

〔特集〕大スケールの計測

超音波ドップラー流速分布計に基づく 実河川流速・流量モニタリング

*東京理科大学 理工学部 二瓶 泰雄†

Monitoring of River Velocity and Discharge Using Acoustic Doppler Current Profilers

Yasuo NIHEI, Faculty of Science & Technology, Tokyo University of Science

1 はじめに

河川における流量は、河川計画・管理上最も重要な観測データの一つであり、長年の間、収集・蓄積され続けている。「治水」や「利水」に加えて「環境保全」に配慮して河川管理を遂行する上では、異常渇水時から計画高水規模の出水時にわたる幅広い範囲の流量調査を精度良く、自動・連続的に実施することが望まれる。また、流域の軸をなす河川を經由して、水や様々な物質が陸域から湖沼・沿岸海域まで輸送されることから、流量データは河川管理のみならず、流域管理、湖沼管理、海岸・沿岸管理に必要不可欠な基礎資料となっている。

河川流量を計測する上では、水位や断面形状、流速分布を取得する必要があるが、このうち時空間変化が顕著な流速の計測が大きなキーとなる。流速分布を横断面全体で計測するには、多くの一級河川の川幅が数十から数百メートル以上であることを考慮すると、高精度でかつ効率よく流速計測を行うことが必須である。これまでの流量観測では、低水時には回転式流速計や電磁流速計、出水時には浮子がそれぞれ用いられているが¹⁾、計測精度、効率性、適用範囲の面からこれらの手法には制約や限界がある（その詳細は本特集で執筆された藤田先生の論文²⁾を参照されたい）。そのため、電波流速計³⁾や超音波ドップラー流速分布計⁴⁾、画像解析法⁵⁾などという新しい計測技術の進展や応用が望まれる。

これらの計測法の中で、図1に示す超音波ドップラー流速分布計（Acoustic Doppler Current Profiler,

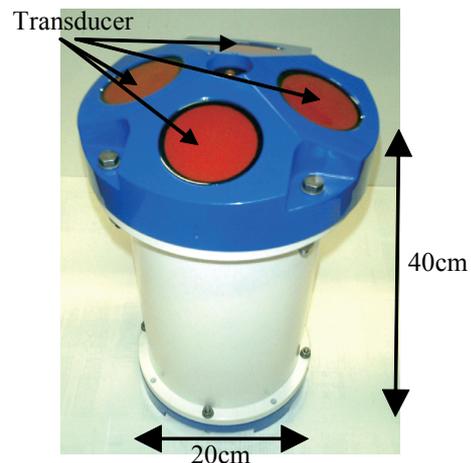


図1 ADCPの概観（Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI製）

以下 ADCP と呼ぶ) は、超音波技術に基づいて、三次元方向流速の鉛直分布をほぼ瞬時に計測する機器であり、沿岸海域や外洋における流速計測で多く使われている⁶⁾。元々海洋観測を主目的として開発された ADCP の河川流観測への適用例は、海洋観測と比べると多くないものの、河川流のような浅い水域の計測に適した ADCP 計測技術の進展により⁷⁾、河川での流速・流量観測に対する ADCP のポテンシャルは十分高いものと考えられる。さらに、最近では、水平設置タイプの超音波ドップラー流速分布計（Horizontal-ADCP, 以下 H-ADCP と呼ぶ）の開発により、横断方向の流速分布計測も可能となっている⁸⁾。本稿では、ADCP や H-ADCP の計測原理や問題点、実河川における流速・流量観測例について紹介する。

*〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

† E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

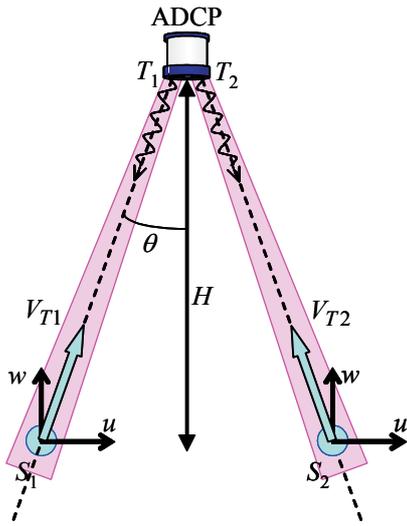


図2 ADCPの流速計測原理 (T_1 と T_2 はトランスデューサーを示す)

