

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～

CURRENT STATUS OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION USING NON-
CONTACT CURRENT METER FOR OPERATIONAL USE IN JAPAN

深見和彦¹・今村仁紀²・田代洋一³・児玉勇人⁴・中島洋一⁵・後藤啓介⁶
Kazuhiko FUKAMI, Hitoki IMAMURA, Yoichi TASHIRO, Hayato KODAMA,
Youichi NAKAJIMA, Keisuke GOTO

¹正会員 工修 (独) 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 水文チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番6)

²正会員 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部岩見沢河川事務所
(〒068-0007 北海道岩見沢市7条東9丁目3番地1)

³正会員 (財) 土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

⁴株式会社東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

⁵横河電子機器株式会社 (〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-27-2)

⁶小糸工業株式会社 (〒244-8659 神奈川県横浜市戸塚区前田町100)

Experiments of continuous flow rate measurements using non-contact Doppler-type current meters were made during floods in three rivers of Japan. As a result of the study, the authors have confirmed that the Doppler-type current meters can be utilized as substitutes for the float method which has been being conventionally applied for flood flow measurements in Japan. Furthermore, it is also indicated this kind of non-contact current meter can detect the H-V loop relations during floods and the change of hydraulic conditions of the observation section such as river bed and its roughness.

Key words: non-contact current meter, radio current meter, ultrasonic current meter, hydrometry, float

1. はじめに

日本における河川の流量観測は、河川の断面積と流速を測り、両者の積として流量を求める方法が一般的である。流速の測定には、低水時は可搬式流速計を用いる一方、洪水時は大きな河川流速や多量の流下ゴミのために、可搬式流速計の維持が難しいこと、危険を伴うことから浮子による観測（浮子測法）を通常用いる。浮子測法では5～6名がチームとなり、橋梁や専用の投下装置から浮子を投下し、浮子が一定の区間（助走区間30m以上、計測区間50m以上）を流下する時間を計測しその区間の平均流速を求める。その際、使用する浮子の選定、測線の配置、浮子流速を平均流速に換算するための更正係数などが技術的には重要になるが、通常は国土交通省による基準に基づいて実施されている¹⁾。この基準は、1950年代に当時の建設省（現在の国土交通省）によって定められて以来、ほぼ、そのままの形で踏襲されてきている。

しかし、流量観測に直接従事できる経験豊かな職員が多数存在することを前提にできた当時とは、現在は人的・予算的条件が大きく異なっており、流量観測の量や質のみならず、社会から期待される迅速な情報公開等の新しいニーズに対応することが今後難しくなっていくことも懸念される。

このような中で、最近、河川の流れを計測する新しい技術がいくつか提案されており、既往の観測方法の課題を改善し、今後の河川の流量観測に新しい方向性をもたらすものとして期待されている²⁾。

中でも、非接触型流速計は、流水に直接触れることなく河川の表面流速を計測するセンサであることから、表面流速値を適切に深さ方向の平均流速値に変換することで、河川の流量を無人で自動的に連続観測できる大きな可能性を秘めている。そのようなシステムが実用化できれば、現行の浮子測法が抱えがちな、①人力観測であり急激な洪水の立ち上がりやピークの観測に間に合わない、②洪水中の観測回数が少ない、③中小洪水の観測

データが少ない、④安全上の問題がある、等の運用上の定の観測精度の確保を同時に図ることが可能になると考えられる。このことから、非接触型流速計を用いた洪水流量観測システムは、ある流量観測所に固定設置し洪水流量を連続モニタリングする手法として、その実用化と普及への期待は大きい。

非接触型流速計は、大きく分けて、電波や超音波を用いて河川の表面流速を測るドップラー式流速計と、ビデオ画像から河川表面の波紋や濃淡等の模様を測る画像処理式流速計との2つに分類されるが、本論文では、国土交通省が札内川、利根川、由良川にパイロット的に設置したドップラー式流速計の実用可能性について検討した初期成果を報告する。

2. ドップラー式流速計の概要

(1) 概要

ドップラー式流速計には電波流速計及び超音波流速計があるが、大きさ、形状等の諸元は類似である。

道路橋などを利用して河川の横断方向に複数の受信器を配置し、マイクロ波もしくは超音波のドップラー効果により表面流速を無人で連続観測することができる。

設置事例を写真-1に示す。



写真-1 ドップラー式流速計の設置例
(超音波流速計(左), 電波流速計(右))

