

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

RIVER FLOW MEASUREMENT WITH ADCP AND RADIO CURRENT
METER AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

稲垣 達弘¹・柿沼 孝治²・三宅 洋³

Tatsuhiko INAGAKI, Kouji KAKINUMA and Hiroshi MIYAKE

¹非会員 土木研究所寒地土木研究所 道東支所(〒085-0014 北海道釧路市末広町10-1)

²非会員 土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3)

³非会員 国土交通省北海道開発局 帯広開発建設部 治水課(〒085-8585 北海道帯広市西4条南8丁目)

The Chiyoda Experimental Channel is Japan's largest full-scale river research facility, and is capable of generating artificial flooding. Starting in 2007, the authors conducted preliminary experiments to determine its basic characteristics, and performed three-dimensional levee breach experiments in the channel using various types of observation instruments (an ADCP and a radio current meter) to evaluate river flow in detail. This report focuses on the limitations of such observation under the conditions of high velocity and turbidity. The authors also applied velocity correction to measurements taken with the radio current meter using the ratio of surface velocity to cross-sectional mean velocity, and examined a method for smooth switching of the sectional area of the stream before and after the experiments using friction speed values. The results showed that the calculated values for both the velocity correction and the cross section correction corresponded well with the actual measurements obtained using the ADCP.

Key Words: Chiyoda Experimental Channel, river flow measurement, ADCP, radio current meter

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有人観測であることから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おり、省力かつ安全で確実な観測手法の確立が望まれている。

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⁵⁾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、数種類の計測機器を用いて流量観測を実施している^{6),7)}。実物大の水理実験施設である千代田実験水路では、任意の洪水流出パターンを自由に設定でき、予め計画した観測方法、人員体制、機械配置のもとに各種観測を行える特徴があり、実河川では難しい高密度な流量観測の実施を可能としている。

本稿では、2007年から2010年にかけて千代田実験水路で同時並行的に実施した流量観測の結果から、主にADCPと電波式流速計の計測特性及び適用に関する知見を報告する。また、観測の結果から高流速や高濁度の厳

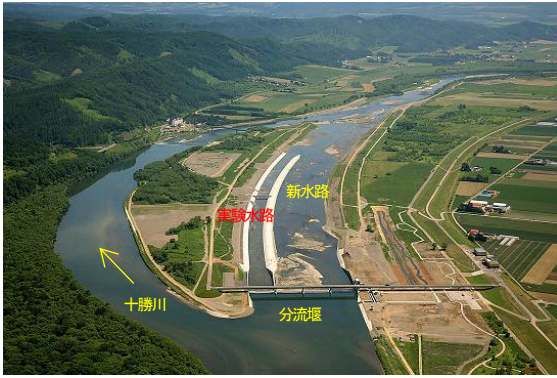


図-1 千代田実験水路

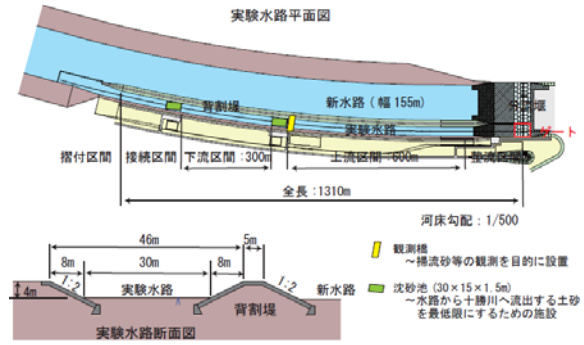


図-2 千代田実験水路の諸元

しい観測条件下でも安定的に観測が行えた電波式流速計について、流量算出精度の向上を目的とした流速補正手法と流水断面積の補正手法について検討を行ったので、その内容について紹介したい。

2. 流量観測の概要

(1) 千代田実験水路の概要

千代田実験水路(図-1, 図-2)は、堤防破壊のプロセス、河床変動などの土砂移動、河道内樹木の密度と洪水時の抵抗、多自然工法や樹木・植生などによる堤防や河岸の保護機能等を解明することを目的として、十勝川千代田新水路に設置された国内最大規模の実物大河川実験施設である。同水路は全長1,310m、水路幅30m、河床勾配1/500であり、水路上流の起伏式ゲートにより、150m³/s超を上限として流量をコントロールすることができ、①実物大の規模であり粒径等のスケールの影響を受けない、②精度の高い流量制御が可能、③充実した観測機器により現象の把握が可能、④実験水路の改変により実験条件を変更することが可能、等の特徴を有している⁵⁾。

これまで実施してきた実験は、北海道開発局と寒地土木研究所の共同実験研究として2007～2008年に水理特性の把握を目的とした試験通水⁸⁾、2009年以降は堤防の三次元越水破堤メカニズムの解明を目的とした縦断破堤実験^{9),10)}を実施中である。

