

# 電波流速計の流速・流量計測精度の検討

## ACCURACY OF VELOCITY AND DISCHARGE MEASUREMENTS BY USING RADIO CURRENT METER

根岸大介<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・片山直哉<sup>3</sup>・柏田仁<sup>4</sup>

Daisuke NEGISHI, Yasuo NIHEI, Naoya KATAYAMA and Jin KASHIWADA

<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)

<sup>3</sup>非会員 修 (工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

<sup>4</sup>正会員 学 (工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

In the present study, we examined the fundamental performance of a radio current meter (RCM) for velocity and discharge measurements. For this purpose, we conducted field measurements using RCM, ADCP and ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) in the Edogawa River under low- and high-flow conditions. Laboratory experiments in an open channel with wind tunnel were performed to compare velocity and discharge measured by RCM, pitot tube and float. The results indicate that the velocity measured by the RCM was almost comparable to that by floats, showing that the measurement depth of the RCM corresponds to the draft of float (<5 mm). It is also found that the discharge using the RCM and standard coefficient of float (=0.85) were in good agreement with the experimental data.

**Key Words** :radio current meter, river discharge, surface velocity, coefficient of float, DIEX method

### 1. 序論

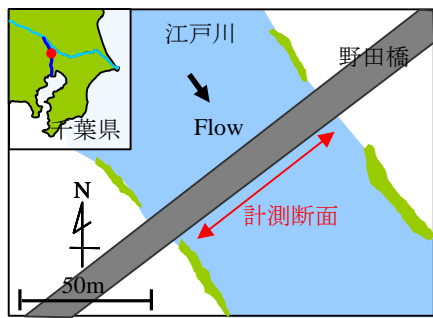
河川流量観測では、様々な流速計を用いた流量観測が各地で実施されており、土木学会水工学委員会流量観測高度化研究小委員会主催による合同観測も 2012 年から行われている<sup>1)</sup>。これらの観測では我が国の標準計測法である浮子やプライス流速計に加え<sup>2, 3)</sup>、ADCP<sup>4, 6)</sup>、H-ADCP (Horizontal ADCP)<sup>7, 8)</sup>、電波流速計や画像解析法等の表面流速計<sup>9-12)</sup>が用いられている。

このうち電波流速計は、空中から水表面に向かって斜め上方から電波を放射し、水表面に形成されている波などの凹凸からの反射電波を計測し、そのドップラー効果を利用して表面流速を非接触計測している。元々、設置型として開発されていたが、最近では安価な可搬型タイプも製品化され、より簡便な流速計測が可能となっている。また、非接触計測を行っているため、出水時に多量のゴミが浮遊している我が国の河川における流量観測には適しており、今後、様々な河川流量観測への適用が期待される。しかしながら、電波流速計の流速計測精度の

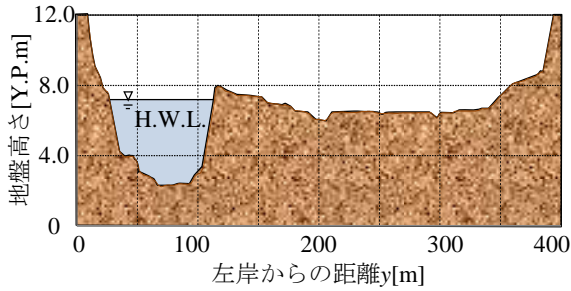
検証事例は多くなく、水面波が発生しない所では、計測原理上、流速計測自体ができない。これに加えて、計測深度や計測値の風速依存性に関する知見が少ない。

また、電波流速計等による表面流速データから流量を算定する際には、標準的に水深平均流速と表面流速の比である更正係数<sup>2)</sup>が用いられる。水表面流速は、一般に、風による影響を大きく受けることから、更正係数も風の影響を考慮する必要があるが、そのような検討は十分なされていない。

