

高水流量観測の省力化に関する精度検討

ACCURACY STUDY ON LABOR SAVING OF FLOOD DISCHARGE MEASUREMENT

小野史也¹・井上拓也¹・木下武雄¹・森田靖則²・持丸章治²・北野実紀²

Fumiya ONO, Takuya INOUE, Takeo KINOSITA, Yasunori MORITA,
Shoji MOCHIMARU, Miki KITANO

¹株式会社水文環境 技術部 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10-6)

²国土交通省関東地方整備局 利根川上流河川事務所 (〒349-1198 埼玉県久喜市栗橋北2-19-1)

This report is aimed at solving the problems related to the float observation of discharge in wide rivers. Flood discharges were observed by the float, ADCP, the mobile radio current meter and video image velocimetry in the projects at two sites of the Tone River.

As a result, observation using the mobile radio current meter spent the 1/3 of the time in float observations at the same condition. An observer could spend the time efficiently to observe discharge within 5% of the difference between the float and the mobile radio current meter. Labor saving effect was very clear by the current meter.

Key Words : river-discharge, labor-saving, float method, mobile radio current meter, ADCP, Tone river

1. はじめに

流量観測は、わが国の河道計画及び管理等における極めて重要な資料であり、河川砂防技術基準等に基づき、高水流量は浮子測法による観測、低水流量はプロペラ式等の可搬式流速計測法による観測が原則とされている。

浮子測法は比較的簡便で長年データが蓄積された手法であるが、それでも利根川や荒川等の川幅が広く水深のある河川においては1回あたりの観測に長い時間を要し、多くの観測員を必要とする等の問題がある。近年、観測員の高齢化や業界の縮小に伴う人員不足により流量観測業務が敬遠され、高水流量観測が実施できない事態も発生しており、高水流量観測手法の省力化検討が喫緊の課題となっている。

近年では高水流量観測に様々な新技術が試験的に導入されてきており、各々の検証結果から各新技術手法の信頼性が向上している中²⁾ ³⁾で、利根川中流部においても携帯型電波流速計観測やADCP観測、画像解析等の新技術を活用した高水流量観測手法の検討を実施している。

本報告は、利根川中流部で実施してきた新技術を活用した高水流量観測のうち、埼玉大橋（埼玉県加須市：図-1）地点における平成26年10月の台風18号に伴う出水及び19号に伴う出水と、芽吹大橋（千葉県野田市：図-1）地点における平成27年9月関東・東北豪雨出水での

観測結果を基にした高水流量観測の省力化と精度確保に関する評価及び課題についての検討成果である。



図-1 観測地点位置図（利根川流域図）

2. 現地観測の内容

(1) 観測対象地点

本報告における現地観測の対象地点は、図-1に示した利根川中流部の埼玉大橋地点（利根川136.5km）と芽吹大橋地点（利根川104km）の2箇所である。

埼玉大橋地点は、新技術に拠っても高水観測の困難な

地点として選定した。河道幅：約650m，低水路幅：約300mである。埼玉大橋は太鼓橋で歩道欄干から水面までが非常に高く（欄干最高位：Y.P.36.5m，平水位：約Y.P.13.0m，差＝23.5m程度），歩道幅が1.0m程度と狭い。高水流量観測が極めて困難な観測環境である。

芽吹大橋地点は、氾濫注意水位を超える規模での洪水に対する携帯型電波流速計の適応性の検討地点として選定した。河道幅：約550m，低水路幅：約200mである。芽吹大橋はトラス橋であるが、車道とは分離した歩道橋があり、歩道欄干から平水面までの高さは15.3m（平成28年2月16日 11：30測量）である。

両地点共に川幅が広く、浮子測法による測線数は20測線（標準法）であり、これまでの浮子測法では、2班編成でも1回の観測が1時間以内で完了しない等の多大な労力を要している。

(2) 本観測での主要な観測機器

本観測で使用した主な観測機器は、①ADCP（TeledyneRDI製 WH-RioGrande）、②携帯型電波流速計（横河電子機器製 RYUKAN）、③風向風速計（KADEC21-KAZE）である。