(2) 実験ケース

千代田実験水路における試験通水及び破堤実験の実験ケースと水路断面図を表-1, 図-3に示す。なお表中の流量は通水前に設定した目標流量であり実測の観測流量ではない。Case1～4は実験水路の全断面を使用した試験通水⁸⁾である。河道幅は30mであり法勾配は左右岸ともに2割である。Case5～6は実験水路内に土堤を築き、その左岸側を河道、右岸側を氾濫域として破堤実験⁹⁾を行った。実験水路内に土堤と氾濫域のスペースを確保するため河道幅を4mに設定しており、法勾配は左右岸ともに2割である。Case7～8はより広い氾濫域を得るため実験水路右

表-1 実験ケース

Case	実施日	目標流量[m ³ /s]	流量変化	実験内容
1	2007.6.13	40,120	あり	試験通水
2	2007.6.25	45	なし(定常)	〃
3	2008.5.22	100	なし(定常)	〃
4	2008.6.25	75	なし	〃
5	2009.4.30	50	あり	水路内縦断破堤実験
6	2009.6.30	50	あり	〃
7	2010.4.27	70	あり	背割堤縦断破堤実験
8	2010.8.4	35	あり	〃

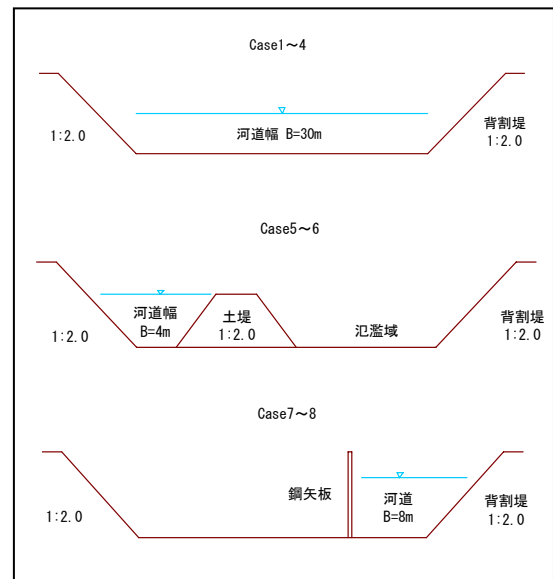


図-3 実験水路断面図

岸側の背割堤を破堤させることとし¹⁰⁾、破堤に必要な水位を確保するため実験水路内に自立式鋼矢板を縦断的に配置し河道幅を8mまで狭窄させた。法勾配は左岸側が鋼矢板の直立であり右岸側は2割である。

通水の方法については、Case1は初めに40m³/sを定常流で通水し、途中から120m³/sへと流量を増加させ再び定常流を維持した。Case2～4は目標流量を終始定常流で通水させた。Case5～8は破堤実験用に設定した目標流量まで徐々に通水量を増加させ、堤防の越流が始まり破堤幅が一定量に達した時点で通水を終了した。

表-2 計測機器概要

ADCP	RD Instruments社製 Workhorse 周波数 1200kHz
GPS	NAVCOM社製 SF-2030M
モード, 層厚	12(ハイスピードモード), 層厚10cm
ping数	3(Case1-2), 2(Case3-8)
ADCP観測艇	幅1.55m 長2.57m 高0.33m 重量88kg
電波式流速計(Case1-4)	横河電子機器社製 WJ-7651 周波数 10.525GHz
電波式流速計(Case5-8)	横河電子機器社製 WJ-7661 周波数 24.150GHz
濁度計	東邦電探社製 FN-52X

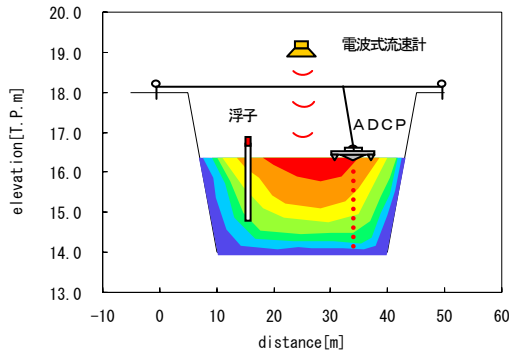


図-4 観測概要図

試験通水および破堤実験時には、実験中の水理挙動を精密に計測するため、従前手法による水位・流量観測に加え、ADCPや電波式流速計等を用いた詳細な流量観測を実施した。なお破堤実験であるCase5～8における流量観測は破堤部の上流側と下流側で実施したが、本検討では、特に記載しない限り破堤部上流側の計測データを使用している。実験による濁度影響を調べるため、実験水路出口部で表面水を採取しポータブル濁度計による濁度観測も行った。各計測機器の概要を表-2及び図-4に示す。