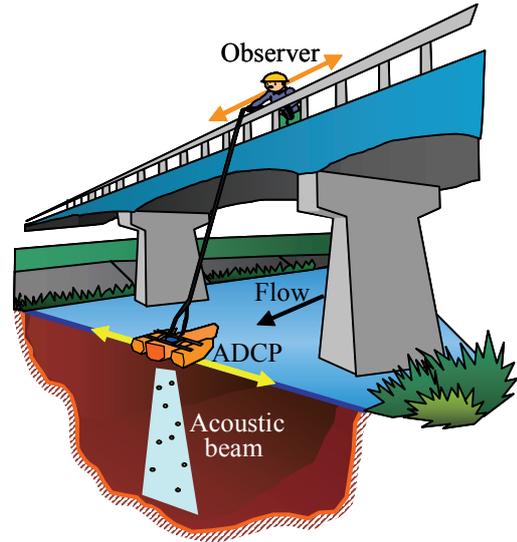


図3 ADCPによる流速・流量観測法の概念図

2 ADCPによる流速・流量観測

2.1 計測原理

ADCPには、図1に示すように、超音波を送受信するトランスデューサーが4つ装着されている。図2は、1対のトランスデューサー T_1 、 T_2 を用いるときの流速計測原理を概念的に示す。トランスデューサーから水中に発信された超音波は、水中を浮遊する懸濁物等の散乱体(同図中 S_1 、 S_2)により散乱し、その後、再び戻ってくる反射音波をトランスデューサーで計測する。このとき、散乱体が超音波ビームの軸方向に移動している場合、ドップラー効果により、発信音と反射音の振動数は異なる。この振動数の変化を捉えることにより、ビーム軸方向の流速 V_{T1} 、 V_{T2} が計測される。また、ビーム軸方向上の異なる距離における散乱体からの反射音波は、時間差で受信される。そのため、水温などで変化する超音波の音速を別途把握することにより、ビーム軸方向の流速分布を把握することが可能となる。

ビーム軸方向速度 V_{T1} 、 V_{T2} から水平・鉛直方向速度(図2中の u 、 w に相当)を算出する手順としては、水中の散乱体 S_1 、 S_2 の速度(u 、 w)が同一であると仮定すると、 u 、 w は次のように与えられる。

$$u = \frac{V_{T1} - V_{T2}}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$w = \frac{V_{T1} + V_{T2}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

ここで θ は鉛直線からのビーム軸方向の傾きである(図2)。ADCPの計測可能な鉛直方向距離は超音波

の周波数により異なり、周波数300、600、1200kHzでは各々最大で175、70、20mである。また、ADCPの鉛直分解能は最小1cmであり、ADCPは浅水流の流速鉛直分布の計測に十分な性能を有している。なお、詳細なADCPの計測原理等については、金子・伊東⁶⁾を参照されたい。

2.2 流速・流量観測法の概要とその問題点

実河川においてADCPによる流速観測を行う方法としては、ADCPを河床面に鉛直上向きに固定設置する場合と、水面付近に鉛直下向きにADCPを設置する場合が挙げられる。前者の場合には、定点における流速の時間変化を計測するのに適している。それに対して、後者の場合には、ADCPをボートや専用浮体等により移動させることにより、流速の空間構造を捉えるのに有効である。

このようなことから、横断面全体の流速分布を計測する必要がある流量観測では、ADCPを水面付近に浮かべて、それを横断方向に移動させる、というADCP移動観測が行われている。ADCPは流速分布のみならず水深も計測し得ることから、ADCP移動観測により、流量算出に必要な断面形状と流速分布が同時に取得される。この時のADCPの移動手段としては、ラジコンボートを用いる方法⁹⁾や、図3に示すように、橋上からロープ等で移動させる方法が挙げられる。洪水中にラジコンボートを操作することは容易ではないので、以下に示す流量調査では、図3のようなADCP移動観測を行っている。

しかしながら、このようなADCPによる流速・流量観測には、主として、次のような問題点が挙げられる。

①「散乱体 S_1 , S_2 が同じ速度で移動する」という流速算出時の前提条件が横断面全体で成り立つ保証はない。この仮定を用いると、流速の横断変化が大きい側岸付近や ADCP から離れた位置 (特に河床付近) では、流速計測誤差が大きくなる可能性が高い。

②我が国の河川の特徴として挙げられるように、出水時には、流速が大きく、かつ、大量の流木や浮遊物が存在する。そのような場合には、水面付近での ADCP の姿勢を安定させることが難しく、かつ、計測自体が困難となる。

③水中の SS レベルが大きくなると、水中での超音波の減衰が大きい等の理由により、散乱体からの反射音波を捉えられず、流速データの欠測が生じる。

以上のように、大規模な出水時には、ADCP による流量観測の実施が困難となる場合が考えられるが、瞬時に流速鉛直分布と河床形状を同時に計測できる ADCP の有用性は十分高いものと考えられる。

2.3 観測結果

この ADCP を用いて実施された現地調査結果を以下に示す。

a) 洪水時都市河川における流速鉛直構造¹⁰⁾

まず、流速の非定常変化が著しい洪水時都市河川における ADCP 観測結果を記述する。都市河川の一

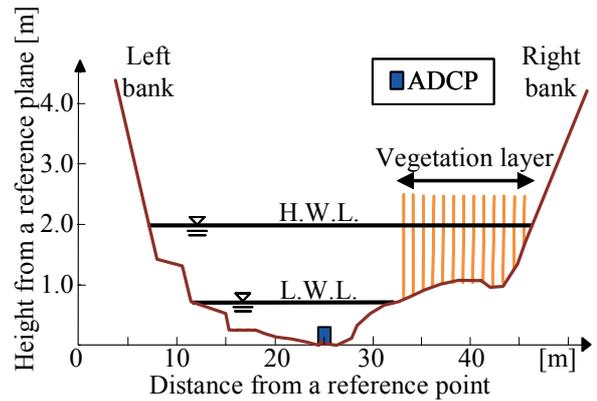


図4 ADCP の設置位置と断面形状 (千葉県大堀川, 河口より 1.5km 地点)

