムを構築している<sup>7)</sup>. 本システムは, 江戸川・野田橋において2006年6月に設置・運用が開始され, 現在 (2015年1月) まで8年半の間に及ぶ長期間の連続観測を行っており, 世界でも例を見ない貴重なデータが蓄積されている<sup>7)~9)</sup>.

本研究では, これら全データを用いて本システムの流量モニタリングの運用状況や流量推定精度を取りまとめ, 8年間という長期間運用された本システムの有用性やロバスト性を検証した. また, 流量推定精度が低下する低水時における精度向上策も合わせて検討した.

## 2. 研究方法

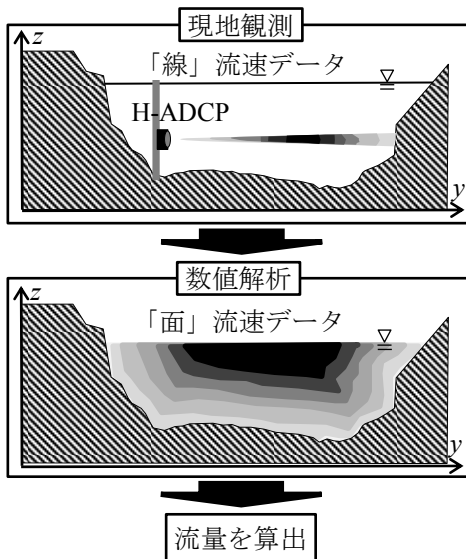


図-1 本システムの概要

### (1) 本システム及びDIEX法の概要

本研究では、図-1に示す、H-ADCPによる現地観測と数値シミュレーション手法（DIEX法）を融合した新しい流量モニタリングシステムを用いる<sup>7)</sup>。本システムでは、①H-ADCPによるある高さの流速横断分布である「線」流速の自動連続計測と、②力学的内外挿法（DIEX法）による「線」流速データから「面」流速分布及び流量の算出、の二つのサブシステムから構成される。

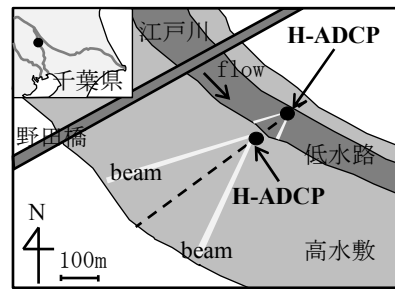
DIEX法において用いる基礎方程式としては、三次元ナビエ・ストークス方程式から移流項や非定常項などの観測困難な項を省略し、その代わりに付加項 $Fa$ を導入した以下の式を用いる。

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

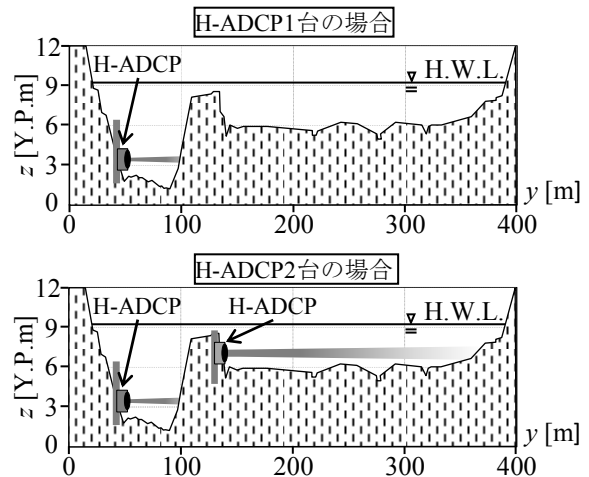
ここで、 $u$ は主流方向流速、 $y$ 、 $\sigma$ は横断・鉛直方向、 $A_H$ 、 $A_V$ は水平・鉛直渦動粘性係数、 $D$ は水深、 $I$ は水面勾配、 $a$ は植生密度、 $C_D$ は植生抵抗係数を表す。DIEX法の特徴は、方程式中に省略した項の代わりに導入された付加項 $Fa$ を介して流速観測データを同化することである。付加項 $Fa$ を横断方向に内外挿する際の内外挿法としては、観測された付加項 $Fa$ の平均値を一様に横断面に与える“一様法”と、観測された付加項 $Fa$ の間を3次関数で近似する“3次スプライン補間法”を用いる。

