

## ◆ 観測技術特集 ◆

## ラジコンボートを用いたADCPによる流量観測システムの開発

松浦達郎\* 金木 誠\*\* 吉谷純一\*\*\*

## 1. まえがき

ADCPとは、Acoustic Doppler Current Profiler(超音波ドップラーフロー流速プロファイラー)の略称で、その名が示すとおり、超音波のドップラーエフェクトを利用した流速計である。ADCPは浮子や回転式流速計といった従来の方法と比較すると、極めて短時間のうちに水深方向の3次元流向・流速分布を測定することができる。さらに近年開発された無人ラジコンボート(Radio-Controlled Boat: RCボート)にADCPを搭載し、河川を横断させながら計測を行うことによって、横断面内の流速分布及び流量を短時間で計測することができる。

本報文では、RCボートにADCPを搭載した流量観測システムの開発と、さらにその適用性検討のために行った実河川における流量観測について報告する。

## 2. ADCPの計測原理

ADCPは、超音波パルスを発射し、そのドップラーエフェクトを利用することによって、1台で観測地点での流速を水深方向の層毎に計測することができる機器である。図-1のように、超音波の送受波機 $T_1, T_2$ から水中へある特定の周波数 $f_0$ の超音波を発射すると、散乱体(プランクトンや浮遊砂等) $S_1, S_2$ からの反射波が計測される。この反射波は、ドップラーエフェクトによって発射時の周波数 $f_0$ とは異なる周波数 $f_1, f_2$ になって戻ってくる。どの程度周波数が変化するのかは、浮遊物質の移動速度によって決まってくるため、この周波数変化を検知すれば式(1)、(2)より流速( $u, w$ )を知ることができる。また発射した超音波が、反射して戻ってくるまでの時間から浮遊物質までの距離が計測できるため、それと合わせることによって水深方向の流速分布が求まる。

Development of Discharge Measurement System Using ADCP and Radio-controlled Boat

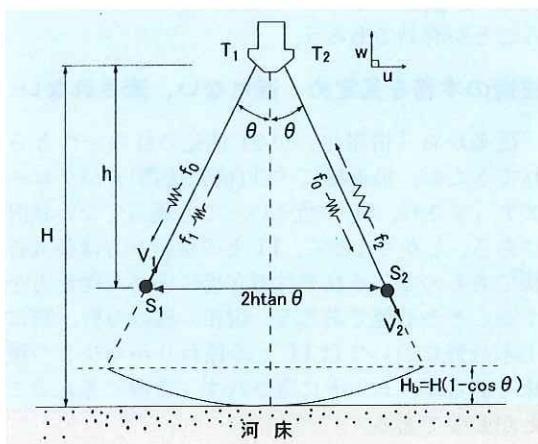


図-1 ADCP の計測原理

そこで $f_1$ と $f_2$ を測定することによって、 $u, w$ はそれぞれ次式で求めることができる。

$$u = \frac{(f_1 - f_2)c}{4f_0 \sin \theta} \quad (1)$$

$$w = \frac{(f_1 + f_2 - 2f_0)c}{4f_0 \cos \theta} \quad (2)$$

ここで、 $u$ : 水平方向の流速成分、 $w$ : 鉛直方向の流速成分、 $\theta$ : 送受波機の鉛直方向からの傾き、 $c$ : 音速をそれぞれ示している。

なお、このような計測法では、速度変動のスケールが超音波ビームの水平距離 $2htan\theta$ ( $h$ : 送受波機から散乱体までの距離)より小さい現象は計測できないことを意味している。例えば、 $\theta$ が $20^\circ$ 、水深 $h$ が5mであった場合は、約3.6m範囲内の流向・流速分布が一様であると仮定して計測しているため、これより小さい渦や内部波が多数存在するような場合は誤差が大きくなる。逆にこのような渦が無視できる程度であれば十分な観測精度が期待できる。

実際のADCPでは、図-2のように2対(4基)の送受波機を十字に配置して使用する。そこで $(T_1, T_2)$ により流速成分( $u, w_1$ )が、 $(T_3, T_4)$ により流速成分( $v, w_2$ )がそれぞれ求まる。