(3) 埼玉大橋地点における観測概要

埼玉大橋地点では、平成26年10月6日出水（流量規模：約1,200m³/s，低水路満杯程度の中出水，以下：10.06出水）と平成26年10月14日出水（流量規模：約500m³/s，平水位よりも1m程度上昇した小出水，以下：10.14出水）の2出水を対象として、浮子測法，ADCP観測，携帯型電波流速計観測，風向風速観測を実施した。

a) 浮子測法

低水路内の代表測線①～③（図-2）において1m吃水浮子により、従来通りの浮子流下時間計測を実施した。

b) ADCP観測

ADCP観測は、埼玉大橋からの橋上操作観測とし、横断観測による流量観測と代表測線①～③での定点観測（表面流速が受ける風の影響を検討するための流速鉛直プロファイル計測）を実施した。なお、洪水時のADCP観測であったため、ADCPとVRS-RTK-GPS（JAVAD GNSS製 DELTA）と音響測深器（Ohmex製 SonarMite）を併用し欠測防止を図った。

c) 携帯型電波流速計観測

低水路内の10測線（標準法に準拠）で各測線1分間の定点観測（サンプリング間隔： $\Delta T=1.0s$ ）を実施した。また、浮子測法と同様の代表測線①～③で、約10分間の連続定点観測（ $\Delta T=1.0s$ ）を実施した。なお、俯角は45度に固定した。

d) 風向風速観測

風速が表面流速に与える影響の検討及び流速値の補正を目的として、風向風速観測を実施した。なお、水面近くの右岸高水敷上において、各観測期間中に連続的な風向風速観測（ $\Delta T=1.0s$ ）を実施した。

観測時の風速状況について図-3に示す。10.06出水時は、前半の18:00頃までは連続的に5.0m/s程度の順風（流下方向）が発生していたが、それ以降はほぼ無風に近い状態が続いた。一方、10.14出水時は、5.0～10.0m/s程度の順風が観測期間中は常に発生していた。

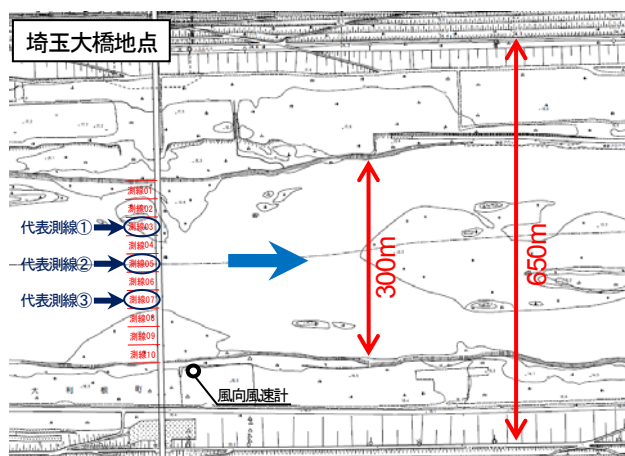


図-2 埼玉大橋地点平面図

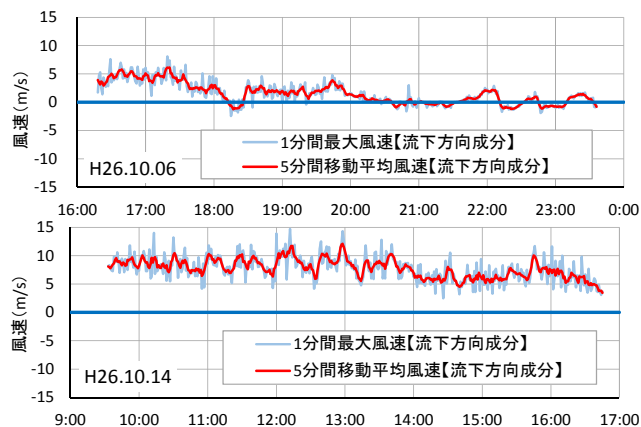


図-3 観測時の風向風速状況（埼玉大橋）

e) 観測時の水位状況

埼玉大橋地点における観測実施時の水位状況を図-4に示す。なお、10.06出水では8回、10.14出水では6回の観測を実施しており、10.06出水の方が2.0m程度高い水位で観測している。

