

ADCP を用いた中小河川の流量計測法に関する検討

RIVER-DISCHARGE MONITORING IN A SMALL RIVER WITH AN ADCP

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 examine the accuracy of discharge measurements in small rivers, we have conducted continuous monitoring of flood flows in a small river with a bottom-mounted ADCP. The observed data indicates that the vertical distribution of the velocity varied considerably in the rising and falling stages of the hydrologic event, in which the unsteadiness parameter α and H.W.L. were relatively larger. It should be noted from the observed data that the averaged coefficients of float are in good agreements with well-known empirical values, while the coefficients of float varied appreciably in each hydrologic event. We also examine the accuracy for evaluating river discharge by using the rating curves with H - Q and V - Q , showing that the rating curves with H - Q and V - Q are appropriate for the evaluation of discharge in the upper and lower reaches of the small river, respectively.

Key Words: discharge, ADCP, small river, rating curve, index-velocity method

1. はじめに

河川計画の策定や河道管理においては, 流量の実測データは最も基礎的な資料の一つとなる。流量の観測方法としては, 洪水時には, 浮子を用いた調査方法が実施されることが多い^{1), 2)}。そこで得られた流量 Q と水位 H の関係 (H - Q 式) に基づいて, 水位観測所における水位データから流量データに換算して流量が得られている³⁾。

このような流量観測は, 浮子観測や H - Q 式の精度に疑問が残るものの^{1), 4), 5)}, 現在, 多くの大河川で実施されており, 多数の自動水位観測所が整備されている。しかしながら, 近年, 豪雨災害が頻発している中小河川では, 水位観測体制は十分整備されていないのが現状である。中小河川は, 大河川と比べて, アスペクト比 (=水路幅/水深) が小さく, その上, 急激な出水が起こるなど流れの非定常性が顕著となることが多い。そのため, 大河川において蓄積されてきた流量調査法をそのまま中小河川での流量計測に適用できるかどうか疑問である¹⁾。

本研究では, 中小河川における流量計測・評価法について検討するために, 超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) を用いて, 中小河川における洪水流に関する連続調査を実施した。ADCP は流速の鉛直分布構造を計測できる機器であり, 既に海洋や沿岸海域における流速計測のスタンダードとなっており^{6), 7)}, 河川洪水流計測にも適用されている^{8), 9)}。最近では, 鉛直分解能 1cm と

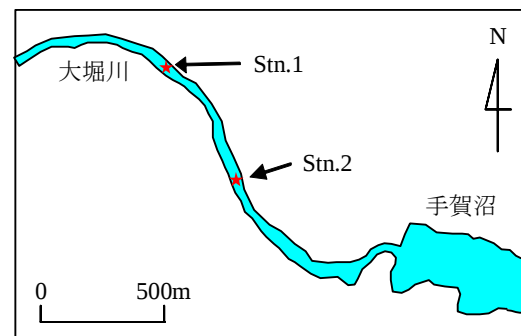


図 - 1 大堀川と観測地点

いう高解像度 ADCP も市販され, 中小都市河川における洪水流観測に適用されている¹⁰⁾。

本論文では, 富栄養化湖沼として有名な千葉県手賀沼への主要流入河川である大堀川下流域を観測サイトとし, 計 5 回の洪水イベントにおける流速鉛直構造を計測した。その観測データを用いて, 1) 洪水時における流速鉛直構造特性を明らかにし, 2) 表層流速から水深平均流速へ変換するための更正係数を算定する。さらに, 3) 流量評価に用いられている H - Q 式や, 流速 V と流量 Q の相関式¹¹⁾ (V - Q 式) による流量推定精度を検討する。

