

# ADCP取得データの“確からしさ”の検討

## STUDY ON THE “CERTAINTY” OF THE DATA MEASURED BY ADCP

本永良樹<sup>1</sup>  
Yoshiki MOTONAGA

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) 水文環境 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10-6 FTビル2F) .

In principle, the data measured by ADCP is derived under the assumption that each two velocity values at two different points gauged by different ultrasonic-wave beams from ADCP are equal. But this assumption is difficult to come into existence in the real flow. This study shows that ADCP actually uses the formula derived from this assumption to calculate the flow velocity without any revision, and that there can be an error of about 3% between actual velocity and velocity measured by ADCP in the flow with wake of pier. From this result, some doubt is showed about the “certainty” of ADCP data.

**Key Words :** *Discharge measurement, ADCP, Certainty of the data, wake of pier*

### 1. はじめに

我が国の河川流量の観測は、洪水時には浮子法が、平水時にはプライス式流速計や電磁流速計などの可搬式流速計を用いた方法が主流である。

これらの方法による継続的に実施される流量観測は昭和初期から始められており、長年に渡り膨大な量の流量データが蓄積されてきた。

しかしながらこれらの方法については問題点も言われてきた。例えば浮子法は、河川を横断方向にいくつかの区間に分割し、各区間に投下した浮子がある距離を流下する時間を計ることで当該区間の断面平均流速を求め、それを区間断面積に乗じて断面通過流量を求める方法である。各区間の断面流量を合計することで河川の断面通過流量を求めるが、投下した浮子が真っ直ぐに流下しないことがある、あるいは区間の分割が実際の横断流速分布に適した分割になっているのか、などの問題点が言われてきた。

そのため、浮子法等の従来の方法により流量観測が継続して行われる一方で、流量観測の高精度化、効率化の努力も続けられ、様々な流量観測技術が開発されてきた。これらは“新技術”と呼ばれるものであり、超音波流速計、電波流速計、PIV等の画像解析法、あるいは超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) などが開発されてきた。これらの技術には従来の浮子法や可搬式流速計による観測にはない利点がある。ADCP以外の技術の利点については、例えば電波流速計、画像解析法であれば非接触で

流量を測定できるため出水時の流量観測が安全である。超音波流速計、電波流速計は無人で連続した観測が実施できる。一方で問題点として、超音波流速計は河川兩岸に斜めに対峙して設置された一対の超音波送受波器を結ぶ測線上の平均流速しか測定できない、電波流速計、画像解析法は河川水面の流速しか測定できない、などが言われてきた。それに対しADCPは河道断面内の一部分のみでなく、断面内全域の3次元的な流速分布と水深を同時に測定することができるという特徴がある。ADCPは船艇に取り付け横断方向に移動させて流速分布観測を行うので無人での連続観測は出来ないが、断面内の流速分布が測れるのは他の技術には見られない優れた利点である。

このような優れた特徴を有する新技術については積極的な現場への試験的な導入を通じて技術の評価・改良が重ねられることが求められるものであり、実際にアカデミックの世界においてはこれらの新技術を利用した流量観測の効率化、高精度化の研究が盛んである。

しかしながら建設コンサルタントとして著者が見る限り、実際の河川管理の現場において、これらの新技術が浸透しているとは思えない。超音波流速計については、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所管内において霞ヶ浦、北浦および利根川を結ぶ水路網内に3台の超音波流速計を設置し、常陸川水門の開閉に伴う同水路網内の水の流れをモニタリングしているなど実用されている例も見られるが、多くの超音波流速計は稼働してはいるが、そのデータは利用されていないものが多いように見える。

電波流速計も設置されている地点はあるものの、データが利用されていないことも多く、著者の見てきた限り、中には既に動いていないものもあった。

ADCPは元々海洋分野で広く利用されていた機器であったが、河川分野で利用できるようになってから既に10年以上経過している。しかしながら他の流量観測との比較データ取得のために用いられる等、一部で試験的に用いられているのみで、実際の河川計画、河川管理のために継続的に行う流量観測業務の中で一般的に使用されるには至っていない。

