

千代田実験水路における 新手法を用いた流量観測について

寒地土木研究所 道東支所 ○稲垣 達弘
寒地土木研究所 寒地河川チーム 島田 友典
帯広開発建設部 治水課 三宅 洋

河川の流量観測は、治水計画の策定、利水量の算定、良好な河川環境の保全等、河川の適正な管理に資する重要な業務であるが、現行の観測手法は安全生や確実性において課題が指摘されており、より安全で省力かつ高精度な流量観測が望まれている。

近年これらの課題に対応する、新手法を用いた流量観測が考案されており、普及に向けた実地検証が進められている。本稿は、千代田実験水路において同一水理条件下で実施した、数種類の新手法を用いた流量観測の結果および特性について報告するものである。

キーワード：千代田実験水路、流量観測、ADCP、超音波流速計、電波式流速計

1. はじめに

河川の流量は、流水の移動速度である流速を計測し、これに流水の面積を乗じて求める方法が一般に用いられている。現行の流量観測手法には、平水時に河川内を徒歩または作業船で移動しながら可搬式流速計を用いて流速を計測し、同時にロッド等で水深を計り流水断面積を得る低水流量観測と、洪水時に橋上等から河川内に浮子を投下し、浮子が定められた区間を通過する時間を計測して流速を求め、事後に横断測量を実施して流水断面積を得る高水流量観測がある¹⁾。

これらの観測結果は水位-流量関係式(H-Q式)作成の基礎資料に用いられ、連続水位データから計算により連続流量データが作成される。しかし現行の流量観測手法には、①感潮域の河川流量を正確に観測できない、②大雨や強風の伴う荒天時や夜間における観測には危険が伴う、③人為的な観測のため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、④中小洪水の観測データが少ないといった課題が残されている。

2004年の水文観測業務規程の全面改定²⁾を受け、前述の課題に対応する新しい流量観測手法として、ADCP、H-ADCP、超音波流速計、電波式流速計、画像解析等による河川流量観測の実地検証が全国各地で進められており^{3, 4)}、流量観測は転換期を迎えようとしている。

2007年に運用を開始した千代田実験水路(図-1)においても、水理特性の把握と実験中の詳細な流量モニタリングを目的として、従前手法の高水流量観測、低水流量観測に加え、ADCP、超音波流速計、電波式流速計による流量観測を実施している。

本稿は、2007年と2008年に千代田実験水路において同時並行的に実施した、従来手法と新手法による流量観

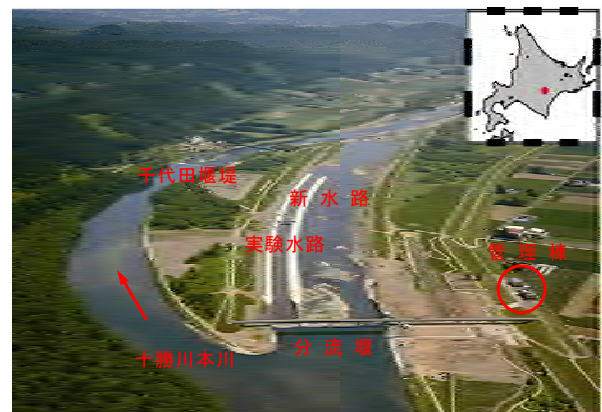


図-1 千代田実験水路

測の結果より得られた各種計測手法の特性及び適用に関する知見を報告するものである。

2. 観測の概要

(1) 千代田実験水路の概要

千代田実験水路は、十勝川中流部における流下能力不足の解消を目的に掘削された千代田新水路に設けられた幅30m、延長1,300mの実物大水理実験施設である⁵⁾。実験水路の上流端は分流堰に接続されており、倒伏式ゲートの操作により最大流量170m³/sの洪水を人為的に発生・流下させることができる。

千代田実験水路では2009年から堤防越水破堤のメカニズム解明を目的とした越水破堤実験⁶⁾が行われており、それに先立ち実験水路の水理特性を把握するため、2007年から2008年にかけて8回の試験通水を行い、様々な流量パターンにおける詳細な水理計測を実施した。