例として、手賀沼に流入する千葉県大堀川の下流部・呼塚橋 (河口より 1.5km 地点) において ADCP 観測を実施した。大堀川は、流域の市街化率が 8 割を越える都市河川である。観測地点の断面形状は、図 4 に示すように、複断面形であり、低水路幅は約 20m である。また、右岸側の高水敷幅は左岸側よりも十分大きく、右岸側には植生が繁茂していた。この観測地点は緩やかな湾曲部に位置しており、右岸側が内岸側に相当している。ADCP は、同図に示すように、低水路内のやや右岸よりの河床に固定設置された。観測期間は 2003 年 7 月 31 日から 8 月 6 日であり、この期間中に、時間雨量 73mm、総雨量

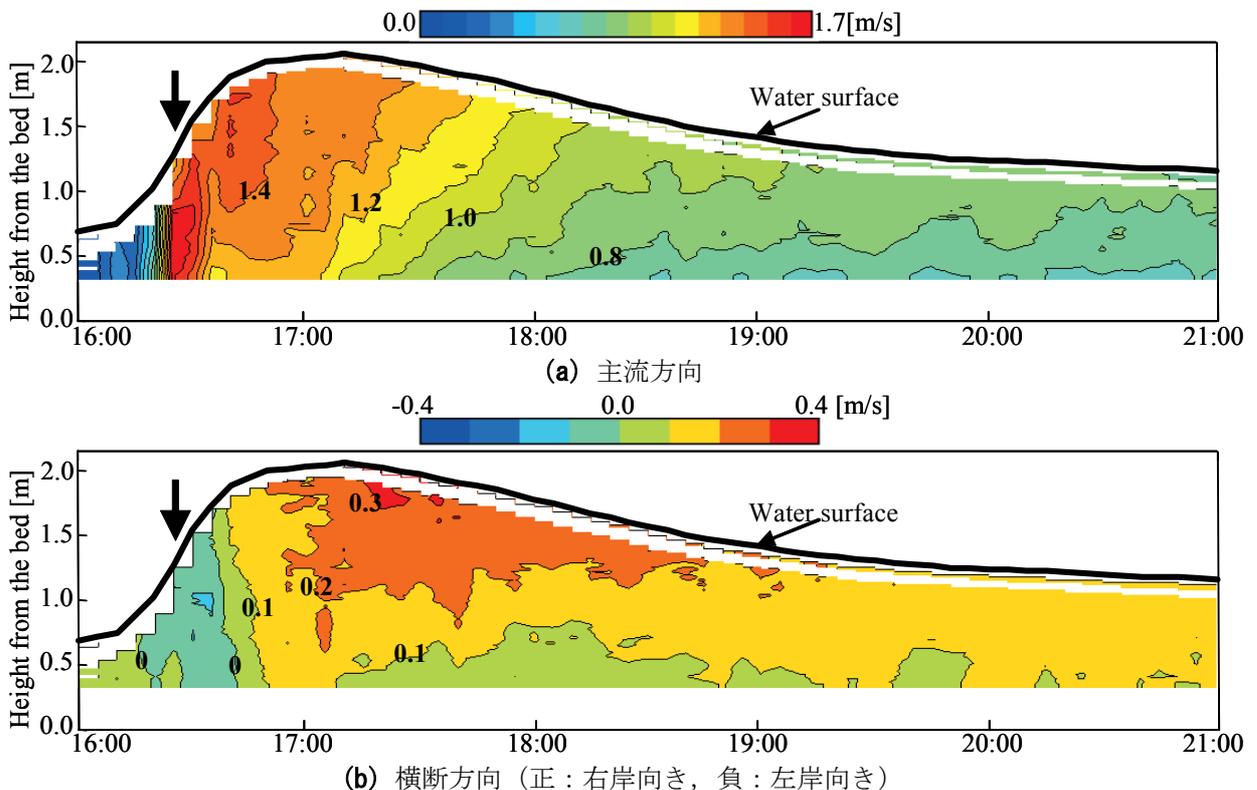


図5 出水時における流速鉛直分布の時間変化 (千葉県大堀川, 2003 年 8 月 5 日)¹⁰⁾

102mm という記録的な出水イベントが生じた。

この出水時における主流・横断方向流速の鉛直分布に関する時間変化を図5に示す。ここで、横断方向流速の正と負の値はそれぞれ右岸，左岸向きを示す。また、底面・水表面付近では、ADCPの計測原理上欠測もしくは計測誤差の大きい部分であるので、ここでは空白としている。今回の出水では、記録的な降雨に伴い水位が約1時間で1.4mも上昇し、極めて非定常性が強かった。主流方向流速に着目すると、水位ピーク前に流速ピーク（図5中矢印）が現れる、という開水路における典型的な流速変化が生じている。特筆すべきこととしては、この流速ピーク時には、表層流速よりも底層流速が大きくなる、という**流速の上下逆転現象**が生じている。流速ピークの後では、増水期における主流方向流速のコンター線が減水期よりも切り立っており、増水期の流速分布が減水期よりも相対的に鉛直方向に一様化している。次に横断方向流速に着目すると、増水期初期では概ね0であるのに対して、主流方向流速ピークが現れる時間帯では負（左岸向き）の流れが顕著となり、最大で-0.1m/sを越えた。その後、増水期後期や減水期では概ね正の値（右岸向きの流れ）となる。このように、増水期と減水期において主流方向・横断方向流速の鉛直構造がダイナミックに変化している様子が、ADCPによりはっきりと捉えられている。

