

ADCPやH-ADCPによる河川流量観測

RIVER-DISCHARGE MEASUREMENTS WITH ADCP AND H-ADCP

二瓶泰雄¹

Yasuo NIHEI

¹正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

Although an ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) has been widely used in flow monitoring in coastal oceans, there were few applications of ADCP into measuring flow and discharge in rivers several years ago. This paper introduces our attempts to apply an ADCP into discharge measurements in rivers. Discharge measured with the ADCP are used to examine the measuring accuracy for river discharge with floats, showing that the measured discharges obtained with floats have some measuring errors mainly due to treat the velocity profiles in vertical and lateral directions. We also presented a new discharge monitoring system with H-ADCP measurements and numerical simulations.

Key Words : discharge measurement, ADCP, H-ADCP, float, flood flow

1. 流量観測のきっかけ

筆者は、これまでに河川流量観測に関する研究論文をいくつか発表しているが、まともに流量研究に取り組むようになったのは2003年頃からであり、本報を執筆されている他の先生方と比べるとまだまだ新米である。

筆者は、前の職場(東工大土木)では、灘岡和夫教授のもと、海岸工学・沿岸環境学を専門とし海の流れ・土砂輸送・水環境に関する教育・研究に主に従事していた。ただし、博士論文では「新しい混相乱流 LES の開発」¹⁾に取り組む、土木に限らず流体力学を扱う様々な分野(機械や化学工学、原子力等)の研究者と交流していた。また、当時の東工大土木の「水工研」には、灘岡先生の他に、池田駿介先生や神田学先生らが在籍し、輪講を通して流体力学の基礎をみっちり学び、かつ、ゼミなどにより河川や沿岸、大気に関する幅広い研究テーマについて日常的に議論していたおかげで、自分の専門を海岸工学と限定的に捉えていない“つもり”になっていた。

そのため、現在の職場(東京理科大学土木)に2000年4月に異動した後、勤務先(千葉県野田市)が「海から遠い」、「利根川と江戸川に囲まれている」、「富栄養化湖沼(手賀沼や印旛沼)が近くにある」という地理的条件を鑑み、専門フィールドを海から陸に変え、「海(湖沼)」と「陸」をつなぐ陸水環境研究をメインにしようと考えた。これら陸水研究は、博士論文とは全然違うし、元々海の研究をやっていたことを完全に断ち切り一から研究を始めることになるので当然大きな不安やリスクが

あったが、前職を経験して、同じ水の研究だから何とかなるかとの楽観的な思いで研究を開始した。

手賀沼等の富栄養化湖沼における水質汚濁化には、流域(陸域)からの過剰な汚濁物質流入が原因の一つとして挙げられていたが、流域から河川を経て湖沼(内湾)に流入する汚濁物質の挙動は非常に複雑でその多くはブラックボックスとなっていた。そのため、2000年度では、まず手賀沼をターゲットとして、流域全体から湖沼環境を捉えるつもりで水環境研究に取り組み始めた。その際には、流域から河川経由の汚濁物質流入量(汚濁負荷量)を精緻に評価することが最重要ポイントであるので、汚濁負荷量(=水質濃度×流量)を把握するために、河川における流量観測を実施した。これが流量観測を行うことになったきっかけである。

2. 試行錯誤の時期

(1) トレーサー(葉)を用いた観測

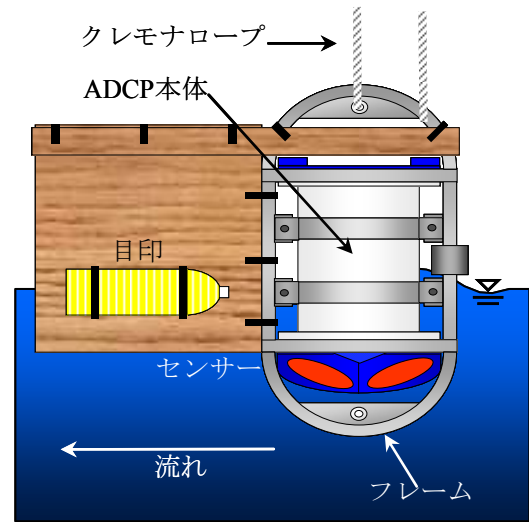
流量観測を始めた2000年当時はまともな観測機器は無く、競争的資金もほとんど獲得できなかったため、流量観測を行うと言っても流速計一つなかった。そのため、何らかのトレーサ(草や葉等)を流し、その通過時間を計測して流速を測り、それから流量を換算する、という古典的な方法で観測を行った。特に、汚濁負荷量は出水時データが皆無であったため、雨の中、学生らとともに河川に出掛けて出水時の流量観測や採水調査をよく行った。