本研究では、風洞付開水路実験や現地観測を行い、電波流速計の流速計測性能を検証すると共に、流量算定精度も合わせて検討する。ここでは、①電波流速計による表面流速値と他の流速計による流速鉛直・横断分布を比較すると共に、②電波流速計により計測された表面流速の更正係数に対する風速依存性を把握し、流速計測性能を検討する。また、③流量計測精度の検証として、上記の室内実験結果を用いて、電波流速計やその他の流速計による流速値から流量を算定・比較する。そこでは、更正係数を用いる従来の流量算定法に加えて、著者らが開



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-1 観測サイト (江戸川・野田橋)

表-1 観測期間と流況

観測実施日	流況	水位 [Y.P.m]	ADV計測 高さ[m]	風速[m/s](下流向きを正)
2012/6/21 9時～17時	出水時	7.41	-	-4.35
2012/10/2 15時～17時	平常時	5.29	0.18, 0.27	-3.41
2012/11/21 15時～16時		3.71	0.20	2.57

発している、「点」もしくは「線」流速データから「面」流速データを推定可能な力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)<sup>7)</sup>を用いる。

## 2. 研究方法

### (1) 現地観測

観測サイトは、図-1(a)に示す江戸川・野田橋下流側(河口から+39km)を対象とする。図-1(b)に示すように、江戸川は複断面河道であり、その低水路幅は約100m、高水敷幅は右岸側において約300mとなっている。表-1は観測期間や流況などを示す。本観測では、出水時1回、平常時2回となっており、出水時においても高水敷が冠水する規模ではなかったため、観測位置は低水路のみとした。本観測で用いる機器は、可搬タイプの電波流速計 (RYUKAN, 横河電子機器(株)製) と ADCP (Workhorse1200kHz, Teledyne RDI製), ADV (Acoustic Doppler Velocimeter, Nortek製) の3つとする。図-2に示すように、ADCP計測で用いられることが多い専用ボート (Riverboat, Teledyne RDI製) の中央部にADCPを鉛直下向きに装着すると共に、ADVもADCPセンサーのそばに下向

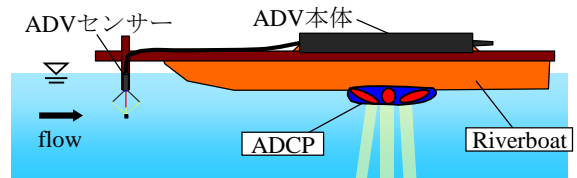
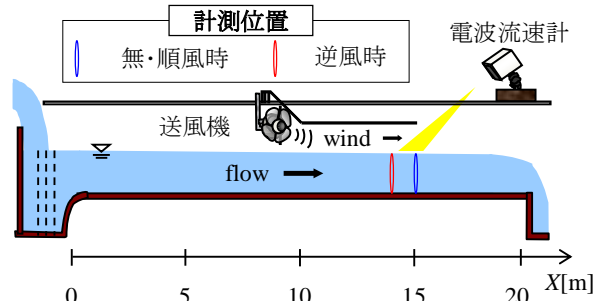
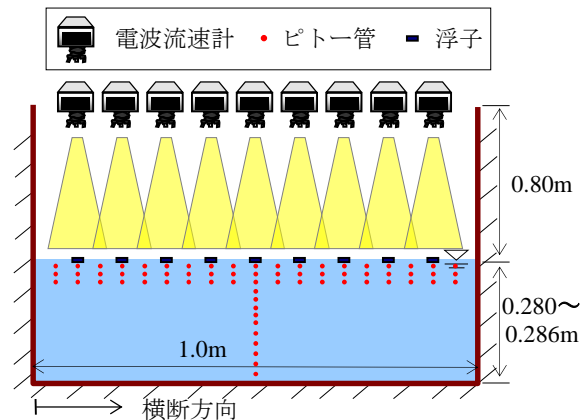


図-2 観測時におけるADV・ADCPの計測状況



(a) 縦断面図 (無・順風時の設置例)



(b) 横断面図

図-3 実験水路の概要と計測位置

きに取り付け、これらを水面に浮かべた形で計測した。また、電波流速計に関しては、橋上の下流側に水平面から45度傾けた状態で設置した。各流速計の計測深さとしては、電波流速計は水表面、ADCPは水面下0.35mから20cm毎に、ADVはADCPの未計測範囲である水面下0.18, 0.20, 0.27mとした。また、流速計測と同時に、橋上中央部にて、マルチ環境測定器 (LM-8102, アズワン(株)製) により風向・風速を計測した。計測時間間隔を電波流速計1.0s, ADCP7.5s, ADV1.0sと設定した。