表-1 観測実施状況

試験通水	実施日	流量(m ³ /s)	高水流観 (浮子)	低水流観 (2点法)	杭ワイヤ ADCP	RCボート ADCP	超音波 流速計	電波式 流速計
CASE-1	2007.6.13	110.78	●	—	●	●	●	●
CASE-2	2007.6.25	55.88	●	●	●	●	—	●
CASE-3	2008.5.22	109.92	●	—	●	—	●	●
CASE-4	2008.6.25	81.48	●	●	●	●	●	●

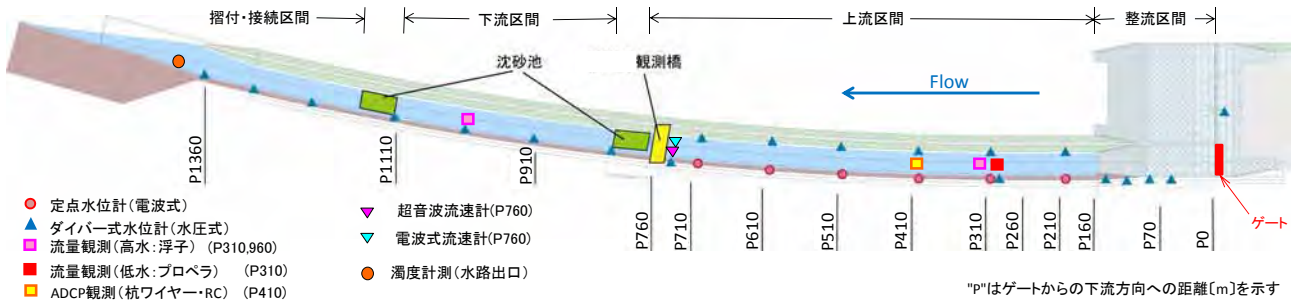


図-2 観測平面図

(2) 実験ケース

千代田実験水路における主な試験通水の実施日と各種観測機器による計測状況を表-1に示す。2007年は6回の試験通水を行ったが、ADCPの計測を行ったのはCASE-1とCASE-2だけである。2008年はCASE-3とCASE-4の2回の試験通水を行った。通水前に設定した目標流量は、CASE-1が40m³/sと120m³/s、CASE-2以降はそれぞれ45m³/s、100m³/s、75m³/sであり、目標流量到達後は定常流の状態を保持し各種観測を実施した。

(3) 各種手法の計測概要

実験水路における各種流量観測の実施箇所を図-2に示す。水路上流部のP410では、杭に固定したワイヤに係留した小型艇と遠隔操縦のRCボートによる2種類の方法でADCPの横断観測を実施した。P310~360、P960~1010を観測区間として浮子による高水流量観測を行った。浮子は水深に対応する標準浮子を投下装置を用いて投下した。P310では回転式流速計による低水流量観測を行った。低水流量観測は水面が大きく変動する高流速時には危険なので実施しなかった。P760の観測橋上流では超音波流速計と電波式流速計による連続流量観測を実施した。また、水路出口ではポータブル濁度計による濁度観測も行った(図-3)。

各種観測機器の横断上の配置は図-4に示すように、ADCPは水面に浮かべ、左右岸方向へ移動させながら鉛直下方の流速分布と河床高を同時計測した。高水流量観測は測線数を6本とし、水深に応じた浮子を用いて実施した。低水流量観測は作業船上から回転式流速計を用い2点法で実施した。超音波流速計はCASE-1とCASE-2は河床から40cm(下層)および90cm(上層)の位置に、CASE-3とCASE-4は河床から45cmの位置に各1対の超音波流速計を設置し送受信器間の平均流速を計測した。