(2) ADCPの導入

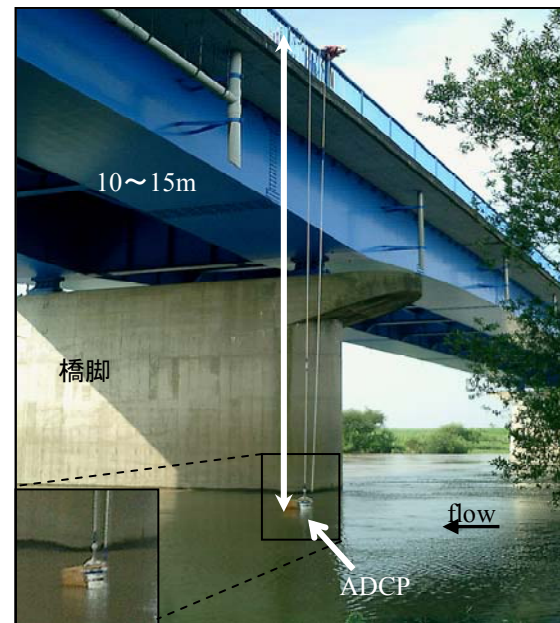
このような“古典的”な流量観測は精度上問題があり、いつまでも続けるわけにいかないと思い、海岸・海洋分野では一般に普及している超音波ドップラー流速分布計 (Acoustic Doppler Current Profiler, 以下ADCPと呼ぶ) を用いて、河川における流速・流量観測を2003年に初めて試みた。筆者が海岸工学を起点に研究を始めたので、ADCPを使うのは珍しくないと思っていた。しかしながら、当時、河川において本格的なADCP観測を行っていたのは我が国では木下良作先生の研究グループのみであり²⁾、世界的に見ても河川工学分野におけるADCPの使用例はそう多くはなかった^{3)~5)}。ADCPを用いて流量観測を行うには、ADCPを下向きにして、「水面付近に固定して流速計測し、それを横断面内の複数地点で繰り返す」もしくは「ADCPを横断方向に曳航しながら流速計測する」ことにより、横断面内の流速データを取得する必要があるが、当時はADCPの曳航用ボートも市販されておらず、かといって木下良作先生と同じくラジコンボートを自作することは到底出来なかったので、ADCPを水面付近に浮かべて姿勢を制御できる枠組み (図-1) を一部手作りした。そのため、川幅400mにわたり完全に人力のみでADCPを移動させる必要があり、その際には若い学生の腕力のみ頼った。余談だが、東京理科大学のような私立大学では一般に定員が多く、研究室の所属メンバーも学部生のみで10人~20人の大所帯となる。それらの学生の中には、パソコンをいじるのが好きな学生ばかりでなく、外で体を動かすのが好きな体育会系の学生もいるため、後者のタイプの学生には困難な観測遂行上多々助けられた。

このADCPを用いて、手賀沼流入河川 (千葉県・大堀川) や東京湾に注ぐ江戸川・玉葉橋 (河口より35km) において洪水時流速・流量観測を行った。そのうち台風0310号出水における江戸川での流速観測結果を取りまとめて2004年の土木学会・水工学講演会で発表したところ⁶⁾、もの珍しかったためか多くの反響を頂いた。様々な質問のうち、「多量のゴミや流木等が浮遊する洪水時にそんな高価な機器 (ADCP) を水面付近に設置して大丈夫か?」や「そもそもADCPは河川流速を正確に測れるのか?」というADCPを用いた観測法に関する疑問が多かった。筆者にとってはそれらの疑問は極めて意外であった。ADCPは海洋観測分野では他の流速計の検証用機器として用いられるほどの信頼性を確立していたが、同じ水でも河川流計測では実績が少なかったため、分野が変わるだけでADCPが“新しい”計測機器として扱われていた。

また、同じ江戸川の観測結果から流量を算出したところ、直近の流量観測所における HQ 式から概算した流量データといくらか異なることが分かった。当時は、河川工学分野で一般に用いられる HQ 式や河川管理者が公表する流量データは絶対的なものであり、計測精度も非常



(a) 模式図



(b) 実際の設置の様子

図-1 ADCPの水面設置用手作り枠組み

に高いものだと思い込んでいたため、ADCPによる流量推定結果に何らかのミスがあるものだと思います。外部に公表できなかった。そのミスとしては、ADCPの流速計測誤差以外に、離散的な観測点における流速データからの流量算定法に問題があると考えた。そのため、流速データを何らかの形で横断方向に内外挿する手法が必要となり、博士論文等でCFDにのめり込んでいたので数値解析技術をなんとか生かさないかと思い、流速観測値を河川流シミュレーションに導入するデータ同化手法を考案した⁷⁾。この手法を力学的内挿法と呼んでいたが、これが後述する力学的内外挿法^{9)・10)}の基礎となった。

(3) ADCPと浮子観測の比較

翌2004年には運よく複数台のADCPを流量観測に用い

ることができる機会に恵まれた。このような貴重な機会を生かすために、単に ADCP による流速・流量観測を行うだけでなく、これまでの洪水流量観測方法の柱である「浮子観測」も同時に行い、両者の結果を比較・検討することを試みた。この比較観測の目的は、2003 年度に露見した「ADCP による流量観測値が $H-Q$ 式による流量データと大きくずれた」理由を探るためであり、出水時の $H-Q$ 式作成に用いられた浮子流量観測結果に着目したためである。ある大河川の3断面において ADCP 観測と浮子観測を行ったところ、全ての断面で ADCP の流量データは浮子流量よりも小さくなっており、その割合も概ね一致していた。同一の観測方法同士で比べると、連続条件等の整合性は取れているが、複数の観測方法の流量データは一致しておらず、一定の割合で差が生じていた。

これらの結果は、筆者にとっては衝撃的な結果であった。まさか、過去 50 年以上我が国の主要洪水流量観測法として採用されている浮子測法にそれなりの誤差が含まれているとは信じられなかった。ただ、ADCP については前述したように海洋物理分野ではスタンダードな機器と認知されていた¹¹⁾。また、過去に浮子観測の計測誤差や計測上の問題点に関して指摘されていたので^{12)・13)}、浮子測法に何らかの誤差要因が含まれているものと考え、これらの観測結果を研究報告会等で口頭発表した。その結果は惨憺たるもので、「ADCP の観測結果は正しいのか？」や「浮子観測結果にも誤差はあるが、誤差の基準となる流量の真値が存在しない」というものから、「既存の文献をちゃんと調べているのか」といった趣旨のことまで言われた。「他の研究者から自分の研究を批判されたらしめたと見え」との趣旨を神田先生が書かれていたが¹⁴⁾、上記のものは「批判」というレベルを大きく超えたものだった。

このように、専門分野や対象フィールドが異なるだけで ADCP データの評価が 180 度変わるとは予想もしていなかったもので、本腰を入れて流量観測研究をやらねばと決意した。その際には、次の 3 点に着目して、流量観測研究を行った。