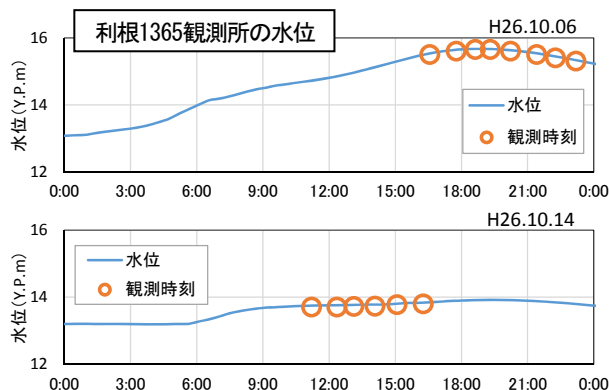


図-4 観測時の水位状況（埼玉大橋地点）

(4) 芽吹大橋地点における観測概要

芽吹大橋地点では、平成27年9月関東・東北豪雨出水（流量規模：約4,500m³/s、氾濫注意水位を超える大出水、以下：09.10出水）を対象として、浮子測法と携帯型電波流速計観測を実施した。

a) 浮子測法（高水）

標準法の20測線で、流量算出を目的とした従来通りの浮子流下時間計測を実施した。なお、各測線での投下浮子は浮子表に準拠した。

b) 携帯型電波流速計観測（高水）

浮子測法と同様の標準法20測線で、俯角を40度に固定し、各測線1分間の定点観測（ $\Delta T=1.0s$ ）を実施した。

c) 観測時の水位・風速状況

芽吹大橋地点の09.10出水での観測実施時の水位状況を図-5に、江戸川河川事務所（野田）の風速状況を図-6に示す。なお、観測期間中の風は弱く、観測時の体感的には、ほぼ無風であった。

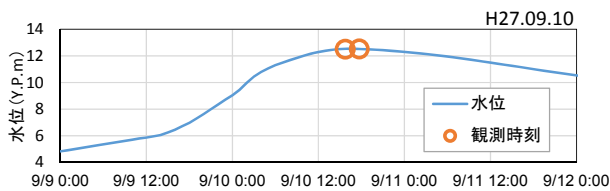


図-5 観測時の水位状況（芽吹大橋地点）

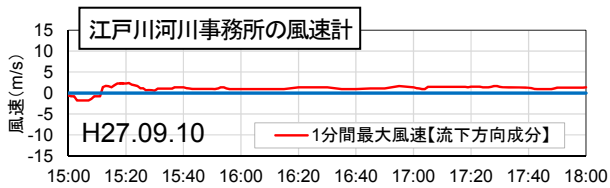


図-6 観測時の風向風速状況（芽吹大橋地点）

3. 観測精度の検討

(1) 流速比較による観測精度の検討

a) ADCPと電波流速計による流速比較

10.06出水の第8回観測（23:11）の携帯型電波流速計流速（以下： V_{mr1} ）とADCP流速（測線区間の平均流速、以下： V_{ADCP_Ave} ）の流速比較を図-7に示す。第1縦軸が流速、横軸が観測の横断位置（追加距離）、第2縦軸が地盤高（Y.P.m）を示している。 V_{mr1} と V_{ADCP_Ave} は、概ね整合した傾向が見られた。しかし、風が弱まった後半観測（20:00以降）では、携帯型電波流速計のデータ取得率が非常に悪く、ほぼ欠測の状態が続いており、第8回観測では図-7に示す通り、測線2、3及び測線7、8の4測線のためのデータ取得となった。

続いて、10.14出水の第6回観測の V_{mr1} と V_{ADCP_Ave} の流速比較を図-8に示す。図-8では、 V_{ADCP_Ave} に比べて明らかに V_{mr1} が速い流速を示している。これは、10.14出水時が、非常に風が強い観測環境であったこともあり、表面流速の V_{mr1} は、風の影響を受けて流速が速く計測されていると想定される。

