

ADCP データに基づく大河川洪水流の 更正係数に関する検討

STUDY ON COEFFICIENTS OF FLOAT IN FLOOD FLOW OF LARGE RIVERS WITH ADCP MEASUREMENTS

酒井雄弘¹・二瓶泰雄²

Takehiro SAKAI and Yasuo NIHEI

¹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)

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)

To check the accuracy of coefficients of float, which are widely used in discharge measurements with float and image processing, we examine the coefficients of float by conducting ADCP measurements for flood flows in the Edo River and the Ara River. We compare the observed results for vertical flow structure with classical well-known velocity distributions such as logarithmic profile and Aki's theory which is used in the evaluation of the general coefficients of float. The observed velocity distributions are better agreements with the logarithmic profile than Aki's theory. It is noteworthy that the observed coefficients of float show a decreasing trend as water depth increases and the averaged coefficients of float are less than the general values. These results for the coefficients of float are also good agreements with those evaluated with the logarithmic profile.

Key Words: coefficient of float, discharge measurement, ADCP, float, vertical flow structure

1. はじめに

河川計画・管理には、流量観測データは基礎資料の一つとなる。これまでに、プライス流速計、電磁流速計、浮子、電波流速計、超音波流速計、画像解析法等様々な河川流速・流量観測法が提案されている^{1~4)}。これらのうち、浮子観測や電波流速計、画像解析法は、表層流速もしくは表面流速を計測しているため、これらの結果から水深平均流速や流量を求める際には、更正係数(=水深平均流速/表層(表面)流速)を用いる必要がある。

一般に用いられる更正係数は、表-1に示すように、安芸⁵⁾による流速鉛直分布の理論式に基づいて、現場での利便性を考慮して暫定的にまとめられたものである⁶⁾。更正係数に関しては様々な理論式や実験結果と比較されてきたが、実河川における洪水流データを用いた検証例は非常に少ない。その主な要因は、現地において流速鉛直分布を高精度で効率的に計測し得る機器が存在しなかったためである。一方、海洋観測分野で一般的な超音波ドップラー流速分布計(ADCP)⁷⁾は流速鉛直分布と水深を同時計測できる機器であり、更正係数の実測に適しており、既に更正係数の検討も一部行われている⁸⁾。

そこで本研究では、ADCPを用いて行われた洪水流調査結果に基づいて、大河川における洪水流の流速鉛直分布構造を把握すると共に、それらのデータに基づいて更

表-1 現行の更正係数の設定

適用水深	浮子の喫水	標準値
～0.7m	水面	0.85
0.7～1.3m	0.5m	0.88
1.3～2.6m	1.0m	0.91
2.6～5.2m	2.0m	0.94
5.2m～	4.0m	0.96

正係数を算出する。ここでは、観測サイトとして江戸川と荒川を選定し、複数の洪水イベントにおいて行われた現地観測結果についてデータ解析を実施する。そこで得られる観測結果と流速鉛直分布の理論値(安芸式⁵⁾や最も基本的な対数分布則)との比較を通して、流速鉛直構造や更正係数の特徴、理論式の適用性を検討する。

2. 現地調査方法及びデータ解析法

(1) 観測概要

ADCPを用いた洪水流調査は、東京湾へ流入する主要河川である江戸川と荒川において行われた。観測地点は、図-1に示すように、江戸川では新関宿橋(57.5km)、野田橋(39.3km)、玉葉橋(35.5km)、荒川では笹目橋(28.5km)、新荒川大橋(20.5km)、西新井橋(13.5km)という計6地点とした。各観測地点の概況としては、江