### (2) 現地観測

観測サイトは、図-2(a)に示す江戸川・野田橋の下流側（河口部から+39km地点）である。図-2(b)に示すように、江戸川は複断面河道であり、低水路幅は約100m、



(a) 平面図



(b) 横断面図とH-ADCP設置状況

図-2 観測サイト（江戸川・野田橋）

表-1 H-ADCPの計測条件

(a) 低水路

観測期間	周波数 [kHz]	層数	層厚 [m]	不感帯長さ $y'$ [m]
2006/6/6~ 2008/7/7	600	128	0.50	2.37
2008/7/7~ 2009/6/25		100	0.50	2.37
2009/6/25~ 現在		20	3.00	3.98

(b) 高水敷

観測期間	周波数 [kHz]	層数	層厚 [m]	不感帯長さ $y'$ [m]
2009/8/11-12 (台風0909号)	600	20	3.00	3.98
2011/9/2-8 (台風1112号)		70	4.00	6.17
2011/9/22-24 (台風1115号)		70	4.00	6.17

右岸側の高水敷幅は約300mとなっている。本研究では、複断面河道の江戸川において、右岸側の高水敷幅が堤間幅の3/4を占めること、かつ、低水時から洪水時まで流量データを取得することを念頭にして、H-ADCPの設置条件を検討した。その結果、ここでは、H-ADCPを低水路に1台設置して観測を行う場合と、低水路に1台、高水敷に1台の計2台のH-ADCPを設置して観測を行う場合の2つの設置パターンを実施した（図-2(b)）。低水路では、

周波数600kHz (Workhorse, Teledyne RDI製) のH-ADCPを、左岸側(左岸天端から46m地点)、高さ3.41Y.P.mにて右岸側に向けて水平に設置している。高水敷では、600Hzもしくは300kHzを右岸側高水敷の低水路寄り(左岸天端から138m地点)の右岸側に向けて設置している。設置高さは2009年と2011年でそれぞれ7.09Y.P.m、7.39Y.P.mである。

低水路・高水敷に設置されたH-ADCPの設置期間と計測条件は表-1に示すとおりである。低水路におけるH-ADCPの設置期間は2006年6月6日～現在(2015年1月13日)までの8年半にわたり、長期間連続観測を行っている。観測開始当初は、より細かい分解能で流速データを取得すべく、計測層厚を0.5mとしたが、計測層厚が大きいくほど高濁度時における超音波の減衰量が小さいことが判明したため<sup>10)</sup>、現在では層厚を3.0mとしている。計測間隔は全期間10分である。一方、高水敷に関しては、2009年から2011年にかけてH-ADCPを設置し、計3回の出水イベントにて計測した(表-1(b))。図-2(b)に示すように、高水敷の計測範囲は300mと長いので、計測レンジが広い低周波数(300kHz)を用いることが望ましいが、機器調達の都合で2009年度は600kHz、2011年度は300kHzを各々用いた。また、計測間隔は低水路に設置したH-ADCPと同様に10分とした。

検証用データを取得するために、別途ADCP移動観測<sup>3)</sup>を平常時、出水時に野田橋にて実施した。ADCPの設定条件としては、層厚0.2m、層数65層、計測間隔7.5sとした。このADCPの観測結果と、国交省・江戸川河川事務所実施のプライス流速計の流量観測データを合わせて検証用観測データとして扱う(総データ数  $n=904$ )。