2. 現地調査の概要

現地観測は, 図 - 1 に示すように, 大堀川下流域の 2

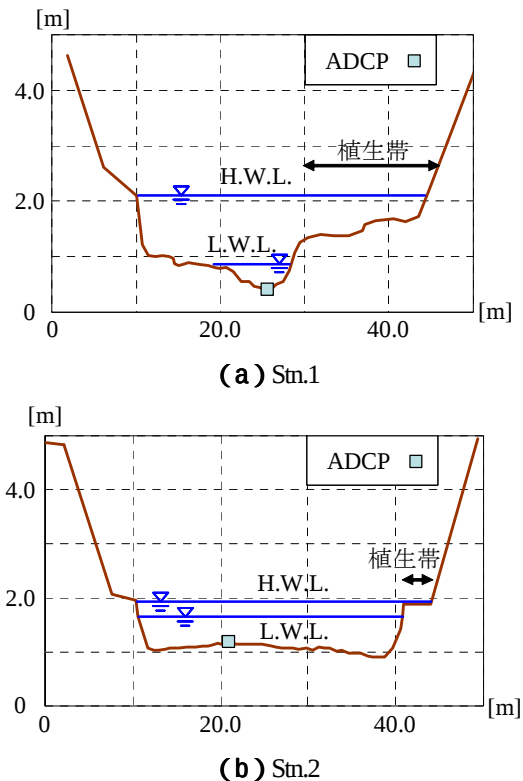


図 - 2 各地点の横断面図と ADCP の設置位置

地点 (Stns.1 と 2) において実施された。この Stns.1 と 2 は大堀川と手賀沼の接続点より上流 1.5km と 0.9km に各々位置し、両地点ともに手賀沼の水位変化の影響を受けるが、その影響は Stn.2 のほうが大きい。各地点の横断面図と ADCP の設置場所を図 - 2 に示す。両断面ともに複断面形状になっているが、Stn.2 の断面では高水敷幅が低水路幅と比べて非常に小さく単断面に近い形である。また、高水敷上では、両断面ともに植生が繁茂している。

この観測では、ADCP として WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz (RD 社製) を用いており、センサーを上向きにして河床に埋め込む形で設置した。計測モードとしては、鉛直分解能 2cm、層数 150、サンプリング間隔 5 分、流速の測定誤差の標準偏差は 2.42cm/s である。河床面から ADCP センサー面までの高さは約 15cm、また、そのセンサー面から計測を行う第一層までの領域 (不感帯) は 14cm であるので、河床面から約 30cm の高さまでは計測できていない。また、水位データを得るために、自記式水位計 (Diver, Eijkelkamp 社製) を用いて、5 分もしくは 10 分間隔で水位を計測した。

観測期間としては、Stn.1 においては、2004 年 5 月 19 日～25 日、6 月 2 日～14 日、11 月 8 日～17 日とした。また、Stn.2 では、2005 年 6 月 2 日～2005 年 7 月 28 日のほぼ 2 ヶ月間とした。これらの期間の中で、合計 5 回の洪水イベント (イベント A～E) のデータを取得した。それらの洪水イベントの概況を表 - 1 に示しており、イベント A (04/5/20-21)、B (04/6/11-12)、C (04/11/12)、

表 - 1 各洪水イベントの概況

Event		T_d [s]	Δh [m]	U_c [m/s]	α
A	増水期	14100	0.938	0.748	8.9×10^{-5}
	減水期	37800	0.815	0.612	3.5×10^{-5}
B	増水期	7200	0.248	0.497	6.9×10^{-5}
	減水期	15600	0.246	0.455	3.5×10^{-5}
C-1	増水期	6900	0.335	0.552	8.8×10^{-5}
	減水期	6300	0.171	0.677	4.0×10^{-5}
C-2	増水期	13500	0.363	0.697	3.9×10^{-5}
	減水期	29100	0.513	0.638	2.8×10^{-5}
D	増水期	20700	0.681	0.609	5.4×10^{-5}
	減水期	20100	0.557	0.682	4.1×10^{-5}
E	増水期	10500	0.217	0.446	4.6×10^{-5}
	減水期	10500	0.129	0.455	2.7×10^{-5}