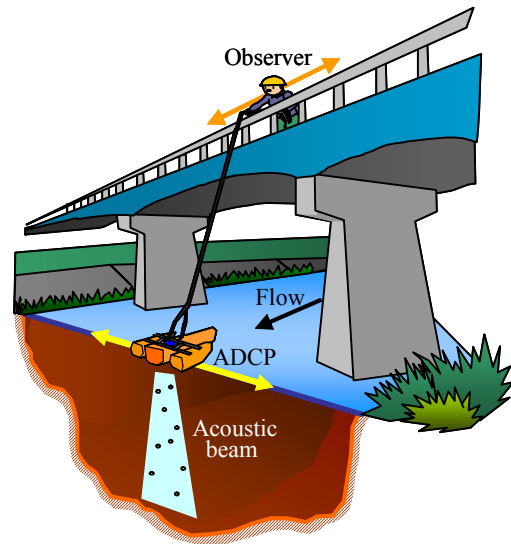
- ① 河川における ADCP 計測精度の検証
- ② 更正係数や流量算出法に着目した浮子観測の流量計測精度の検討
- ③ H-ADCP による新しい流量連続モニタリングシステムの構築

以下では、各研究成果の一部を紹介する。

3. 河川における ADCP 計測精度の検証¹⁵⁾

(1) 調査方法の概要

様々な河川流量観測法が用いられているが、それら相互の精度検証をする時に、必ず「河川流量の真値はどれだ？」という話になる。例えば、低水時では、プライス流速計や電磁流速計等の「点」流速計を用いて、計測点



(a) 模式図



(b) 実際の様子 (江戸川・野田橋)

図-2 ADCP 移動観測法の概要

を空間的に十分細かく設定でき、横断面内全体の流速分布を詳細に取得しえるので、それらの結果は「流量の真値」に限りなく近くものと見なされる。すなわち、時間と労力を十分掛けて良い低水時ならば流量観測精度について心配する必要はない。ところが、時間的な変化が大きい洪水時の場合や、もしくは川幅が数百 m~1 km 程度の大河川の場合には、点流速計を用いて十分な空間解像度を有した計測点を設定することが困難である。このような状況下では、効率的でかつ計測精度が高い ADCP が有力な手法となると考えられるが、前述したように、河川工学では ADCP の計測精度に疑念を持たれていた。そのため、ADCP による流量観測の計測精度について検証を行う必要があり、これを行わないと後述する浮子流量観測の計測精度の実態解明や新たな流量モニタリング手法開発に必要な検証用データが無くなってしまふ。

そこで、ADCP による河川流量観測法を確立・標準化することを目的とし、低水時・洪水時の流量観測を実施し、ADCP を用いた河川流量計測法の流量計測精度やその手順

について検討した¹⁵⁾。瞬時に流速鉛直分布が計測可能であるという ADCP の特徴を生かしつつ、特殊技能を持たなくても ADCP を移動させる可能となるように、図-2 に示すような ADCP 移動観測法を実施した。ここでは、ADCP を鉛直下向きにした形で専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI 製) に取り付け、それを水面付近に浮かべて橋上より横断方向に移動させる。ここでは、ADCP により各横断位置における流速鉛直分布と水深を計測し、また同時に目視で ADCP の横断位置を記録することにより、横断面全体の流速と水深分布データを取得し、最終的に流量を算定する。ADCP の移動手段としては、橋上からロープ等で移動させるという簡便な方法とする。専用浮体の大きさは 1.2m×0.8m とコンパクトであり、低水時のみならず出水時においても、専用浮体をわずか 1 人で引っ張ることにそれほど労力を必要としない。

また、ADCP の流量観測精度を考える際には、データ取得してから流量を求めるまでの後処理が極めて重要であり、特に、ADCP の未計測エリアとなる水表面・底面、側岸付近における流速補間操作がキーとなる。その手順の詳細は、筆者の文献¹⁵⁾を参照されたい。

(2) 観測結果の一例

表-1 は、ADCP による流速、水深、目視による横断位置及び流量に関する計測誤差の平均値と RMS 値が示されている。これらの結果は主として江戸川・野田橋で低水時にて行われた。これより、本観測法による流速、水深、横断位置、流量の計測精度は、既存手法と比べてそれほど遜色ないことが分かる。

詳細に流量計測精度を調べるために、既存研究¹⁶⁾と同様に、ADCP による流量観測値 Q_{ADCP} と $H-Q$ 式による基準値 Q_{HQ} の差の RMS 値 ΔQ_{rms} を図-3 に示す。ここでは誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} の流量依存性を見るために、図の横軸を流量 Q_{HQ} とし、流量を 20m³/s 毎もしくはそれ以上の範囲に区分けし、各流量範囲内において求められた ΔQ_{rms} が図示されている。また、参考のために、プライス流速計による流量観測値 Q_p に関して算出した誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} も表示している。これより、ADCP 移動観測法における ΔQ_{rms} はどの流量においても 6m³/s 以下に収まっており、また、流量が増加すると ΔQ_{rms} が小さくなる。これらの結果を相対誤差に換算すると、全て流量において、相対誤差は 10% を下回っている。また、 $Q_{HQ} < 100$ m³/s では相対誤差が 5% 以上となるのに対して、 $Q_{HQ} > 100$ m³/s では相対誤差が 5% 以下である。一方、プライス流速計の結果に対する ΔQ_{rms} は、最大で 8.6m³/s であり、相対誤差で見ると概ね 5% 強である。両結果を比べると、流量 100m³/s 未満ではプライス流速計の誤差値の方が ADCP 移動観測法の値よりも小さいものの、流量 100m³/s 以上ではその逆の大小関係になっている。