このように現場での普及が進んでいるようには見えない新技術であるが、その理由の一つとして、その観測原理が理解しづらいということがあると思われる。浮子や可搬式流速計を用いて流量を測定する方法は、その観測原理が直感的に理解しやすい。しかしながら新技術で使用されている超音波、電波は目に見えないものではなく、それらがどのように流速、流量に結びついているのかわかりづらく、そのため新技術によるデータの“確からしさ”について現場にて確信が持たれていないものと考えられる。

観測されたデータに対して最終的な責任を負う立場の河川管理者としては、どのように流速が測られているのか、もっと言えば原理的に本当に正しい流速が測られていると言えるのかわからない機器を使用するには躊躇があるものと思われる。著者は建設コンサルタントとして、例えば河川感潮域におけるADCPを用いた流量観測や水理調査などの提案をいくつかの河川事務所で行ったことがあるが、著者のプレゼンテーションの未熟さも原因の一つであろうが、積極的に考えてくれる河川管理者にお会いしたことはあまり多くなく、ある事務所では「ADCPのようなわけのわからない機械を当事務所管内で使用する気は全くない」とまで言われたことがある。

しかしながら先述した通り“新技術”には従来の浮子法や可搬式流速計による方法にはない優れた利点があり、流量観測の高精度化、効率化に大きく寄与する可能性が高い。そこでこれらの実際の現場でのこれらの“新技術”の普及が進むように、それぞれの技術がどのように流速（流量）を測っているのかを明確にしていくとともに、測定原理について疑問がある場合にはそれらを一つ一つ解決していくことで、それらによるデータの“確からしさ”を示していくことが重要であると考えられる。

本論文の著者は新技術の中でも断面内の流速分布が測定できるADCPは今後の流量観測の精度向上、効率化を図る上で特に有益であると考えられる。よってADCPについて、これにより流速が測定される原理を説明するとともに、その原理に基づけば正しいと思われる流速が実際に測れているのかについて調べ、ADCPにより得られたデータの“確からしさ”について検証するものである。

## 2. ADCPの流速測定原理と疑問点

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) とは観測機器の一般名ではなく、米国のTeledyne RDI社が開発した超音波ドップラー流速分布計の商品名である。

ADCPには4つのトランスデューサー（超音波の送受波器）が配置されている。トランスデューサー面の向きは鉛直軸に対してそれぞれ20°の角度を持つ。河川の分野では小型無人船艇にADCPを取り付けて、トランスデューサー面を下に向けて水面に浮かべ、任意の横断断線を移動させながら連続的に流向・流速を計測する方法が一般的に採用されている。

それぞれのトランスデューサーから水中に向けて発射された超音波ビームは、水中のプランクトンや浮遊砂などの散乱体に当たって反射される。このとき散乱体が移動していれば、ドップラー効果によって反射波の周波数が変化する。この周波数の変化量を解析することによって、まずそれぞれの超音波ビーム軸向きの流速が求まる。この超音波ビーム軸向きの流速から水平方向、鉛直方向の流速を求めている。

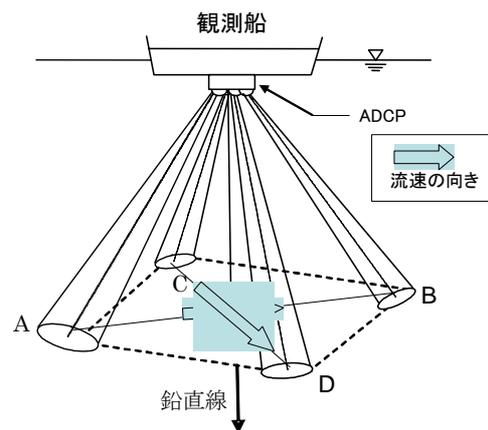


図-1 ADCPの概念図

対角線に向かい合う一対の超音波ビーム軸向きの流速から、当該の対角線に沿う流速が求められる。

図-1に示すように、4つのトランスデューサーから発射される超音波ビームにより図中のA,B,C,D各点における超音波ビーム軸向きの流速が最初に求められ、次にA,B点における超音波ビーム軸向きの流速からA→B向きの流速、C,D点における超音波ビーム軸向きの流速からC→D向きの流速が求められている。ここで超音波ビーム軸向きの流速から水平方向、鉛直方向の流速が求まる原理について、例としてA→B向きの流速を用いて説明する。