### (2) 室内実験

室内実験では、図-3に示す水路長20m、水路幅1mの風洞付水平開水路(パンフィックコンサルタンツ(株)所有)を用いた。ここでは、電波流速計とピトー管(計測部外径5mm)、浮子(縦3.0×横2.6×厚さ0.5cmの木片)を用いた。浮子については水表面近傍の流速を計測するために、喫水を4mm(静水中)とした。実験時の水理条件としては、流量を0.270m<sup>3</sup>/s、水深を0.280~0.286mで固定し、風条件は無風、順風(+3.6m/s)・逆風(-4.2m/s)の3

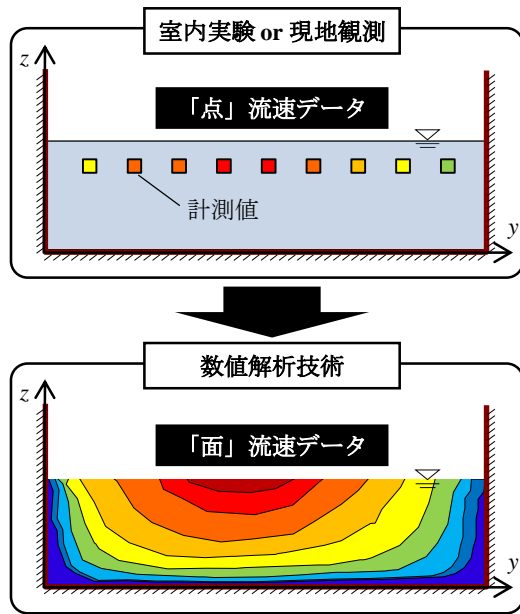


図-4 DIEX法による流量算定手順の概要

つとした。計測断面は、図-3(a)に示すように、無風・順風時は流下距離  $X=15\text{m}$  (送風機からの吹送距離  $5\text{m}$ )、逆風時は  $X=14\text{m}$  (吹送距離  $5\text{m}$ ) とした。横断面内の計測位置は、図-3(b)に示すように、電波流速計及び浮子は表面流速の9地点 ( $0.1\text{m}$  間隔)、ピトー管は水面からの深さ  $z=0.01, 0.03, 0.05\text{m}$  にて19地点 ( $0.05\text{m}$  間隔) とした。また、横断面中央部にて、ピトー管を用いて水面下  $10\text{cm}$  まで  $1.0\text{cm}$  間隔、 $10\text{cm}$  以深では  $3.0\text{cm}$  間隔で流速鉛直分布を計測した。

### (3) 流量算定方法

流量を算出するに当たり、更正係数を用いて行う方法(従来法)と、力学条件を満たした形で流速データの内外挿が可能なDIEX法の2種類を用いる。従来法としては、

①表面流速データ(もしくは表層流速データ)に更正係数を掛けて、水深平均流速を算出する。

②各横断位置の水深平均流速と水深を掛けて、それを横断方向に積分して、流量を求める。

ここでは、室内実験結果では電波流速計のデータとピトー管による水面下  $0.01\text{m}$  のデータ、現地観測では ADCP による計測データを対象とする。更正係数  $\alpha$  として、表面流速用の標準値 ( $=0.85$ ) を用いる場合 (Case1-1) と、後述する更正係数に関する風速依存性の式 (式(2)) を用いる場合 (Case1-2) の検討を行う。

一方、DIEX法 (Case2) による流量算定手順では、図-4に示すように、ピトー管や電波流速計等による「点」流速計測値をデータ同化して、横断面内の流速分布や流量を推定する。ここでの基礎式としては、三次元ナビエ・