(2) 測定原理

ドップラー式流速計では、照射波と移動体からの反射波の周波数の違いから、移動体の速度を算出する。

電波の周波数 f 、波長 λ 、伝播速度 v の間には(1)式の関係がある。周波数 f の電波を、速度 v_x で移動し

$$v = \lambda f \quad \dots\dots (1)$$

$$f_r = f + \frac{2v_x}{\lambda} \quad \dots\dots (2)$$

$$f_d = f_r - f = \frac{2v_x}{v} f \quad \dots\dots (3)$$

$$f_d = \frac{2f}{v} v_x = \frac{2 \times 10.525 \times 10^9}{2.99793 \times 10^8} v_x = 70.215 \quad \dots\dots (4)$$

課題を克服し、洪水流量観測の省人化・省コスト化と一ている物体に照射する場合、ドップラー効果により反射波の周波数は $2v_x/\lambda$ だけ増え、観測される反射波の周波数 f_r は(2)式となる。これを変形して照射波と反射波の差の周波数 f_d を取り出すと(3)式となり物体の速度に比例したドップラー周波数が得られる。電波流速計の場合、 $f = 10.525 \text{ GHz}$ 、 $v = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$ を(3)式に代入すると次のようになり、速度 1 m/s あたり約70Hzの周波数の差異(ドップラーシフト)が得られる。なお、電波と超音波の仕様の違いは表-1の通りである。

表-1 電波流速計と超音波流速計の仕様比較

	超音波流速計	電波流速計
使用周波数	20.4 KHz	10.525 GHz
伝搬速度 (m/s)	331.45+0.61T T: 気温 (°C)	$2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$
移動体流速 1 m/s 当りの ドップラーシフト (Hz)	85 Hz	70.215 Hz

我々の計測対象物体は河川水表面であるが、仮に河川水表面が限りなく滑らかな平面(鏡面状態)だったとすると、ドップラー方式では電波(音波)照射方向に反射波が生じないことから、表面流速を計測することは不可能である。したがって、水表面に存在する波が、ドップラーセンサの直接の計測対象であると言える。水表面に存在する様々な凹凸のうち、非接触型流速計測値に流速成分を生み出す波は、何らかの乱流擾乱(ボイル等)や風等を契機として発生し、水粒子自体の動き(表面流速)の上に載る形で水表面を伝播する微小振幅波であり、不規則波であると考えられる。したがって、非接触型流速計は、電波や超音波が照射される領域内における様々な方向を持った不規則波成分を計測することとなるが、その中から全ての不規則波成分に必ず重畳している、河川の自流による表面流速成分が卓越して検出されるものと考えられる³⁾。一方、風がある場合は、吹送流による流速成分がさらに重畳して流速プロファイルに影響を与える。土木研究所、土木研究センターと民間5社により構成された河川流量調査用の非接触型流速計開発の共同研究グループは、河川表面上を吹く風の風速計測値を用いることで、線形式により近似的に吹送流の影響を除去できることを示し、以下の実験式を提案した^{3), 4), 5)}。

$$\text{補正流速} = \text{観測流速} - U_{10} \cos \Phi \times 0.016 \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 U_{10} は風向風速計の風速から水面上10mの流速、 Φ は順流方向を正($\Phi=0^\circ$)とした風向値である。

一旦河川の表面流速が複数測線で得られれば、これらに更正係数を乗じて平均流速とし、各測線が分担する区分面積を乗じて合計することにより河川流量を求めることができる。

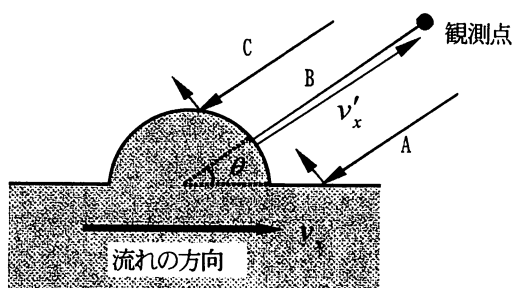


図-1 流速観測における俯角 θ の影響

なお、ドップラー式流速計を橋梁に設置する場合には、俯角 θ を考慮し、ドップラー速度計測値 V'_x と河川の表面流速 V_x との間に、 $V_x = V'_x / \cos\theta$ を適用する（図-1参照）。