図-2に示すように一対のトランスデューサーを考えた場合、図中のA,Bにおける超音波ビーム方向流速 $V_A$ 、 $V_B$ について、それぞれ超音波が反射されている錯乱体の速

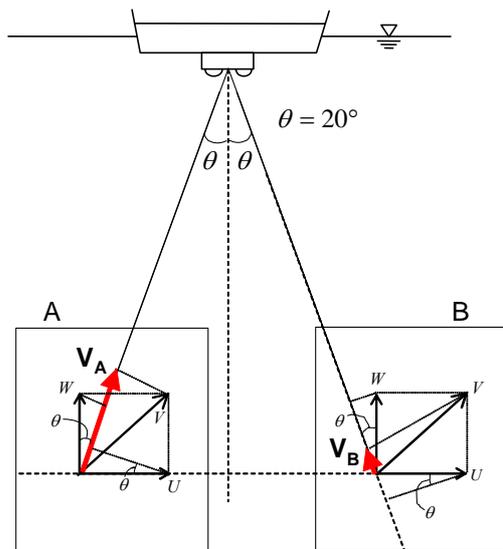


図-2 ADCPの流速原理に関する概念図

〔 図中、A、Bにおける流速 $V$ が等しいという仮定に基づいて  $U、W$ が算出される。 〕

度 $V$ が等しいとすれば、 $V_A、V_B$ を用いて錯乱体の流下方向の移動速度 $U$ と鉛直方向の移動速度 $W$ は次式で表される。

$$U = \frac{V_A - V_B}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$W = \frac{V_A + V_B}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

このとき水中の散乱体が水流と同じ速度で動いていれば、 $U$ と $W$ は水流速度となる。

この2式は以下のように導かれる。

図中A,Bについて、それぞれ超音波ビーム方向の流速について考えると以下の2式が成立する。

$$A : V_A = W \cos 20^\circ + U \sin 20^\circ \quad (3)$$

$$B : V_B = W \cos 20^\circ - U \sin 20^\circ \quad (4)$$

この2式を連立させると(1),(2)が求まる。

ここで疑問になるのは以下の2点である。

#### 疑問1

先述の通り、ADCPは米国Teledyne RDI社の商品であり、理論的には(1)、(2)式から流速を求めているはずであるが、実際にはどのように流速を求めているかはブラックボックスである。

#### 疑問2

(1)、(2)式は、「異なる2本の超音波ビームが測定しているそれぞれの地点の流速ベクトルが一様である」という仮定の下に成り立つが、二瓶ら<sup>1)</sup>、木下<sup>2)</sup>、萬矢ら<sup>3)</sup>が指摘しているように、この仮定が実際に成立しているのか、ということである。例えば水面から3m潜った

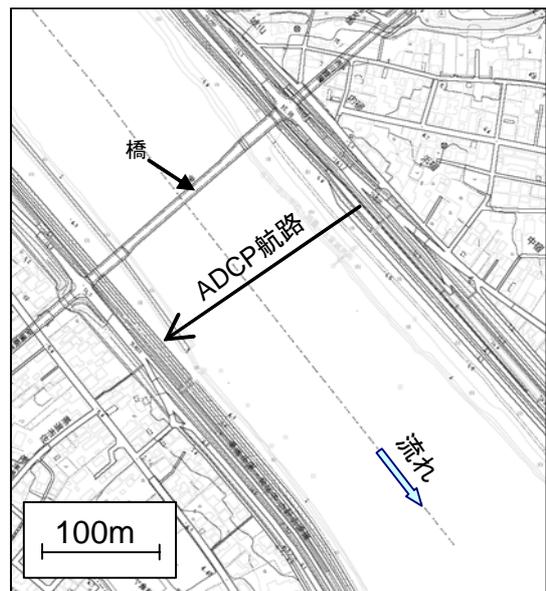


図-3 ADCPによる観測現場周辺図

深さにおいては、二つの超音波ビームが測定している地点間の距離は $2 \times 3 \times \tan 20^\circ = 2.18\text{m}$ であり、自然の河道流れにおいてこれだけ離れている地点の流速ベクトルが等しいとは考えにくい。

