

4種類の観測手法を用いた同時流速観測

RIVER FLOW OBSERVATION SIMULTANEOUSLY USING FOUR OBSERVATION EQUIPMENT AND TECHNIQUE

手計太一¹・江蔵拓²・笹川幸寛³・小川厚次³
Taichi TEBAKARI, Taku EZO, Yukihiko SASAKAWA and Koji OGAWA

¹正会員 博(工) 富山県立大学講師 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²正会員 富山県農林水産部 新川農林振興センター (〒937-0863 富山県魚津市新宿10-7)

³学生員 富山県立大学大学院 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

The purpose of this study is to clarify the strong points and weak points of method of observation according to river condition, time scale and weather condition. In this study, the following river flow observation equipment and technique were used; ADCP, Price type current meter (PTC), Radio current meter (RCM) and the float method (FM) for this study in the Idagawa River, the Jinzu River and the Kurobe River.

As a result of statistical analysis, the characteristics of the correlation coefficient between the ADCP, the PTC, the RCM and the FM were clarified. The positive and negative points of all technique were categorized according to the observation condition. In addition, flow velocity of the FM is larger 13%, 9% and 9% than the RCM, the PTC and the ADCP.

Key Words : ADCP, Radio current meter, float, Price type current meter, Idagawa River
Jinzu River, Kurobe River, Toyama Prefecture

1. はじめに

現在、洪水時の流量を計測するため、浮子観測¹⁾が広く用いられている。浮子観測は他の観測手法と比べ、安全且つ簡易的に行え、一定の精度を保って観測が可能である。更に、河川に大量のごみや浮遊物がある場合においても、観測自体に大きな影響を及ぼすことなく計測出来る利点がある。しかしながら浮子観測^{2), 3)}は、更正係数の妥当性の検証例が少ない事や浮子の投入した場所による誤差の違いなど様々な問題点がある。特に、洪水流量観測には浮子観測を行う際に多くの人員を要するため、何箇所も同時に観測をする事は難しい。浮子観測のみを主な流量観測方法として採用するのではなく代替方法の提案が必要である。

昨今では最新の技術を利用した様々な流量観測手法が提案されており、既往の知見から状況に応じた各観測手法の評価がされている⁴⁾。近年、流量観測手法の1つとしてADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)^{5), 6)}を利用した観測方法が研究されている。ADCPは、これまでの浮子観測では計測出来ない緻密な横断面の流速や、鉛直分布の流速の計測が可能である。他にもプライス式流速計や電波流速計^{7), 8)}を用いた流量観測手法があり、そ

れぞれの機器固有の性質がある。電波流速計は非接触であるため観測中におけるトラブルが少なく、連続したデータの採取が可能であるが、ある一点の表面流速しか測定できない。また、水面が波立たないと計測値が得られないため、河川表面の状態に依存する欠点がある。プライス式流速計⁹⁾は、流れに対して水平面内に角度のずれが生じてても大きな流速測定誤差を生じないといった利点があるが、ある一点の流速値しか得られない。

以上のように、いずれの機器、手法にも長所と短所があるため、浮子観測のみに依存するのではなく、それぞれの流速測定機器の適性を活かした流量観測を実施すべきである。既往研究¹⁰⁾では、状況に応じた各観測手法の評価がなされているが、同時に複数の観測手法を用いた流速観測による評価例は少ない。

そこで著者らのグループでは、富山県に位置する神通川、井田川、黒部川において、ADCP、電波流速計、プライス式流速計及び浮子観測の同時流速観測を行い、各種流速測定機器の長所や短所を明らかにした¹¹⁾。加えて本研究では、それぞれの観測手法から得られる流速値を基に浮子評価指数、電波流速計評価指数、各種流速機器の標準偏差の比較検討を行った。本稿では、各種の流速測定機器の長所や短所を比較し、各種の流速測定機器の特徴を報告する。

表-1 ADCPの設定条件¹⁾

	井田川	神通川	黒部川
計測モード	12	12	12
Mode 12 Sub-Pings	30	8	30
計測層厚	0.1m	0.1m	0.1m
計測層数	25	40	25
アンサンブルタイム		1.94 sec	
アンサンブルインターバル	10 sec		10 sec
ウォーターピング数	7	3	7
ボトムトラック数	on	on	on
ボトムピング数	7	3	7
固定観測における流速誤差の標準偏差	2.15 cm/s	6.35 cm/s	2.15 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート

2. 観測手法

本研究では、流速観測を行うに当たって、4種類の流速測定機器を使用した。観測機器は、(1)ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)、(2)プライス式流速計、(3)電波流速計、(4)浮子(表面、吃水30 cm、吃水50 cm)を使用した。それぞれの機器の概要と設置方法、人員配置や観測時に工夫した点を以下に示す。

(1) ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)

ADCP は Teledyne RD Instruments 社製を使用した。ADCP は水中に超音波を発信し、そのドップラー効果を利用して流速を計測する機器である。これを ADCP 専用のポートに取り付け 2 台使用した。1 台は本体のメモリに記録する設定で橋の欄干からロープで吊るし定点を継続的に計測した。もう 1 台を遠隔で操作・記録できる設定で、橋上で観測者がロープを持ち横断することで河川の横断面の流速を計測した。本観測においては、ADCP の遠隔操作を行う観測者、河川の横断を行う観測者、以上の 2 人の人員で観測した。全ての場所でこの方法を採用した。ADCP の計測条件を表-1 に示す。

(2) プライス式流速計

プライス式流速計は神山製作所(株)製を使用した。設置方法は河川の 6 割水深の位置で測定した。20 秒間のプロペラの回転数から計測された流速値を 20 秒ごとの平均流速値として記録した。本研究に使用したプライス式流速計の適用範囲は 0.03~6.00 m/s である。橋上からロープで吊るし、事前に測量した 6 割水深の位置で固定した状態で流速観測を行った。設置後の作業は、プライス式流速計の稼働の確認、また附属のデータロガーの性質上、20 秒に 1 回、計測ボタンを押す必要がある。そのため、観測中の人員配置は 1 人で十分であった。

(3) 電波流速計

電波流速計は横河電子機器(株)製を使用した。電波流速計は河川の波の動きを電波で捉え、表面流速を測定する機器である。俯角は観測場所に応じて 40°~45°とし、1 秒毎の流速を測定した。本研究に使用した電波流速計の照射距離の適用範囲は 20 m 程度である。準備の手法は、電波流速計を橋の欄干に設置した。観測自体は自動に計測するため、設置時以外の人員配置は必要なかった。

(4) 浮子法

本研究では、表面、吃水30 cm、吃水50 cmの3種類の浮子を使用した。計測区間は場所に応じて30~50mに設定し、その間に浮子が移動する時間を計測した。また、大雨や台風時など無線でのコミュニケーションが困難な場合を想定し、3種類の旗を製作し、無線と併用した。例えば表面の浮子を投下する時は赤色の旗で合図を送り、吃水30 cmの浮子を投下する時は黄色の旗で合図を送るという要領で行い、観測ミスの軽減に努めた。また、本観測においては、橋上から浮子投下要員、断面1を通過したと伝える観測者、断面2を通過した事を確認して時

間を測る観測者、以上の3人の人員を必要とした。本研究は流速機器の比較を行う事を目的としているため、浮子は全て主流速付近に投下した。

3. 観測場所

本研究では、富山県内の 3 か所で計 4 回の観測を行った。1 回目と 2 回目は井田川の高田橋で観測を行い、3 回目は神通川の神峡橋で観測を行い、4 回目は黒部川の新川黒部橋で観測を行った。それぞれの河川と観測場所の詳細は既往論文に示してあるため¹⁾、ここでは河川と観測場所の概要を以下に示す。

(1) 神通川

神通川は、北陸地方の代表的な河川の一つであり、古くから氾濫が度々起きていた歴史ある一級河川である。流域面積は 2720 km²、流路延長は 120 km、年平均流量は 183 m³/s である。また、神通川の河床勾配は、上流部が約 1/20~1/150、中流部が約 1/150~1/250 であり、我が国屈指の急流河川である。神通川では、神通川中流部の神峡橋で観測を行った。川底から橋の欄干までの高さは 30.40 m である。川幅は 149.50 m、水深は 3.50 m、河床勾配は約 1/150~1/250 であった¹⁾。観測時の概算流量は 1570 m³/s である。水深は、河川の流速が最も大きい流心部で測定した。次項以降に説明する井田川、黒部川においても同様に流心部の水深である。観測時の流速は約 2.0 m/s、天候は雨天から快晴に変化する状況であった。水位は、観測開始から観測終了までに 30 cm 程度減少した。