3. ドップラー式流速計の現地検証

(1) 検討の概要

ドップラー式流速計は、簡便に洪水流況を監視するための装置としては、既に実河川での適用実績は多い（特に電波流速計）。本研究では、無人・自動での流量観測システムの実用性を検証することを目的として、国土交通省が3河川（3カ所）の水位流量観測所に新たに設置したドップラー式流速計を対象として、データ解析を行った。

(2) 非接触型流速計の設置箇所

設置箇所は、いずれも国土交通省が洪水時に浮子観測に用いている道路橋であり、その橋の桁下付近に固定設置されている（写真-1参照）。近畿地方整備局管内の由良川音無橋地点には電波流速計、北海道開発局管内の札内川札内橋地点には超音波流速計が設置されている。関東地方整備局管内の利根川八斗島地点には1999年から2004年にかけて電波流速計と超音波流速計が重複して設置され、両者の比較が行えるようになっている。各観測地点の横断面図と1台の非接触型流速計が分担する区間を図-2に示し、現地の平面図を図-3に示した。

(3) 更正係数の設定

ドップラー式流速計の測線毎の表面流速観測値から鉛直方向平均流速に換算するための更正係数は、利根川では水圧式水深流速計によって流速分布を実測して求めた。水圧式水深流速計はピトー管の原理を利用して動圧と静圧の差から流速を計測するものであり、回転式流速計のような可動部が無く、器深も自ら計測できることから、流速が速くゴミ等の流下物が多い日本の河川における洪水流でも、流速分布を直接計測することができる数少ない流速計である⁹⁾。水圧式水深流速計の形状は図-4のとおりである。これを橋梁上から一定速度で昇降させることにより流速分布を計測する。生の計測値は変動するため、実測した流速分布に適合する流速分布式を「対数分布式」、「Bazin式」、「安芸式」から抽出し、最も適合性の高いものによって平均的な流速分布を与えた。

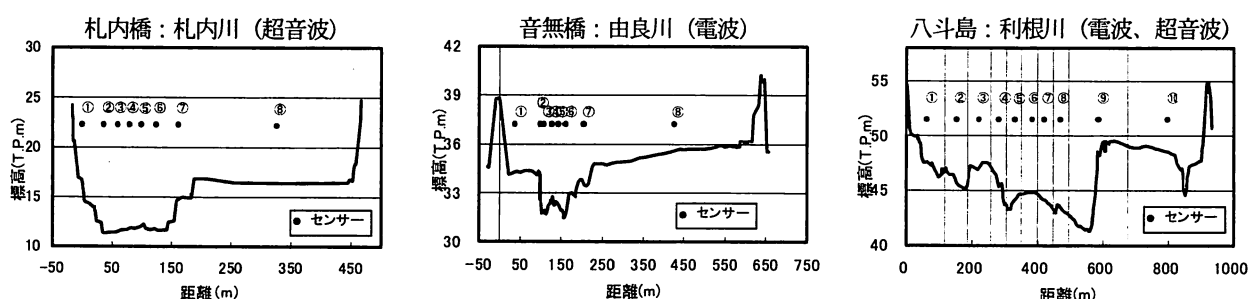


図-2 ドップラー式流速計観測地点横断面図



図-3 ドップラー式流速計観測地点の平面図（左から札内川、由良川、利根川）
〔図中の—— は、ドップラー式流速計の照射断面位置を示す〕

図-5は水圧式水深流速計を用い、出水時に利根川で実測した流速分布に3つの流速分布式をあてはめた例であるが、流速鉛直分布の実測値との誤差が最も小さくなる安芸式を用い、1洪水3測線の平均的な更正係数として0.88を得た。山口ら⁷⁾により電波流速計の更生係数0.85~0.90が得られており、Costaら⁸⁾は0.85を妥当としている。利根川八斗島地点で得られた0.88は、これらの既往の値と近いものの、若干大きめの値である。由良川、札内川は流速鉛直分布を実測していないことから、一般的な値である0.85を試算値として用いた。