その他にもADCPに関する疑問点は存在するが、先述した通り、これらの疑問を一つずつ検討していくことがADCPという新技術への理解につながり、流量観測におけるADCPの一般的な利用につながると著者は考えている。上述した2つの疑問点について、以下で検討する。

### 3. 疑問1について

ADCPによる流速を測定する原理として(1)、(2)式を導いた。しかしながらADCPは米国Teledyne RDI社の商品であり、(1)、(2)式が実際に使用されているかはブラックボックスである。

#### 3-1. 疑問1についての検討内容

「異なる2本の超音波ビームが測定しているそれぞれの地点の流速ベクトルが一様である」という仮定の下に導いた(1),(2)式が実際にADCP内の流速計算に使用されているかを確認する。

実際に河川でADCPによる流速分布測定を行う。観測項目として断面内における流下方向流速分布、横断方向流速分布、および各超音波ビーム方向の流速分布を測定する。各超音波ビーム方向流速の測定結果を用いて、(1),(2)式から各アンサンブルごとに流下方向流速、横断方向流速を算出する。以降、この値を算出流速と呼ぶ。ADCPにより測定された各アンサンブルの流下方向流速、

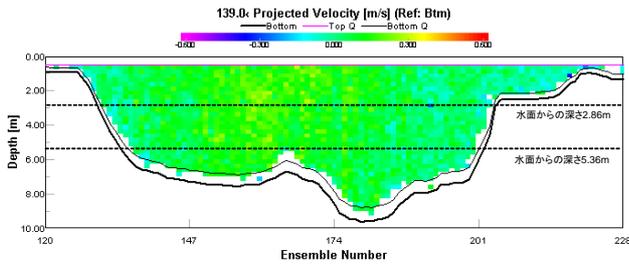


図-4 ADCPによる流下方向流速分布図

横断方向流速を、それぞれ算出流速と比較する。

ADCPにより出力される流速データは南北方向流速、東西方向流速である。ADCPデータの解析用ソフトであるWin Riverを用いて、河川の流下方向流速、横断方向流速に成分分解する。

ADCP観測は某河川の某地点にて実施した。観測地点周辺地図と観測断面位置を図-3に示す。このときADCPは各トランスデューサーから発射される超音波ビーム軸向きの流速もデータが取れるように設定した。

観測にはラジコンボートにADCPおよび音響測深器、VRS-RTK-GPS、データ送受信器を取り付け、遠隔操作でラジコンボートの船首の向きがなるべく流下方向に垂直になるようにして同地点を横断させた。

### 3-2. 疑問1についての検討結果

ラジコンボートによるADCP横断観測を実施したところ、図-4のような断面内の流速分布結果が得られた。(図には流下方向流速分布のみを掲載。)

図中に示した水面からの深さ2.86mと5.36mの位置におけるアンサンブル内の算出流速とADCPにより実際に得られた流速との比較を行った。その結果を図-5、図-6に示す。

流速を算出する際に、対になる二つの異なる超音波ビームにより測定されている2点間の距離は、深さ2.86mでは2.08m、深さ5.38mでは3.92mである。図-5、図-6からはいずれの深さにおけるデータに関しても、流下方向流速、横断方向流速ともに、ADCP流速値と算出流速値がほぼ全てのアンサンブルにおいて概ね等しい値を示していることが分かる。このことから、Teledyne RDI社製の商品であるADCP内部では流速を算出する際、(1)、(2)式を使用しており、異なる超音波ビームで測定している地点間の距離に関して補正等はしていないことがわかった。

図-5、図-6においては、各アンサンブルにおいて、ADCP流速と算出流速の流速値、隣り合うアンサンブル間での流速の変動(減っているか、増しているか)、変動幅の程度などが、流下方向流速、横断方向流速問わずにほぼ等しいと判断したが、厳密に見ると、ADCP流速と算出流速でわずかに差が生じている。これはADCP流速では流速の南北成分、東西成分がデータとして出力されるが、これをADCPデータの解析用ソフトWin Riverを