D (04/11/15) は Stn.1 にて、イベント E (05/7/3-4) は Stn.2 において計測された。表中には、次式により定義される非定常パラメータ α ¹²⁾ が示されている。

$$\alpha = \frac{\Delta h}{T_d} \frac{1}{U_c} \quad (1)$$

ここで、 Δh は洪水ピーク時と洪水前 (後) の水位差、 T_d は洪水開始から水位ピーク (または水位ピークから洪水終了) までの時間を表す。また、 U_c は平常時と洪水ピーク時における水深平均流速の平均値である。表中では、これらの水理量やパラメータを増水期と減水期に分けて表示している。なお、イベント C は二峰性の洪水イベントであったので、それらを分けて、C-1、C-2 として表中に示している。

3. 洪水流の鉛直構造

(1) 主流方向流速の鉛直分布

非定常性が顕著となる中小河川における洪水流の流速鉛直構造を見るために、Stn.1 で計測されたイベント A とイベント D における主流方向流速の鉛直分布を図 - 3 に示す。ここでは、増水期と減水期における結果を比較するために、同じ洪水イベントで同一の水深となる時間帯の結果を合わせて表示する。図中の横軸は、主流方向流速 u をそこでの水深平均流速 $\bar{U}$ で無次元化したものである。この水深平均流速を算出するには、底層付近における欠測データを何らかの形で推定する必要がある。そこで、観測値に対して近似曲線 ($u = az^b$, z : 河床面からの高さ、 a, b : 係数) を最小二乗法により算出し、それをデータが欠測している底層データとして与える。なお、この近似曲線の相関係数は概ね良好であることから ($r > 0.70$)、この方法により底層部分の欠測データは問題なく推定されているものと考えられる。