電波式流速計は観測橋の高覧に設置し、水路上空から流心部の表面流速を計測した。各計測機器の概要を、表-2に示す。

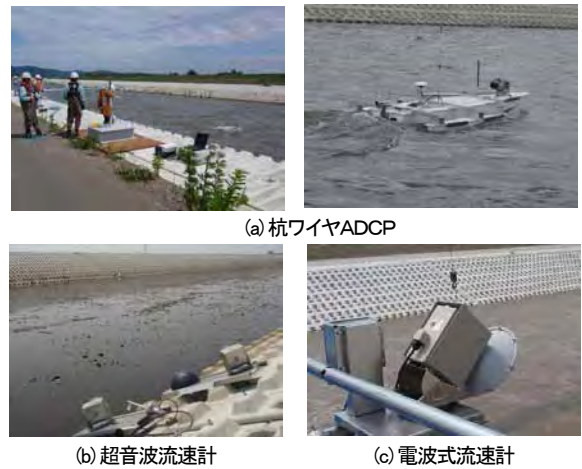


図-3 流量観測状況

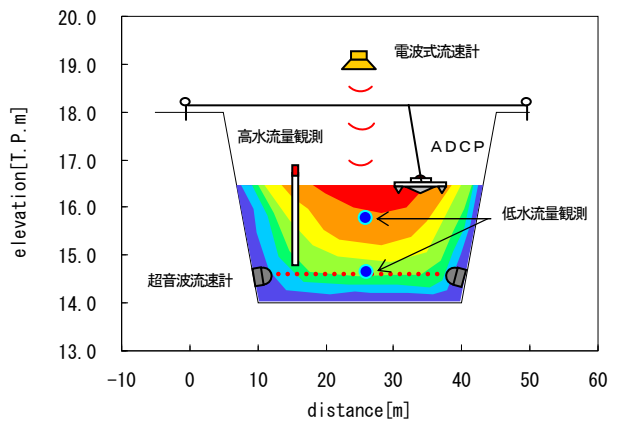


図-4 観測概要図

表-2 計測機器概要

ADCP	
機種名	RD Instruments社製 Workhorse
周波数	1200kHz
GPS	NAVCOM社製 SF-2030M
モード・層厚	12(ハイスピード)・10cm
超音波流速計	
機種名	JFEアドバンテック社製 TD-200
周波数	200kHz
計測可能流速	-10~10m/s
電波式流速計	
機種名	横河電子機器社製 WJ-7651
周波数	10.525GHz
計測可能流速	0.5~10m/s
濁度計	
機種名	東邦電探社製 FN-52X

(4) 流量算出条件

詳細は後述するが、ADCP計測の流速はGPS測位補正値を使用しており、流水断面はADCP計測断面を基本的に使用しADCPの断面が得られていない場合には同時計測した測深器のデータを使用した。表層部と河床部におけるADCPの不感帯については、附属ソフトにより流速値を補間した。またCASE-3、CASE-4については河岸付近の流量補間も行った。

超音波流速計および電波式流速計の観測流量は、計測した流速に通水前の水路横断データを与えて計算したものである。なお、超音波流速計の流速については、計測値をSIMK校正法⁷⁾を用いて断面平均流速に変換処理している。電波式流速計の流速は、表面流速を補正せず使用しているが、生データでは情報が細かすぎて数値の震幅が激しいため5分間移動平均により毎分データを平滑化処理している。