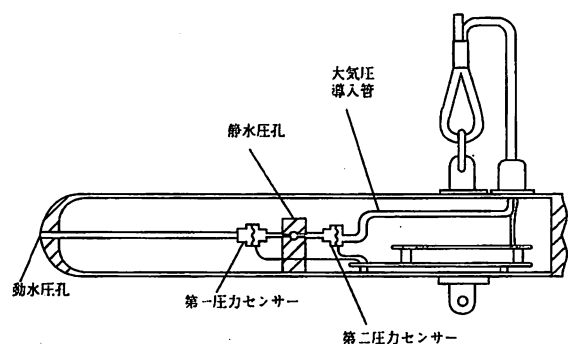


図-4 水圧式水深流速計の構造

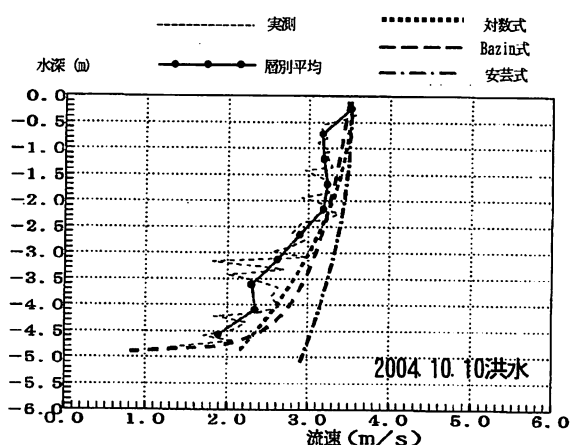


図-5 流速分布式のあてはめ(利根川；測線8)

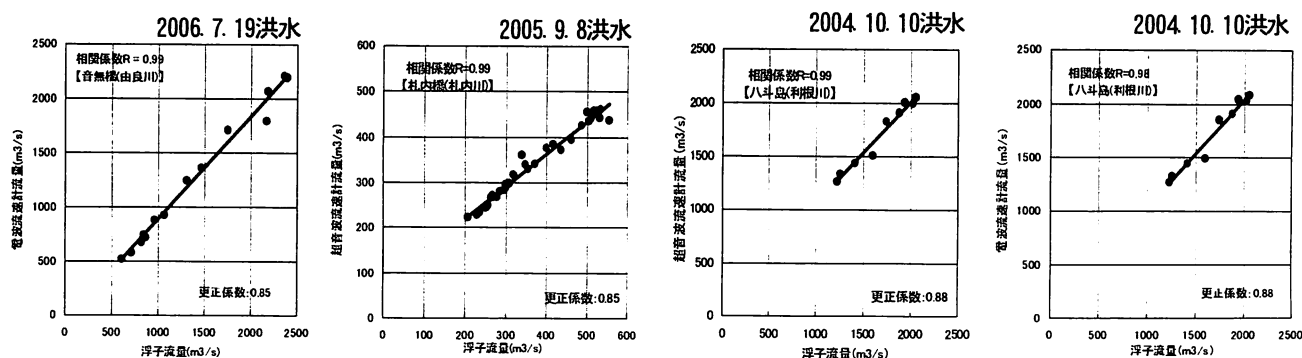


図-6 ドップラー式流速計と浮子による流量相関図

(4) ドップラー式流速計による流量観測結果

検討対象とした洪水の概要を表-2に示す。

表-2 検討対象洪水

観測所	河川名	対象洪水	ピーク流量	備考
札内橋	札内川	H17. 9. 8	628m ³ /s	台風
八斗島	利根川	H16. 10. 10	2,123m ³ /s	台風
		H16. 10. 20	3,728m ³ /s	台風
音無橋	由良川	H18. 7. 19	2,531m ³ /s	前線性

これらの洪水時におけるドップラー式流速計及び浮子による流量観測結果を図-6に示す（浮子データが少なかった利根川2004.10.20を除く）。広範な洪水流量範囲において、非接触型流速計による流量評価値と浮子流量観測値との間に高い相関があることが確認できる。図-7は流量ハイドログラフとしての比較を示す。一部の浮子観測がピーク付近を欠測しているという問題があるものの、ドップラー式流速計は浮子流観と概ね合致したハイドログラフを再現している。