表-1 各項目の計測誤差の平均値と RMS 値 (RMS : Root Mean Square, n : データ数)

	Value		Percentage [%]		n
	Mean	RMS	Mean	RMS	
Velocity [m/s]	-0.024	0.036	-4.18	6.93	23
Depth [m]	-0.031	0.114	-1.13	9.18	123
Lateral position [m]	-0.256	0.950	-0.36	2.13	91
Discharge [m ³ /s]	-2.18	4.48	-3.63	6.20	36

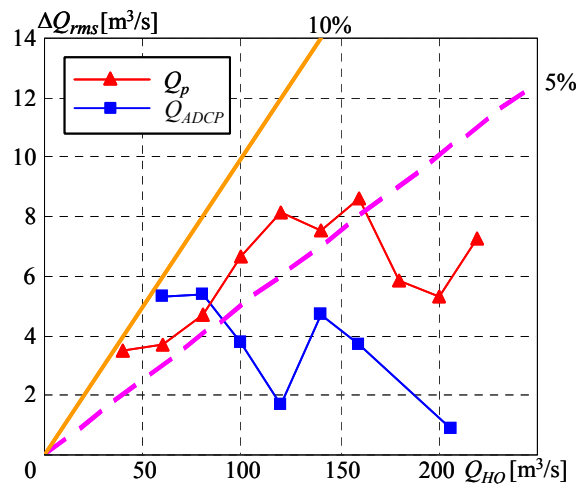


図-3 流量誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} と流量の関係 (図中の点線と実線は観測誤差 5、10% を示す)

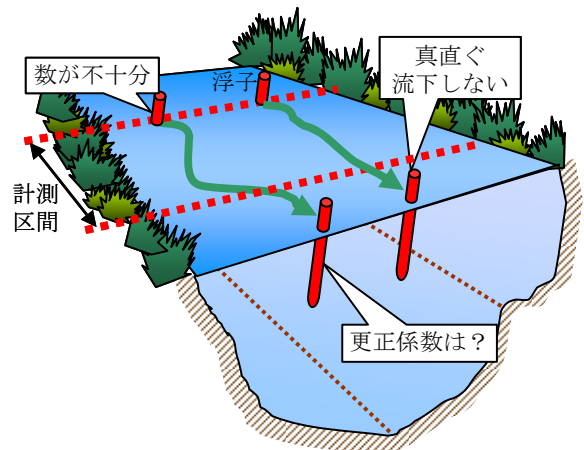


図-4 浮子観測の概要と問題点

以上のことより、ADCP 移動観測法がプライス流速計と同程度に精度良く流量計測を実現しており、流量が相対的に大きくなるほどその精度は向上することが示された。なお、流量が相対的に小さい場合には水深が浅くなるため、ADCP 移動観測法では流速計測可能なエリアが相対的に減少するとともに、測深誤差が増加する。その結果として、低流量条件では、ADCP 移動観測法の計測誤差が増

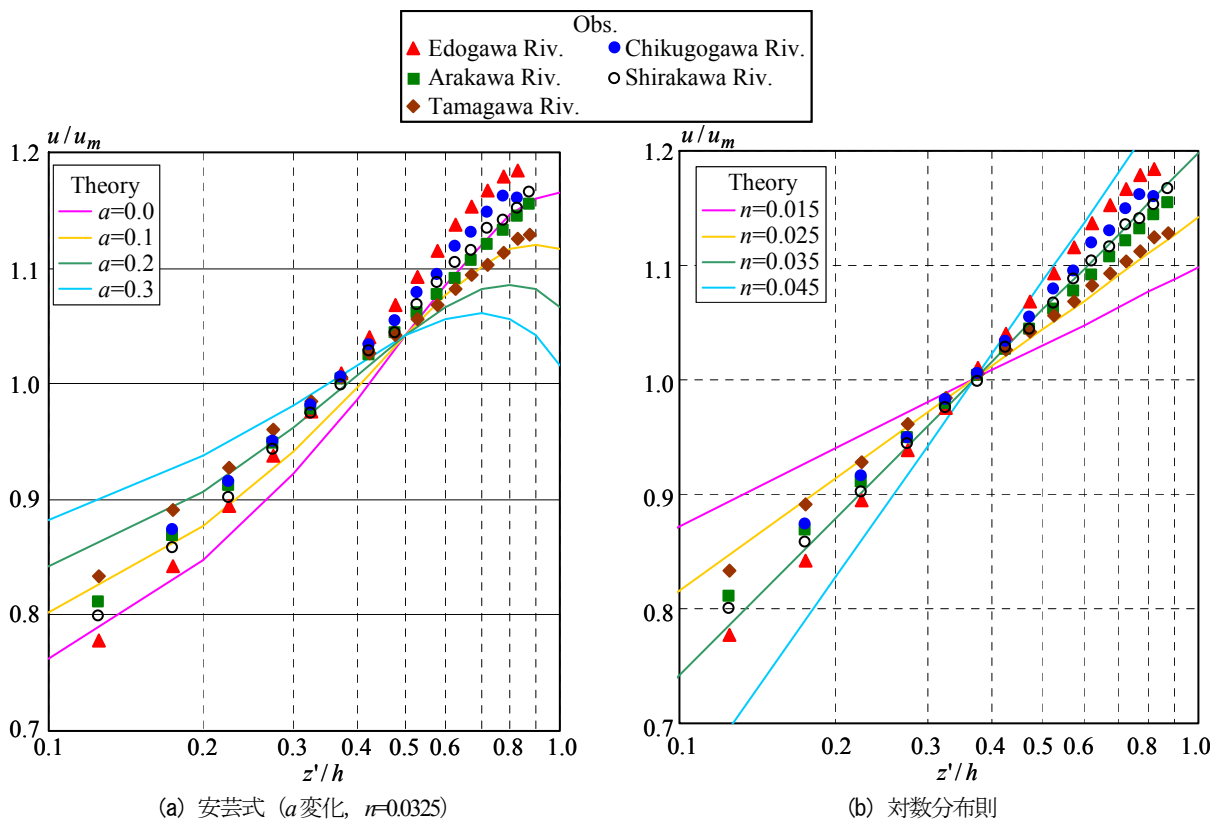


図-5 各河川における無次元流速鉛直分布に関する観測データの平均値と理論値の比較 (n : m/s 単位)