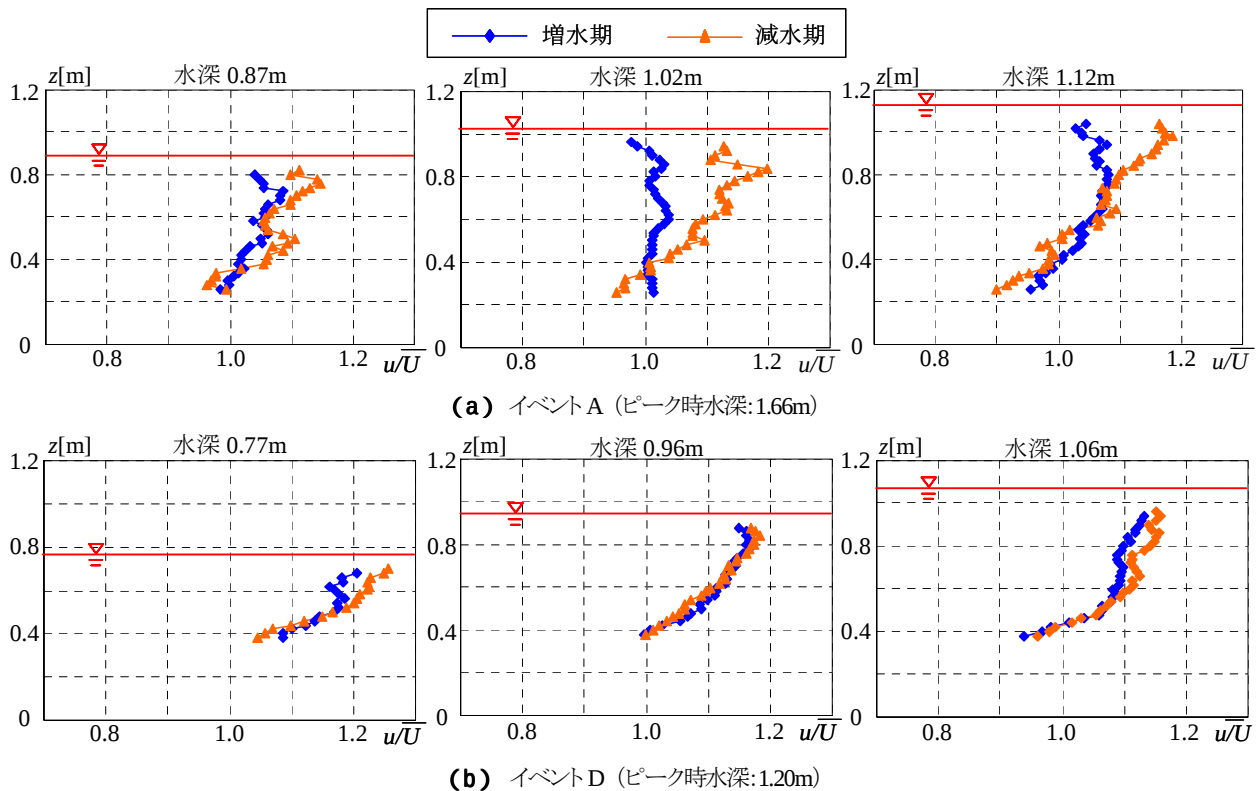


図 - 3 イベント A, D における増水期と減水期の流速鉛直分布 (z : 河床面からの高さ)

図 - 3 中のイベント A の結果に着目する．水深が 0.87m のときには，増水期と減水期における流速分布はほとんど一致している．しかしながら，水深が大きくなると（水深 1.02m, 1.12m），増水期においては流速分布が切り立って，鉛直方向に一樣化する傾向があるのに対して，減水期では流速分布は鉛直方向に傾いた分布形となっている．このように，同一水位（水深）においても，増水期と減水期とでは，主流方向流速の鉛直分布が大きく異なることが分かる．次に，イベント D の結果に注目すると，3 つの水深ともに，増水期と減水期の流速分布形状は概ね類似しており，イベント A とは大きく異なる結果であることが分かる．

このような増水期と減水期における流速鉛直構造に明確な違いが現れたのはイベント A のみであり，他のイベントにおいては，イベント D と同様に増水期と減水期における流速鉛直構造の差は見られなかった．イベント A では，表 - 1 より，増水期における非定常パラメータ α が大きく，また水位差 Δh が大きく水位ピーク付近では高水敷は冠水している．このように非定常性が大きく，高水敷が冠水するほど水位上昇が見られたときに，増水期と減水期の流速鉛直構造は異なるものと推測されるが，今後，より多くの洪水イベントにおける ADCP 調査を行い，詳細に検討していく必要がある．なお，イベント A における非定常パラメータ α は 8.8×10^{-5} であり，室内実験結果から弱い非定常流と見なせるが¹²⁾，本観測結果では，室内実験では見られない増水期と減水期の流速鉛直

構造の違いが現れていることに注意されたい．

(2) 更正係数

通常，流量調査を行う際には，棒状の浮子や表面浮きを用いて，表層流速を計測し，それに更正係数を掛けて水深平均流速に変換している．この ADCP データでは流速鉛直分布を計測しているので，これまで用いられている更正係数を検証することが可能となる．一般的に，流量観測では，水深が 0.7m 以下の時には表面うきが，水深が 0.7m ~ 1.3m の時には 0.5m の棒浮子が推奨されている^{2), 3)}．これらのことを考慮して，図 - 4 は，図 - 3 と同じイベント A と D における 2 種類の表層流速と水深平均流速の相関図について，増水期と減水期に分けた形で示している．ここでの 2 つの表層流速としては，水面下 15 ~ 25cm 流速の平均値（表層 25cm 流速）と水面下 15 ~ 50cm 流速の平均値（表層 50cm 流速）としており，前者が表面うき，後者が 0.5m の棒浮子の更正係数を念頭に置いている．なお，本来，水面直下のデータも用いて表層流速の算出を行うべきであるが，ADCP では水面のごく近傍（厚さ $0.06d$ ， d : ADCP センサー面から水面までの高さ）では原理的に測定できないため，ここでは解析には使用していない．

まず，イベント A における表層流速と水深平均流速の相関図を見ると，同一の表層流速においては増水期の水深平均流速の方が減水期の結果を上回る，ということが表層 25cm, 50cm 流速ともに見られる．これは，図 - 3