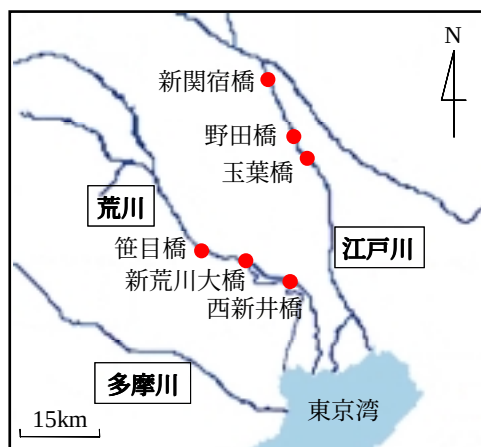


図-1 観測地点

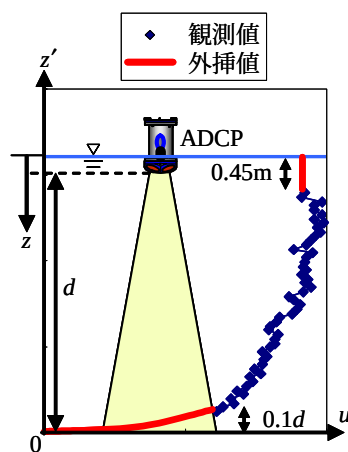


図-2 表層・底層流速の外挿方法

表-2 観測対象の出水イベントの概要 (H.W.Lは江戸川では野田橋 (YP表示), 荒川では新荒川大橋 (AP表示) の値である)

No.	期間	地点	設置方法	H.W.L[m]	出水要因
①	2003/8/9～12	江戸川：玉葉橋	水面	7.45	台風0310号
②	2004/10/6～8	江戸川：新関宿橋，玉葉橋	水面	7.63	秋雨前線
③	2004/10/9～11	荒川：笹目橋，新荒川大橋，西新井橋	底面	3.24	台風0422号
④	2004/10/21～23	江戸川：新関宿橋，玉葉橋	水面	8.74	台風0423号
		荒川：笹目橋，新荒川大橋，西新井橋	底面	3.27	
⑤	2005/7/27	江戸川：玉葉橋	水面	8.02	台風0507号
⑥	2006/6/16～17	江戸川：野田橋	水面	7.68	低気圧
⑦	2006/7/19～20	江戸川：野田橋	水面	9.21	梅雨前線

江戸川の3地点では、低水路幅約100m、堤間幅約400mの複断面河道である。これらの地点は、海水遡上を防止する江戸川水閘門（9.3km）の開閉状況の影響を受ける背水区間の上流側に位置している。一方、荒川の3地点では、低水路幅は100～250m、堤間幅は400～700mの複断面形である。これらの地点はいずれも感潮域に位置する。

ここで用いる ADCP は、WorkHorse Sentinel 1200kHz (Teledyne RDI 製) であり、高解像度で三次元流速鉛直分布計測が可能な機器である。観測方法としては、江戸川3地点では、河川橋上よりロープで ADCP を鉛直下向きに吊り下げ水面付近に浮かべて、定点にて2分半～5分固定する。このとき、計測中の ADCP の姿勢を安定化させるために、整流板もしくは専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI 製) に ADCP を取り付ける。横断面内での計測位置は、低水路中央部のみ、もしくは、低水路内数地点とする。このときの ADCP の設定は、層厚 20cm、サンプリング間隔 15 秒を標準としている。一方、荒川3地点では、ADCP を鉛直上向きにして河床に設置して連続観測が行われた。ADCP の設置位置は、低水路中央部とした。この観測での ADCP の設定は、層厚 10cm、サンプリング間隔 15 分である。

観測を行った出水イベントと現地調査の概要を表-2に示す。ここでは、江戸川では6つ、荒川では2つの出水イベントを対象とする。これらの出水イベントのうち、

江戸川ではイベント⑦が最も規模が大きく、荒川で行われた二つの出水イベントは同程度の規模である。なお、江戸川での調査については著者らが実施したが⁹⁾、荒川の調査に関しては国土交通省荒川下流河川事務所が実施しており、その詳細は調査報告書¹⁰⁾を参照されたい。