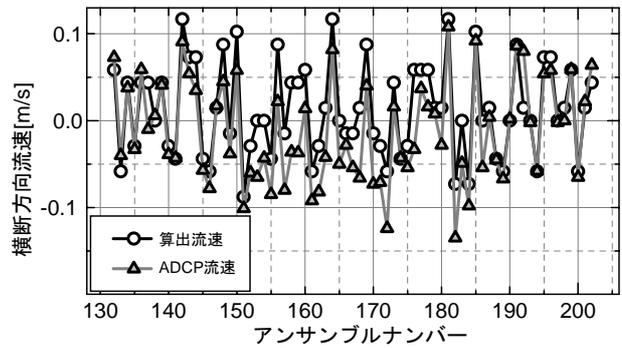
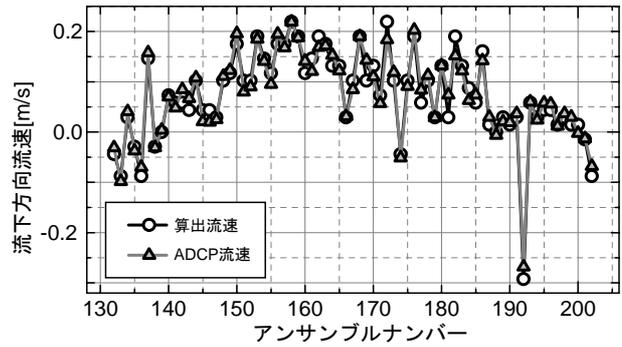


図-5 算出流速とADCP流速の比較(深さ2.86m)

超音波ビームにより測定されている2地点間の距離は2.08mである。

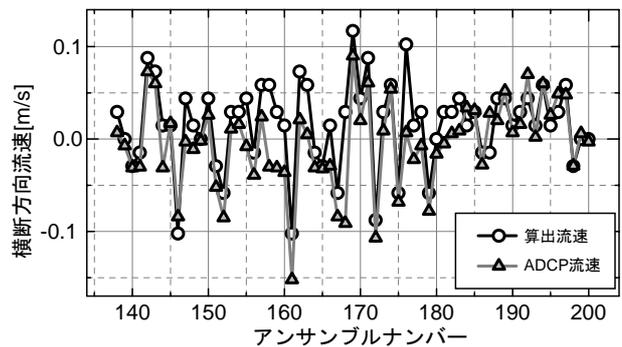
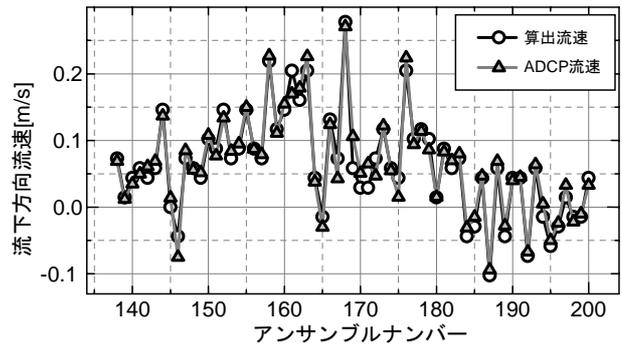


図-6 算出流速とADCP流速の比較(深さ5.38m)

超音波ビームにより測定されている2地点間の距離は3.92mである。

用いて河川の流下方向成分、横断方向成分に分解したため、南北軸と流下方向軸の成す角度の読み値のズレ等に起因して差が生じていると思われる。

#### 4. 疑問2についての検討

河川においてADCPによる横断観測を実施した場合、ある位置における流下方向流速データは、その位置から流下方向に同距離の前後2地点における超音波ビーム方向流速を用いて算出された値である。このとき、この前後2地点における流速ベクトルが等しいという仮定の下にADCP内部では流速の計算がなされている。