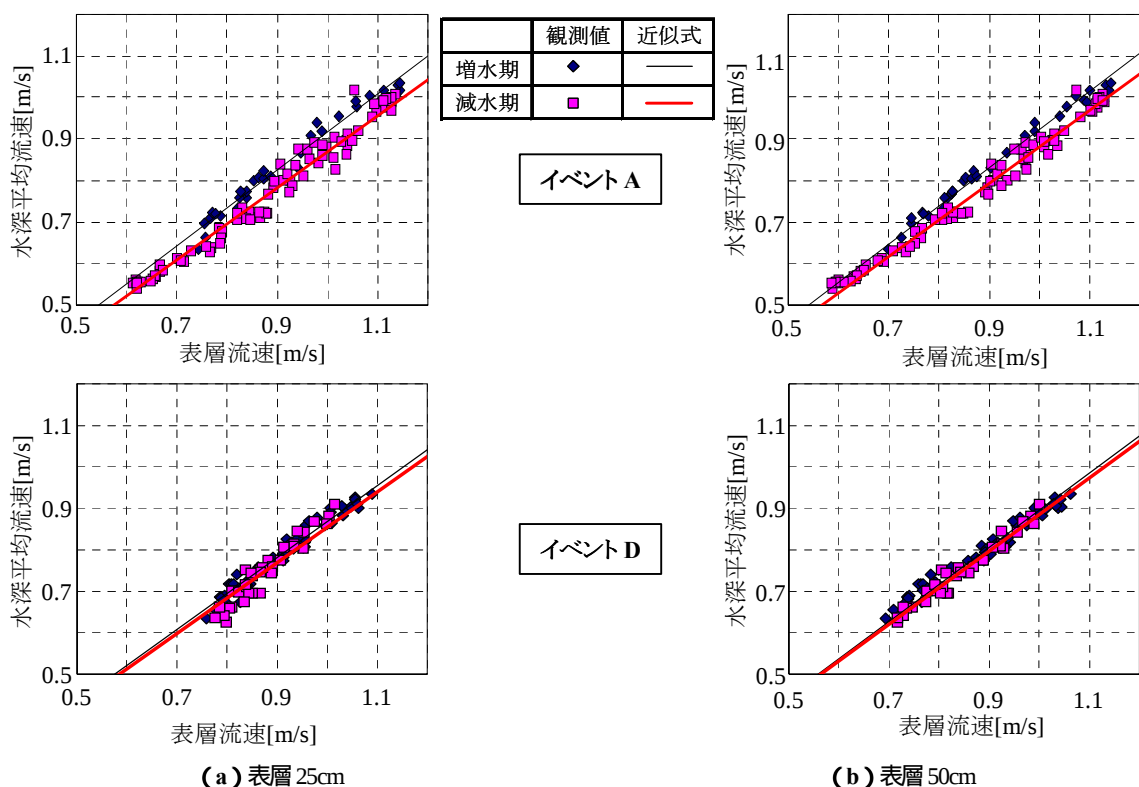


図 - 4 イベント A と D における表層平均流速と水深平均流速の比較

表 - 2 各洪水イベント及び全期間における更正係数

Event	表層25cm		表層50cm	
	増水期	減水期	増水期	減水期
A	0.916	0.867	0.925	0.883
B	0.746	0.759	0.779	0.778
C	0.826	0.811	0.876	0.878
D	0.866	0.851	0.900	0.883
E	0.812	0.805	0.902	0.885
全体	0.830		0.874	

に示しているように、イベント A では、増水期と減水期において流速鉛直構造が大きく異なり、増水期の方が相対的に鉛直方向に様な流速分布となっているためである。一方、イベント D については、イベント A で見られるような増水期と減水期の相関関係の違いは見られない。これも、図 - 3 の流速鉛直分布の結果と対応している。

このような表層流速と水深平均流速の相関関係に対して近似直線を適用し、得られた結果を図 - 4 中に図示している。また、ここで得られた近似直線の傾きは更正係数（＝水深平均流速 / 表層流速）に相当しているので、その結果をまとめたものを表 - 2 に示す。この表から増水期と減水期の更正係数を比べると、イベント A のみ 0.04 ~ 0.05 という大きな違いが見られるが、他のイベントでは 0.01 程度のわずかな差が生じていない。これらは前述した議論と一致している。更正係数の大きさとし