(2) データ解析の手順

水深平均流速と表層 (表面) 流速の比である更正係数を算出するには、水表面から底面までの流速データが必要となる。ADCP を用いる場合、図-2に示すように、センサー近傍では、不感帯と呼ばれる計測できない層が存在し、その部分のデータは欠測する。同図のように、ADCP を鉛直下向きに水面付近に浮かべる場合には、センサーの喫水を含めて、水表面直下約0.45mの部分のデータが欠測する。また、センサーより発信された超音波が境界 (同図の場合、底面) 付近において反射する影響により、境界 (底面) 付近において計測誤差が生じることが指摘されており¹¹⁾、その厚さは $0.1d$ (d : センサー面から境界面までの高さ) 程度である。同図とは反対に ADCP を河床に設置した場合においても、同様に底面・水表面付近においてデータが欠測する。そのため、水表面・底面付近では何らかの形で流速データを外挿する必要がある。そこで、同図に示すように、水表面付近では、計測している表層第一層の流速値を与える。一方、底面

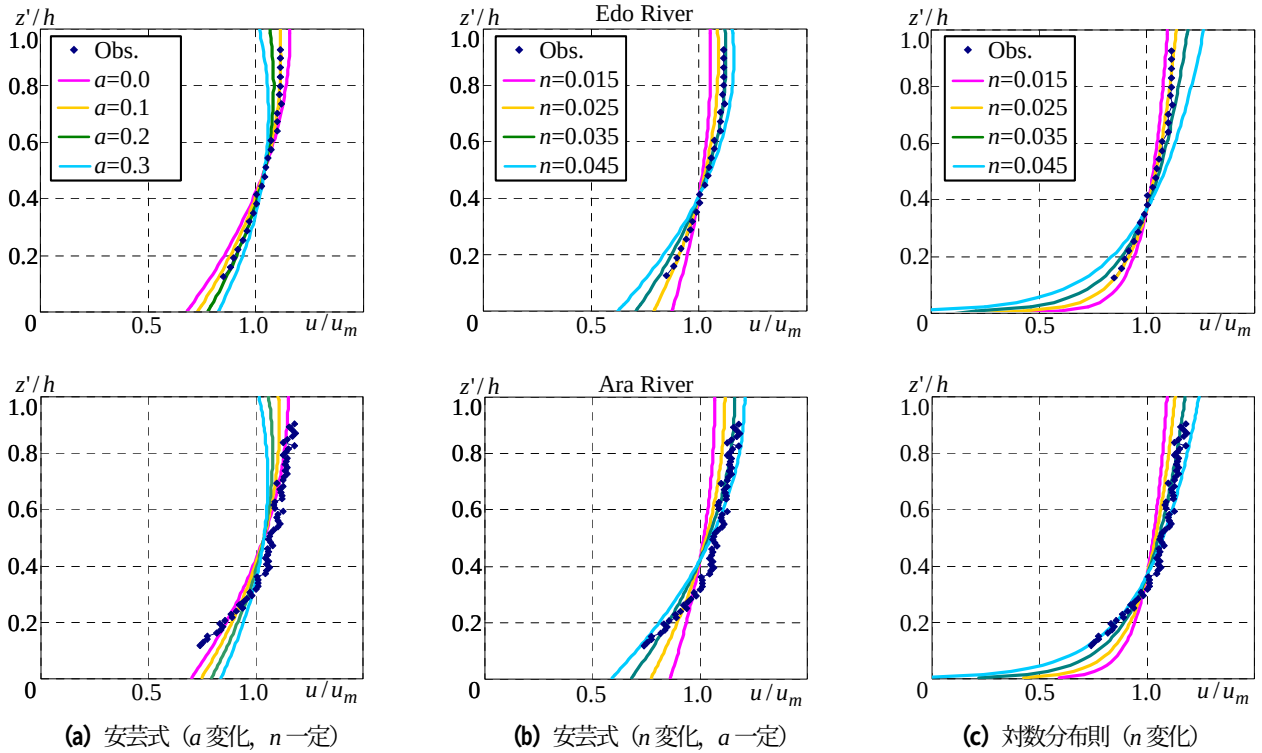


図-3 無次元流速鉛直分布に関する実測値と理論値の比較 (上図：江戸川・野田橋 (イベント⑦, 2006/7/19 20:23), 下図：荒川・西新井橋 (イベント③, 2004/10/10 2:00), n : m/s 単位を使用)