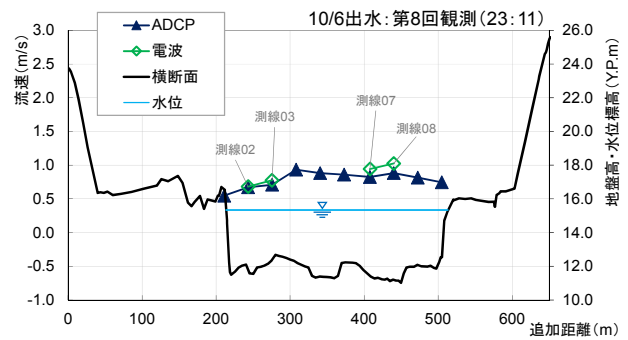


図-7 流速横断比較図（埼玉大橋地点：10.06出水）

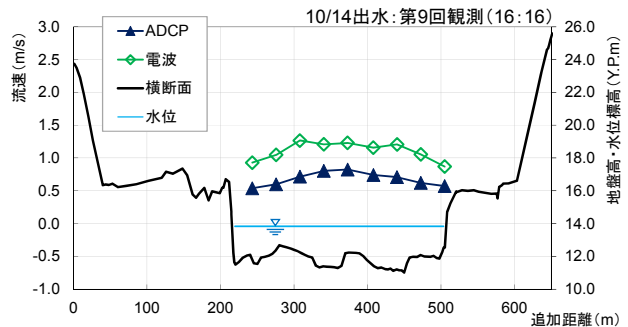


図-8 流速横断比較図（埼玉大橋地点：10.14出水）

b) 浮子測法との流速比較

10.14出水時では代表測線②（図-2）において、浮子測法と定点ADCP観測と定点携帯型電波流速計観測を同時に実施し、この観測による流速比較結果を図-9に示す。なお、浮子測法には $\pm 5\%$ 範囲を赤線で表示している。

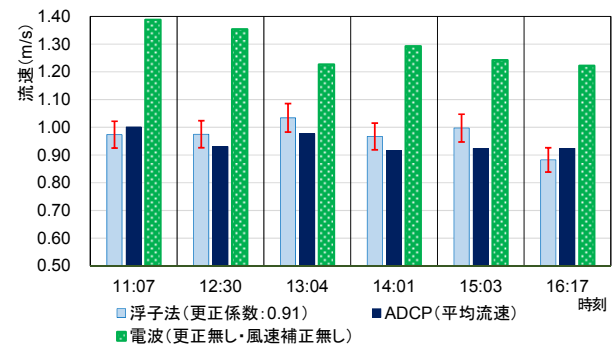


図-9 浮子測法とADCP流速・電波流速の比較（10.14出水）

浮子測法の流速は、従来通りの第1見通断面～第2見通断面間での浮子流下時間計測で算出した値であり、1m浮子の更生係数0.91を乗じている（以下： V_{fl} ）。

ADCP流速は、各観測回における10分間定点観測の平均値（以下： V_{ADCP_AA} ）であり、電波流速も V_{ADCP_AA} と同様に10分間定点観測の平均値（以下： V_{mr_C} ）である。なお、 V_{mr_C} には更生係数等を乗じていない。

V_{ADCP_AA} は、 $\pm 5\%$ 程度のバラつきは見られるものの、 V_{fl} とはほぼ一致する結果が得られた。

しかし、表面流速の V_{mr_C} に関しては、 V_{fl} や V_{ADCP_AA} に比べて25%～40%程度も速い流速値を示している。

これは、図-8と同様に風の影響と考えられる。

c) 浮子測法と携帯型電波流速計観測での流速比較

09.10出水（第1回 15:48，第2回 17:44）での浮子測法による浮子流速（以下： V_{f2} ）と携帯型電波流速計流速（以下： V_{mr2} ）の流速比較について図-10に示す。第1縦軸が流速値，横軸が観測の横断位置（追加距離），第2縦軸が地盤高（Y.P.m）を示している。