上述した流速の上下逆転現象の形成過程としては、上下逆転現象が生じた流速ピーク時には左岸向きの横断方向流速が顕著であるのに対して、それ以外の時には右岸向きの横断方向流速が卓越している。これより、流速の上下逆転現象が生じたときには、植生が繁茂する右岸側高水敷より低速流体塊が低水路表層部に輸送され、結果として、表層における主流方向流速は減少し、流速の上下逆転現象が生じたものと推察される。このように非定常性・三次元性が強くダイナミックに変化する流速鉛直構造は、河道

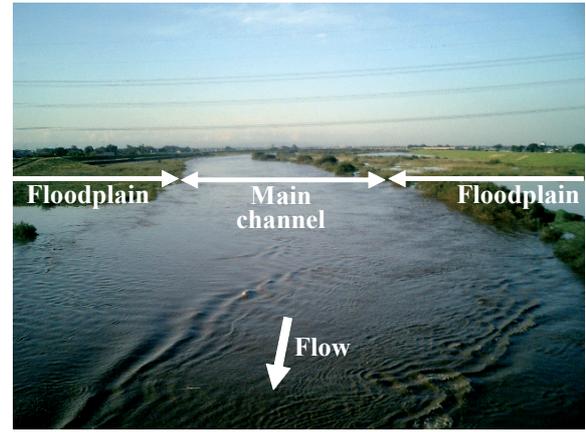


図6 洪水時の低水路と高水敷の様子（江戸川・新関宿橋より上流側を見て、2004年10月21日撮影）

の平面形や植生の分布・倒伏状況と関連すると考えられ、今後類似した現地調査を行う必要がある。

b) 横断面内における流速分布特性¹¹⁾

次に、ADCP移動観測により得られた横断面内での流速横断分布について述べる。観測サイトは、幅約100mの低水路と植生が繁茂する高水敷を有する江戸川・新関宿橋（河口より57.5km）である。観測日時は、年最大規模の出水が生じた台風0423号接近時（2004年10月21日）である。そのときの洪水流の様子を図6に示す。このように、高水敷に繁茂する植生は冠水しているものの、完全には水没していない。この植生分布には粗密が見られ、左岸側の方がやや粗となっている。また、低水路側岸部に張り出す植生（低木ヤナギ）から剥離渦が発生していたことが目視により確認された。

このときの主流方向流速コンターの一例を図7に示す。なお、底面・水面付近のデータ欠測部分については外挿操作を行っている。これより、低水路流速は最大2m/sに達し、その流速ピークの横断位置は、低水路平面形や橋脚の影響を受けて、低水路の中央部には現れず右岸・左岸境界付近に生じている。また、流速ピークの高さは、右岸側では表層付近に現れるのに対して、左岸側では底層付近に現れている。

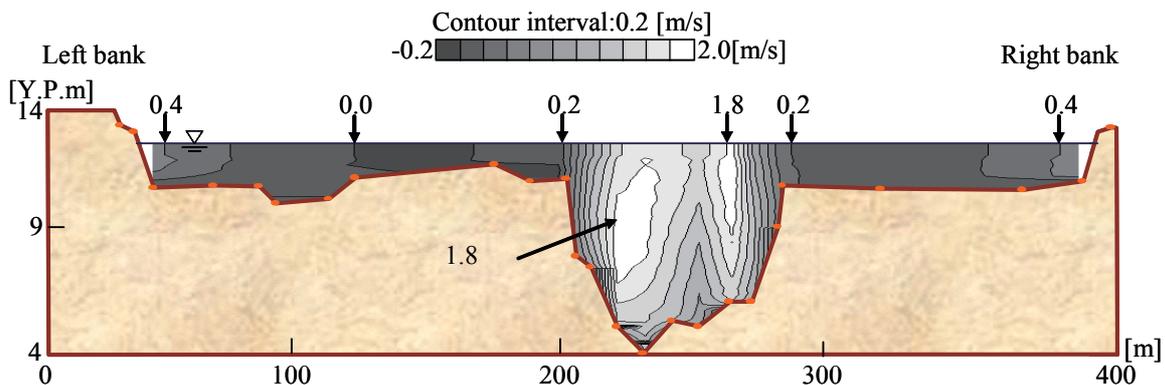


図7 横断面内における主流方向流速コンター（江戸川・新関宿橋、2004年10月21日）¹¹⁾

左岸側では、低水路側岸に繁茂しているヤナギの葉が水表面付近を覆っているため、それに起因する流体抵抗により底層付近の流速が表層よりも大きくなる。一方、高水敷に関しては、植生が密に繁茂する場所では、0.1m/s 以下もしくは上流向きの流れが生じているのに対して、植生分布が疎な領域では 0.4~0.5m/s という大きい流速が発生している。このように、横断面内の流速分布についても、河川の平面形や植生分布の影響を受けて複雑に変化していることが分かる。