また、図-1のように、ビーム軸が傾いている場

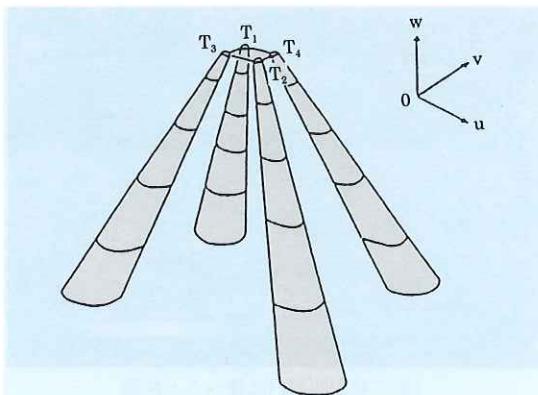


図-2 送受波機の配置

合、河床からの反射波と河床近くの散乱体からの反射波が同時に送受波機へ戻ってくるため、河床付近において測定不能な領域が生じる。送受波機から河床までの鉛直距離を  $H$ 、ビームの傾きを  $\theta$  とすれば測定不能域  $H_b$  は次式で与えられる。

$$H_b = H(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

さらに、送受波機が超音波を発信し、それが受信可能な状態になるまでは反射波を計測できないため、表層部にも一定の測定不能域が発生する。

なお今回は、この測定不能域の流速として、測定領域両端の値をそのまま用いることとした。

### 3. ADCP を用いた流量観測システムの開発

これまでに、計測機器を搭載して洪水中でも走行することが可能な RC ボートが木下良作氏によって多数開発<sup>1),2)</sup>されている。今回使用した ADCP 搭載用 RC ボート (写真-1) も木下氏によって開発されたものである。

ADCP と RC ボートを組み合わせた流量観測システムの機器構成図を図-3 に示す。本システムは、ADCP、RC ボート、観測用パソコン、ADCP 無線制御装置 (以下無線装置) から構成されている。ここで無線装置とは、観測データの送受信及び ADCP の制御を陸上に配置した観測用パソコンで行うための装置である。本システムでは、單に観測断面内の流速分布、流量を計測するだけでなく、無線装置を搭載することによって、観測者は ADCP で観測された水の流れの状況をリアルタイムで確認できるとともに、その情報を元に、観測中でも自由に ADCP の操作を行うことが可能となっている。

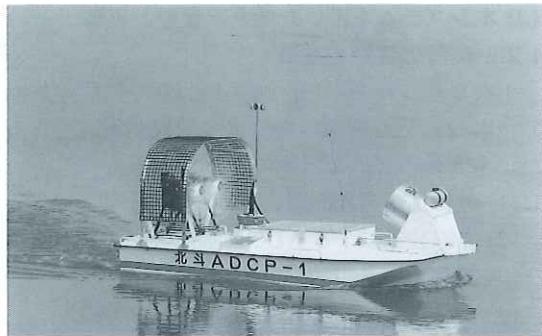


写真-1 ADCP 搭載用 RC ボート

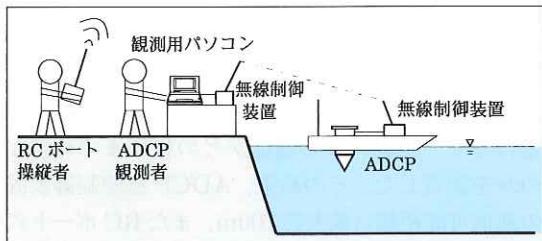


図-3 流量観測システム機器構成図

本システムの実河川における適用性評価のために、新潟県の阿賀野川下流部において現地流量観測を行った。

### 4. 阿賀野川における ADCP を用いた流量観測

#### 4.1 阿賀野川の概要及び観測地点付近の状況

##### 阿賀野川での観測

地点位置を図-4 に示す。今回現地実験及び流量観測を行ったのは、この阿賀野川の河口から 7.2km の地点、大淵水位観測所付近である。

この地点は、交互砂州が接続する場所に位置するため、洪水時の水面の横断傾斜が極めて小さく、流量を的確に計測する上では最良の断面であることが確認されており<sup>3)</sup>、この地点を観測断面に設定した。