### (3) DIEX法の計算条件

DIEX法における流量算出条件として、H-ADCPの設置台数毎に、付加項Faの内外挿法や高水敷での植生抵抗項の扱いの有無を表-2に示す。ここでは、全期間を、H-ADCP2台を用いた期間(表-1(b)に記されている三つの洪水期間)とそれ以外の期間(H-ADCP1台のみ)と分ける。まず、H-ADCPを低水路に1台のみ設置している期間では、付加項Faの内外挿法としては、低水路、両岸の高水敷ともに一様法を用いる。また、このケースでは、植生が繁茂する右岸側高水敷では、植生抵抗項を考慮しており、岩本・二瓶<sup>8)</sup>と同じ値を採用する。この時のH-ADCPにより得られた観測値のデータ同化範囲は、計測層厚0.5m、3.0mの時にそれぞれ最大で $y'=37.9$ 、 $37.0$ mとする( $y'$ : H-ADCPからの横断距離)。ただし、超音波の伝播過程や高濁度時の超音波の減衰を考慮して、H-ADCPより発信される超音波ビームが水面・底面に届くか、もしくは、超音波の反射強度が規定値(=110counts)以下になる横断位置が上記の $y'$ を下回れば、その横断位置までを同化範囲とする(この方法をCase1とする)。

なお、低水時では、H-ADCP近傍にて超音波が水面に

表-2 DIEX法における計算条件

H-ADCP 台数	計算 期間	Faの内外挿法			植生 抵抗
		左岸側 高水敷	低水路	右岸側 高水敷	
1台	下記 以外	一様法	一様法	一様法	有
2台	台風 0909号			一様法	無
	台風 1112号			3次ス プライン 補間 法	
	台風 1115号				

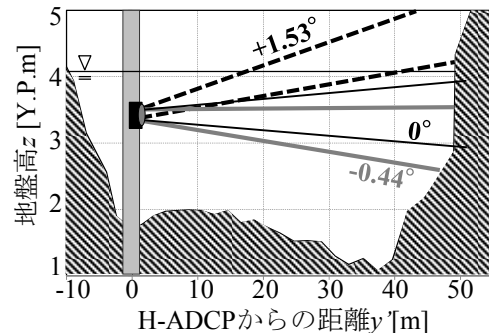


図-3 H-ADCPのピッチ角度と超音波ビームの軌跡

到達する。また、H-ADCPはピッチ角度が $\pm 0.5$ 度以下となるように固定設置したが、設置後でもピッチ角度は取り付けられた単管パイプの熱膨張等によりわずかに推移し、本サイトでは $-0.44 \sim 1.53$ 度まで変化した。これらの場合には、データ同化範囲が狭くなる(図-3)。その際、水面反射位置以降の流速分布を確認したところ、一部のデータに関しては流速計測が問題無くできていた。そのため、後述するように、低水時の流速計測精度向上策として、データ同化範囲の設定を変更する。すなわち、超音波の水面到達位置に関わらず同化範囲を与えることとし、この時のFaの内外挿法として一様法と3次スプライン補間法を用いるケースを各々Case2-1、2-2とする。

次に、低水路と右岸側高水敷に計2台のH-ADCPを設置するケースについて記述する。ここでのFaの内外挿法としては、低水路と左岸側高水敷ではH-ADCP1台のみと同様に一様法を用いるが、H-ADCPが追加された右岸側高水敷では、計測範囲が相対的に狭いH-ADCP600kHzを用いた台風0909号時では一様法を採用し、最大400mの計測が可能なH-ADCP300kHzを用いた台風1112、1115号時では3次スプライン補間法を用いた。右岸側高水敷では、H-ADCPによる流速データを取得でき、このデータ同化を介して植生抵抗効果を考慮できるため、3つの洪水時では植生抵抗項を考慮しない。