c) 更正係数¹²⁾

前述したように、ADCP により得られた洪水流の流速鉛直・横断分布特性には、流体力学的観点から大変興味深い結果が多く得られている。一方、工学的観点に基づいて ADCP 観測結果を解析した一例として、ADCP による流速鉛直分布データから更正係数 (=水深平均流速/表層 (表面) 流速)¹⁾ を算出することを試みた。この更正係数は、表層 (もしくは表面) 流速を計測する浮子や電波流速計、画像解析法等の観測結果から水深平均流速や流量を求める際に必要となる。現在一般的に用いられている更正係数に関しては、実験結果との比較は行われているものの、実河川での検証例は非常に少ない。このことより、ADCP による観測結果は更正係数の算定及び検証に有用であると考えられる。

江戸川と荒川において行われた ADCP 観測結果から算定された更正係数 α_z の結果を図 8 に示す。図中には、7 つの出水時を対象として、各河川 3 地点の結果を示している。ここでの更正係数は、浮子観測 (浮子長 2m と 4m) を念頭にして、水深平均流速と表層流速の比としている。浮子長 2m と 4m は、それぞれ水深 $h=2.6\sim 5.2\text{m}$, $5.2\text{m}\sim$ の時に採用されるため、これらの水深に対応する形で更正係数を求めている。また、図中には、ADCP 観測値 (生データと移動平均値)、浮子観測で用いられる現行の標準値 (浮子長 2m, 4m に対して各々 0.94, 0.96) を表示している。さらに、流速鉛直分布の理論値として、対数則を用いたときに得られる更正係数も示しており、ここでは、マンニングの粗度係数 n を 0.015 から $0.045\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 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にバラツキは見られるものの、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くなっている。表層 4m 流速の観測データの移動平均値に関しては、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 (=0.96) よりも 0.04~0.10 小さい。

次に、観測値と理論値の更正係数について比較する。

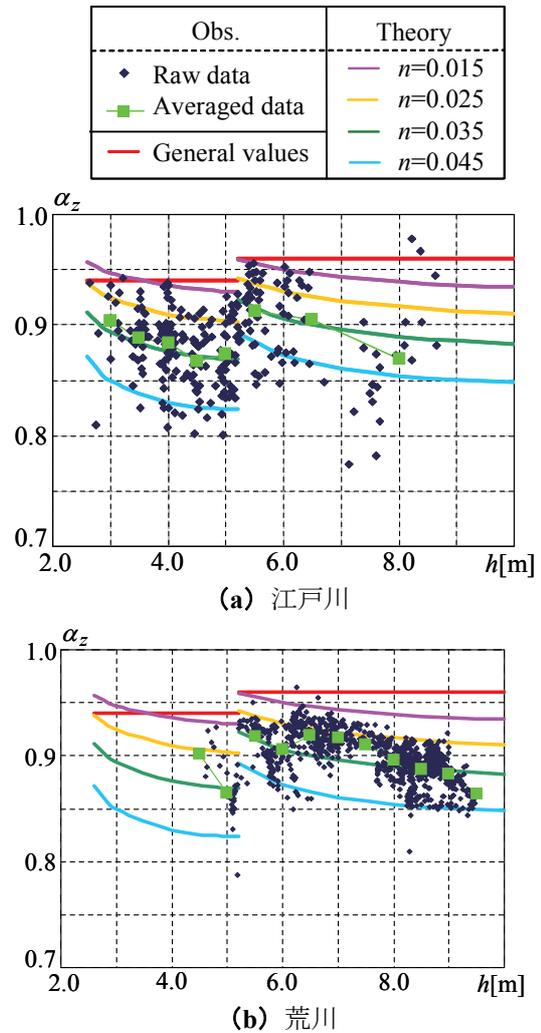


図 8 更正係数 α_z と水深 h の関係 (n : m-s 単位)¹²⁾

理論値において見られる、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。様々な Manning の粗度係数 n の中では、江戸川では $n=0.035\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の時、荒川では $n=0.025\sim 0.035\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の時に観測値と最も良好に一致している。このように、更正係数に関する ADCP 観測結果は、現行の浮子観測で用いられている標準値よりも小さく、基本的な流速分布理論の一つである対数則と平均的に一致していることが分かる。なお、これらの限られた観測条件下における実測データのみでは更正係数の検討は十分とは言えず、今後、より多くの観測データを収集する必要がある。