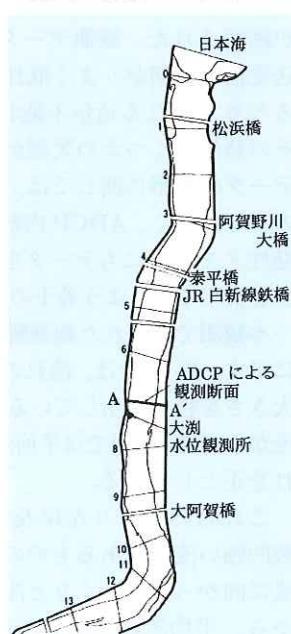


図-4 ADCP による観測位置図

## 4.2 本システムを用いた低水流量観測実験

### 4.2.1 実験の目的と方法

平成9年6月26日9:00～15:00の期間において、本システムを用いた低水流量観測実験を行った。本実験の目的は以下の4点である。

- (1) 無線通信可能距離の確認
- (2) 無線装置によるADCP本体の操作性の確認
- (3) 観測データの送受信の確認
- (4) 本システムによる流量観測精度の確認

観測は、観測線上及びその近傍を計5往復させ、10回分のデータを収集した。なお、本観測時の水面幅は約550mであった。

### 4.2.2 実験結果

まずRCボートを、観測地点より上流に向けて走行させ、無線による通信がどの程度まで可能なかを調査した。その結果、ADCP無線制御装置の通信可能距離は最大約700m、またRCボートの操作に関しては最大約1,000mであることが確認された。ただし無線装置については、RCボートが草木等の障害物によって地上側から見通せなくなると、距離に関係なく通信不能になった。これは、通信に使用している無線の周波数帯(1,200MHz帯)が直進性の高い特性を持っているためであると考えられる。

また、通信可能距離内におけるADCP本体およびRCボートの操作は全て問題なく行えることが確認された。観測データの送受信については、送受信の同期がうまく取れていないと起因すると考えられる通信不能状態に陥ることがあり、その結果いくつかの欠測が生じた。そこで、観測データの取得に関しては、無線によるデータ取得のみではなく、ADCP内部に装着されている不揮発性メモリーにもデータを書き込み、2種類の方針を併用できるよう若干の改造を行うこととした。

本観測で得られた観測断面内流速分布を図-5、6に示す。図-5では、流れの向きを矢印で、流れの大きさを色別で示している。また図-6では上流から下流(紙面では手前から奥)に向かう流れを正としている。

これらの図より左岸及び表層部付近に比較的強い流れがあるものの、全体としては下流に向かってゆっくりと流れていることがわかる。平均流速は約0.2m/s、最大流速は約0.5m/sであった。