3. 結果と考察

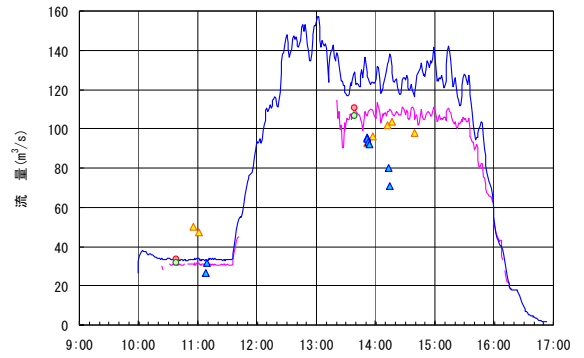
(1) 各種観測手法の計測特性

CASE-1~CASE-4の試験通水で実施した流量観測結果を図-5に示す。観測結果から各種手法の計測特性を次項に述べる。

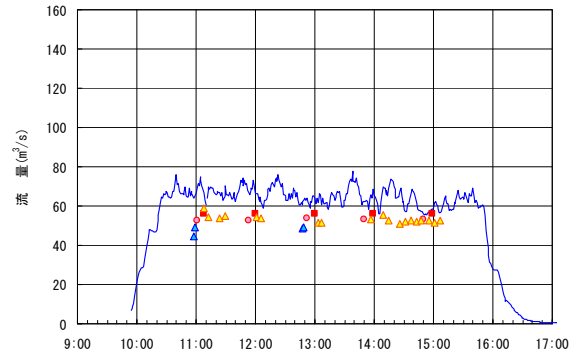
a.) ADCP

CASE-1の前半において、特に抗ワイヤADCPの流量が高水流量観測結果と大きく異なる値を示している。これは、観測時の水深が60cm程度と浅く、流速値のほとんどを補間により求めていることが原因と考えられる。

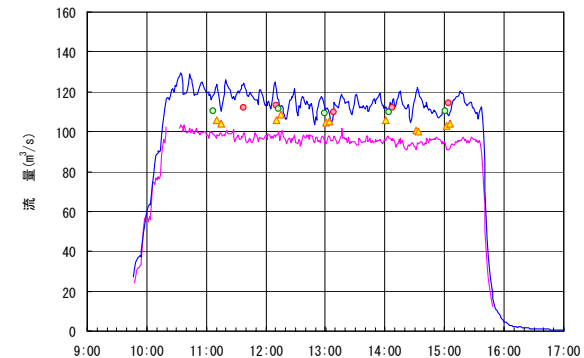
図-6はCASE-3における13時00分のADCPによる断面流速分布および河床高の実測結果であるが、この図に示すようにADCPは機器の特性上、表層と河床部が不感帯となり流速を取得できない。このため計測不能域の流速は補間（水面部は第1層流速、河床部は理論式：本例ではpower curve fit⁸⁾を適用）により求める必要がある。よって水深が浅いほど流速補間の割合が増え、正確な流量の算出が難しくなる。



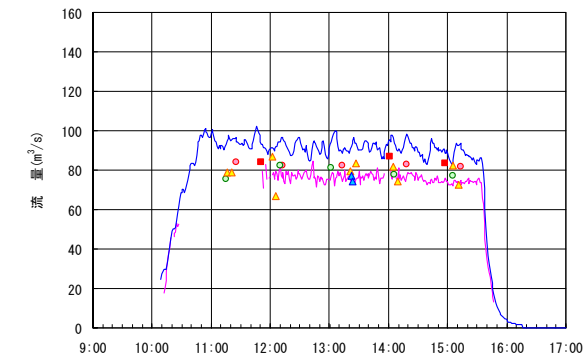
(a) CASE-1



(b) CASE-2



(c) CASE-3



(d) CASE-4

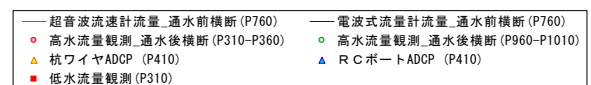


図-5 流量観測結果

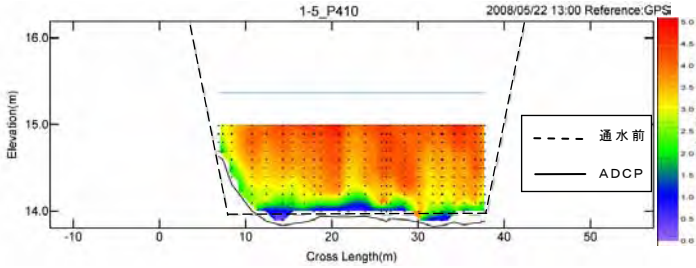


図-6 ADCP実測結果(CASE-3 13時00分)

またADCPによる移動観測では、計測される流速値に船艇の移動要素が含まれるため、ADCPの移動速度を計測し流速を補正する必要がある。ADCP本体には対地速度を測定し流速を補正するボトムトラッキング(以下、BTM)機能が備えられており、流速が小さな条件では非常に高精度に流速を得ることができる。ただし、河床材料の移動が起こる高流速の条件では、BTMは河床の移動を船艇の移動として認識してしまう。この場合、流速値は過小に評価されるため、GPSによる位置情報を用いて船艇の移動速度を補正する方法が有効とされる。