(2) 井田川

井田川は、岐阜県及び富山県を流れる神通川水系左支川の一流河川である。流域面積は 435.8 km²、流路延長 44.9 km である。井田川では、富山市内に位置する高田橋で観測を行った。川底から橋の欄干までの高さは 13.30 m である。川幅は 39.10 m、第1回目の観測時の水深は 1.98 m、第2回目の観測時の水深は 1.36 m、河床勾配は約 1/630 である。第1回目の観測時の概算流量は 108 m³/s、第2回目の観測時の概算流量は 69 m³/s である¹⁾。橋上での風速は微風が感じられる程度であった。水位については、観測結果より時間的な変化はなく一定であった。

(3) 黒部川

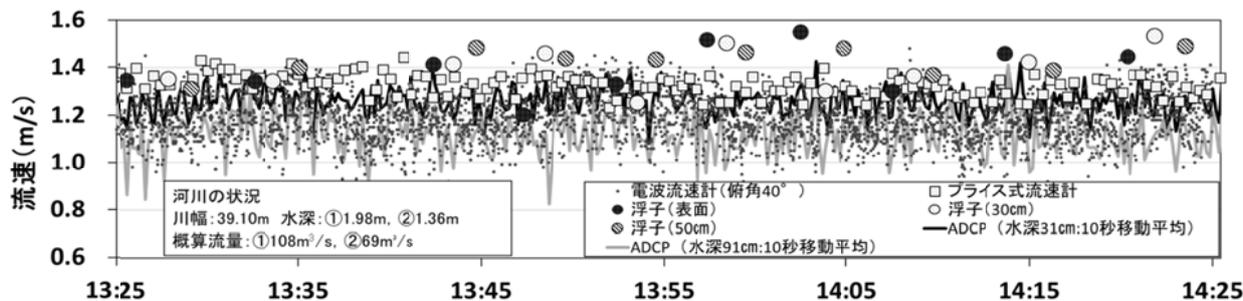


図-1 井田川におけるADCP、プライス式流速計、電波流速計、浮子観測による流速値の経時変化¹⁾。

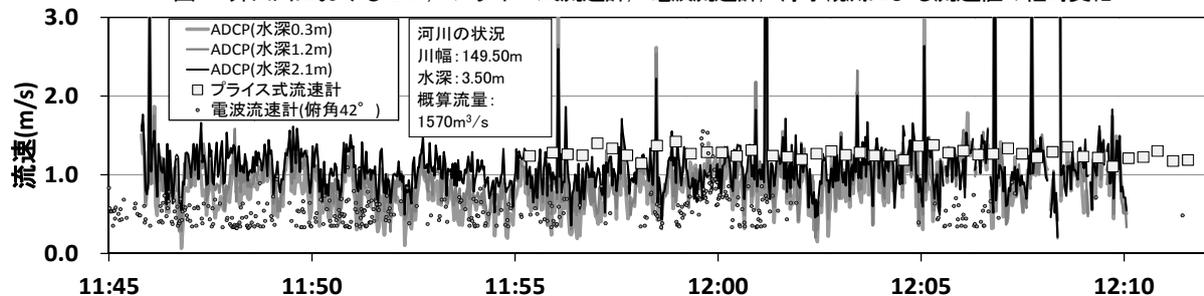


図-2 神通川におけるADCP、プライス式流速計、電波流速計による流速値の経時変化¹⁾。

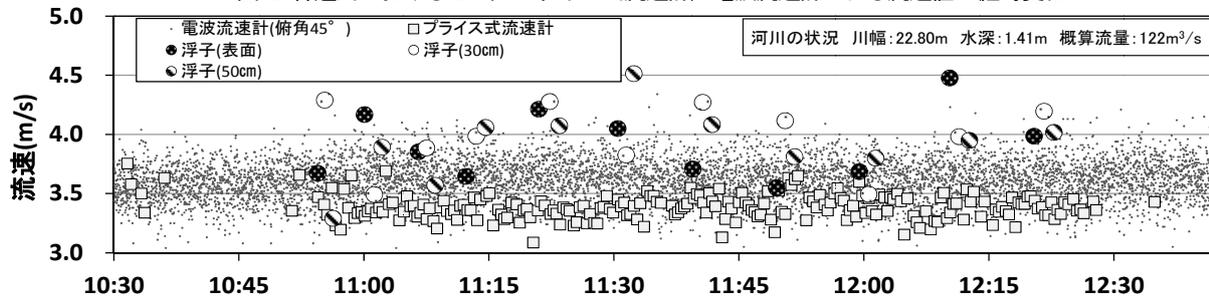


図-3 黒部川におけるプライス式流速計、電波流速計、浮子観測による流速値の経時変化¹⁾。

黒部川は富山県東部に位置する一級河川水系の1つであり、河床勾配が1/5～1/119という我が国屈指の急流河川である。流域面積は682 km²、流路延長は85 kmである。黒部川では、黒部川下流域の新川黒部橋で観測を行った。川底から橋の欄干までの高さは、15.30 mである。川幅は22.80 m、水深は1.41 m、河床勾配は約1/100である。観測時の新川黒部橋の概算流量は122 m³/sである¹⁾。橋上での風速は殆ど感じられなかった。また、観測地点の約5 km上流に位置する愛本堰堤において、観測時間内の水位の変化はなかった。