ては、表層 25cm 流速の場合には 0.75 ~ 0.92、表層 50cm 流速の場合には、0.78 ~ 0.93 と幅広く分布している。また、全データに対する平均値は、表層 25cm 流速では 0.830、表層 50cm 流速では 0.874 となっている。川幅の効果を考慮しない場合、一般的な更正係数としては、表面うきの場合 0.85、0.5m の棒浮子には 0.88 が推奨されている³⁾。本観測結果の平均値は、更正係数の推奨値と概ね一致している。しかしながら、同一河川においても洪水イベント毎に大きく更正係数が変化することや増水期と減水期とで更正係数が変化していることが明らかとなった。

4. H-Q 式と V-Q 式の流量算定精度の検討

(1) 流量の算定手順

前述した ADCP データを用いて、流量評価に用いられる H-Q 式及び V-Q 式の流量推定精度を調べる。H-Q 式及び V-Q 式において必要な流量 Q の算定手順を述べる。本調査では、ADCP により横断面内で一地点の水深平均流速しか計測していないため、流量を算出するには、横断面内の流速分布を何らかの形で取得する必要がある。そこで、流体運動の力学条件を満たした形で流速データを内・外挿することが可能な力学的内挿法¹³⁾を用いて、一地点の流速データから横断面全体の流速分布を取得し、それから流量を算出している。この力学的内挿法を用いて、横断面内の地形データと時々刻々変化する水位及び