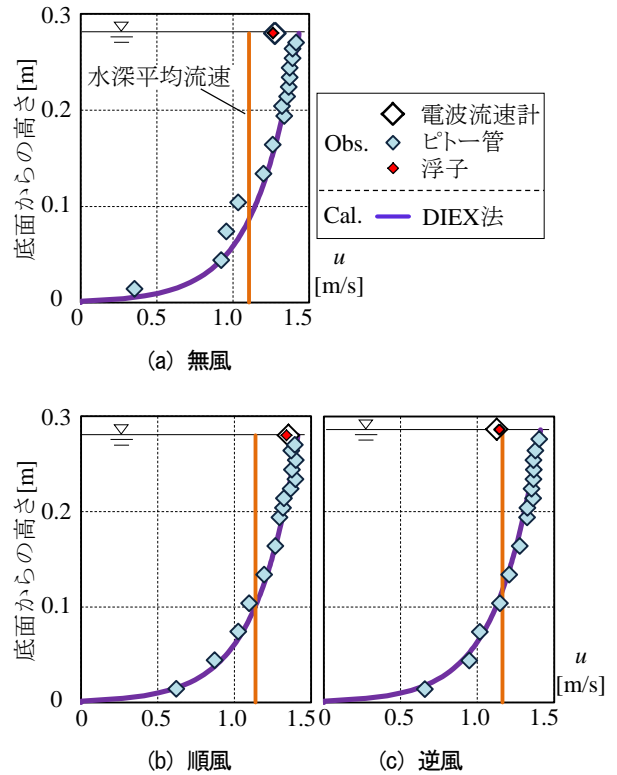


図-5 水路中央部での流速鉛直分布

ストークス方程式中の移流項や非定常項等を省略し、その代わりに付加項  $F_a$  が導入された式となっている<sup>7, 13, 14</sup>。また、DIEX法の唯一のパラメータは粗度係数  $n$  のみであり、 $n$  をいくつか変えて計算している。なお、計算方法等の詳細については、著者らの論文<sup>7, 13, 14</sup>を参照されたい。

## 3. 結果と考察

### (1) 流速鉛直・横断分布

電波流速計の計測状況の基本特性を把握するために、水路中央部における流速鉛直分布を図-5に示す。ここでは、無風・順風・逆風における電波流速計とピトー管、浮子の実験結果を表示する。また、ピトー管により得られた水深平均流速も図示する。なお、ピトー管 ( $z=0.01\text{m}$ ) の流速データを同化したDIEX法による流速推定結果も表示しているが、3.3にて検討する。これより、電波流速計の計測値は、風速条件に依らず浮子と一致している。一方、これらとピトー管の計測値は順風では概ね一致するが、無風・逆風では差は広がっていることが分かる。このような電波流速計とピトー管(水面下  $1\text{cm}$ ) の流速計測値の違いは、実験水路の計測断面(送風機から  $5\text{m}$ ) における吹送流の発達状況や二次流の影響を受けているものと推測されるが、詳細は不明な点が多く今後の検討課題とする。