H-ADCP観測断面における横断面測量は、毎年2~3回実施している。そのため、流量算出に際しては、近い時期の横断面測量データを用いる。

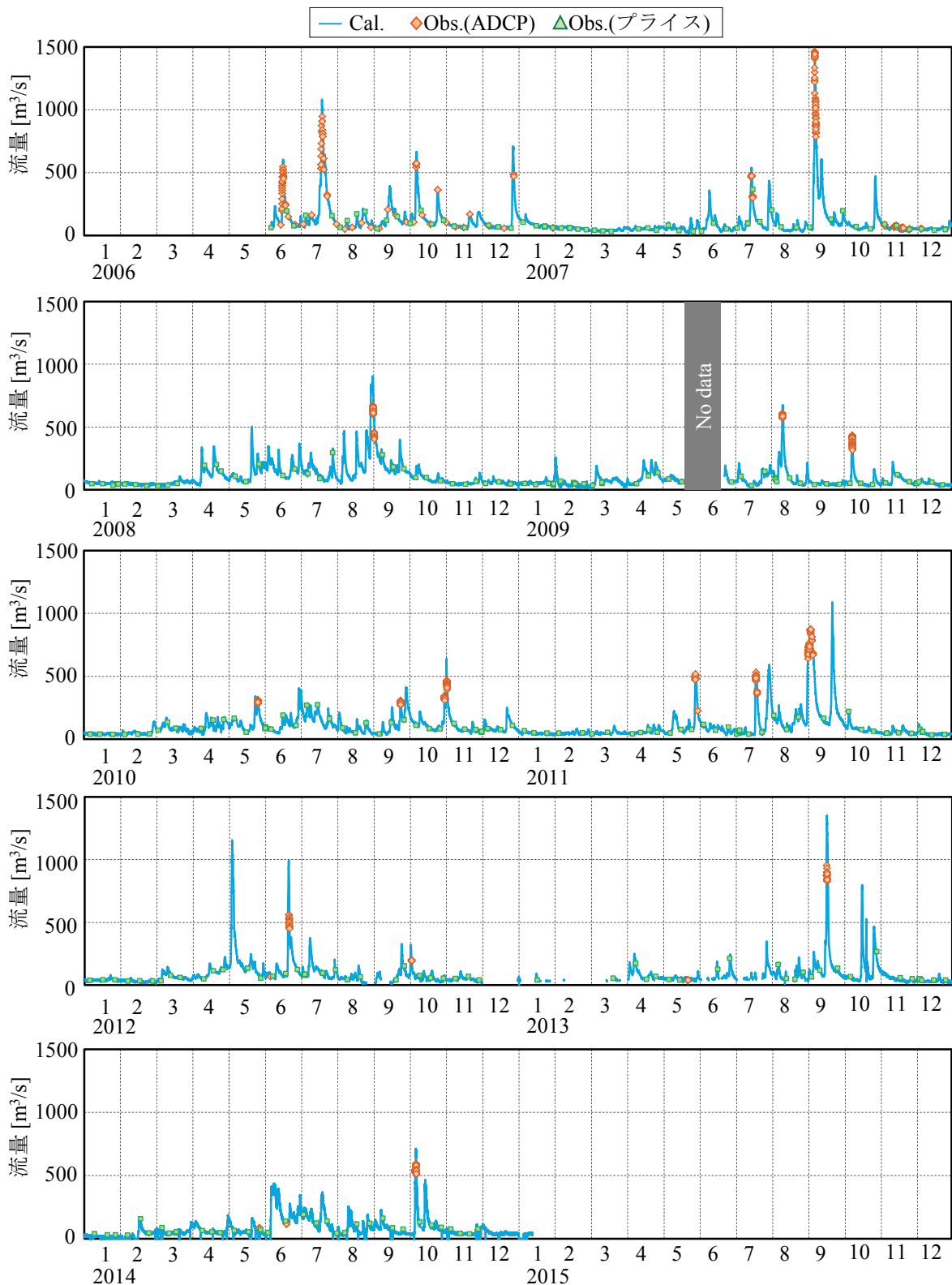


図-4 全期間における流量推定値の時系列変化

### 3. 結果と考察

#### (1) 本システムの運用状況

図-4は、本システムを設置・運用を開始してから現在までの全期間（2006年6月6日から2015年1月13日まで全

3143日間）における流量推定値の時系列変化を示す。ここでは、別途行われているADCP移動観測法とプライス流量観測による検証用観測データも併せて図示している。これより、本システムにより推定した流量値は、検証用データと概ね一致しており、本システムの流量推定は良好であることが伺える。また、運用開始時から現在まで

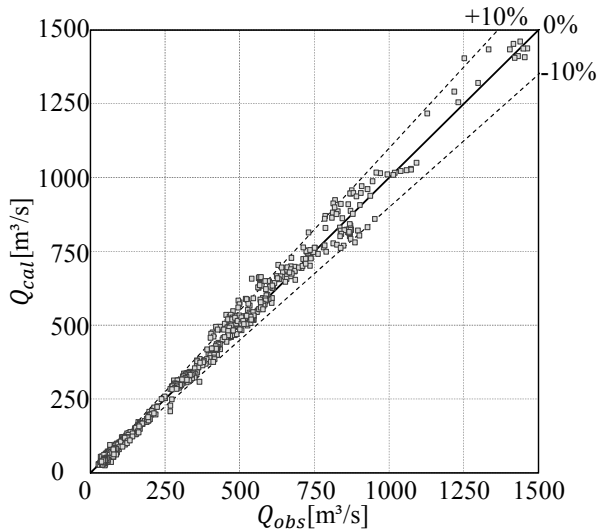


図-5 流量に関する本システムの推定値 $Q_{cal}$ と検証用観測値(ADCP, プライス流速計)  $Q_{obs}$ の相関関係