付近では、流速実測値に対して対数の近似曲線を当てはめ、それより外挿データを作成する。

(3) 流速鉛直分布の理論式

前述したように、更正係数算定の基礎となる流速鉛直分布に関する安芸の理論式⁵⁾は、次式ようになる。

$$u = \sqrt{Ih} \left\{ C + \frac{20}{3} - 20a + 40a \frac{z}{h} - 20 \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで I は水面勾配、 z は水面からの深さ、 C は Chezy 係数 ($=h^{1/6}/n$, n : マニングの粗度係数)、 a は流速ピーク位置の相対水深である。竹内・江川⁶⁾ は a を水深により変化させ、 $h < 1\text{m}$, $1 < h < 2\text{m}$, $2 < h < 4\text{m}$, $h > 4\text{m}$ の時に各々 $a=0, 0.1, 0.2, 0.3$ としている。 C については、 $n=0.025 \sim 0.040\text{m}^{-1/3}\text{s}$ に対応する値を与えている⁶⁾。式 (1) を水深平均流速 $u_m (=C\sqrt{Ih})$ で除した無次元流速分布は次の通りである。

$$\frac{u}{u_m} = \frac{1}{C} \left\{ C + \frac{20}{3} - 20a + 40a \frac{z}{h} - 20 \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

また、更正係数 α_z (水深平均流速 u_m と深さ z までの平均流速 u_{mz} の比) は、式 (1), (2) より、

$$\alpha_z = \frac{u_m}{u_{mz}} = \frac{C}{\left\{ C + \frac{20}{3} - 20a + 20a \frac{z}{h} - \frac{20}{3} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\}} \quad (3)$$

その他の流速鉛直分布の代表的なものとして、次式に示す粗面乱流に関する対数分布則を用いる。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z'}{k_s} + A_r \quad (4)$$

ここで U_* は摩擦速度、 A_r は普遍定数 ($=8.5$)、 z' は底面からの高さ、 k_s は相当粗度高さ ($= (n/0.0417)^6$) を表す。対数分布則についても式 (2), (3) のように無次元流速分布や更正係数 α_z を求めるが、その式形は省略する。

3. 観測結果と考察

(1) 流速鉛直構造

a) 理論値と観測値の比較

流速鉛直分布に関する ADCP 観測結果と安芸式、対数分布則を比べるために、無次元流速の鉛直分布を図-3 に示す。図中の縦軸は河床からの高さ z' を水深 h で、横軸は流速 u を水深平均流速 u_m で、それぞれ無次元化したものである。ここでは、出水規模が相対的に大きいイベント⑦における江戸川・野田橋での結果 (2006/7/19

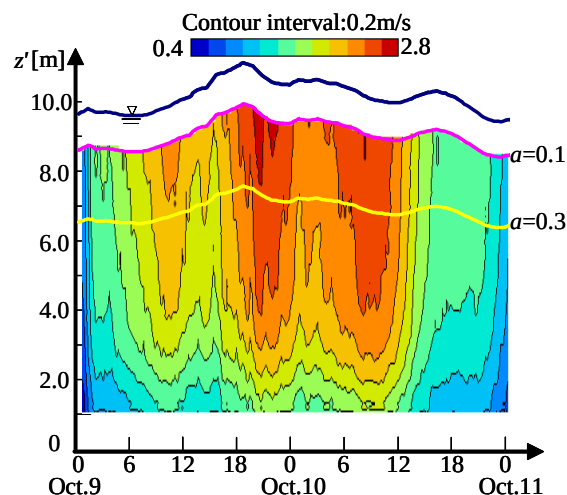
20:23) 及びイベント③の荒川・西新井橋における結果(2004/10/10 2:00)を表示している。また理論値として、安芸式の中で、 $n=0.0325\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と一定とし流速ピークの相対水深 a を $0\sim 0.3$ と変化させた場合(同図(a))と、 a を固定して $n=0.015\sim 0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と変化させた場合(同図(b))、対数分布則として $n=0.015\sim 0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と変化させた時の結果(同図(c))を図示する。この時の水深と平均流速は、江戸川・野田橋では 6.24m , 1.83m/s 、荒川・西新井橋では 9.04m , 2.05m/s である。