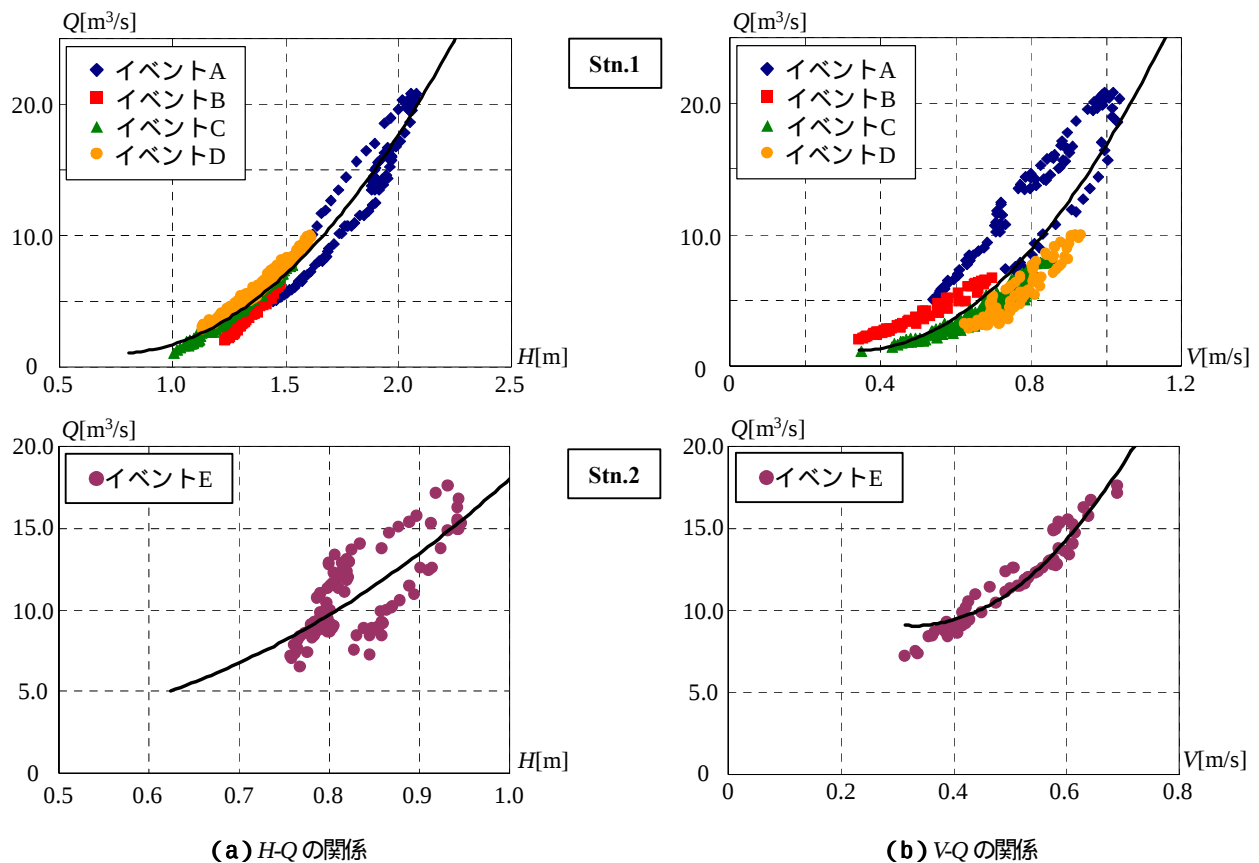


図 - 5 Stn.1 と Stn.2 における H - Q 及び V - Q の相関関係

水深平均流速データを用いて、流量の時系列データを作成している。

(2) H - Q 関係と V - Q 関係

水位 H と流量 Q 及び流速 V と流量 Q の相関性を調べるために、Stn.1 と Stn.2 の両地点において、 H - Q 及び V - Q の相関関係を図 - 5 に示す。ここでは、Stn.1 ではイベント A, B, C, D に関する結果、Stn.2 ではイベント E の結果がそれぞれ図示されている。また、 V - Q 関係における流速としては、水深平均流速を用いる。なお、図中には、各地点における全データに対する近似曲線も合わせて図示している。

これを見ると、まず、Stn.1 に関しては、 H - Q 関係と V - Q 関係ともに、中小河川特有のループを描いているが、そのループは V - Q 関係のほうが大きい。また、4 つのイベント間のばらつきも両者にはある程度存在するが、そのばらつき方も V - Q 関係の方が顕著である。一方、Stn.2 においては、Stn.1 とは逆に、 H - Q 関係のループの方が V - Q 関係のループよりも大きいことが分かる。洪水時における水位変化量としては、Stn.1 のほうが、沼水位の影響が強い Stn.2 よりも大きいため、Stn.2 では同一の水位 H に対して、流量 Q の差が大きくなったものと推察される。また Stn.2 では水位変化が小さいために、流速と流

量のループは Stn.1 と比べて小さくなっている。

(3) 流量算定結果

このような H - Q 関係と V - Q 関係に基づいて、流量を算定する。ここでは、図 - 5 により得られた地点毎の H - Q 式と V - Q 式を適用し、両地点における流量を算定することを試みた。表 - 3 は各イベントにおける累積流量の実測値と、 H - Q 式と V - Q 式による流量の算定結果をまとめている。ここでも、各洪水イベントを増水期と減水期、全体と分類して表記している。また、2 つの方法による算定結果は実測値により基準化されている。イベント全体を見ると、Stn.1 で計測されたイベント A ~ D における H - Q 式の評価精度は 89% ~ 124% となるのに対して、 V - Q 式では評価精度は 67% ~ 143% と大きくばらついていることが分かる。これは、図 - 5 に示すように、 V - Q の相関関係のばらつきが H - Q 関係よりも顕著であったことに対応しており、Stn.1 のような上流域では V - Q 式による流量推定は適していない。

また、イベント全体と増水期、減水期の評価精度を比べると、イベント全体よりも増水期と減水期のどちらかは必ず評価精度が低下していることが分かる。これは、図 - 5 (a) に示しているように、 H - Q 関係が一洪水中にループを描くためであり、当然の結果である。このよ