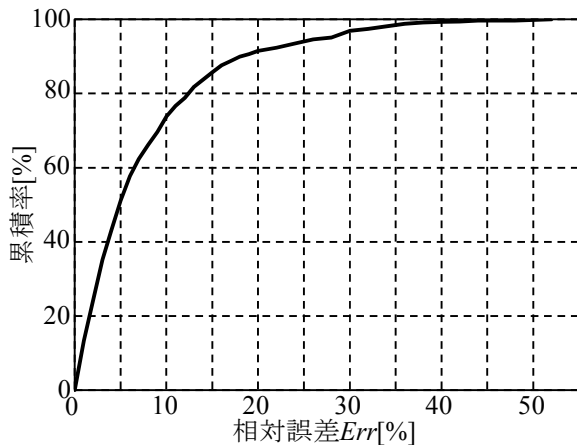


図-6 本システムによる流量推定値の相対誤差の累積分布

の全期間の中で、本サイトの植生刈り取り業者によるH-ADCP用ケーブルの切断(2009年5月18日から同年6月22日)による欠測と、水位が低水路のH-ADCP設置高さ以下でありH-ADCPが冠水しないことによる欠測期間を除く全2920日間において、H-ADCPの流速データ取得状況は良好であった。得られた流速データを用いてDIEX法による流量推定もほぼ100%実施できている。このように、本システムにより、無人で自動連続的に確実に流量算出が可能であり、本システムのロバスト性が極めて高いことが実証された。

## (2) 本システムの流量推定精度

このような本システムの流量推定精度を検証するために、全期間における流量推定値 $Q_{cal}$ とそれに対応する検証用データ(ADCP, プライス流速計)  $Q_{obs}$ の相関図を図-5に示す(総データ数 $n=904$ )。ここでは、推定結果と観測結果の差異を見やすくするために、検証用観測値を基準とし誤差±10%の点線も併せて表示する。これよ