4. 観測結果

図-1、図-2、図-3 は井田川、神通川、黒部川におけるADCP、プライス式流速計、電波流速計、浮子観測による流速値の経時変化の結果である。それぞれの手法、機器によって測定できる水深が異なるが、それぞれの流速値の特徴を比較する。

全体的な傾向として、井田川と黒部川では浮子の流速値は他の流速測定機器と比較して大きい傾向にある。

また、黒部川における浮子観測では、得られた流速値の最大値と最小値の幅が約1 m/sあった。これは他の流速測定機器と比較すると非常に大きい。この要因の一つとして、黒部川の水面が大きく波立っている事が挙げ

られる。流況の変動が激しい黒部川では、波の窪地に浮子が入り、流れに乗っていない可能性がある。また、波の窪地に浮子が隠れるため、観測者が浮子を見失う事があった。以上より、観測流速値の最大値と最小値の幅が大きくなったと考えられる。

電波流速計による計測結果は、井田川の流速値は1～1.4 m/s、黒部川の流速値は3.2～3.8 m/sであった。いずれの観測においても、比較的安定した流速値を示した。電波流速計は、射出波と受信波の周波数の差異から河川の表面流速を求めることができる。そのため、波の存在しない地点での測定は困難であるが、黒部川のように大きく波立っている河川では、有効的に流速観測を行うことが出来たと考えられる。

プライス式流速計による計測結果は、井田川の流速値は1.2～1.4 m/s、神通川の流速値は1～1.4 m/s、黒部川の流速値は3.2～3.6 m/sであった。同様に、比較的安定した流速値を得ることができた。

ADCPによる計測結果の例として、井田川の水深91 cm流速値は0.8～1.4 m/s程であった。これは、他の流速測定機器と比べデータの幅が大きい。またADCPによる観測結果は、代表流速として水深31 cmと91 cmの流速を比較すると、水深31 cmの方が水深91 cmの位置よりも流速値が高い値を示した。