3 H-ADCP による流速・流量観測

3.1 H-ADCP の特徴

H-ADCP は、水平方向に超音波ビームを送受信して、流速横断分布を計測できる機器である。H-ADCP のトランスデューサーの数は、ADCP と異なり、3

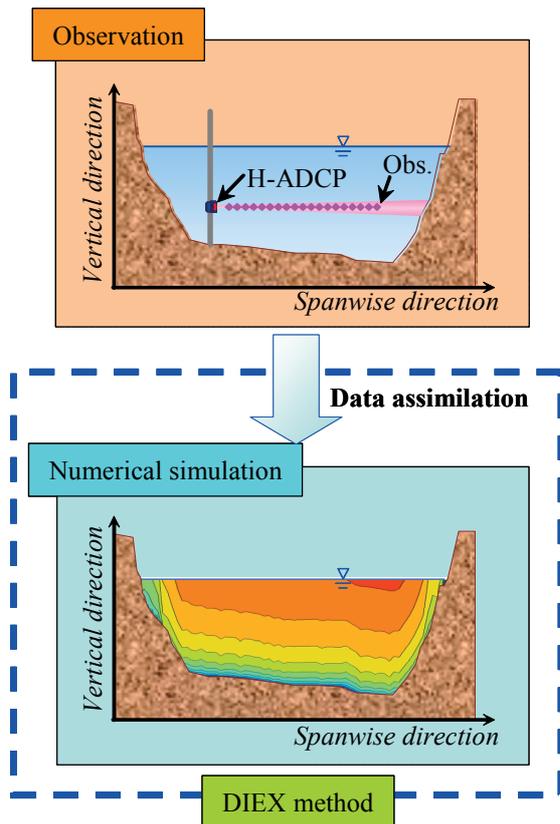


図9 H-ADCP計測と数値計算を組み合わせた新しい流量モニタリング手法の基本的枠組み¹⁵⁾

つまたは2つであるが、図2に示す1対のトランスデューサーにより二方向の流速を計測する原理はADCPと基本的に同じである。そのため、「二つの超音波ビーム上の散乱体 S_1 と S_2 の速度が同一である」と仮定して流速を算出するため、H-ADCPから距離が離れた対岸付近では速度の計測精度が低下する¹³⁾。H-ADCPの計測可能な横断方向距離は、ADCPと同様に超音波の周波数により変化し、目安として、周波数300, 600, 1200kHzにおいてそれぞれ300, 100, 20mとなっている。

3.2 H-ADCP計測と数値解析を融合した流量モニタリングシステムの開発^{15), 16)}

このように、わずか一台で流速横断分布計測が可能なH-ADCPは、流量計測法として極めて有望な機器の一つである。ただし、H-ADCP単独では、流速横断分布という流速の「線」データを取得することはできるが、横断面内における流速の「面」データや流量を算出することはできない。そこで、鉛直方向に移動可能な自動昇降装置にH-ADCPを取り付けて、流量を算出するシステムが提案されている¹⁴⁾。しかしながら、この観測システムは、非常に高価であり、かつ、大掛かりな装置となるため、この観測システムが導入されている河川は限定されている。

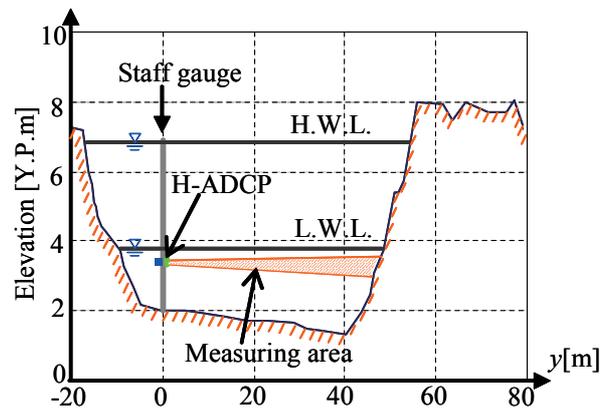


図10 H-ADCPの設置位置(江戸川・野田橋付近、図中の斜線部は測定範囲を示す)

それに対して、著者らは、図9に示すように、固定設置するH-ADCP観測と数値計算技術を融合して、低コストで精度の良い新たな高規格自動流量モニタリングシステムを構築している^{15), 16)}。このシステムでは、H-ADCPにより得られる「線」流速データを、河川流解析を介して、流体力学条件を満足した形で横断面全体に内外挿し、流速の「面」データや流量を算出している。その数値解析では、上記の要件を満たすために、H-ADCP観測データを合理的に取り込むデータ同化手法を組み込んでいる力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)を新たに構築している。このDIEX法は、計算負荷が小さいため、H-ADCPデータの読み込みから流量算出までほぼ瞬時に行うことが可能である(汎用PCを用いて、CPU時間で0.3s程度)。そのため、本手法とテレメータ装置を組み合わせることにより、自動・連続的に、かつ、リアルタイムで流量をモニタリングすることが可能であると期待できる。なお、DIEX法を含めて本流量モニタリング手法の詳細については、著者らの論文^{15), 16)}を参照されたい。

3.3 流速・流量のモニタリング結果

a) 観測概要

横断面内における流速の時空間変動特性を把握するとともに、上述した本流量モニタリングシステムの有用性を検証するために、江戸川中流部の野田橋(河口から39km)においてH-ADCPを設置した。ここでは、図10に示すように、低水路左岸側に位置する水位標において右岸向きにH-ADCPを固定設置した。観測期間は2005年9月5日から12月6日である。この観測では、Workhorse H-ADCP 600kHz(Teledyne RDI製)を用いており、計測範囲は低水路内に限定される。