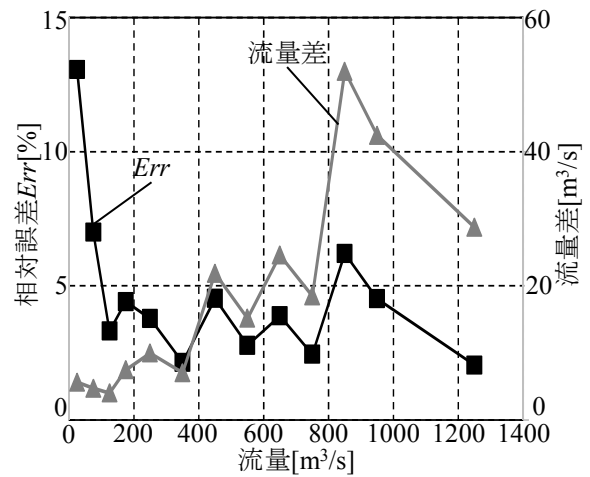


図-7 流量推定値の相対誤差 $Err$ と流量差(絶対値)に関する流量依存性

り、本システムの流量推定値の多くは、誤差±10%以内に入り、かつ、観測値に対して過大・過小評価している様子は見られない。詳しく見るために、各データの相対誤差 $Err$ ( $=|Q_{obs}-Q_{cal}|/Q_{obs} * 100[\%]$ )を求め、その累積分布を図-6に示す。これより、相対誤差2%、5%、10%以内はそれぞれ全体の24.4%、51.2%、73.8%となっている。全データの相対誤差の平均値と中央値は各々7.8%、4.8%となり、本システムの流量推定値が長期間に関わらず極めて高い精度を示している。なお、平均値と中央値は両方とも小さいものの差異が見られるのは、図-6に示すように、低頻度ではあるが相対誤差が大きいものが存在するためである。

この要因を検討するために、流量推定結果の相対誤差 $Err$ を流量別に整理し、この $Err$ 及び流量差(推定値と検証用観測値の差)の絶対値と流量の相関図を図-7に示す。ここでは、各流量範囲における $Err$ と流量差の中央値を表示する。また、これらの値を $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の流量 $Q$ では50もしくは $100\text{m}^3/\text{s}$ 毎に求め、データ数が少ない $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量では一つにまとめて示す。これより、相対誤差 $Err$ は $Q>100\text{m}^3/\text{s}$ では概ね5%以下となっており良好な精度である。それに対して、 $Q<100\text{m}^3/\text{s}$ では $Err$ が大きくなり、特に $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下では $Err$ は最大の13%に達し、これが図-6に示した相対誤差 $Err$ が大きい要因となっている。ただし、この低流量時における流量差は $5.6\text{m}^3/\text{s}$ であり、絶対値としては大きくない。

## (3) 低流量時の推定精度改善策

前節で示した低流量時( $Q<100\text{m}^3/\text{s}$ )における流量推定誤差は、H-ADCPからの超音波ビームが対岸まで届かずH-ADCP近傍の水面で反射することが主要因と目される。この状況下における流速データ取得状況を確認するために、主流方向流速と超音波反射強度の横断分布を図-8に示す。ここでは水位が同じ2時点(2007/2/13 9:20、

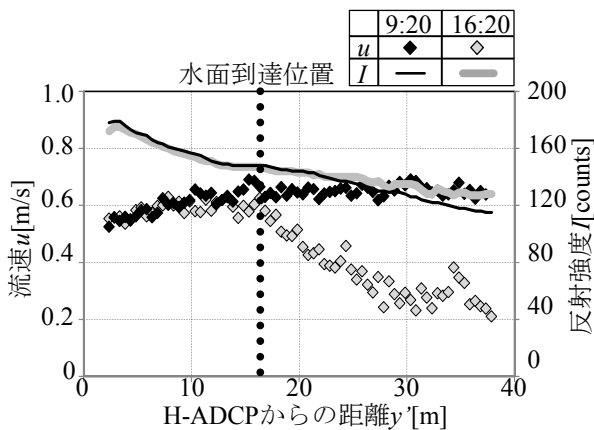


図-8 低流量時における主流方向流速と反射強度の横断分布 (2007/2/13, 3.99Y.P.m)