図-4 は井田川における鉛直断面の流速値の経時変化である。鉛直断面が表面から水深0.3 mの流速値は推定

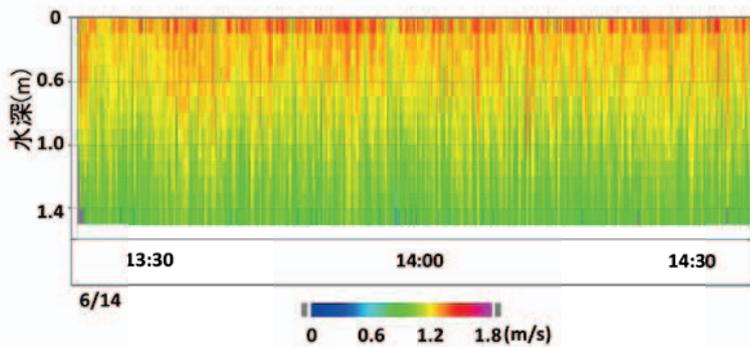


図-4 井田川における鉛直断面の流速値の経時変化。

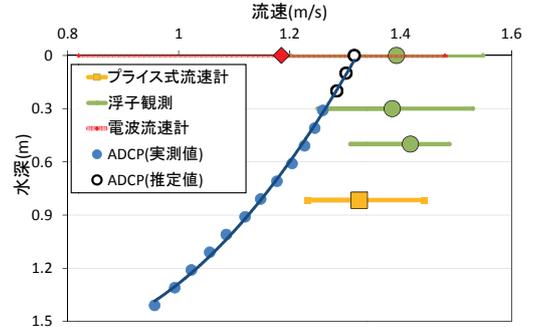


図-5 井田川におけるADCPの鉛直断面の流速値

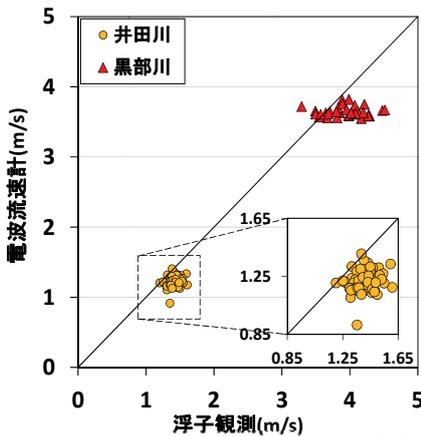


図-6 浮子観測による流速値と電波流速計による流速値の関係¹⁾。

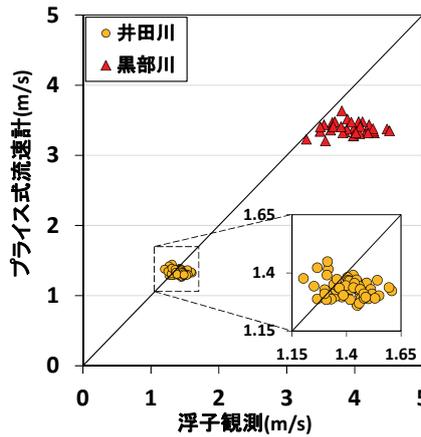


図-7 浮子観測による流速値とプライス式流速計による流速値の関係¹⁾。

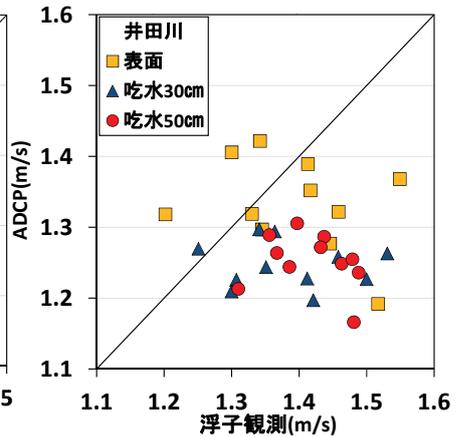


図-8 浮子観測による流速値とADCPによる流速値、表面流速の推定値の関係¹⁾。

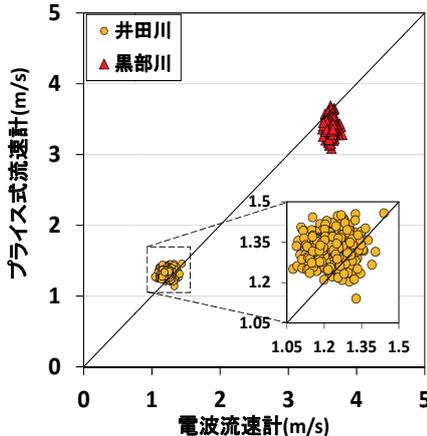


図-9 電波流速計による流速値とプライス式流速計による流速値の関係¹⁾。

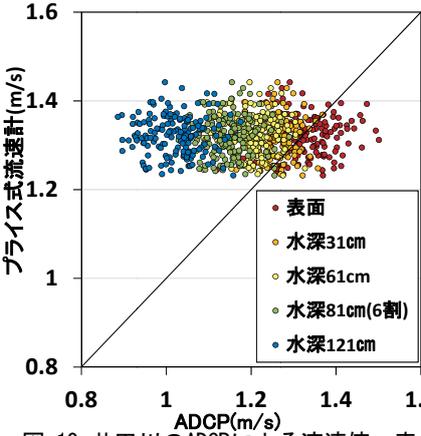


図-10 井田川のADCPによる流速値、表面流速の推定値とプライス式流速計による流速値の関係。

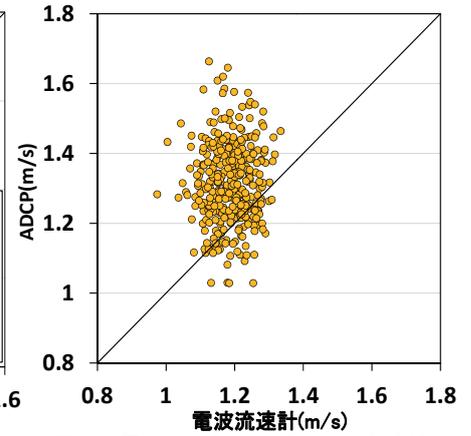


図-11 電波流速計による流速値とADCPによる表面流速の推定値の関係¹⁾。

値、水深0.3 m以上の流速値は実測値である。ADCPによる表面流速の推定方法は、図-5を用いて説明する。

図-5は井田川におけるADCPの鉛直方向の流速値から算出した2次近似曲線図である。図-5に示した2次近似曲線を用いて最小二乗法で表面流速を推定した。

次に、これまでの得られた観測値や推定値を用いて、同じ水深を測定した各流速機器による流速値を比較した。

図-6は浮子観測と電波流速計による流速値の比較である。それぞれを比較すると、浮子による流速値の方が電波流速計による流速値より平均して約13%大きい。

図-7は浮子観測とプライス式流速計による流速値の比較である。浮子による流速値の方がプライス式流速計による流速値より平均して約9%大きい。図-6、図-7よ