大するものと考えられる。また、ここでの流量計測精度の検証は低水時のみに限定されているが、水表面における ADCP の姿勢を安定して保つことが可能な流況ならば、洪水時においても ADCP 移動観測法の流量計測精度はここで示した結果と同程度になるものと推察される。

4. 浮子流量観測の精度検証^{17)~19)}

(1) 概要

前節で示したように、ADCP 流量観測法の計測精度が良好であることが確認できたので、この ADCP 観測結果を基準データとして、浮子流量観測の計測精度を検証した。浮子流量観測の問題点としては、図-4 に示すように、①浮子が流下方向に真直ぐ流れない等の流速計測値自体の問題と、②修正係数 (=水深平均流速/浮子表層流速) の妥当性の検証例が少ない、③浮子の数が少ないために十分な流速横断分布が得られない、という流量推定上の問題が指摘されている^{12, 13)}。そのため、以下では、修正係数について詳細に検討した結果を紹介し^{17, 18)}、浮子流速データから流量推定方法の検討結果についても示す¹⁹⁾。

(2) 修正係数

実河川における浮子の修正係数の実測値を得るために、ADCP による流速鉛直分布データから修正係数を算出する。ADCP データとしては、江戸川、荒川、多摩川、筑後川、白川における観測結果であり、これらの中には ADCP を水

面設置した場合と底面設置した場合がある。また、ADCP のみならず、Aquadopp (Nortek AS 製) による計測値もデータ解析に使用されている。ここでは合計 3500 を越える流速鉛直分布データを収集し、解析に用いた。

結果の一例として、各河川における流速鉛直分布の観測データの平均値と理論値を比べたものを図-5 に示す。ここでは無次元流速 u/u_m と無次元高さ z'/h の形で表示されている (u : 主流方向流速, u_m : 水深平均流速, z' : 底面からの高さ, h : 水深)。また、理論値としては、更正係数算定に用いられる安芸式 (最大流速相対深度 $a=0 \sim 0.3$, マニングの粗度係数 $n=0.0325 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$)²⁰⁾ と対数分布則 ($n=0.015 \sim 0.045 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$) の結果を図示している。これより、安芸式の場合には、観測データは上層では $a=0$ か 0.1 、下層では $a=0.1$ か 0.2 の理論値と類似したパターンとなっているが、水深全体にわたりよく適合する流速ピークの相対水深 a は存在しない。それに対して、4 種類の Manning の粗度係数 n を設定した対数分布則の場合には、全河川の観測データは水深全体にわたり理論値と概ね一致しており、特に $n=0.025 \sim 0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の理論値の適合度が高い。このように、流速鉛直分布に関する観測平均値は、安芸式よりも対数分布則との一致度合いが高いことが確認された。

修正係数の観測値に対する理論値の整合性を検討するために、各水深における修正係数の観測値と理論値を図-6 に示す。ここでは多くの観測データが収集された表層

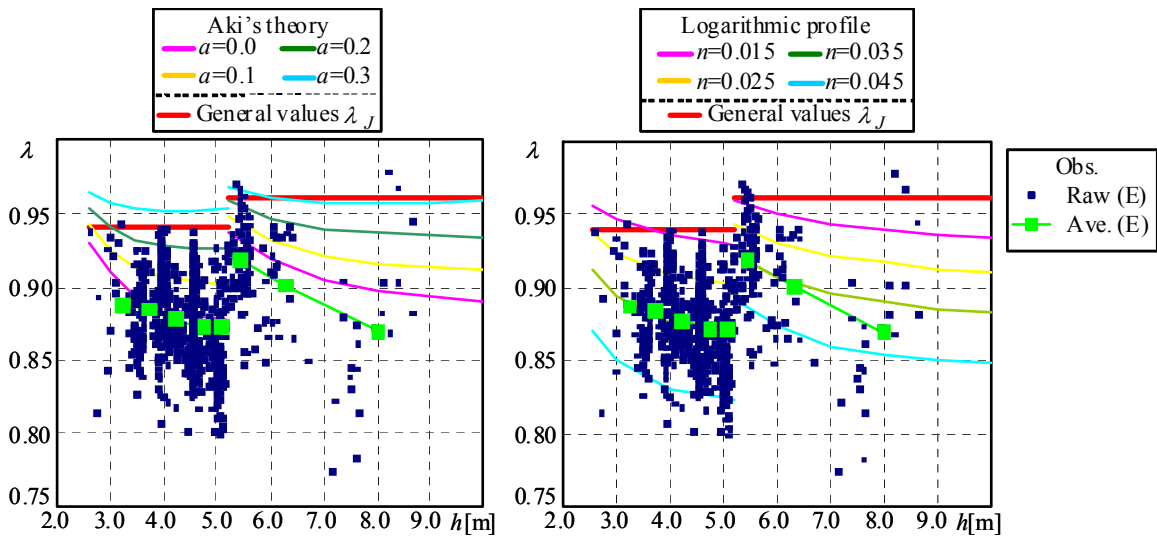


図-6 表層 2m 及び表層 4m 流速に対する更正係数の観測値と標準値 λ_J 、理論値の比較 (理論値として安芸式 (左図, n 一定) と対数分布則 (右図) を示す. 観測値としては江戸川における生データと移動平均値を示す)