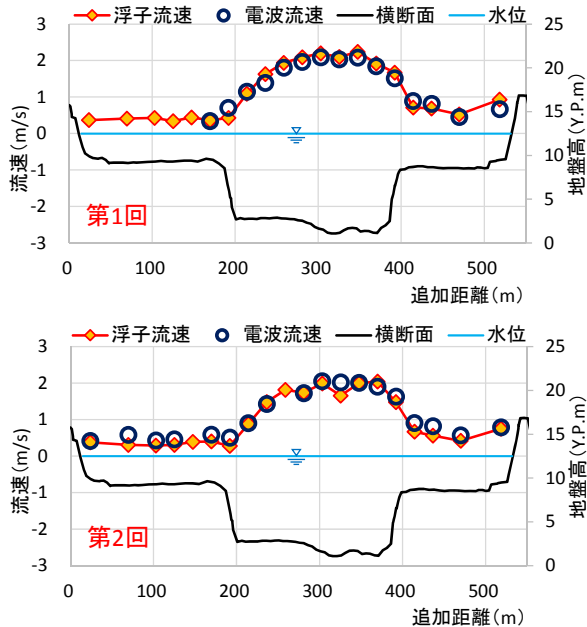


図-10 流速横断比較図（芽吹大橋地点：09.10出水）

V_{f2} は浮子の流下速度に各浮子長に応じた更正係数を乗じた流速値であるが、 V_{mr2} は更正係数を乗じていない計測値である。本来、安芸式⁴⁾により仮定された鉛直流速分布を基に、表面流速には0.85の更正係数を乗じる必要があるが、今回の観測結果では、更正係数を乗じた V_{f2} と更正係数を乗じていない V_{mr2} が概ね一致する傾向が見られた（決定係数 $R^2=0.939$ ）。なお、 V_{mr2} が1.7%程速くなる傾向が見られた（図-11）。

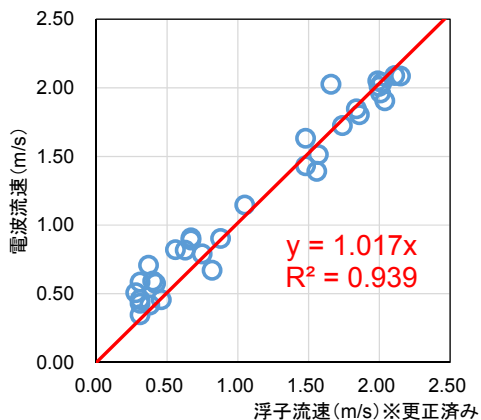


図-11 浮子流速と電波流速の相関関係（芽吹大橋地点）

(2) 流量比較による観測精度の検討

09.10出水での第1回・第2回観測について、 V_{f2} と V_{mr2} を用いて各々の流量値（浮子流量= Q_{f2} ，電波流量= Q_{mr2} ）を算出した（表-1）。その結果，両観測回共に Q_{f2} と Q_{mr2} の差の割合は5%以内となった。

表-1 浮子流量と電波流量における差の割合

観測回	浮子流量 Q_{f2}	電波流量 Q_{mr2}	差の割合 ($Q_{mr2}-Q_{f2}$)/ Q_{fs}
第1回	4086.64	4089.08	0.06%
第2回	3822.09	3960.69	3.63%

(3) 表面流速の風の影響検討

携帯型電波流速計は，浮子測法と比較しても概ね同様の流速計傾向が得られる（図-11参照）ことが確認されたが，10.14出水時の様に極端に風が強い場合には，風速により風の影響を補正する必要がある。

10.06出水（微風時）と10.14出水（強風時）の定点観測で得られた流速の鉛直分布図を図-12に示す。表面流速が風の影響を受けている様子が，ADCPと携帯型電波流速計による定点観測の結果から明確に確認できる。

本定点観測は，10分間の連続観測（電波 $\Delta T=1.0s$ ，ADCP $\Delta T=2.0s$ ）であり，図-12の各点は10分間の平均値である。

10.06出水での V_{mr1} とADCP流速（以下： V_{ADCP} ）は，表面付近ではほぼ同等の値を示しているが，10.14出水では V_{mr1} と V_{ADCP} とで0.34m/sもの流速差が生じている。