まず、同図(a)と(b)に示されている安芸式の理論値に着目すると、 a が大きくなると流速ピーク位置が水面から離れ、全体的に鉛直方向に切り立つ形となる。一方、 n が大きくなるとともに、無次元流速は底面付近では低下すると共に、表面付近では増加し、流速鉛直分布の傾きが大きくなる。また、安芸式では、底面上で流速が0とならず、ある一定の速度を有することが大きな特徴となっている。このような安芸式の理論値と観測値を比べる。江戸川・野田橋の結果に関しては、 n =一定で a を変化させた場合には $a=0.1$ の時に理論値は観測値に最も近くなる。また、 a =一定で n を変化させた場合には、 $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ の時に理論値と観測値は最も良く一致する。荒川・西新井橋に関しては、江戸川での結果と比べると、理論値と観測値の一致度合いは低く、水深全体にわたって理論値と観測値が一致する a, n は見出せない。ただし、 n =一定の時には $a=0$ のケースが、 a =一定の時には $n=0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ か $0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$ のケースが、それぞれ相対的に観測値に近くなっている。今回の水深は両地点ともに 4m 以上であるため、更正係数算出時に使用されている a は 0.3 であるが、 $a=0.3$ の場合よりも $a=0$ か 0.1 のケースの方が観測結果とより一致している。

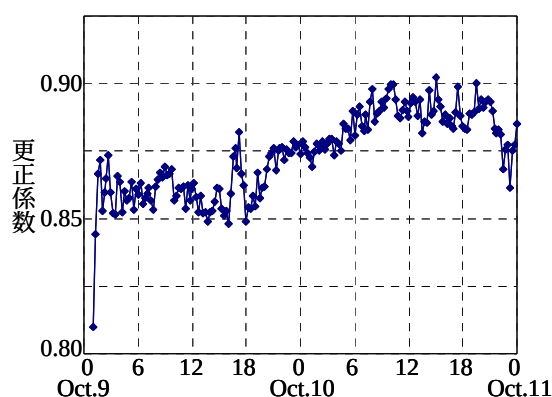
次に、同図(c)に示されている対数分布則と観測値を比べると、江戸川・野田橋では $n=0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ のケースの理論値が観測値と良好に一致する。また、荒川・西新井橋における観測値は、安芸式よりも対数分布則の方が相対的に近くなっており、最も一致する n は $0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ か $0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$ の時である。なお、理論値の適合性を定量的に確認するために、理論値と観測値の差について RMS (Root Mean Square) 値を求めたところ、上記と同じ結果となることを確認している。

b) 流速ピークの相対水深

上述したように、安芸式による理論値は観測値と一致していない部分が見られ、特に、流速ピークの相対水深が異なっていた。そこで、より多くの観測データを対象として、流速ピークの相対水深位置を確認するために、荒川・西新井橋における主流方向流速コンターを図-4(a)に示す。ここでは、イベント③における結果を図示する。また、上述したように、底面付近と水表面付近で



(a)主流方向流速コンター



(b)表層4m流速に対する更正係数

図-4 流速鉛直分布と更正係数の時間変化(イベント③, 荒川・西新井橋)

は、ADCP データが欠測するか、もしくは、大きな計測誤差を含むため、この部分を空白としている。また、図中には、流速ピークの相対水深 $a=0.1, 0.3$ に相当する高さも図示している。これより、潮汐の影響により、この地点の水位変動は一峰性とならず、いくつかの水位ピークが見られる。また、流速ピークが出現する時間帯は、一般的な洪水流で見られる増水期でなく、水位ピーク後の減水期である。これも潮位変動の影響を受けて、洪水流と下げ潮時の流れが重ね合わさった結果である。各時間における流速ピークとなる相対水深は、計測範囲の上端に位置しており、少なくとも $0 \leq a \leq 0.1$ に流速ピークが現れている。前述したように、更正係数算出時に用いている a は、このケースの水深では 0.3 となるが、 $a=0.3$ には流速ピークは現れていない。