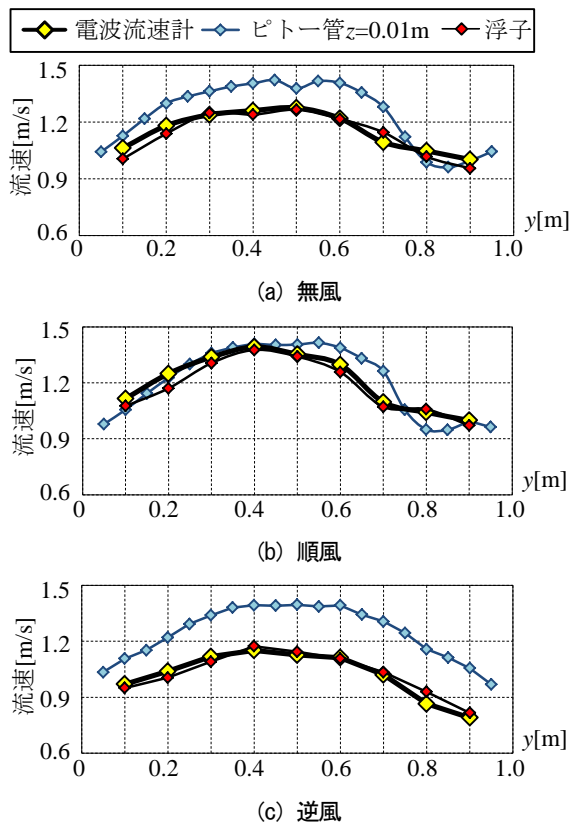


図-6 水面近傍の流速横断分布

様々な横断位置において電波流速計とピトー管、浮子の流速値を比較するために、3つの風速パターンにおける流速横断分布を図-6に示す。ここでは、ピトー管の流速値に関しては、 $z=0.01\text{m}$ と $0.03\text{m}$ 、 $0.05\text{m}$ の差はほとんど無いので、 $z=0.01\text{m}$ の計測値のみを採用している。これより、電波流速計と浮子の流速値はどの横断位置、3つの風速条件でも一致しているが、 $z=0.01\text{m}$ におけるピトー管の結果とは明確に差が生じており、流速鉛直分布の結果と対応している。浮子の喫水が $4\text{mm}$ であることを考慮すると、電波流速計は水面極近傍 ( $<5\text{mm}$ ) における流速を正確に計測しているものの、水面下 $1\text{cm}$ 以深の結果とは異なること、その様子が風速条件により変化していることが示唆された。

上記の室内実験結果と現地観測結果を用いて、電波流速計と他の流速計による流速値を比較したものを図-7に示す。他の流速計としては、実験結果では浮子とピトー管 ( $z=0.01\text{m}$ )、観測結果では、ADCP ( $z=0.35\text{m}$ ) とADV ( $z=0.18, 0.20, 0.27\text{m}$ ) を表示する。まず、図-7(a)より電波流速計の流速値は浮子の値とほぼ一致しており、両者の相対差のRMS (Root Mean Square) 値は $3.2\%$ と極めて小さい。一方、電波流速計とピトー管の流速値に関する相対差のRMS値は順風 $6.4\%$ 、無風 $8.9\%$ 、逆風 $19.6\%$ となり、その差は逆風ほど大きくなっている。さらに、ADCPやADVに対する相対差のRMS値は $24, 27\%$ となり、実験結果よりも大きな差となっている。これは、ADCPやADV