表 - 3 累積流量の実測値及びH-Q式とV-Q式による算定値

Event		実測値	割合[%]	
		$\times 10^4 [\text{m}^3]$	H-Q 式	V-Q 式
A	全体	43.6	101.5	78.8
	増水期	13.3	88.9	103.7
	減水期	30.3	107.0	67.9
B	全体	7.7	123.6	67.1
	増水期	3.2	115.3	75.4
	減水期	4.5	129.4	61.3
C	全体	21.0	96.6	123.9
	増水期	10.2	93.6	130.4
	減水期	10.8	99.3	117.7
D	全体	15.7	88.9	142.6
	増水期	9.3	86.1	151.9
	減水期	6.4	93.0	129.1
E	全体	34.1	100.0	103.7
	増水期	17.4	93.1	104.6
	減水期	16.7	107.1	102.8

うに、洪水イベント全体の総流量評価にはH-Q式はある程度の信頼性はあるものの、増水期や減水期における時々刻々の流量評価に着目するとその信頼性は低下する。この推定誤差は、陸域負荷量（汚濁負荷量）や物質輸送量の評価に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

一方、Stn.2においては、Stn.1の場合とは逆に、H-Q式よりもV-Q式における推定精度が高いことが分かる。これは、図-5の結果と良好に対応している。以上の結果より、湖沼の水位変化の影響を大きく受ける、今回のStn.2のような地点では、流量算定にはH-Q式よりもV-Q式が適していることが示唆された。

5. まとめ

ADCPを用いて中小河川における洪水流調査を行い、その結果に基づいて、中小河川における流量計測法に関する検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

1) 観測を行った5つの洪水イベントのうち、相対的に非定常性が強く、水位変化が最も大きいイベントAでは、増水期と減水期において、流速の鉛直分布特性が大きく異なることが示された。また、このイベントでは、更正係数も増水期と減水期とでは0.05程度の差が生じることが示された。

2) 5つの洪水イベントに対して更正係数を算出したところ、全データに対する平均値としては、表層25cm流速では0.830、表層50cm流速では0.874となり、一般的に使われている更正係数と一致した。しかしながら、洪水イベント毎に更正係数を求めたところ、表層25cm流

速では0.75~0.92、表層50cm流速では0.78~0.93と非常に幅広く変化していることが示された。

3) 湖沼の水位変化の影響の少ない上流側での流量評価にはH-Q式が適しているのに対して、下流側ではV-Q式が適していることが示された。また、H-Q式やV-Q式により流量の時間変化を正確に再現することは難しい。

なお、この流量誤差は陸域環境負荷評価の精度を大きく低下させる可能性が高く、今後詳細に検討する。

謝辞：本調査を行う際には、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。また、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(研究代表者：二瓶泰雄)、(財)河川環境管理財団・河川整備基金助成事業(研究代表者：二瓶泰雄)、文部科学省・私学学術フロンティア(2005)によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集 [平成11年度版]、丸善、pp.75-86、1999。
- 2) (社)中部建設協会：絵で見る水文観測、水谷印刷、pp.175-199、2001。
- 3) 吉川秀夫：河川工学、朝倉書店、pp.23-31、1980。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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.
- 7) 金子新、伊東集通：ADCPの普及と海洋学の発展、海の研究、Vol.3、pp.359-372、1994。
- 8) 木下良作：無人ラジコンボートによる洪水流観測、ACVの研究、Vol.28、No.1、1998。
- 9) 佐藤慶太、二瓶泰雄、木水啓、飯田裕介：洪水流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～、水工学論文集、Vol.48、pp.763-768、2004。
- 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、Vol.49、pp.631-636、2005。
- 11) Huang, H.: Index-velocity rating development for rapidly changing flows in an irrigation canal using broadband StreamPro ADCP and ChannelMaster H-ADCP, *Proc. of River'04*, pp.146-154, 2004.
- 12) Nezu, I., Kadota, A., Nakagawa, H.: *J. Hydraul. Eng.*, Vol.123, No.9, pp.752-763, 1997。
- 13) 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 / -73, pp.155-160、2005。

(2005.9.30 受付)