(2) 更正係数

a) 時間変化

流速鉛直分布データを用いて更正係数を算出した結果の一例として、図-4(a)と同じ場所、出水イベントを

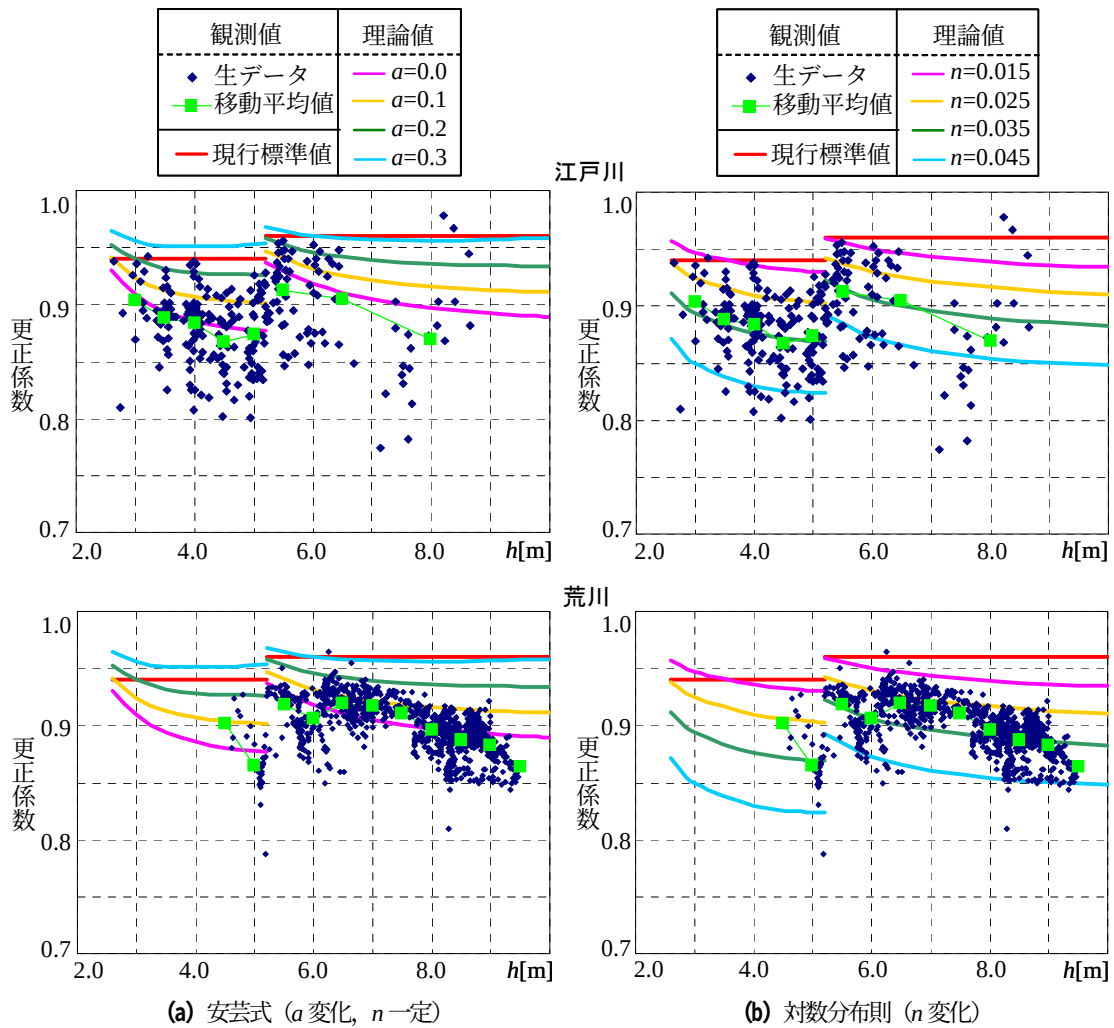


図-5 表層 2m, 4m 流速の更正係数に関する実測値と理論値の比較 (n : m-s 単位を使用)