図-7はCASE-2、CASE-3、CASE-4の高水流量観測結果を基準としてADCPの流速補正手法別の観測値を比較したものである。参考値として低水流量観測の結果も載せている。比較結果からADCPの流速補正はBTMよりもGPSのほうが高水流量観測の値に近い。流量規模が大きい時ほどBTMは小さめの値を算出しており、流量増加に従い顕著となった河床材料の移動をBTMは自機の移動として認識し流速を過小評価した結果と考えられる。

ADCP観測ではGPSにより流速を補正し、河岸部の流量補間も行うことで高水流量観測および低水流量観測の結果に非常に近い値となることが分かった。

b.) 超音波流速計

CASE-1の11時40分から13時20分に掛けて超音波流速計が欠測している。超音波流速計が欠測する原因は、水中雑音の発生、高濁度による音波の減衰、気泡の発生などが挙げられるが、中でも濁度の影響把握は実河川での観測において重要である。図-8は超音波流速計と電波式流速計の流量に水路出口で観測した濁度をプロットしたグラフである。9時50分に通水を開始してまもなく、濁度は急激に上昇し284をピークに一旦下降し、流量の上昇に合わせて再び440まで上昇した後に下降している。超音波流速計の欠測は濁度が急激に上昇した時間帯と一致している。しかし濁度の増減が急激であることから、超音波流速計がどの程度の濁度で欠測するかまでは分からない。次にCASE-3では最大で濁度200を記録しており、この日の超音波流速計のデータは、概ね連続して取得することに成功している。なお10時30分頃に短い欠測があるが、これは機器設定のため計測を中断したものであり濁度による欠測ではない。CASE-1の観測結果では超音波流速計の欠測と濁度との関係は明らかではないが、CASE-3の観測結果から濁度200程度までは正常に計測が可能であることが分かった。

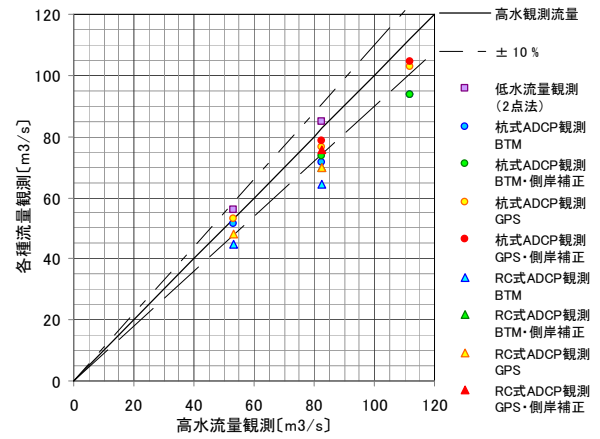
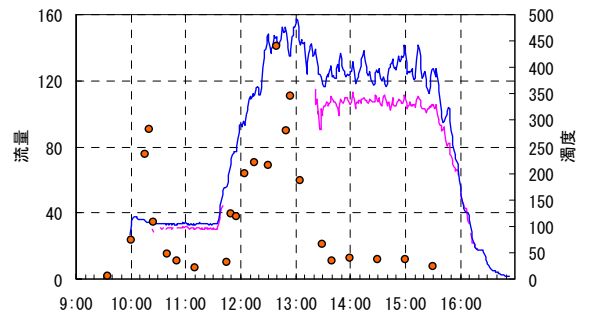
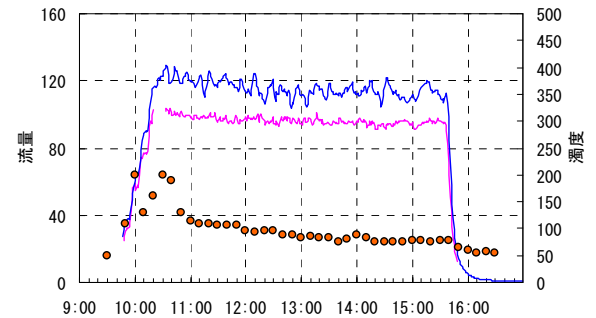