2m・4m 流速の更正係数を対象とし、水深 $h=2.6\sim 5.2\text{m}$ と $5.2\sim 10\text{m}$ においてそれぞれ表層 2m, 4m 流速の更正係数を表示している. 理論値としては、安芸式 ($n=0.0325\text{m}^{-1/3}\text{s}$, $a=0\sim 0.3$) と対数分布則 ($n=0.015\sim 0.045\text{m}^{-1/3}\text{s}$) の結果を図示している. また、観測値としては、生データに加えて、水深 $0.2\sim 0.5\text{m}$ 毎に適当に区分けされた範囲における更正係数の移動平均値を表示し (対象: 江戸川のみ)、我が国の標準値 λ_J も合わせて図示している. これより、観測データの移動平均値は我が国の標準値を下回っており、その差は水深と共に広がる. 例えば標準値が 0.96 である表層 4m 流速の更正係数に関しては、移動平均値は $0.87\sim 0.92$ となり、標準値 λ_J を $0.04\sim 0.10$ も下回る. 理論値と観測値を比べると、流速鉛直分布と同様に、安芸式よりも対数分布則の方が観測値と一致している様子が分かる. このように、浮子流量観測において用いられる更正係数にはある一定の誤差が含まれている.

(3) 浮子観測の流量推定法の検討

浮子観測における流量推定手順に着目し、流速鉛直分布 (更正係数) と流速横断分布の扱いについて検討した. 前者の更正係数については、前節で述べたとおり、我が国の標準値 (浮子長 2m, 4m の場合各々 0.94, 0.96) は ADCP による観測値を上回っている. ここでは簡易に更正係数を設定するために、実測値の平均値として、浮子長 2m には 0.87, 浮子長 4m には 0.90 の更正係数を与えた. 一方、流速横断分布については、横断面内の測定点数が不十分な浮子データは、横断方向に大きく変化する流速分布を正確に計測できず、流量の推定誤差が増加するものと考えられる. そこで、疎らな観測点における流速データを力学条件を満たした形で内挿し、精度良く流速横断分布や流量を推定することが可能な平面二次元河川流解析法

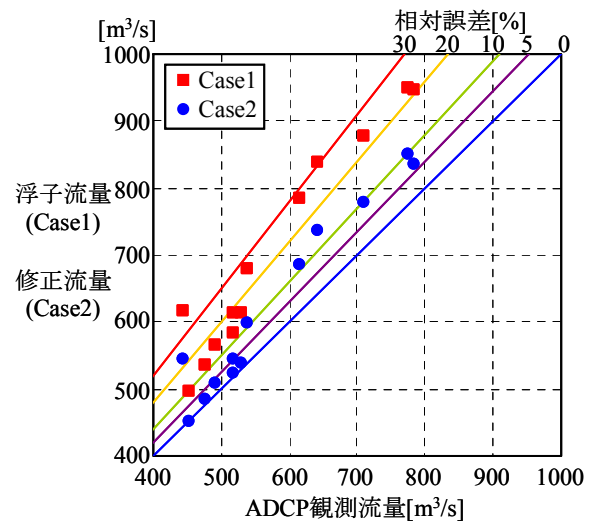


図-7 浮子流量 (Case1) と修正流量 (Case2) 及び ADCP 観測流量に関する相関図

である力学的内挿法^{7,8)}を導入する. 本節では、浮子観測データを用いてこれまでの流量推定手順による結果 (浮子流量, Case1) に加えて、ここで示した力学的内挿法と更正係数の実測値を用いて浮子観測データを修正して得られた結果 (修正流量, Case2) について、ADCP 移動観測結果と比較する.

Case1 と 2 における流量推定精度を定量的に検証するために、浮子流量 (Case1) 及び修正流量 (Case2) と ADCP による流量観測結果の相関図を図-7 に示す. 図中には、ADCP 観測値に対して 5, 10, 20, 30% の誤差に相当する直線を引いている. これより、浮子流量 (Case1) については、ADCP 観測結果とのずれが大きく、誤差 10~30% あたりに分布している. 一方、修正流量 (Case2) に関しては、浮子流量 (Case1) よりも誤差が減少し、誤差 10% の直線周囲に分布している. 両ケースにおける相対誤差