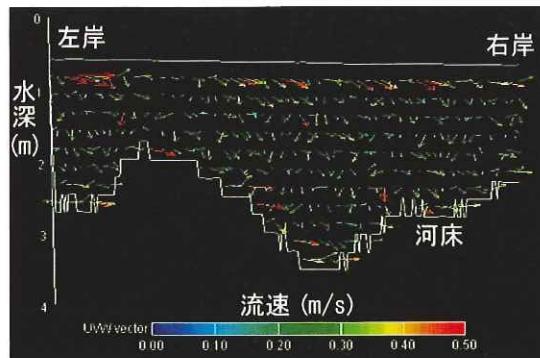


図-5 観測断面内流速ベクトル図

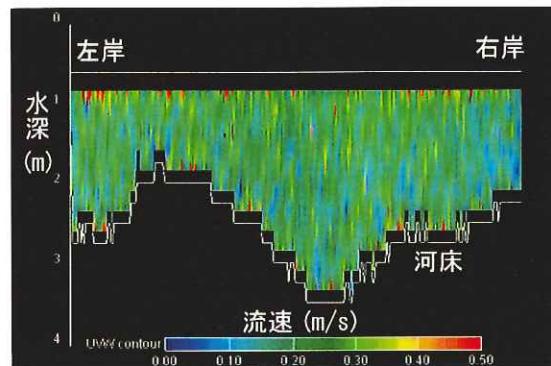


図-6 観測断面内流速コンター図

### 4.2.3 流量観測精度の評価

表-1にADCPによる計算流量(以下、ADCP流量)と観測地点近傍にある満願寺流量観測所におけるH-Q曲線による流量(以下、H-Q流量)を示す。なお、満願寺流量観測所は観測地点より上流約9kmの地点に位置しており、本観測時ではこの2観測所間ににおける他からの流入量はなかった。これより、満願寺観測所での流量との差は、全て10%以内であった。実河川における流量の真値を正確に把握することは困難であるため、この結果をもってADCP観測精度を論じることはできないが、本システムによる流量観測精度は、少なくとも従来の手法と同程度であると考えられる。

表-1 H-Q流量とADCP流量との比較

観測時刻	流量 ( $m^3/s$ )		H-Q流量とADCP流量との差 (%)
	満願寺H-Q流量	ADCP流量	
10:00	132.2	132.8	-0.4
14:00	167.7	159.1	5.1
14:30	177.4	180.6	-1.8
15:00	187.3	171.8	8.3

### 4.3 本システムと浮子による同時流量観測

#### 4.3.1 観測の目的と方法

平成10年8月5日9:00～16:00の期間において本システムと浮子による同時流量観測を行った。本観測の目的は、データ記録方式をADCP内部メモリ併用方式へ改造したことによる動作の確認と、その流量観測精度の確認である。浮子による流量観測は、木下良作氏が開発した表面浮子投下装置を取り付けたRCポート(以下「浮子用RCポート」と呼ぶ)を用いて行った<sup>3)</sup>。

浮子は、RCポート用コントローラーのレバーによって両舷から交互に一本ずつ投下される仕組みになっている。また投下された浮子の位置測定は、河岸に設定されたレーザートラック・トータルステーションにより行われる。

観測は、観測線上を本システム、浮子用RCポートを交互にそれぞれ4回ずつ走行させた。なお、この時の水面幅は約570mであった。

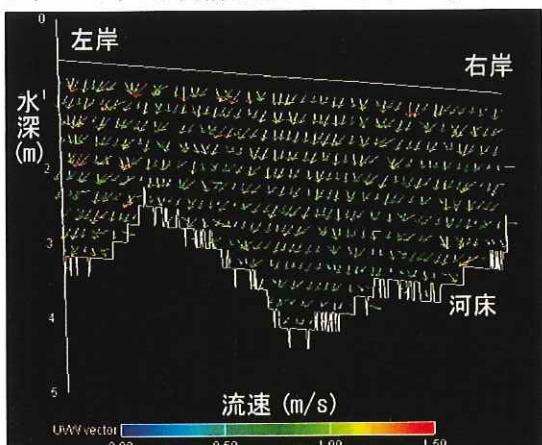


図-7 観測断面内流速ベクトル図

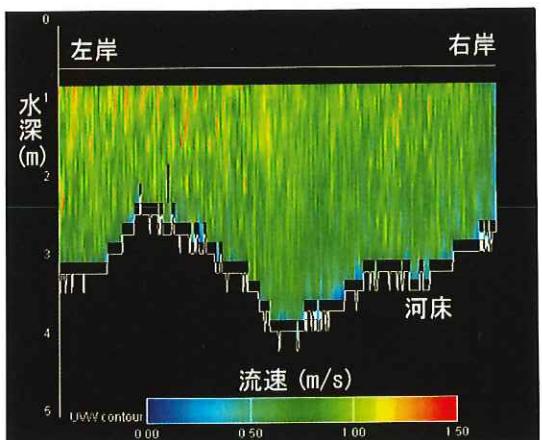


図-8 観測断面内流速コンター図

#### 4.3.2 観測結果

データ記録方式の変更による動作の異常は特に認められなかった。本観測で得られた観測断面内流速分布を図-7, 8に示す。

これらより、左岸側に比較的速い流れが存在すること、河川中央部に比べて岸に近い部分の流れに乱れがあることなどがわかる。また平均流速は約0.8m/s、最大流速は約1.5m/sであった。