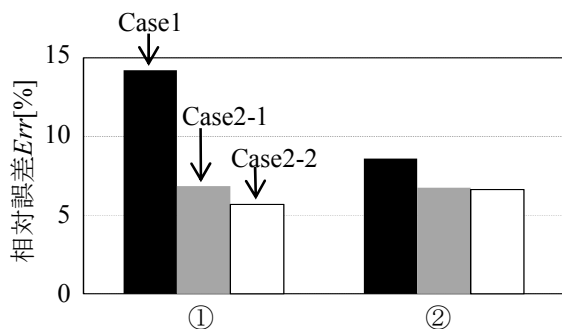


図-9 低流量時①と②における流量算出精度

16:20, 3.99Y.P.m)の結果を例示する。なお、図中には超音波ビームの水面到達位置も示す。これより、両時点の反射強度分布には大きな差異は無いが、流速分布としては水面反射位置以降に差異が大きい。これはH-ADCPのピッチ角度のわずかな変化で超音波の軌跡も変わり(図-3)、その変化量がセンサー誤差範囲( $\pm 0.5$ 度)と同程度であるためと推測される。

そこで $100\text{m}^3/\text{s}$ 以下の低流量時において、①超音波が水面反射位置以降でも流速の取得状況が良好なもの( $n=61$ )と、②全データ( $n=384$ )を対象として、データ同化範囲を水位と共に変化させるCase1と固定するCase2-1、2-2の流量推定結果を図-9に示す。これより、②では3ケースの差は相対的に小さいが、①ではCase2-1、2-2の方がCase1よりも高精度になっていることが分かる。以上の結果から、より対岸まで流速データを取得できる位置にH-ADCPを設置すれば低水時の流量推定精度は向上できることが定量的に示唆された。

#### 4. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 本システムを8年7ヶ月の間、運用した結果、河川管理者の人為ミスによるケーブル切断時や低水位時を除いてH-ADCPのデータ取得やDIEX法による流量算出を

ほぼ100%実施でき、本システムのロバスト性が実証された。

(2) 本システムの流量推定結果を検証用観測データと比べたところ、相対誤差は中央値で4.8%と極めて低い。流量別に見ると、相対誤差は流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上では概ね5%以下と良好であるが、流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下では相対誤差は13%と高い。ただし、この低流量時における流量差の絶対値は $5.6\text{m}^3/\text{s}$ と小さい。これより本システムの流量推定精度は極めて高く、本システムは無人の自動連続流量観測に非常に有用であることが示された。

(3) 低流量時の推定精度を向上させるには、対岸まで流速データを取得できるような高さにH-ADCPを設置することが有効であることが示唆された。

謝辞：現地観測に際しては、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には様々なご協力を頂いた。また、大変な観測作業を遂行できたのは、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生の惜しみないご協力のおかげである。特に、卒業生である故 木水啓氏、原田靖生氏、岩本演崇氏、柏田仁氏、御厨純氏、鈴木大樹氏には大変お世話になった。ここに感謝の意を表します。

#### 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) 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, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 二瓶泰雄, 木水啓：H-ADCP観測と河川流量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) 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, Vol.53, pp.1009-1014, 2009.
- 9) 御厨純, 二瓶泰雄, 鈴木大樹, 中山朝陽：2台のH-ADCP計測とDIEX法に基づく複断面河道の洪水流量計測 ～台風1112号出水を例に～, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_1345-I\_1350, 2012.
- 10) 二瓶泰雄, 岩本演崇, 谷古宇洋介：H-ADCPの有効計測範囲の検討, 水工学論文集, Vol.54, pp.1099-1104, 2010.

(2015. 4. 3受付)