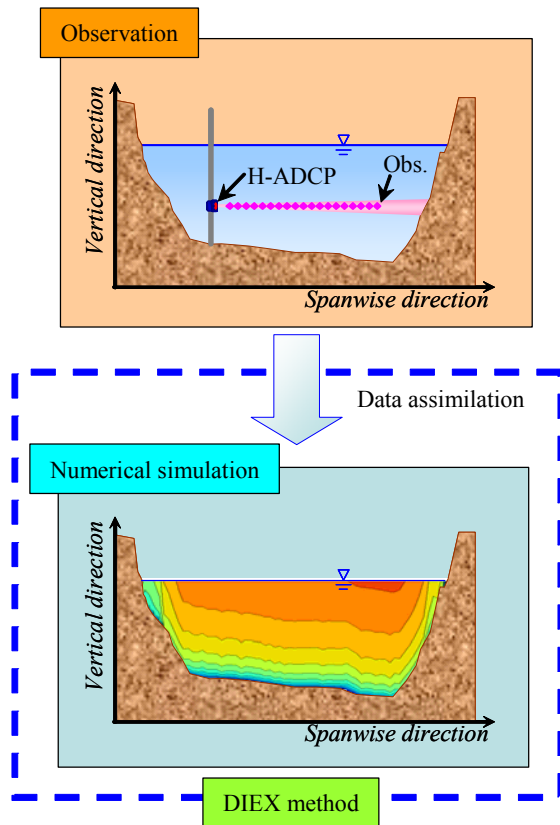


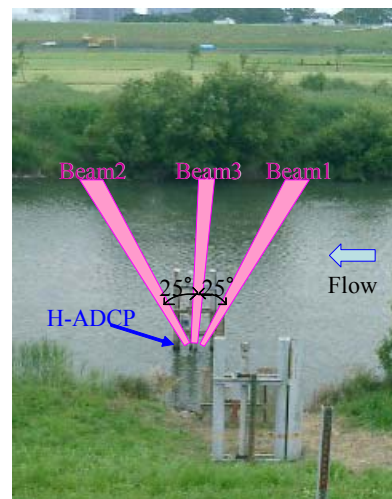
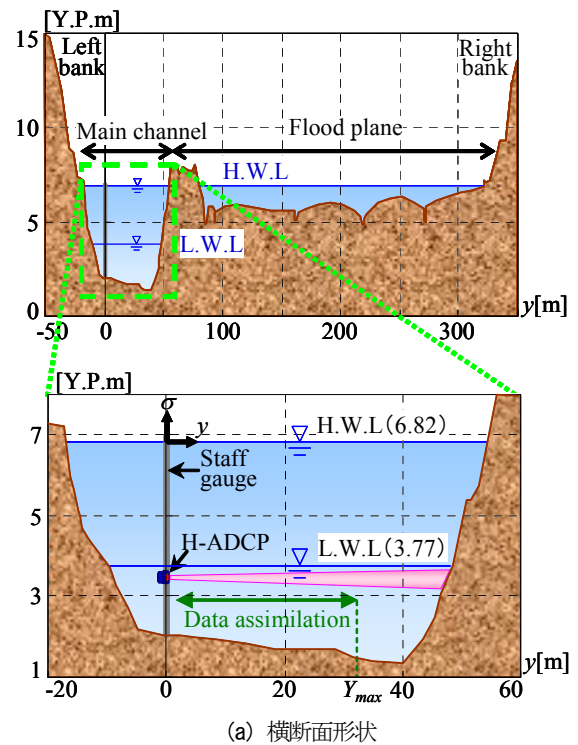
図-8 本流量モニタリング手法の基本構成

の平均値は Case1 で 20.9%、Case2 は 7.5% となり、ここで示している二つの修正点を加えることにより 13.4% の誤差を低減していることが分かる。この内訳としては、更正係数の実測値を用いたことによる効果は約 7% であり、力学的内挿法による流速横断分布の修正による効果が約 6% である。浮子流量観測における流量計測精度を向上させる上では、更正係数の実測値導入と力学的内挿法による流速横断分布の推定は有用であることが示された。

5. H-ADCPによる新しい流量連続モニタリングシステムの構築^{9, 10)}

(1) 概要

上記の ADCP 観測や浮子観測は、現地河川に出掛けて行う「単発観測」であり、これらのデータから $H-Q$ 式を作成し、流量の連続データをモニタリングしている。このような「間接」流量観測法では適用精度や範囲に限界があるので、近年著しく発展している流速計測技術に基づく「直接」流量モニタリング手法の開発が求められるが、現状で横断面全体の流速分布計測を可能とする測定器は存在しない。そこで、流速計測技術を生かしつつ、適切な方法により観測値を補間する「準直接」流量モニタリング技術の開発が強く求められている。そこで、わずか一台で流速横断分布計測が可能な水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP (Teledyne RDI 製) による



(b) 様子

図-9 H-ADCP の設置状況 (江戸川・野田橋)

観測技術と最新の河川流シミュレーション技術を融合して、低コストで高精度な自動流量モニタリングシステムを新たに開発した。ここでは、図-8に示すように、H-ADCPにより流速横断分布を計測して、得られた流速の「線」データを取り込んだ河川流シミュレーションを行い、流速の「面」データや流量を算定する。データ同化手法を組み込んだ河川流モデルとして、流体力学条件を満たした上で横断面内における流速の内外挿操作を実施する力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, 以下、DIEX 法と呼ぶ) を開発した。この H-ADCP 600kHz を江戸川・野田橋付近に 2005 年から設置している。設置の様子は図-9 のとおりである。