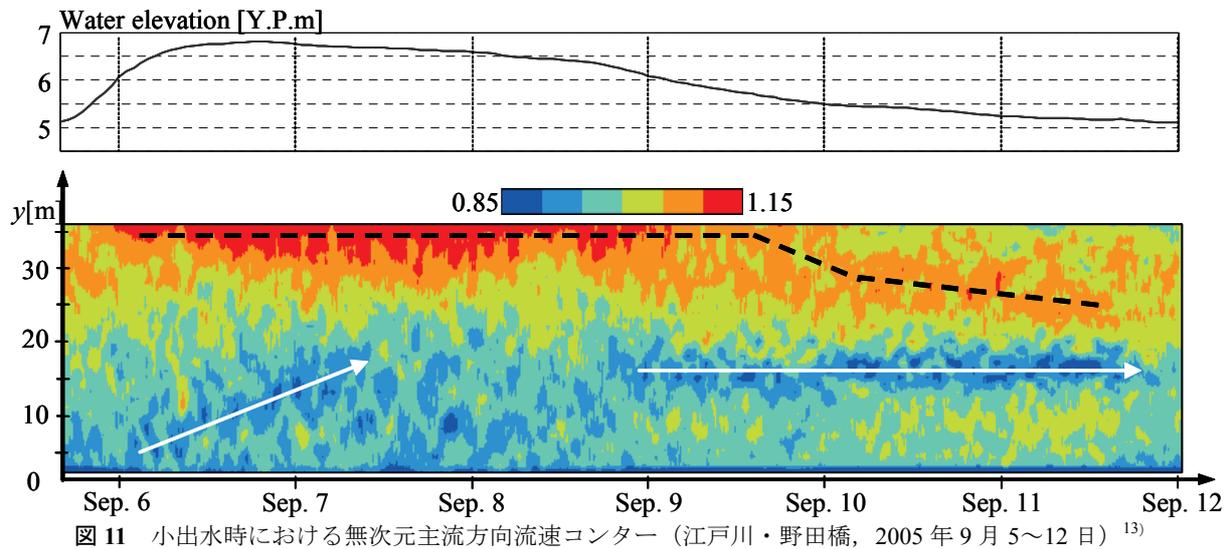


図 11 小出水時における無次元主流方向流速コンター（江戸川・野田橋，2005 年 9 月 5～12 日）¹³⁾

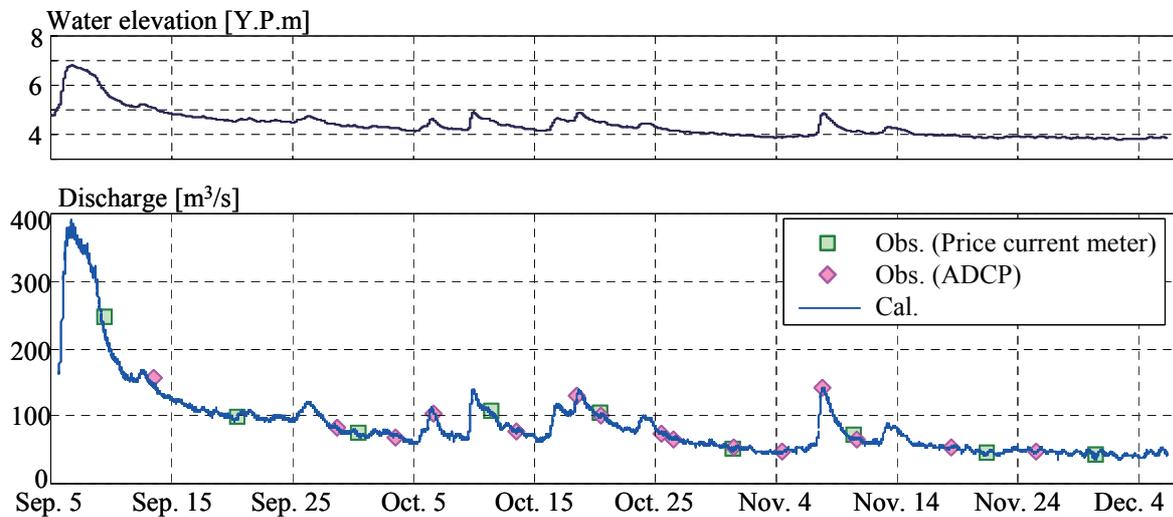


図 12 本モニタリングシステムによる流量推定結果（江戸川・野田橋，2005 年）

b) 出水時における流速の横断変化¹³⁾

H-ADCP により得られた観測結果の一例として、小規模出水時（2005 年 9 月 5～12 日）における無次元主流方向流速の横断分布に関する時間変化を図 11 に示す。ここで、無次元主流方向流速は、主流方向流速をその時刻における横断平均流速値で除したものである。また、無次元主流方向流速は 0.7 から 1.2 の範囲で変化しているが、図化の関係上 0.85 から 1.15 の範囲で示す。これより、無次元流速の高速域は、増水期から減水期前半には右岸側にあるが、減水期後半には中央寄りに移動している（図中点線）。一方低速域は、左岸側に固定されておらず、図中矢印のように、増水期から水位ピーク期にかけて左岸側から中央部へ移動しているように見受けられる。また、減水期では中央部に低速域が現れている。