#### 4.3.3 本システムと浮子による各流量観測結果の比較

表-2に浮子による流量観測結果を示す。同表から左岸側の流れが比較的速いことがわかる。これは、先述した本システムによる観測結果と一致する。

表-3に、本システムと浮子による観測データのうち、区分断面毎の平均流速値を比較したものを見た。ここで区分断面1とは、観測横断面を区分したものの中、最も左岸側の断面のことを示している。また浮子による区分断面平均流速とは、浮子で観測された流速値に更正係数を乗じたものである。今回の場合、本来ならば2m浮子を用いるところであるが、浮子用RCポートの機能上の制約から表面浮子を用いているため、更正係数は0.85を使用した。

この表から、本システムと浮子による流速観測値の差は、各観測毎、断面毎に多少ばらつきはあるものの概ね10%以下であった。

表-4に本システムと浮子による各流量観測結果を示す。本システムと浮子の差は概ね10%以下であった。

以上のことから、本システムによる流量観測は、少なくとも浮子によるものと同程度の精度が期待できると考えられる。

#### 4.4 まとめ

今回、ADCPとRCポートを組み合わせた流量観測システムを開発し、さらにその適用性の検討のために、実河川における流量観測を実施した。その結果より以下のことが確認された。

- (1) RCポートの操作は、阿賀野川における流量約1,500m<sup>3</sup>/s、最大流速約1.5m/sの出水でも問題なく行えた。また、無線装置の通信可能距離は最大700m程度、RCポートの操作可能距離は最大1000m程度であることがわかった。したがって上記のような条件を満たす河川であれ

表-2 浮子流量観測結果

回数	左岸からの浮子投下距離 (m)	流速 (m/s)	区分断面積 (m <sup>2</sup> )	区分流量 (m <sup>3</sup> /s)	総流量 (m <sup>3</sup> /s)
1回目	32.940	1.050	165	147	
	80.903	1.114	165	156	
	135.447	1.074	156	139	
	189.654	1.095	149	139	
	229.573	0.959	169	138	
	284.671	0.992	218	184	
	334.806	0.965	235	193	
	392.268	0.946	212	170	
	443.027	0.964	185	152	
	494.081	0.876	195	145	
	548.121	0.862	159	116	
	588.839	0.566	90	51	1,730
2回目	82.772	0.927	309	243	
	130.025	1.035	120	106	
	177.242	0.911	129	123	
	238.164	0.935	163	130	
	276.165	0.929	183	145	
	330.300	0.941	212	170	
	375.239	0.781	204	136	
	434.814	0.937	196	156	
	488.023	0.778	181	120	
	539.041	0.816	164	114	1,445
	78.222	0.851	299	216	
	127.470	0.900	131	100	
3回目	180.593	0.888	147	111	
	231.898	0.912	153	119	
	275.581	0.836	198	141	
	333.085	0.902	221	169	
	384.750	0.799	184	125	
	432.185	0.866	182	134	
	487.986	0.826	190	133	
	543.334	0.787	233	156	1,404
	80.178	0.903	296	227	
	137.494	0.946	126	101	
	180.316	0.836	123	87	
	224.130	1.004	164	140	
4回目	284.371	0.911	206	160	
	333.009	0.888	203	153	
	384.167	0.856	199	145	
	439.782	0.710	182	110	
	491.787	0.823	170	119	
	543.224	0.780	224	149	1,391