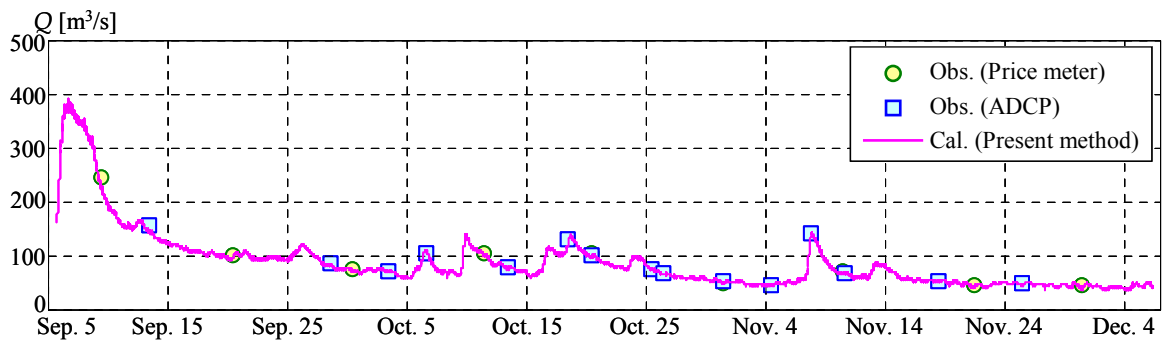


図-10 全観測期間中における流量の時系列変化

(2) 結果

本手法による流量推定精度を検証するために、ある観測期間中における流量の時系列変化を図-10に示す。ここでは、DIEX法による計算結果とプライス流速計及びADCPによる観測結果をそれぞれ図示している。これを見ると、本手法による流量推定値はプライス流速計やADCPによる流量の実測値と良好に一致している様子がうかがえる。本手法による流量の算定精度をより詳細に検討するために、流量の観測結果 Q_{obs} と計算結果 Q_{cal} の相関図を図-11に示す。ここでは、DIEX法による計算結果に加えて、単純法（観測データを直線で補間する手法）による推定結果も図示する。図中には流量推定値の誤差が分かるようにするために、誤差0、 $\pm 10\%$ に相当する直線（実線、点線）も表示している。これを見ると、DIEX法の計算結果は観測値と類似しており、全て誤差 $\pm 10\%$ 以内となっている。それに対して、単純法による計算結果は、DIEX法の結果よりも観測値との差が大きく、 $\pm 10\%$ の誤差を上回る結果が多く見られる。また、単純法の流量推定値は全体的に観測値よりも小さい。これは流速の内外挿を行う部分において流速を過小評価しているためである。このように、DIEX法は流量を精度良く推定しており、その相対誤差のRMS値は4%以下となり、力学条件を考慮しない単純法の場合よりも十分低く、本流量モニタリング手法の有効性が示された。なお、ここでは、低水時のデータのみ示したが、出水時や感潮域においてもほぼ同様な結果を得ており、本システムの汎用性・適用性は幅広いものと考えている^{21, 22}。

6. おわりに

本報では、河川では比較的少なかったADCPによる流量観測を始めた経緯や観測方法、計測精度について示した。また、そのADCPデータを基準として、浮子観測法の計測精度やその改善策を提示するとともに、H-ADCP計測技術と数値解析技術を融合した新しい流量連続モニタリングシステムを構築した結果の一例を紹介した。

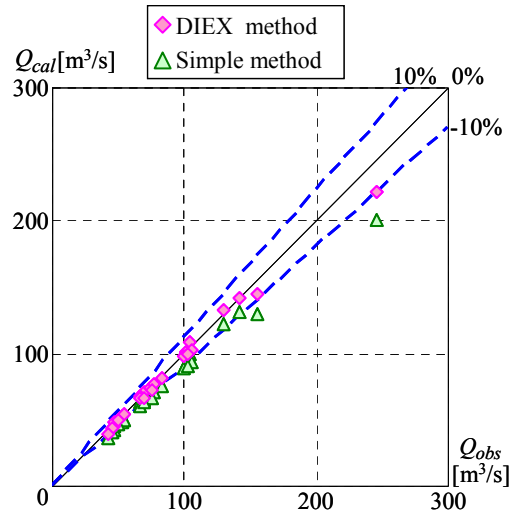


図-11 流量の観測結果 Q_{obs} と計算結果 Q_{cal} の比較（図中の実線、点線は推定結果の誤差0、 $\pm 10\%$ を示す）

昨年度より国土交通省ではADCPによる流量観測法導入の検討を本格的に開始しており、筆者が研究を始めた時と比べると隔世の感がある。河川流量データは、河川管理上の最重要データの一つであり、品質管理は極めて重要である。そのため、より慎重な流量データ管理を行う必要があり、過去からの連続性に縛られ最新の計測技術の導入が見送られるのは問題がある。その点、我が国における最近のADCP観測法導入の動きは画期的なものであると考えられる。また、筆者の流量研究も、細々とではあるが続けるつもりであり、国内外の流量観測技術発展の一助となるような研究成果を上げられるように鋭意努力する予定である。

なお、本報で紹介した研究成果は、関係する河川管理者の皆様からの観測実施への協力やデータ提供をして頂いたおかげである。また、大変な観測作業や膨大なデータ整理には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の卒業生の惜しみないご協力のおかげである。特に、故木水啓氏、酒井雄弘氏、原田靖生氏、色川有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) 二瓶泰雄：新しい計算手法に基づく混相乱流LESの開発と

複雑混相乱流解析への応用, 東京工業大学学位論文, pp.1-185, 1999.

田川を例として～, 水工学論文集, Vol.52, pp.943-948, 2008.

- 2) 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.
- 3) Lipscomb, S. W.: Quality assurance plan for discharge measurements using broadband acoustic Doppler current profilers, U. S. Geological Survey Open-File Report 95-701, 1995.
- 4) Mueller, D. S.: Field assessment of acoustic-Doppler based discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 5) Oberg, K.: In search of easy-to-use methods for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
- 6) 佐藤慶太・二瓶泰雄・木水啓・飯田裕介: 洪水観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用 ～江戸川を例にして～, 土木学会水工学論文集, Vol.48, No.1, pp.763-768, 2004.
- 7) 二瓶泰雄, 木水啓: 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集 Vol.803/II-73, pp.155-160, 2005.
- 8) Yasuo Nihei and Akira Kimizu: Evaluation of River Velocity and Discharge with A New Assimilated Method, *Journal of River Basin Management*, Vol.4, No.1, pp.27-30, 2006.
- 9) 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 B, Vol.64, No.4, pp.295-310, 2007.
- 10) 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.
- 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.
- 12) 山口高志: 洪水流速および流量観測 ―その1―, 水文・水資源学会誌, Vol.15, No.6, pp.625-635, 2002.
- 13) 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.
- 14) 神田学: 学術賞を受賞して, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.2, pp.117, 2004.
- 15) 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.
- 16) 今村仁紀, 深見和彦, 天羽淳: 河川における低水流量観測技術基準の再評価, 土木技術資料, Vol.48, No.1, pp.66-71, 2006.
- 17) 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, Vol.51, pp.733-738, 2007.
- 18) 二瓶泰雄, 酒井雄弘: 実河川洪水流における浮子の更正係数, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.104-118, 2010.
- 19) 原田靖生・二瓶泰雄・酒井雄弘・木水啓: 浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.1081-1086, 2007.
- 20) 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.
- 21) 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観測への適用, 水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 22) 原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝: H-ADCP 計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング ～隅

(2010. 7. 20 受付)