この仮定が成立しない流れ場でADCPにより横断面内流速分布を測定した場合、実際の流れ場の状況を測定できているのが疑問である。

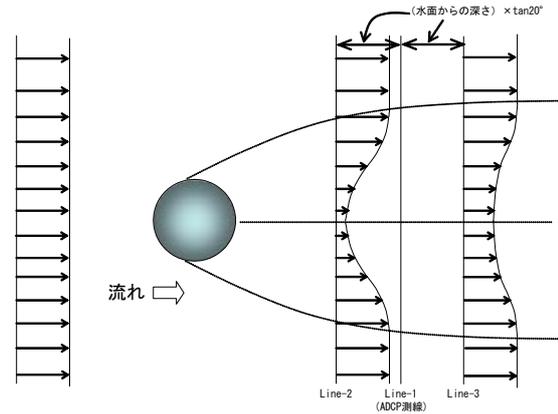


図-7 橋脚後流の概念図

(後流内部では流速分布が縦断方向に変化する。)

##### 4-1. 疑問2についての検討内容

ここでは、縦断方向に流速ベクトルが変化する流れ場においてADCPを用いた横断面内流速分布を測定したとき、実際の流れ場とどの程度の誤差が生じるのかを検討する。この場合には、対象とする流れ場において空間的な流速分布が既知である必要があるが、これは現実には難しい。

そこで縦断方向に流下方向流速の横断分布が変化するある流れ場を設定して、その中でADCPによる横断観測を実施した場合、その結果と設定した流速分布との間にどの程度の差が生じるかを計算して検討する。実際の流れは鉛直方向に対数的な流速分布形状を有するが、ここでは検討を簡略化するために不等流であるし、鉛直方向には流速は一様分布であるとする。

縦断方向に流下方向流速の横断分布が変化する流れ場として多くの例が考えられる。一般的な河川における洪水流においても大規模水平渦やボイル等の2次元流れ、3次元流れの発生により、縦断方向に複雑に流速が変動しているのが普通であろう。これらの全ての場合について、ADCPを用いた断面内流速分布を測定した場合、実際の流れとの間に誤差が生じるのか、またどの程度の誤差が生じるのかを一般論として導くことは難しい。

本論文では流速の横断分布が縦断方向に向かって変化する流れ場の一例として橋脚後流を考える。図-7にその概念図を示す。図中に示したLine-1上をADCPが通過した場合、このライン上における流速は図中のLine-2, Line-3上における流速ベクトルから算出されることになる。Line-1とLine-2, Line-3間の距離は(水面からの深さ)  $\times \tan 20^\circ$ となる。橋脚後流内部において、Line-2上とLine-3上の流速分布は異なっており、ADCPでの流速測定において、「異なる2本の超音波ビームで測定しているそれぞれの地点での流速ベクトルが等しい」という仮定は明らかに成立していない。このとき(1),(2)式で示したADCPの流速算出方法で求まる流速分布と、実際に設定した流速分布がどの程度異なるかを調べる。

橋脚後流の流れ場として、無限大の幅を持つ矩形断面

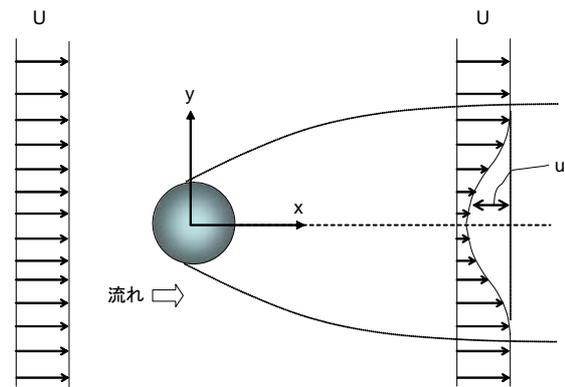


図-8 橋脚後流 座標の説明

水路の中心軸上に直径2mの円柱型の橋脚が立っている流れ場を考える。橋脚の上流側に一様流速を与える。水深は上流側の一様流速にかかわらず5mであるとした。

橋脚から5m流下した地点の横断面内流速分布を(1),(2)式から算出し、その結果を実際に想定した横断面内流速分布と比較する。

橋脚後流内の流速分布については、図-8に示すような座標軸において、池田<sup>4)</sup>による理論式から以下のように設定する。

$$\frac{u}{U} = \frac{C_D}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Ud}{\varepsilon_0}} \left(\frac{x}{d}\right)^{-1/2} \exp\left(-\frac{\eta^2}{4}\right) \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{U}{\varepsilon_0 x}} y \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = 0.022 C_D \cdot d \cdot U \quad (7)$$