り、浮子観測は電波流速計とプライス式流速計のいずれと比較しても約10%程度大きな流速値が観測された。

図-8は浮子観測とADCPによる表面流速の推定値、水深30cm、水深50cmの流速値の比較である。浮子の吃水の種類による定量的、定性的な違いは認められない。また、浮子による流速値の方がADCPによる流速値より、全ての水深で平均して約9%大きい。

図-9は電波流速計とプライス式流速計による流速値の比較である。データの幅が狭い事から、どちらも安定した観測値が得られていることがわかる。しかし黒部川において、電波流速計とプライス式流速計を比べた場合は、プライス式流速計の方がデータの幅が約2.1倍広く、この点から考えても電波流速計が最も安定した流速値を

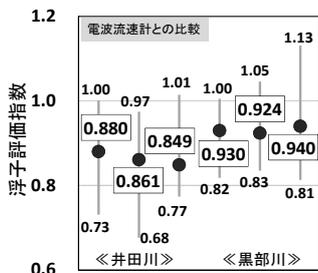


図-12 浮子観測と電波流速計による流速値から算出した浮子評価指数

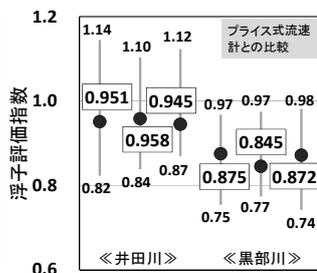


図-13 浮子観測とプライス式流速計による流速値から算出した浮子評価指数

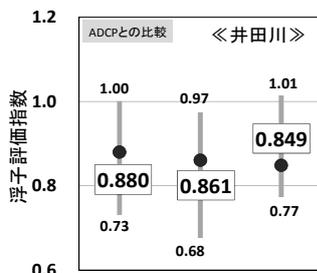


図-14 浮子観測とADCPによる流速値、表面流速の推定値から算出した浮子評価指数

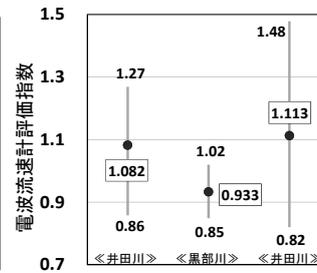


図-15 電波流速計とプライス式流速計、ADCPによる流速値から算出した電波流速計評価指数

示している事が分かる。しかし、両者から得られる流速値の水深が異なるため、単純に比較することはできない。

図-10はそれぞれ井田川におけるADCPとプライス式流速計による流速値の関係である。ADCPの流速値は、表面流速の推定値と各水深の流速値を利用した。この図から、プライス式流速計による流速値の方がADCPによる流速値より、全ての水深で平均して約15%大きい値を示している。

図-11はADCPによる表面流速の推定値と電波流速計による表面流速の関係である。ADCPによる表面流速の推定方法は前述と同様である。この図から、ADCPによる流速値の方が電波流速計による流速値よりも約11%大きい値を示している。