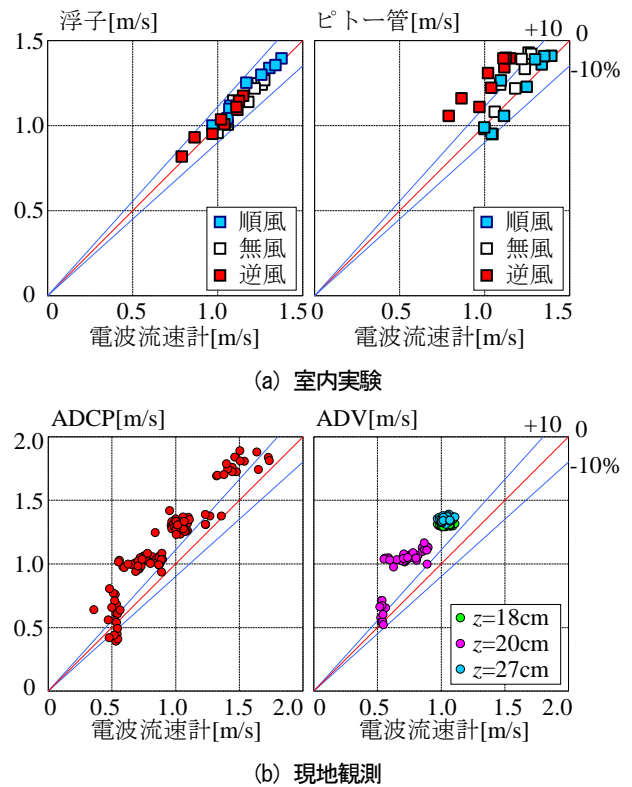


図-7 電波流速計と他の流速計の比較

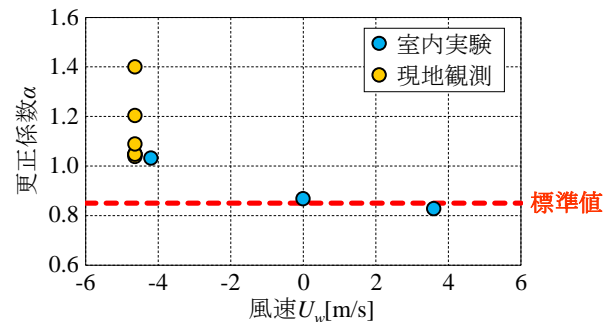


図-8 電波流速計の更正係数 $\alpha$ と風速 $U_w$ の関係

の計測位置がピトー管よりも深いためであると考えられる。これらより、現地・室内スケール共に、電波流速計の計測値は水面極近傍の流速を捉えていることが示唆された。

## (2) 更正係数や表面流速の風速依存性

電波流速計の表面流速データから流量算出時に用いる更正係数 $\alpha$  (=水深平均流速/電波流速計の表面流速)と風速 $U_w$ の関係を図-8に示す。更正係数算出に用いる水深平均流速は、室内実験ではピトー管の結果、現地観測ではADCPの結果よりそれぞれ求める。また、風速 $U_w$ としては下流向きを正とする。観測結果には、出水時データ(逆風,  $-4.35\text{m/s}$ )のみを採用する。これより、実験結果としては、無風・順風時における更正係数は標準値 (=0.85)と近く、逆風時では $1.03$ となり、標準値を大きく上回った。また、逆風条件の現地観測結果では、全ての更正係数は $1$ を上回り、逆風時の実験結果

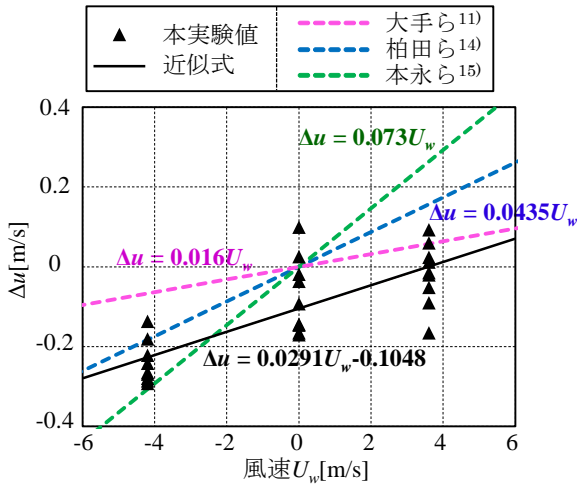


図-9 流速差  $\Delta u (= u_{RCM} - u_{ref})$  と風速  $U_w$  の相関図

より大きな値となる。なお、観測・実験結果の大きな差異は、吹送流の発達状況の違いと類推される。このように、表面流速の更正係数の風速依存性は現れ、様々な風速条件下では更正係数が0.85の一定値とならない可能性が示された。

このような更正係数と直接関係する表面流速の風速依存性を過去のデータを交えて検討するために、電波流速計による表面流速計測値  $u_{RCM}$  と水面直下の流速データ  $u_{ref}$  との差  $\Delta u (= u_{RCM} - u_{ref})$  と風速  $U_w$  との相関図を図-9に示す。本実験結果として  $u_{ref}$  にピトー管 ( $z=0.01m$ ) の計測値を採用する。また、既存の研究として、大手ら<sup>11)</sup>、柏田ら<sup>14)</sup>、本永ら<sup>15)</sup> による流速差と風速の提案式を点線で表示する。これより、本実験結果では、図-7(a)に示すように、どの風速条件でも流速差は  $\Delta u$  は負になることが多い。これらの結果と既存の提案式を比べると、逆風条件では同程度であるものの、順風・無風条件では  $\Delta u$  を過小評価している。本実験データに対して近似直線を適用したところ、以下の近似式が得られた。

$$\Delta u = 0.0291U_w - 0.1048 \quad (1)$$

このように、傾きは0.029 (風速の2.9%) と柏田ら<sup>14)</sup> や本永ら<sup>15)</sup> よりも小さい。無風時に  $\Delta u$  が0とならないため、切片が0となっていない。なお、本実験では吹送距離が5mしかなく、吹送流が十分発達していない可能性がある。多くの風速条件下において十分に吹送流が発達した条件での追加実験が必要であり、今後実施する予定である。