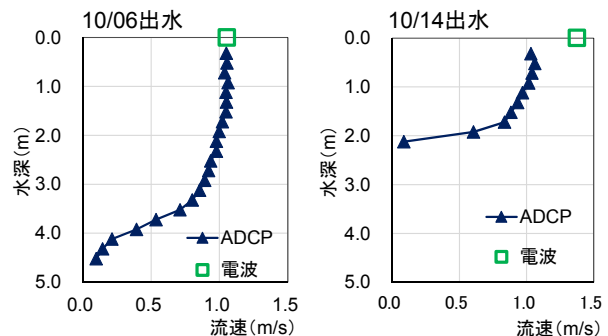


図-12 流速鉛直分布図（ADCPと電波の比較）

ADCP計測部の流速のうち，上層第1層流速（水面下0.32m）を風の影響を受けていない表面流速値（以下： $V_{ADCP,s}$ ）と仮定し，電波流速 V_{mr1} と $V_{ADCP,s}$ の流速差（ $V_b=V_{mr1}-V_{ADCP,s}$ ）を風の影響量と仮定した。この流速差 V_b と風速の関係について図-13に示す。

図-13によると，風速の4.93%が流速差となる傾向が見られた。これは，本永ら⁹⁾が示す7.4%や，恩田ら¹⁰⁾が示す7.73%よりも傾きが小さくなる傾向となったが，①既往成果に比べて最大風速の規模が格段に大きい，②水面に近い高さと風向風速を計測した等が，既往成果と傾

向が異なる要因として考えられる。

なお、図-9の電波流速 $V_{mr,c}$ から当該時刻の風速の4.93%を差し引いた結果を図-14に示す。 $V_{mr,c}$ は浮子測法やADCP観測による流速値と概ね同様の値となり、図-13で求めた傾向は概ね妥当であることが分かった。

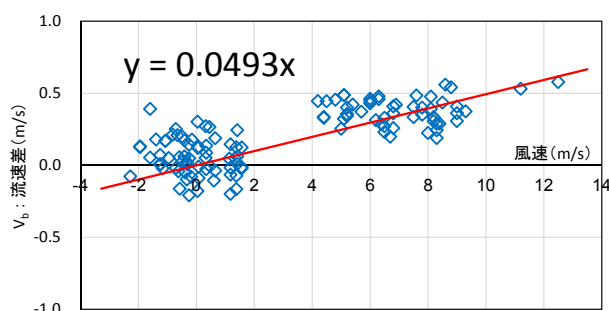


図-13 流速差と風速の相関関係

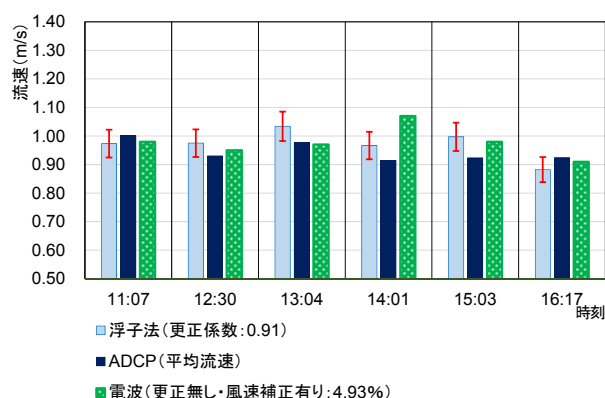


図-14 浮子測法・ADCPとの流速比較（電波：風速補正実施）

(4) 電波流速計データ取得率と風速の関係

表面流速の風の影響に続き、観測精度の検討の一環として、電波流速計のデータ取得率の変化についての考察を述べる。10.06出水（微風時）と10.14出水（強風時）における電波流速計データ取得率と風速の時系列変化を図-15に示す。なお、この時の流速は、両出水共に0.8～1.5m/s程度であった。