次に、電波と超音波で観測を行った八斗島の結果をみると、いずれの対象洪水もピーク流量付近で超音波のほうが電波より大きな値を示し、2004.10.20洪水では両者間に約400m³/sと大きな差が生じている。この要因を調べるため2004.10.20洪水における測線ごとの観測状況の一例を示したものが図-8であり、ピーク流量付近の電波と超音波の乖離は測線7の観測結果が大きく影響していることが判明した。このことは2004.10.10洪水でも同様の傾向であった。八斗島での観測では、電波、超音波とも、センサは概ね同じ位置に設置されているが、取り付け高さは異なっている（超音波のほうが下方に設置）ため、両者の照射エリアが厳密に同じではない。一方、八斗島地点は低水路が右岸から左岸方向に斜めに形成され、低水路では斜め方向の流速成分が卓越していたと考えられることから、流心付近である測線7では両方式のセンサが流れの違う場所を観測していた可能性が考えられる。音無橋では電波流速計は浮子流量とよく一致した流量ハイドログラフを捉えているが、流量は全般に浮子

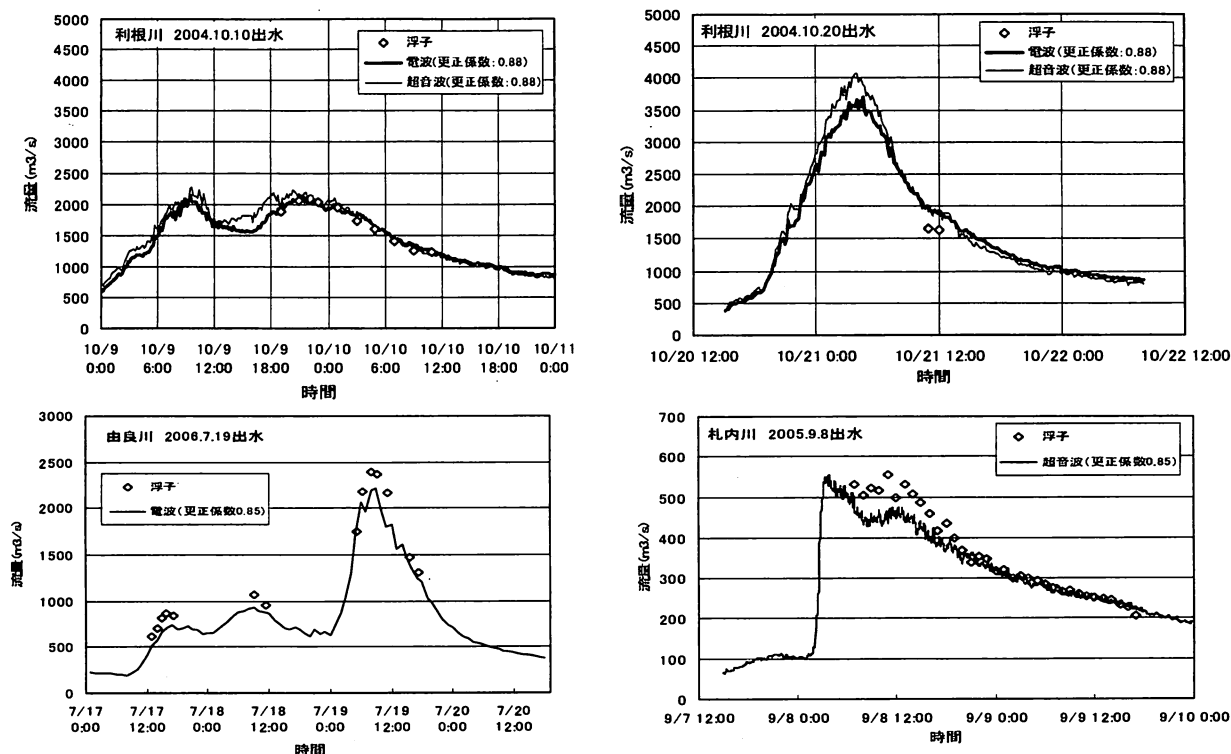


図-7 ドップラー式流速計観測結果

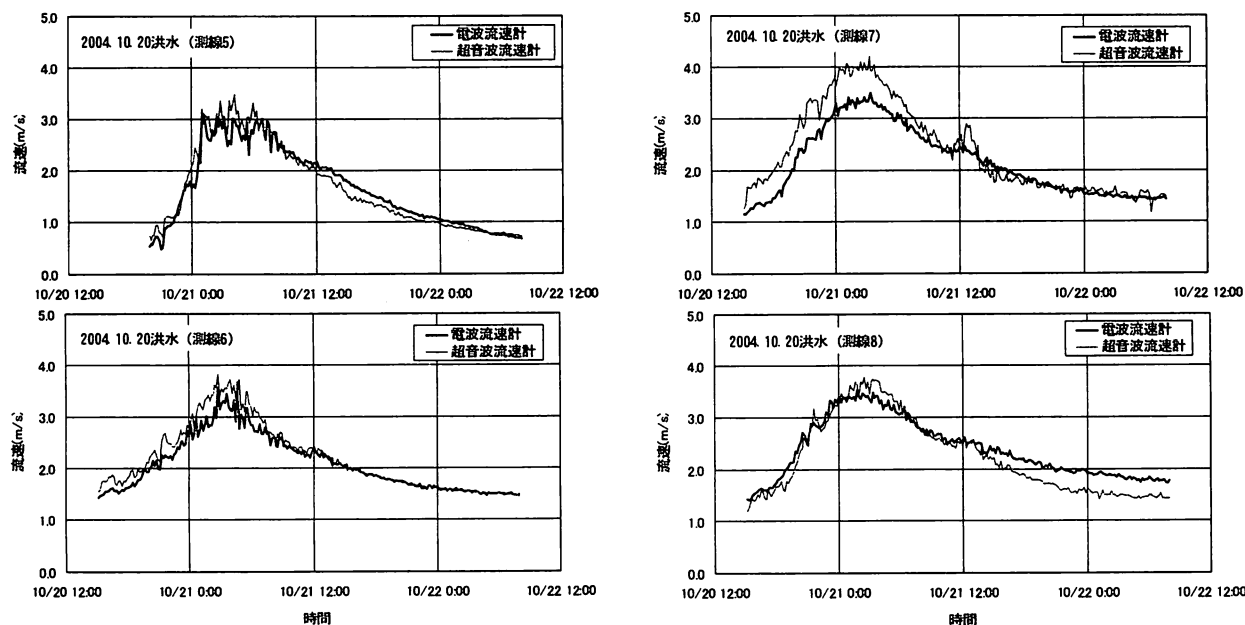


図-8 測線別流速時系列図 (利根川八斗島地点: 2004. 10. 20~10. 22)