対象として、表層 4m 流速に対する更正係数の時間変化を同図 (b) に示す。ここで示されている範囲の水深 (=8.1~9.5m) では、表-1 に示すように、4m の浮子長が選定されるため、それに合わせて表層 4m 流速の更正係数が表示されている。これを見ると、更正係数はおおよそ 0.85 から 0.90 の間を変化している。これらの結果は、現行の標準値 (=0.96) よりも小さい。また、更正係数は時間的に変化しており、増水期の更正係数の方が減水期よりも小さい。これは増水期と減水期の流速鉛直分布の違いと対応していることが確認されている。

b) 各水深における更正係数の変化

更正係数に関する ADCP の観測値及び安芸式や対数分布則による理論値について広範な条件下で比べるために、江戸川と荒川の全洪水イベント時において得られた更正係数を図-5 に示す。ここでは、水深毎に対象とする更正係数を分けており、表-1 に示すように、 $h=2.6\sim 5.2\text{m}$ 、 $5.2\text{m}\sim$ に対してはそれぞれ表層 2m, 4m 流速に対する更正係数を算出している。図中には、実測値に対して水深 0.5m 毎の移動平均値もプロットしている。ただし、江戸川における表層 4m 流速 ($h>5.2\text{m}$) に対してはデータ数

が少ないことを考慮して、 $5.2<h\leq 6\text{m}$ 、 $6<h\leq 7\text{m}$ 、 $h>7\text{m}$ と分割して平均値を表示している。さらに、現行で用いられている更正係数の標準値や安芸式と対数分布則の理論値も表示されている。ここで安芸式については、 $n=0.0325\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と固定して $a=0\sim 0.3$ と変化させ、対数分布則については $n=0.015\sim 0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と変化させている。この図を見ると、ADCP により得られた生データの大部分や移動平均値が現行の標準値よりも小さい、ということは江戸川や荒川の結果において共通して見られる。表層 4m 流速に関しては、江戸川では 0.87~0.91、荒川では 0.86~0.92 となっており、標準値よりも 0.04~0.10 小さくなっている。また、更正係数の実測生データのバラツキは各水深で見られ、その変動幅は江戸川では約 0.15、荒川では約 0.05 となっている。このように江戸川において更正係数の変動幅が大きいのは、ADCP の設置方法や計測時間等の計測方法の違いではなく、低水路側岸付近を含む様々な横断地点での計測結果が江戸川の場合には含まれるためであり、各地点における更正係数のバラツキは荒川の場合と同程度であることを確認している。

次に、観測値と理論値の更正係数を比べる。両理論値

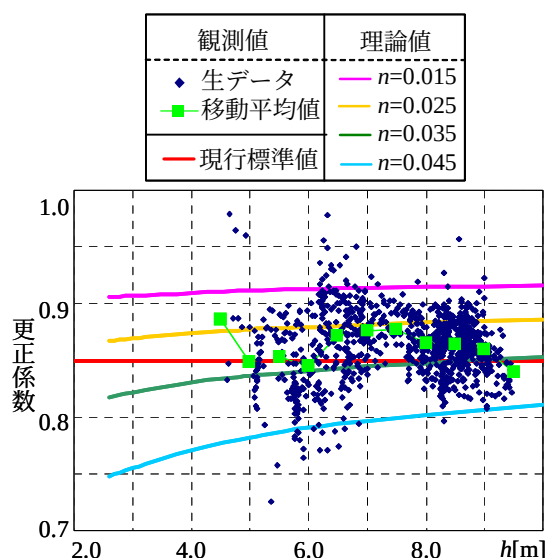


図-6 表面流速の更正係数に関する実測値と理論値の比較 (荒川3地点の結果, n : m-s 単位を使用)