5. 浮子評価指数及び電波流速計評価指数の検討

前述の観測結果を基に浮子評価指数の検討を行った。一般に修正係数とは、浮子観測や電波流速計から得られた表面流速を流量算出に用いる際に使用する流速値の補正係数である。既往研究^{7),9)}によると実河川における浮子の修正係数は表面が0.85、吃水50cmが0.88、吃水100cmが0.91であり、電波流速計の修正係数は0.85~0.90程度に設定されている。しかし、本研究ではそれぞれの流速測定機器から得られる流速値だけを比較するため、修正係数ではなく、新しく浮子評価指数と定義して検討する。浮子評価指数の算出方法は、各種の流速測定機器による流速値を浮子観測による流速値を除いて算出した。電波流速計評価指数も同様の算出方法である。例として浮子評価指数の算出式(1)を以下に示す。

$$F_i = \frac{v_i}{v_j} \quad (1)$$

ここに、 F_i : 浮子評価指数、 v_i : 比較する流速測定機器による流速値、 v_j : 浮子観測による流速値とする。

図-12は浮子観測及び電波流速計から得られた流速値を基に算出した浮子評価指数の最大値、平均値、最小値である。井田川での浮子評価指数の平均値は0.85~0.88であり、浮子評価指数の最小値と最大値の差が0.29であった。黒部川の浮子評価指数の平均値は0.92~0.94であり、浮子評価指数の最小値と最大値の差が0.32であった。井田川と比較して、黒部川の方が最小値と最大

値の差が大きく、平均値も高い事から、流量観測を行う河川によって浮子評価指数の違いが生じる事が分かる。

また、浮子の修正係数は表面が0.85、吃水50cmが0.88、吃水100cmが0.91であり、吃水が大きくなるに従って修正係数も大きくなる。しかし本研究における浮子の吃水ごとの浮子評価指数の違いは認められない。

図-13は浮子観測及びプライス式流速計から得られた流速値を基に算出した浮子評価指数である。井田川の浮子評価指数の平均値は0.94~0.96であり、最小値と最大値の差が0.32である。黒部川の浮子評価指数の平均値は0.84~0.88であり、最小値と最大値の差が0.24であった。前述と同様に浮子観測とプライス式流速計の関係から算出した浮子評価指数も、浮子の吃水ごとの定性的な違いは認められない。

図-14は浮子観測から得られた流速値とADCPによる表面流速の推定値と水深30cm、水深50cmの流速値を基に算出した浮子の浮子評価指数である。浮子評価指数の平均値は0.85~0.88であり、浮子評価指数の最小値と最大値の差が0.29である。これまでと同様に、吃水ごとの浮子評価指数の定性的な違いは認められない。

図-15は電波流速計から得られた流速値とプライス式流速計から得られた流速値、ADCPによる表面流速の推定値を基に算出した電波流速計評価指数である。電波流速計評価指数の平均値は0.93~1.11であり、相関係数の最小値と最大値の差が0.66であった。

6. 考察

図-16は各流速測定機器から得られた20秒毎の平均流速値の標準偏差の関係である。全体の傾向として流速が約1~1.4m/s程度であった井田川においては、いずれの手法においても標準偏差が0.045~0.079m/sであった。しかし、流速が約3~3.5m/sであった黒部川では、いずれの手法においても標準偏差の値が大きい事が分かる。

次に、各手法別の標準偏差について考察する。浮子観測については、井田川における標準偏差は0.079m/s、黒部川における標準偏差は0.284m/sであった。流況の変動が激しい黒部川では、波の窪地に浮子が入り、河川の流れに乗っていない可能性があるため、データのばらつきが生じたと考えられる。



図-16 井田川、神通川、黒部川における各流速測定機器による流速値の標準偏差。

ADCP に関しては、井田川における標準偏差は 0.058 m/s、神通川における標準偏差は 0.174 m/s であった。ライス式流速計に関しては、井田川における標準偏差は 0.045 m/s、神通川における標準偏差は 0.064 m/s、黒部川における標準偏差は 0.120 m/s である。どちらも流速が大きくなるにつれ、データのばらつきが大きくなる。ライス式流速計は、井田川における標準偏差が最も小さかったことから安定したデータが得られたと考えられる。

電波流速計に関しては、井田川における標準偏差は 0.048 m/s、黒部川における標準偏差は 0.052 m/s であった。他の手法と比較し、電波流速計は流速が大きい黒部川においても標準偏差が小さいことから、様々な流速においても安定したデータの取得が可能であると評価できる。