流量の方がやや大きく、この理由として流量換算に用いた断面が浮子測法と電波流速計で異なること、電波流速計の更正係数を一般値の0.85とした影響等が考えられる。また、札内橋では通減部において超音波と浮子流観結果がよく一致するがピーク付近では差が見られる。これは河川流速に対する超音波のLinearityが状況によって変化することを示したものとも考えられるが、現状では明確ではない。今後、更にデータを蓄積して電波流速計と超音波流速計の流速に対するLinearityの特性を明らかにするとともに、河川断面内の流速分布を詳細に計測できるADCP (Acoustic

Doppler Current Profiler) を用いた観測流量との比較などを通して検証を進める必要がある。なお、2004. 10. 20は台風に伴い、図-9のようにピーク流量発生時付近で8m/s程度の風が吹いていたため、前出(5)式により水面付近の流速プロファイルに対する吹送流の補正を行った。補正の結果は図-10のとおりであり、観測流量が約180m³/s下方に補正され浮子流量(吹送流の影響を比較的受けにくい)との関係が改善した。このように、ドップラー式流速計は、まだ究明すべき課題を残してはいるが、洪水ハイドログラフを無人で自動連続観測できる特長を有し、浮子観測を代替できるレ

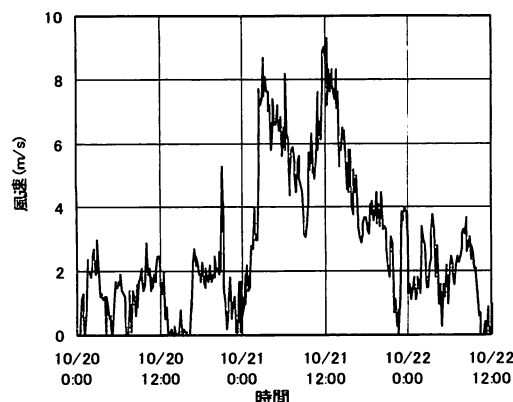


図-9 利根川における風速観測結果

ベルの観測精度を有していることから、河川の現場で実用化する能力を有していることを示すことができた。但し、ドップラー式の非接触型流速計を現地に設置した際には、浮子測法のみならずADCP観測データ等との比較分析を行うことで、定量的なシステム校正を行っておくことが必要であり、併せて精度管理手法を確立することが今後の課題である。