このように、流速横断分布特性は、出水中に大きく変化していることが分かる。これらの流速横断分布の時空間変化を引き起こす主要因の一つは、河

床変動であると推察されるが¹⁷⁾、河床変動データを同時計測していないため、今後の課題としたい。この H-ADCP 観測結果や前章で述べた ADCP の観測結果より、「流れ」－「河床変動」－「植生分布」間の相互作用は重要であり、実スケールにおける河川流構造を解明するには、これらの相互影響を加味したモニタリングが重要であることが分かる。そのためには、流れのモニタリング技術の高度化と共に、河床変動・土砂輸送過程や植生の倒伏状況・流体抵抗特性などに関するモニタリング技術を開発・応用していくことが急務の課題である。

c) 流量推定結果^{15), 16)}

H-ADCP 観測技術と数値解析技術に基づく本モニタリング手法による流量推定結果を見るために、全観測期間において推定された流量の時間変化を図 12 に示す。図中には、野田観測所における水位の時間変化を図示している。また、比較用の流量観測データとして、ADCP 移動観測による流量観測値及び

低水流量観測として実施されたプライス流速計による流量観測結果も合わせて表示している。これらを見ると、本手法は、全データに対して安定して流量を求められており、また、その流量変化は水位の時間変化と概ね対応している。本手法による流量の推定値と ADCP やプライス流速計による流量観測値を比較したところ、これらの結果は良好に一致していることが分かる。流量の観測値と推定値の差について RMS (Root Mean Square) 値を求めたところ、その RMS 値は約 4% となり¹⁵⁾、一般的な流量観測法と同程度の計測精度となっている。ここでの検証は低水時に限定されているが、同一地点における出水時の検討を別途行ったところ、出水時における本手法の流量推定精度は低水時と同程度に良好であることが確認された¹⁶⁾。以上のことから、H-ADCP 観測と数値解析を組み合わせた本流量モニタリング手法の基本的な有効性が示唆された。

4 おわりに

本稿では、実河川における流速・流量モニタリングの一計測法として超音波ドップラー流速分布計 (ADCP と H-ADCP) に着目し、その計測原理や問題点、いくつかの観測事例について紹介した。ここで示した洪水流中の流速鉛直・横断構造については、興味深い結果は得られているものの、そのメカニズムについては十分検討できておらず、河床変動や植生抵抗等の影響を考慮した総合的な現地モニタリングを進めていく必要がある。また、実河川流のように大きなスケールの流動場を取り扱う場合、現地観測のみでは計測できる範囲が時間的・空間的に限定されることから、数値シミュレーションと併用した形で研究を進めていくことは今後益々重要となってくると考えられる。その際には、データ同化手法の取り扱いが大きなキーとなり、本研究で示した DIEX 法が有用な数値解析法の一つとなり得るものと考えられる。

謝辞：本研究は、NEDO・平成 17 年度産業技術研究助成事業、文部科学省科学研究費補助金・若手研究 (A) (いずれも、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、現地観測の実施や流量データの提供に関して、様々な便宜を図って頂いた。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、本研究で示した現地調査やデータ解析の大部

分は、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室所属の多くの卒業生・在校生によって行われており、特に、佐藤慶太君、木水啓君、飯田裕介君、酒井雄弘君、北山秀飛君には大変お世話になった。ここに記して深甚なる謝意を表します。

引用文献

- 1) (社)日本河川協会編：改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説 調査編, (1997) 33-58.
- 2) 藤田一郎：非接触型流速計測法を用いた実河川の計測と問題点, ながれ, 26 (2007).
- 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, 497/II-28 (1994) 41-50.
- 4) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, 115 (1989) 925-936.
- 5) 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, 38 (1994) 733-738.
- 6) 金子新, 伊東集通：ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, 3 (1994) 359-372.
- 7) 橘田隆史, 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, 12 (2006) 133-138.
- 8) Wang, F. & 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*, 1 (2005) 319-328.
- 9) 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, 11 (1998) 460-471.
- 10) 二瓶泰雄, 飯田裕介, 佐藤慶太：都市河川における流速・SS の鉛直構造に関する高解像度 ADCP 調査, 水工学論文集, 49 (2005) 631-636.
- 11) 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, 52 (2005) 1106-1110.
- 12) 酒井雄弘, 二瓶泰雄：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, 水工学論文集, 51 (2007).
- 13) 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, 12 (2006) 139-144.
- 14) 大東秀光, 上坂薫, 南修平, 劉炳義, 橘田隆史：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, 56 (2001) 454-455.
- 15) 二瓶泰雄, 木水啓：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, 土木学会論文集, (2007, 投稿中).
- 16) 木水啓, 二瓶泰雄, 北山秀飛：H-ADCP と DIEX 法を用いた河川流量計測法の洪水流観測への適用, 水工学論文集, 51 (2007).
- 17) 山口高志：洪水流速および流量観測 —その 2—, 水文・水資源学会誌, 16 (2003) 439-448.