ここに  $x, y$ : 橋脚中心を原点とした時の流下方向軸, 横断方向軸,  $u$ : 後流内の欠損流速,  $U$ : 後流外側の一様流速,  $C_D$ : 抗力係数,  $d$ : 橋脚幅,  $\varepsilon_0$ : 渦動粘性係数, である。本検討では洪水流を想定して  $U = 2.0\text{m/s}$ 以上の流速を考えるので、レイノルズ数は  $\text{Re} \geq 10^6$ のオーダーとなり、よって抗力係数  $C_D = 0.4$ とする。

なお、橋脚後流外側の一様流速Uについて、1.0 m/s ~ 5.0 m/sの範囲で変化させて流速分布を設定している。

#### 4-2. 疑問2についての検討結果

式(5)~(7)により表現される橋脚後流を有する流れ場においては鉛直方向流速は設定されていない。またこの後流内部においては、ADCPで測定する場合における二つの異なる超音波ビームで測定される2地点の流速が一様ではない。

よってこのような流れ場においては、(3)、(4)式は

$$A : V_A = U_A \sin 20^\circ \quad (3)'$$

$$B : V_B = -U_B \sin 20^\circ \quad (4)'$$

となり、ADCPで測定した場合、(3)', (4)'式の結果が(1)、(2)式に代入されて流速U, W が求まる。

設定した流れ場において、橋脚から5m流下した位置の横断面での各深さにおける流下方向流速分布について、最初に設定した流速分布（以降、設定流速と呼ぶ。）と(3)', (4)'式で算出した流速（以降、算出流速と呼ぶ。）の比較を行った。深い位置ほど異なる2本の超音波ビームで測定している地点間距離が長くなっている。

**図-9** にU=3.0m/s の場合における橋脚から5m流下した位置の横断面での各深さにおける設定流速と算出流速の比較を示す。

深くなるほど橋脚後流内部において設定流速と算出流速に差が生じている。特に中心軸上（**図-5** におけるy=0軸上）において流速差が大きい。

**図-10** には設定流速と算出流速の差が最も大きくなる中心軸上（y=0）について、U= 1.0 ~ 5.0 m/s に変化させた時の、設定流速と算出流速の誤差率の深さ方向への変化を示す。誤差率は次式で定義する。

$$\text{誤差率}[\%] = \frac{\text{設定流速} - \text{算出流速}}{\text{設定流速}} \times 100 \quad (8)$$

深い位置ほど誤差率が大きくなり、水深4.81m（異なる2本の超音波ビームで測定している地点間距離3.5m）においては誤差率は3% になる。U = 1.0 ~ 5.0 m/s の範囲で変化させたが、各深さにおける誤差率に変化は生じなかった。

深いほど誤差率が大きくなるのは、ADCPで測定するとした場合、2本の異なる超音波ビームが測定している地点間の距離が深い位置ほど長くなり、それにより2点における流速の差が大きくなるため、「異なる超音波ビームで測定している2地点の流速ベクトルが等しい」という仮定が成立しなくなるからである。縦断方向に流速が変化しない橋脚後流外側の領域においては、深さによらず誤差率は0[%]であった。