7. おわりに

既存の流速測定機器、観測手法を比較検討するため、様々な実河川スケールを対象に、各種機器、手法を同時に利用して河川の流速観測を行った。その結果、各種の観測機器、手法の長所や短所を明らかにすることができた。

ADCPは、鉛直方向の流速成分を時間分解能も細かく計測できる大きな利点がある。しかし、神通川では、洪水時の高濁度や気泡による欠測の問題が発生し、安定したデータの取得が出来なかった。黒部川では、ADCPが波のうねりによってボートが大きく揺動してしまい、データのばらつきが生じた。黒部川のように流速が大きい場合は、高流速用の観測艇を導入する必要がある。

ライス式流速計は、安定して長時間観測することが出来ると評価できる。しかし、洪水時における流木、草木やゴミによる機器への障害によって、観測困難になる事や高流速時にライス式流速計が表面付近まで上がってしまうという問題が生じた。

電波流速計は、本研究の中では最も安定的に連続したデータの取得が出来た。高濁度や高流速においても、問題なく観測でき、設置も容易なことから、洪水時の観測に適した方法だと考えられる。図-15より、本研究で算出した電波流速計評価指数の平均値は0.93~1.11であった。これは、ADCPやライス式流速計による流速観測において、連続したデータの取得が出来なかった時や欠測値が生じた時、電波流速計評価指数を用いて、取得出来なかったADCP及びライス式流速計による流速値の

推定が可能である。前述の観測結果や考察より、洪水時において、ADCPやライス式流速計は連続したデータの取得が容易ではないため、電波流速計は他の流速測定機器のデータの間を埋める代替機としても活用出来ると評価できる。電波評価指数を一般的に用いるためには、今後観測ケースを増やすことで、更に多くの観測データを用い、電流流速計評価指数の検討が必要である。

浮子観測は、他の流速測定機器と比較すると、流速値が大きく、データのばらつきが大きいものの、危険な洪水時においても安全に観測できる。図-12、図-13、図-14より本研究で算出した浮子評価指数の平均値は0.84~0.96であった。浮子の既存の更正係数は表面が0.85、吃水50 cmが0.88、吃水100 mが0.91であるが、本研究では吃水による浮子評価指数の定性的な違いは認められない。

今後も観測ケースを増やす事で、これまでの問題点をさらに検討し、時空間スケールや状況に応じた適切な河川流量観測手法を提案したい。

謝辞：本研究の遂行にあたり、㈱ハイドロシステム開発、横河電子機器㈱にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 安芸皎一：浮子特に竿浮子による観測流速の更正係数に就て、土木学会誌, Vol.18, No.1, pp.105-129, 1932.
- 2) 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.
- 3) 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, 第51巻, pp.1081-1086, 2007.
- 4) 深見和彦, 今村仁紀, 田代洋一, 児玉勇人, 中島洋一, 後藤啓介：ドップラー式非接触型流速計(電波・超音波)を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～、河川技術論文集, 第14巻, pp.307-312, 2008.
- 5) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 深見和彦：日本におけるADCPを用いた高水観測手法、河川流量観測の新時代, 第2巻, pp.34-41, 2011.
- 6) 手計太一：ADCPを利用した水理・水文観測事例—塩水楔と失水・得水量—、河川流量観測の新時代, 第2巻, pp.66-71, 2011.
- 7) 山口高志：電波流速計による洪水流速観測の失敗を含めた事例集、河川流量観測の新時代, 第2巻, pp.20-27, 2011.
- 8) 稲垣達弘, 柿沼孝治, 三宅洋：十勝川千代田実験水路におけるADCP及び電波式流速計による流量観測、河川流量観測の新時代, 第2巻, pp.57-65, 2011.
- 9) (独)土木研究所編：水文観測, (社)全日本建設技術協会, 1992.
- 10) 本永良樹, 萬矢敦啓, 深見和彦, 柿沼孝治, 山坂昌成：河川流速測定に関する新旧技術の比較～浮子測法と新技術 (ADCP, 電波流速計) の比較～, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, II-22, 2013
- 11) 江蔵拓, 笹川幸寛, 手計太一：各種河川流速観測手法に関する基礎的検討、河川流量観測の新時代, 第3巻, pp.41-48, 2012.

(2013. 4. 4受付)