図-7 ADCP補正比較(CASE-2~4)



(a) CASE-1



(b) CASE-3

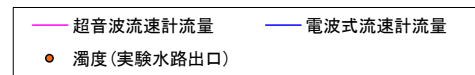


図-8 濁度観測結果

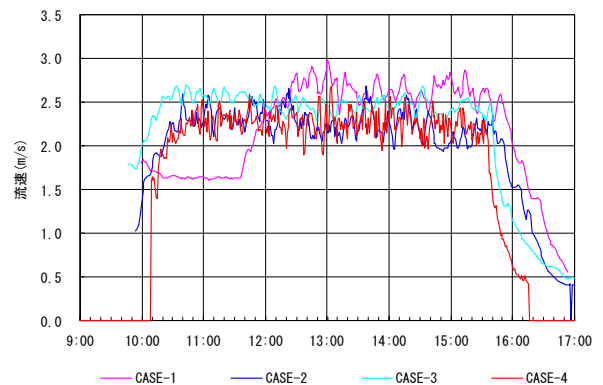


図-9 電波式流速計による流速計測結果

c.) 電波式流速計

電波式流速計は、急激な流量変化や高濁度に影響されず、常に安定した連続観測に成功している。観測に使用した電波式流速計の測定可能範囲は表-2に示すとおり0.50m/s～10m/sであるが、試験通水で観測した流速の最小値は0.41m/s、最大値は2.98m/sであった(図-9)。最小値については0.5m/sを下回った辺りで急に流速がゼロになっていることから、0.5m/s程度が有効計測範囲の下限値として妥当であることを確認できた。

(2) 流量観測結果の比較

各種観測手法による流量を比較すると、CASE-1を除き従来手法とADCPの観測結果は概ね一致している。超音波流速計はCASE-1の後半とCASE-4で従来手法およびADCPと近い値を示している。電波式流速計は全体的に他の手法より大きい値を示しているが、観測値は概ね平行の状態では規則的に分布している様子がうかがえる。このことから、次項に電波式流速計の補正について検討する。

(3) 電波式流速計の流速補正

電波式流速計は、表面流速のみを計測する仕組みなので、表面流速と断面平均流速の関係を調べ、適切な更正係数を設定することが重要である。既往の知見⁹⁾によると実河川における電波流速計の更正係数は0.80～0.90程度に設定されている。今回、ADCPによる断面平均流速が得られていることから、簡易な方法ではあるがCASE-2、-3、-4のADCP(GPS補正)による全ての断面平均流速と、同時刻の電波式流速計による表面流速の比を求めて更正係数を $f=0.87$ に設定した。ADCP流速と更正前後の電波式流速計による表面流速の関係は図-10のとおりである。これを適用して流量を再計算した結果を図-11に示す。全体的に電波式流速計の流量が高水流量観測やADCPの観測値に近づき、超音波流速計の波形ともほぼ一致した。しかし、CASE-3については超音波流速計と電波式流速計は高水流量観測やADCPに比べ小さな流量を算出しており、通水の後半に向かう程その差が大きい。