### (3) 流量算定結果

電波流速計の表面流速やピトー管による表層流速 ( $z=0.01m$ ) などから流量の推定を行う。ここでは、まず、従来法として、更正係数  $\alpha$  の標準値を用いる場合 (Case1-1) と式(1)から得られる次の式(2)を用いる場合 (Case1-2) を想定する。

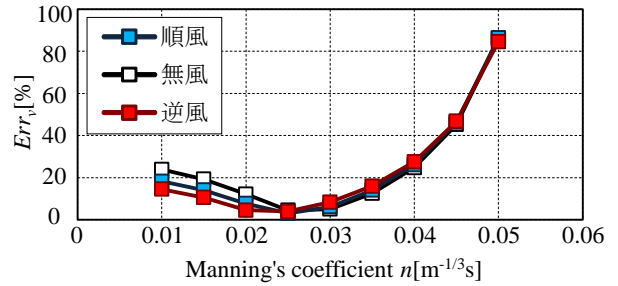
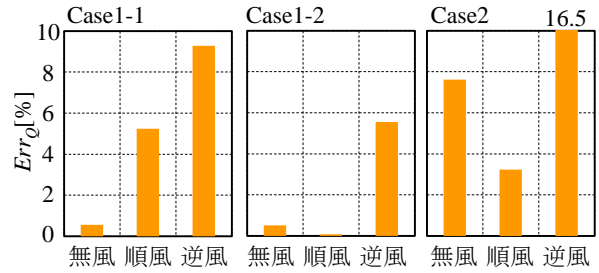
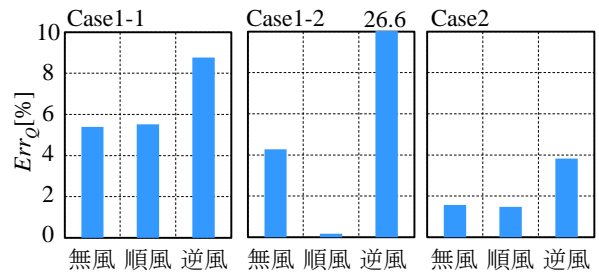


図-10 様々なマンニングの粗度係数  $n$  における流速推定誤差



(a) 電波流速計



(b) ピトー管

図-11 室内実験での流量推定値の相対差  $Err_Q$

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_{ref} + \Delta u} = \frac{\bar{u}}{u_{ref} + 0.0291U_w - 0.1048} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}$  は水深平均流速である。この時の  $u_{ref}$  にはピトー管 ( $z=0.01m$ ) の値を用いると、実験での更正係数は、順風・無風・逆風条件でそれぞれ 0.807, 0.841, 0.989 となる。

一方、DIEX 法 (Case2) での流量推定にあたり、唯一のパラメータであるマンニングの粗度係数  $n$  を適切に与えるため、流速分布の再現性を検討する。ここでは、 $n=0.01 \sim 0.05 m^{-1/3}s$  の範囲で  $0.005 m^{-1/3}s$  毎に変化させて、中央部の流速鉛直分布に関する相対差 (= (計算値 - 実験値) / 実験値) の RMS 値  $Err_Q$  を求めた結果を図-10に示す。ここでは、3つの風条件下におけるピトー管 ( $z=0.01m$ ) の実験値を同化データとして用いた。これより、どの風速条件においても  $n=0.025 m^{-1/3}s$  のとき誤差値が最小であり、かつ、これらの値はいずれも 5%以下と高精度である。この  $n=0.025 m^{-1/3}s$  の時の流速鉛直分布の計算結果は、図-5の黒線に示すとおりであり、計算結果は良好に流速鉛直分布を再現できていることが分かる。