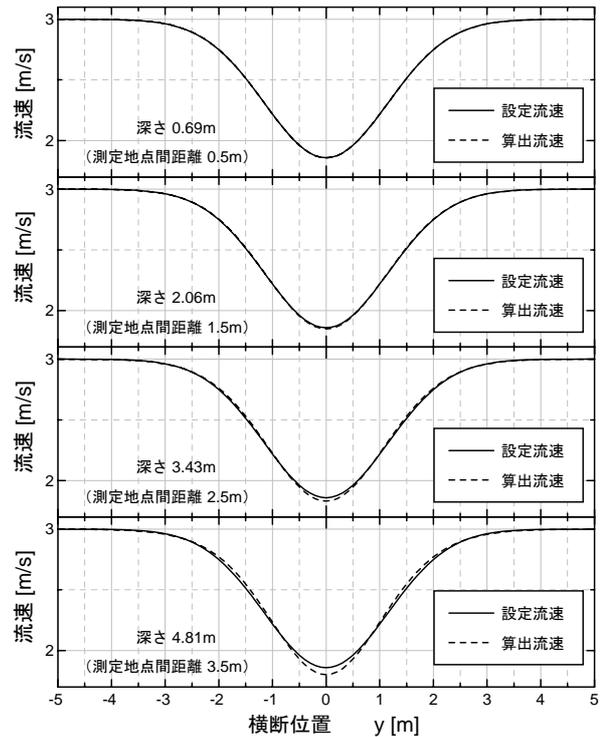


図-9 各深さにおける設定流速と算出流速の比較  
( U = 3.0m/sの場合)

（深いほど設定流速と算出流速の差は大きく、中心軸 (y=0) 上では差が明確である。）

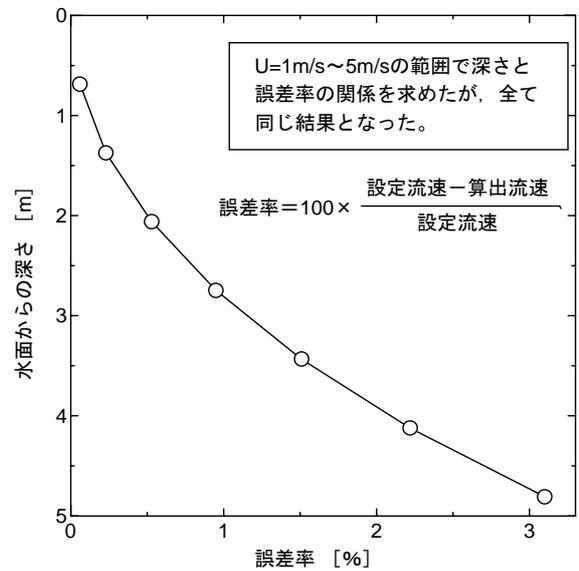


図-10 各深さにおける設定流速と算出流速の誤差率  
(橋脚後流を有する流れ)

（中心軸 (y=0) 上の流速で考えている。深いほど誤差率は大きくなる。）

#### 5. まとめ

本論文により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ADCPにより求められる流速は一对の超音波ビーム軸向きの流速をドップラー効果により測定し、その値を基に算出されている。その算出式として、ADCPの原理上導かれる算出式が実際に使用されており、深い位置で異なる2本の超音波ビームで測定している地点間の距離が長くなっても補正等は加えられていない。
- 2) 流速の横断分布が流下方向に変化する流れ場において、ADCPにより流速の横断分布を測定した場合、設定した流れ場の実際の流速とは異なる値を示す。またその誤差は深い位置ほど大きくなる。

本論文で設定した流れ場は橋脚後流を有する流れであり、流速の横断分布が縦断方向に向かって変化する領域が狭い範囲の流れであった。流速の横断分布が縦断方向に変化する流れ場の一例でしかない。先述した通り、現実の洪水時の河川流れは大規模水平渦やボイルなどの2次元、3次元構造を有することが普通であり、その流速は縦断方向により複雑に変化しているものと考えられる。その場合は本論文で導いた値よりも誤差率は相当に大きくなるであろう。

本論文の結果から言えることは、ADCPにより流速分布を測定したとき、実際の流速分布との間に誤差が生じる場合がある、ということである。この結果から、ADCPにより得られた流速の“確からしさ”について、今後もさらに検討を進めることが必要であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 木下武雄: 流量観測の過去と未来, 河川流量観測の新時代, pp.13-18, 2010
- 3) 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦: 河川実務者から見たADCPによる流量観測技術開発の論点, 河川流量観測の新時代, pp.46-55, 2010
- 4) 池田駿介: 詳述水理学, 技報堂出版, pp.240-244, 1999.

(2011. 7. 31受付)