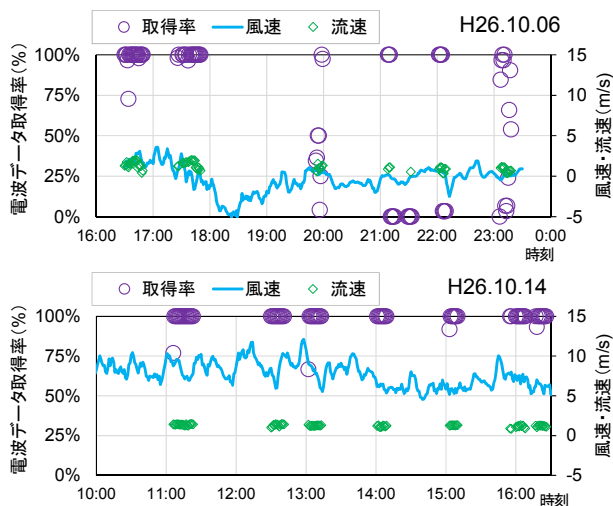


図-15 電波データ取得率と風速の時系列変化

10.06出水は、10.14出水よりも2.0m程度水位が高い状態（図-3参照）であるが、データ取得率の低下が顕著に見られる。これに対し、常に風速が5～10m/s程度発生していた10.14出水では、電波流速計の照射距離が30mを超える（照射面から水面までの鉛直距離＝約22.7m、俯角＝45度、 $\therefore$ 照射距離＝約32m）にも係わらず、データ取得率の低下は殆ど見られなかった。

この時の風速と電波データ取得率の関係を図-16に示す。今回の観測結果では、風速が2.0m/sを超えると電波流速計のデータ取得率が65%を超える傾向が見られた。基本的に風が強くなるほど水面波が顕著に現れ、電波の反射強度が上昇することに起因すると考えられる。

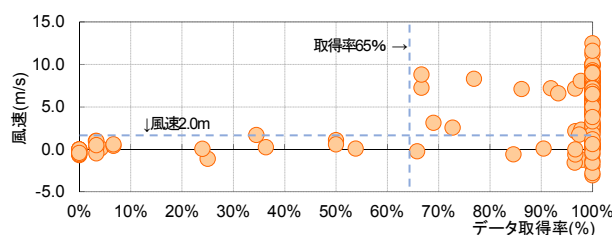


図-16 風速と電波データ取得率の関係

さらに、電波流速と電波データ取得率の関係を図-17に示す。図-17では、流速が上昇するに連れて取得率も上昇する傾向が見られ、流速が1.5m/sを超えると電波流速計のデータ取得率はほぼ100%になることが解った。

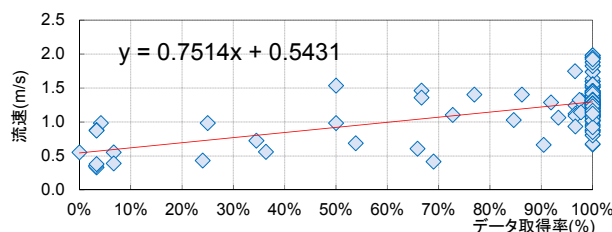


図-17 流速と電波データ取得率の関係

4. 観測の省力化の検討

(1) 浮子測法と携帯型電波流速計観測での観測時間比較

09.10出水での第1・第2回観測についての観測時間の比較結果について表-2に示す。

表-2 浮子測法と携帯型電波観測における観測時間の比較

観測回	方法	観測開始	観測終了	経過時間	縮小率
第1回	浮子	15:15	16:20	65分	—
	電波	15:15	15:42	27分	42%
第2回	浮子	17:00	18:28	88分	—
	電波	17:00	17:28	28分	32%

浮子測法は1回の観測に65分～88分要したのに対し、携帯型電波流速計観測は30分以内で観測が完了した。30分以内での観測時間であれば、1時間に1回の頻度で

流量観測を実施することも十分に可能であり、かつ合間の休憩時間も見込める。また、浮子測法の場合は、合間の時間で浮子を各測線に配置する等の準備作業が必要となるが、携帯型電波流速計観測には、その準備作業の必要が無い。よって、携帯型電波流速計観測は、浮子測法と比べても省力性が高いと判断できる。

(2) ADCP観測の位置付けの検討

ADCP観測は、観測機器が非常に高価であり、観測作業自体に高度な技術を要し、場合によっては浮子測法よりも多くの観測員が必要となるため、高水流量観測の省力化には繋がり難い。