表-3 区分断面平均流速の比較

回数	区分断面	浮子流速 (m/s)	ADCP流速 (m/s)	浮子とADCP の差 (%)
1回目	1	0.895	0.919	-2.91
	2	0.947	0.919	2.96
	3	0.913	0.913	0.0529
	4	0.931	0.871	6.38
	5	0.815	0.848	-4.06
	6	0.843	0.868	-2.89
	7	0.820	0.823	-0.293
	8	0.804	0.803	0.131
	9	0.819	0.824	-0.608
	10	0.745	0.795	-6.72
	11	0.733	0.776	-5.97
	12	0.583	0.579	0.722
2回目	1	0.788	0.854	-8.38
	2	0.879	0.879	0.0852
	3	0.774	0.828	-6.93
	4	0.794	0.833	-4.81
	5	0.789	0.814	-3.08
	6	0.799	0.802	-0.269
	7	0.664	0.786	-18.4
	8	0.796	0.789	0.935
	9	0.661	0.775	-17.2
	10	0.694	0.634	6.98
	11	0.723	0.787	-8.79
	12	0.765	0.878	-14.8
3回目	3	0.755	0.819	-8.51
	4	0.775	0.835	-7.71
	5	0.711	0.819	-15.3
	6	0.767	0.791	-3.17
	7	0.679	0.780	-14.8
	8	0.737	0.784	-6.43
	9	0.702	0.749	-6.68
	10	0.669	0.687	-2.69
	11	0.768	0.803	-4.62
	12	0.804	0.816	-1.48
4回目	3	0.711	0.773	-8.78
	4	0.853	0.747	12.5
	5	0.774	0.785	-1.38
	6	0.755	0.791	-4.79
	7	0.728	0.755	-3.77
	8	0.604	0.744	-23.2
	9	0.699	0.729	-4.21
	10	0.663	0.683	-3.02

表-4 浮子流量とADCP流量との比較

観測番号	浮子流量 (m <sup>3</sup> /s)	ADCP流量 (m <sup>3</sup> /s)	浮子とADCP との差 (%)
1	1,730	1,550	10.4
2	1,450	1,400	3.11
3	1,404	1,390	0.854
4	1,390	1,310	5.75

ば、本システムの運用は可能である。

(2) 本システムを用いることにより、観測者は現場において、河川内の流れの様子や流量観測結果をリアルタイムで把握することが可能である。

なお、阿賀野川における観測では、本システムの運用に必要な人数は4~6人であった。また、測線を1往復(水面幅:約700m)するのに要した時間は20分程度であった。ただしこれら数字は対象河川や出水の状況によって変化する可能性がある。

(3) 本システムによる流量観測は今回行った観測地点のように、小規模洪水時で2~3m以上の水深がある場所では、少なくともこれまでの観測手法と同程度の精度が期待できると考えられる。

(4) 本観測システムは、流下物が非常に多く、かつそれを視認する事が困難な夜間等での利用は制限される。また、大洪水時のような非常に乱れた流れでの観測は未だ実施していないため、このような条件下における本システムの観測精度は現状では不明である。今後様々な条件下における流れについて観測を行い、本システムの適用範囲を明確にしていく必要がある。

なお本研究は、主として実用性のある流量観測システムの開発という点に主眼を置いたため、理論的な考察については今後有待課題も多い。これらの点については、今後とも研究を進める予定である。

### 参考文献

- 木下良作: エアクッション RC ボートによる洪水流調査, 第35回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会, 1997.
- 木下良作: 無人ラジコンボートによる洪水流調査, ACV の研究, 28, 1997.
- 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, 1998.
- 金木誠、吉谷純一、松浦達郎: 洪水流量観測の高度化に関する研究, 土木技術資料 41-4, 建設省土木研究所, 1998.
- 松浦達郎、金木誠: ラジコンボートを用いた ADCP による流量観測システムの開発, 第53回年次学術講演会講演概要集,(社) 土木学会, 1998.
- 金木誠、寺川陽、吉谷純一、松浦達郎: 超音波ドップラー流速プロファイルの河川流量観測への応用に関する研究報告書, 土木研究所資料第3719号, 2000年3月

松浦達郎\*



建設省土木研究所河川部  
水文研究室研究员  
Tatsuro MATSUURA

金木 誠\*\*



同 水文研究室長  
Makoto KANEKI

吉谷純一\*\*\*



同 都市河川研究室長  
(前 水文研究室主任研究员)  
Junichi YOSHITANI