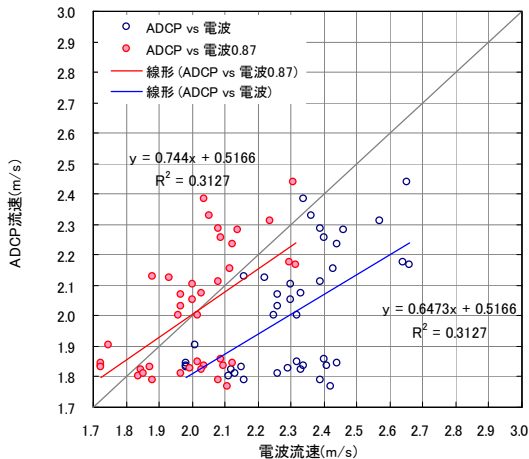
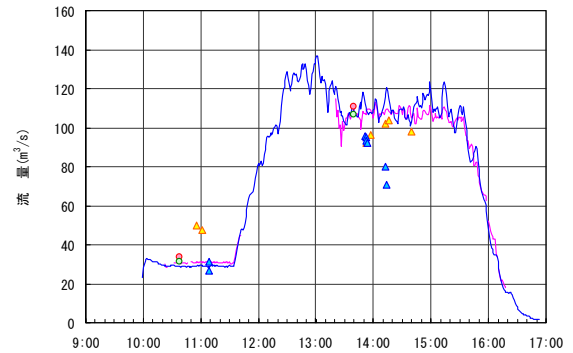
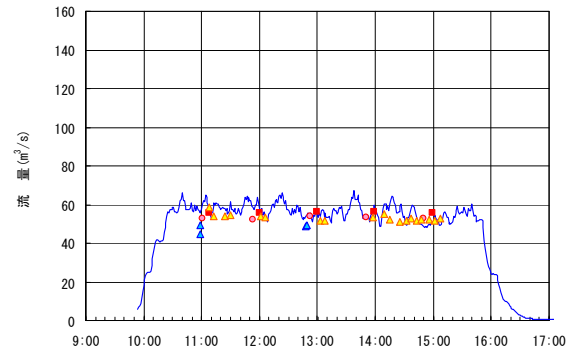


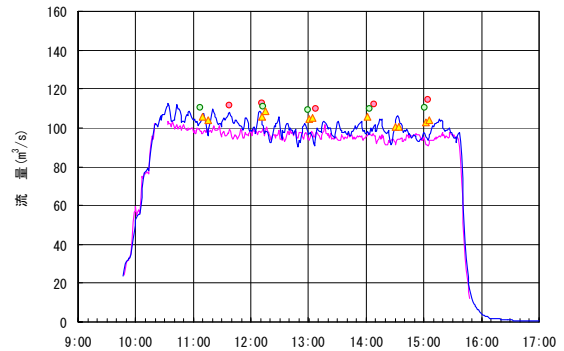
図-10 ADCP 流速と電波流速の比較(CASE-2～4)



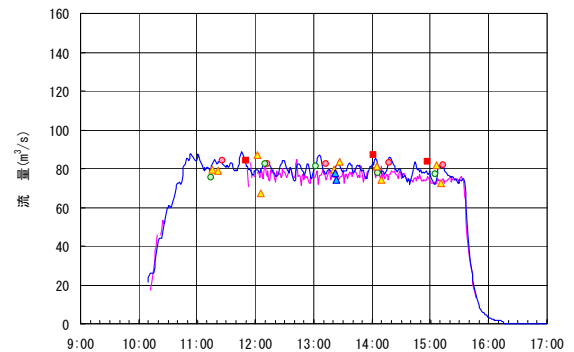
(a) CASE-1



(b) CASE-2



(c) CASE-3



(d) CASE-4

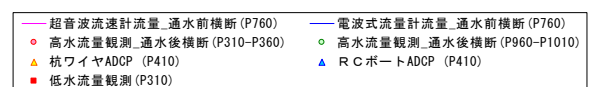


図-11 流量観測結果(電波更正 $f=0.87$)

(4) 水路断面形状の変化と流量算出値の関係

CASE-3の観測結果は、電波式流速計の流速補正を行った結果、超音波流速計の値には近づいたが、ADCPおよび高水流量観測の値より小さめの流量となった。この原因として通水中の水路断面形状の変化が考えられる。図-6を見ると分かるように、ADCPの計測断面(実測断面)は13時00分の時点で河床部が洗掘を受け、水路断面が通水前より大きくなっている。

図-12は超音波流速計で計測した流速に通水前後の横断形状を付与し観測水位から求めた流水断面積と、ADCPの計測断面積を比較した結果である。通水開始から終了にかけて徐々にADCPの計測断面積が通水後断面を与えた超音波流速計の流水断面積に近づいていく様子が確認できる。

図-13に超音波流速計と電波式流速計の流量算出に通水後横断を与えた結果を示す。全体的にADCPや高水流量観測の値に近づき、流量精度が向上することがわかる。このことは、適切な流水断面の付与の重要性を示すものである。ただし、堆積や浸食により河道断面が時々刻々と変化する観測地点では、流速と同時に河床高を測定できるADCP以外の方法では真の流水断面の付与は不可能であり、通水前後の横断測量だけでは正確な流量変化を捉えることに限界があるので注意が必要である。