実際に、埼玉大橋の様に橋高の高い（水面高まで20m以上ある）地点では、橋上操作によるADCP観測の現場作業自体が非常に困難であった。また、芽吹大橋の様なトラス橋では橋上操作での横断観測は不可能である。

しかしながら、ADCP観測では、他の観測では得られない詳細な流速分布が得られるため、各対象地点に適した携帯型電波流速計流速に乗ずる更正係数（鉛直流速分布から算出）や、本報告でも述べた風の影響検討においては、これらの検証用観測データとして重要な役割を担っている。

よって、今後、携帯型電波流速計を用いて流量観測を実施する場合においては、可能な箇所でADCPによる定点観測を行い、流速の鉛直分布を取得し、携帯型電波流速計の観測値に反映させることで、高水流量観測の省力化と精度向上が連動していくと考える。

5. 各手法の省力化および観測精度に関する特徴

本報告において得られた知見を以下にとりまとめる。

- a) ADCP観測は、詳細な流速分布が得られ、河床高（水深）計測が同時に行われるため、流量算出において付帯観測の必要が無く、利便性の高い観測手法であることが確認された。しかし、観測機器が非常に高価であり、埼玉大橋の様に橋高の高い（水面高まで20m以上ある）地点では、橋上操作によるADCP観測の現場作業自体が非常に困難であった。また、芽吹大橋の様なトラス橋では橋上操作での横断観測は不可能である。
- b) 携帯型電波流速計観測は、現場作業自体が非常に容易であり、水面からの距離が7.5m、河道幅500m以上で20測線が観測対象となった場合でも、浮子観測の1/3程度の時間（30分以内）かつ観測員1名で1回の観測を終えることができた。また、浮子との流量差も5%以内に収まることも確認された。しかし、風の影響を顕著に受ける点（付帯観測として風向風速観測が必要）や、埼玉大橋の様に橋高が極端に高い観測環境、水面波が殆ど見られない状況では、電波の反射強度が弱まり、データ取得率が0～50%程度まで低下する点については留意が必要である。

- c) 携帯型電波流速計の計測可能距離は電波照射面～水面まで20m以内（斜距離）とされていたが、埼玉大橋の様に水面から電波流速計までの鉛直高が20m以上ある地点（俯角45度で斜距離≒28m）で、風速2.0m/s以上の風が発生する場合や、流速が1.5m/sを超える場合では、データ取得率が65%～100%程度まで上昇することが確認された。
- d) 今回の観測データからは、風速の補正係数（4.93%）を考慮することで、浮子測法やADCPと概ね一致する流速値が得られることを確認した。ただし、流速差と風速のプロット位置のバラつきが顕著（図-13）であるため、今後も観測データを蓄積し、補正係数の算出精度を高める必要がある。
- e) 芽吹大橋では、鉛直平均流速と仮定した浮子流速と更正係数を乗じていない電波流速が概ね一致する傾向となった。これは、表面流速が鉛直平均流速に近似したことが要因だと推察される。なお、流速の鉛直分布は、流速規模や粗度環境等により変化することが考えられるため、携帯型電波流速計の適切な更正係数については今後の課題として検討が必要と考えている。

6. まとめ

携帯型電波流速計は、観測精度において従来の浮子測法と同等の観測値が得られ、かつ、観測時間や観測員数の省力化が図れるため、河道幅500m級の河川における高水流量観測の省力化には、極めて有効な1手法だと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 調査編，pp.第2章第4節－16-第2章第4節－20，2014。
- 2) 島本重寿，藤田一郎，萬矢敦啓，柏田仁，浜口憲一郎，山崎裕介：画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討，河川技術論文集，Vol20，pp37-42，2014。
- 3) 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。
- 4) 土木学会 水理公式集 昭和46年改訂版 PP162，1971。
- 5) 本永良樹，萬矢敦啓，深見和彦：河床変動及び強風を伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討，土木学会論文集B1，Vol.69，No.4，pp.745-750，2013。
- 6) 恩田実之留，平川隆一，大野智弘，柏田仁，山崎裕介，井上拓也，阿部昭寛：河川上流部での非接触型流速計測法を用いた高水流量観測の実用化，河川技術論文集，Vol21，pp95-98，2015。

(2016.4.4受付)