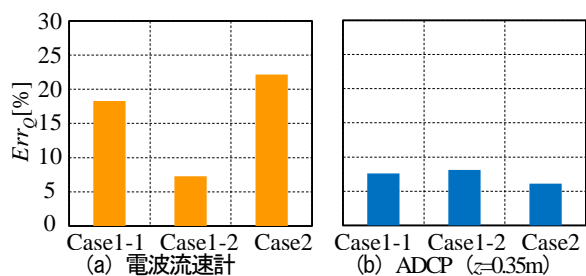


図-12 現地観測での流量推定値の相対差  $Err_Q$

これらの方法に基づいて室内実験条件の流量推定結果を図-11に示す。ここでも実験値 ( $\approx 0.270\text{m}^3/\text{s}$ ) と推定値の比較するために、流量の相対差  $Err_Q$  を各ケースで算出した。まず、電波流速計の場合には、更正係数を用いる従来法では Case1-1, 1-2 いずれも概ね良好な精度であり、相対差  $Err_Q$  は大きくて Case1-1 の逆風時にて 9.3% となる。一方、DIEX 法では相対差  $Err_Q$  が 10% を越えるケースもある (逆風時)。これらは、今回用いた DIEX 法では水表面近傍での風応力等の効果を考慮できていないためである。一方、ピトー管の流速値の場合には、DIEX 法による相対差は全て 5% 以下となり極めて良好である。

次に、現地観測データに対する流量推定結果を図-12に示す。ここでは、電波流速計データと ADCP データ ( $z=0.35\text{m}$ ) を用いた各ケースでの流量推定誤差の RMS 値を図示する。なお、観測時は、逆風条件であった。これより、室内実験同様に、電波流速計を用いる場合には従来法の Case1-1 か 1-2, ADCP データを用いる場合には DIEX 法を適用することで、流量推定精度は概ね良好となる。これより、電波流速計に関しては、更正係数を用いる従来法では良好な流量計測精度となることが示された。

#### 4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 室内実験結果から、電波流速計の流速データは、浮子と一致するものの、水面下 0.01m のピトー管の計測値とは概ね一致しなかった。このことより、電波流速計の計測値は水表面極近傍 ( $< 5\text{mm}$ ) の流速を捉えていることが示された。
- 2) 電波流速計による表面流速データに対する更正係数を調べたところ、実験結果より、順風時や無風時は標準値と近くなったものの、逆風時では 1.03 となった。このように、様々な風速条件下では更正係数が 0.85 の一定値としない可能性が示唆された。
- 3) 更正係数を用いる従来法と DIEX 法により室内実験結果に対して流量を推定した。電波流速計に関しては、更正係数を用いる Case1-1 か 1-2 において良好な流量推定精度となった。また、DIEX 法に関してはピトー管の流速値 ( $z=0.01\text{m}$ ) を用いると、流量誤差が 5% 以下となり、極めて良好な流量推定が可能となることが示された。

今後は、より幅広い風速条件の下で実験・観測データを蓄積し、河川流の吹送流特性や水表面と水面下の流速差に対する風速依存性に関して検討する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省河川砂防技術研究開発制度地域課題分野における委託研究 (研究代表者：二瓶泰雄) によるものである。本研究では、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所の皆様には、多くのご助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 柏田仁, 藤田一郎, 本永良樹, 萬矢敦啓, 二瓶泰雄, 中島洋一, 山崎裕介: 統一された流速内外挿法に基づく様々な流速計測技術の流量推定精度, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.1739-1744, 2013.
- 2) (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.
- 3) 土木学会: 水理公式集 平成 11 年版, 丸善, pp.75-86, 1999.
- 4) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 柏田仁, 二瓶泰雄, 高島英二郎, 山崎裕介, 市山誠: 力学的内外挿法 (DIEX 法) に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築, 河川技術論文集, Vol.17, pp.23-28, 2011.
- 14) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠: 電波流速計による表層流速計測と DIEX 法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, Vol.18, pp.393-398, 2012.
- 15) 本永良樹, 萬屋敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風に伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.1745-1750, 2013.

(2013. 9. 30 受付)