4. おわりに

千代田実験水路における新手法を用いた流量観測結果から、以下の知見を得た。

- 1) ADCPはGPSで流速補正を行い河岸部の計測不能域を補間することで、高水流量観測および低水流量観測の結果とほぼ同じ観測値が得られることを確認した。
- 2) 超音波流速計はCASE-1通水初期の急激な流量の上昇時に計測ができなかった。欠測の原因は明らかではないが最大440の濁度が観測されており、高濁度により超音波信号が減衰しデータを欠損したものと推測される。ただしCASE-2の濁度200程度の条件では影響を受けなかった。
- 3) 電波式流速計は濁度の影響を全く受けず、あらゆる流量条件においても安定して連続観測を実施できた。千代田実験水路における更正係数は、ADCP流速との比から $f=0.87$ を得た。
- 4) 水路断面形状が変化する流況においては、通水後横断を付与することで超音波流速計および電波式流速計の流量算出精度が向上した。

洪水時における河川流量モニタリングにおいては、時々刻々と変化する流速の連続データ取得が重要となる。電波式流速計は観測作業における安全性が極めて高く、データの取得においても信頼性が高いことが確認できた。本手法の普及に向けて、実河川での長期観測における信頼性の検証が望まれる。

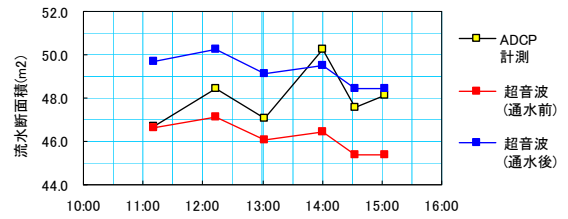


図-12 通水前後断面の比較(CASE-3)

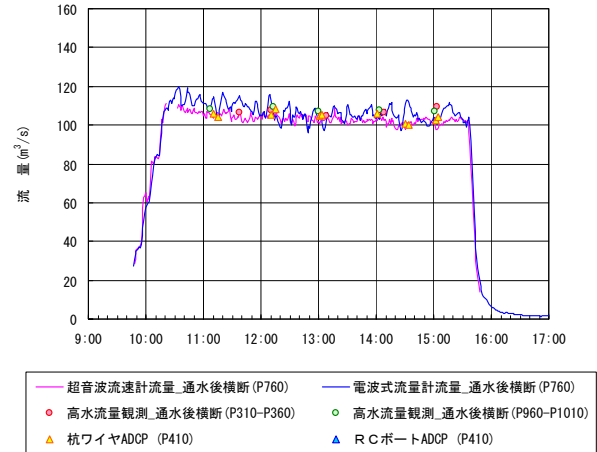


図-13 通水後断面を付与した結果(CASE-3 電波更正 $f=0.87$)

参考文献

- 1) (社)全日本建設技術協会：水文観測，pp94-157, pp221-241, 2002.
- 2) 国土交通事務次官通達：水文観測業務規程の改訂について，国土交通省河川局水文観測業務規程関係係平成17年10月改訂版，pp1-12, 2005.
- 3) 水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度化研究会」編：河川流量観測の新時代，<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/newQobs/journal.htm>
- 4) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・石谷隆始：近年における流量観測技術の高度化について～関連論文のレビュー，寒地土木研究所月報第691号，pp21-33, 2010.
- 5) 千代田新水路の概要及び千代田実験水路，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/index.html>
- 6) 島田友典・平井康幸・辻珠希：千代田実験水路における越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第54巻，pp811-816, 2010.
- 7) 中川一・小野正人・小田将広・西島真也：横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証，水工学論文集，第50巻，pp709-714, 2006.
- 8) Win River 操作手順書，株式会社SEA，pp31, 2005.
- 9) 例えば山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流観測，土木学会論文集，No. 497/II-28，pp41-50, 1994.