において見られる, 水深が大きくなると更正係数が小さくなる, という更正係数の水深依存性は, 観測データの移動平均値にも見られる. また, 安芸式については, 江戸川では $a=0$, 荒川では $a=0$ か 0.1 のケースの理論値が観測値と相対的に近い. 一方, 対数分布則については, 江戸川では $n=0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の時, 荒川では $n=0.025 \sim 0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の時に観測値と良好に一致している. この場合には, 流速鉛直分布と同様に, 安芸式より対数分布則の方が実測値とより一致している. また, 現行の更正係数算出時に採用されている流速ピークの相対深さ a を用いると安芸式の理論値と観測値は大きくずれ, 流速ピーク位置の評価の精度が更正係数に直接的に反映されている.

また, 表面流速に対する更正係数に関する結果を図-6に示す. ここでは, データ数の多い荒川のみを対象とし, 対数分布則の理論値も表示されている. これより, 観測データの移動平均値は $0.85 \sim 0.88$ に分布しており, 現行の標準値 ($=0.85$) よりも若干大きい. また, 観測値は対数分布則の $n=0.025 \sim 0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ のケースと近い結果となっており, 流速鉛直分布や表層 4m 流速の更正係数と類似した結果となっている. なお, 表面流速の更正係数は, 水表面下の流速データの外挿精度に多少影響されるため, 図-6の結果は, 厳密には水面下 $0.7 \sim 0.9\text{m}$ の流速値に対する更正係数であることに注意されたい.

4. まとめ

ADCP を用いて大河川の江戸川と荒川において洪水流の流速鉛直分布調査を行い, その結果に基づいて実河川における浮子の更正係数の検討を行った. そこで得られた主な知見は以下の通りである.

- 1) 流速ピークの相対水深 a を調べたところ, $0 \leq a \leq 0.1$ に流速ピークが現れており, 現行の更正係数算定に用いられている値とは異なる.
- 2) ADCP による実測値から更正係数を算定したところ, 表層 4m 流速に関しては, 江戸川では $0.87 \sim 0.91$, 荒川では $0.86 \sim 0.92$ となっており, 標準値よりも $0.04 \sim 0.10$ 小さくなっている.
- 3) 流速鉛直分布及び更正係数について実測値と理論値を比較した結果, 両者において安芸式より対数分布則の方が実測値とより一致することが明らかとなった.

なお, 本論文で得られた更正係数などに関する知見は, 2河川, 7つの出水イベントの観測データには有効であるが, その他の多くの河川において一般化できる確証はない. そのため, より多くの現地調査データを収集して, 流速鉛直構造や更正係数に関する議論を深化させる必要があり, 現在, 鋭意検討中である.

謝辞: 荒川における ADCP 観測データについては, 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所からご提供して頂いた. また, 江戸川における調査を実施する際には, 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は, 多大なる御助力を頂いた. 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者: 二瓶泰雄) による成果である. ここに記して謝意を表する.

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) 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.
- 3) 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.
- 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) 安芸皓一: 浮子特に竿浮子による観測流速の更正係数に就いて, 土木学会誌, Vol.18, No.1, pp.105-129, 1932.
- 6) 竹内俊雄, 江川太郎: 浮子の更正係数, 土木技術資料, Vol.5, No.1, pp.18-21, 1963.
- 7) Pettigrew, N. R., Beardsley, R. C. and Irish, J. D.: Field evaluations of bottom-mounted acoustic Doppler profiler and conventional current meter moorings, *IEEE*, pp.153-162, 1986.
- 8) 酒井雄弘, 二瓶泰雄: ADCP を用いた中小河川の流量計測法に関する検討, 水工学論文集, Vol.50, pp.721-726, 2006.
- 9) 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方法に関する検討〜江戸川を例にして〜, 海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.
- 10) (株)建設技術研究所: 荒川下流における流量観測精度向上検討業務報告書, 2005.
- 11) 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.

(2006.9.30 受付)