4. まとめ

本研究の成果を整理すると以下の通りである。

- 1) 非接触型流速計の1種であるドップラー式流速計（電波流速計及び超音波流速計）について、国土交通省が札内川、利根川、由良川の3地点に設置している合計4基の流量観測システムについて、平成16年から18年にかけての典型的な洪水観測事例を用いて、その精度評価と実用性検討を行った。
- 2) 非接触型流速計で得られる測線毎の表面流速値を鉛直方向平均流速に変換するための更正係数について、水圧式水深流速計を用いて実証的に推定した。利根川の八斗島地点では、流速分布式として最も実測値との適合度が高かった安芸式を用いて0.88を得た。他の地点では直接推定するためのデータを欠いたため通常の0.85を仮定しており、洪水流況や観測地点の特性との関連も含めて、さらに検証が必要である。
- 3) 非接触型流速計による流量観測値は浮子観測流量と非常に高い相関を確保できていることを確認した。
- 4) 但し、洪水ピーク付近で量的な差異が3種（浮子測法、超音波流速計、電波流速計）の間で見られる事例があり、測定領域の差異や計測特性の差異が影響している可能性がある。これらの点を解明するために、今後、ADCP等を用いてより詳細な洪水流況トランスデータを確保した上で検討を行う必要がある。
- 5) 風による吹送流が無視し得ない場合は、ドップラー式流速計の観測値に水面付近の流速プロファイル補正式を適用することにより、浮子観測流量との適合性を改

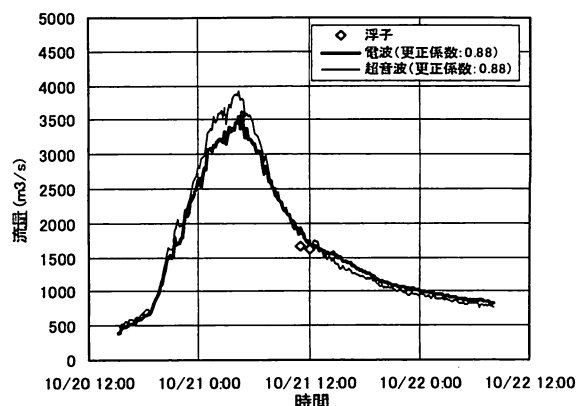


図-10 利根川における風速補正後のドップラー式流速計観測結果

善することができた。

- 6) 今後、非接触型流速計を活用した無人リアルタイム流量観測システムの精度管理手法を確立する必要がある。

謝辞：貴重な観測データ・資料を提供して頂いた国土交通省の帯広河川事務所、利根川上流河川事務所及び、福知山河川国道事務所をはじめとする関連する方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局監修、独立行政法人土木研究所編著：水文観測（平成14年度版）、社団法人全日本建設技術協会、2002
- 2) 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の課題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
- 3) 深見和彦、東高德、吉谷純一、田村正秀：河川流量調査を目的とした非接触型流速計に対する風の影響 1. 既往の知見に基づく風の影響モデルの構築、土木学会第57回年次学術講演会概要集、第Ⅱ部門、Ⅱ-157、pp. 313-314、2002
- 4) 東高德、深見和彦、吉谷純一、田村正秀、淀川巳之助、中島洋一、小松朗、小林範之、永山正典：河川流量調査を目的とした非接触型流速計に対する風の影響 2. 室内水路実験、土木学会第57回年次学術講演会概要集、Ⅱ-158、pp. 315-316、2002
- 5) 独立行政法人土木研究所、財団法人土木研究センター、アジア航測株式会社、小糸工業株式会社、株式会社拓和、株式会社東京建設コンサルタント、横河電子機器株式会社：共同研究「非接触型流速計測法の開発」共同研究報告書、土木研究所共同研究報告書、No. 291、2003
- 6) 江川太郎、近藤真啓、堺本実：水圧式洪水流速計の実用化に関する研究、河川情報研究、No. 3、pp. 17-24、1995
- 7) 山口高志、新里邦生：電波流速計による洪水流量観測 土木学会論文集No. 497/Ⅱ-28、1994
- 8) Costa J.F. et al :Use of radars to monitor stream by non contact methods、WWR Vol. 42、2006

(2008. 4. 3受付)