(3) 各手法の計測方法

a) ADCP観測

ADCP観測はADCP本体、GPS、測深器を観測艇に登載して水面に浮かべ、鉛直下方の流速分布と河床高を同時計測した。観測艇をワイヤで係留し水面上を横断移動させることで、流水断面全体の流速分布と河床形状を得た。観測施設は図-5に示すように両岸に設置した支柱間にワイヤを張り、支柱に取り付けたウインチを操作することでワイヤを巻き取り、観測艇の横断移動を行った。観測艇は図-6に示す白い無人艇であり、最近の市販されているADCP専用艇に比べると少し大ぶりで重量も重めであるが、2007年から2010年まで同じ観測艇を使用している。

b) 電波式流速計

電波式流速計は、Case1～4及びCase7～8は水路を横断する橋梁上に、Case5～6は水路左岸に設けた張り出し足場上に、1台の電波式流速計を上流向きに設置して河道中心部の表面流速を計測した。電波式流速計は、流向に

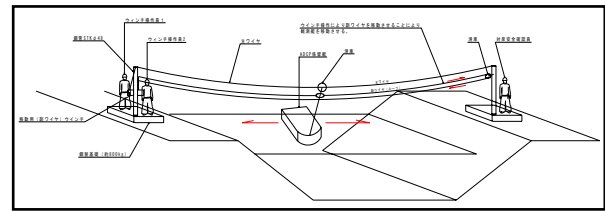


図-5 ADCP横断観測の概要



a) ADCP観測艇



b) 係留用支柱



c) ADCP本体



d) ADCP無線通信システム



e) 電波式流速計Case1-4



f) 電波式流速計Case5-8

図-6 観測状況および計測機器

対して俯角20～45度、偏角0～20度の範囲内で電波を照射し、その反射波を受信してドップラー周波数により表面流速が得られる。俯角と偏角の設定は、Case1～4及びCase7～8は俯角のみを設定し、Case5～6は俯角と偏角の両方を設定した。電波式流速計のデータ取得間隔は、Case1～4は1分間隔、Case5～8は1秒間隔に設定し、通水の開始から終了まで連続的に流速を計測した。

c) 浮子観測

浮子観測は横断方向に断面を分割し、水深に応じた標準浮子(表面浮子および喫水深0.5mと1.0mの竿浮子)を用いて実施した。断面分割数は、Case1～4は6分割、Case5～8は4分割とした。

(4) 計測データの整理方法

a) ADCP

ADCPで計測された流速にはADCP本体の移動速度である対地速度が含まれるため、これを除去する必要がある。対地速度の測定には、ボトムトラッキングとGPSによる手法がある。ボトムトラッキングは、河床から反射するエコーのドップラー効果を用いて対地速度を測定す

る方法で、GPSは座標を測定して対地速度を求める方法である。河床が移動しているような状況の場合、ボトムトラッキングによる対地速度に河床の移動速度も含まれる場合がある。千代田実験水路では通水中の河床移動が確認されていることから⁸⁾、ADCP本体の移動速度はGPSにより除去した。また、ADCPは機器の特性により表層部と河床部が不感帯となり流速を取得できない。この不感帯は附属ソフト(Win River)を用いて水面部に第1層流速を付与、河床部に理論式:power curve fit¹¹⁾を適用して補間した。ADCPで計測した流速分布及び河床高から流量を算出し、流積で割り返して流水断面全体の平均流速(以下、断面平均流速と呼ぶ)を求めた。

b) 電波式流速計

電波式流速計の生データは情報が細かく流速の上下振動が激しい。このため生データを5分間移動平均により平滑化処理を行った。流水断面積は、自記水位計で観測した毎分水位と通水の前と後に実施した横断測量データを用い、通水前後2種類の流水断面積を算出した。

c) 浮子観測

計測した流速に浮子の更正係数を乗じて流量を算出し、流積で割り返して断面平均流速を求めた。

3. 各種計測手法の計測特性

観測の結果から各手法別における流速の計測精度と、高流速や高濁度の厳しい観測条件下で欠測や異常値が生じる境界条件を整理した。流速の比較検討に用いる流速値は、ADCPは断面平均流速、電波式流速計は表面流速である。図-7に流速の観測結果を示す。

(1) ADCPの計測特性

ADCPを小型艇に搭載し水面に浮かせた状態で観測を行う際には、水面上の漂流物や水面の波立ちにより観測が困難になることがある。Case1～Case6までの観測では特にそのような現象は起きなかったが、Case7～8では観測地点下流の破堤開始に伴い4m/s程度の高流速が発生しADCPが計測不能となった。Case7は図-8に示すように鋼矢板による狭窄部から多量の気泡が発生し、気泡がADCP船艇の底部に入り込んだことで計測データが得られなかった。Case8は計測地点をCase7より下流に設定したため気泡の影響は避けられたが、高流速により水面が大きく波打ったことでADCPの横断移動が困難となり、安全のため観測を一時中断したほか、再開後の計測値にばらつきが目立った。発生した高流速下における状態では、水面の波立ちやうねりに対し、かろうじて観測が出来る状態であり、正常に観測出来る範囲を超えている状態が伺えた。



図-8 ADCP計測状況(左:Case7, 右:Case8)



図-9 濁水の発生状況

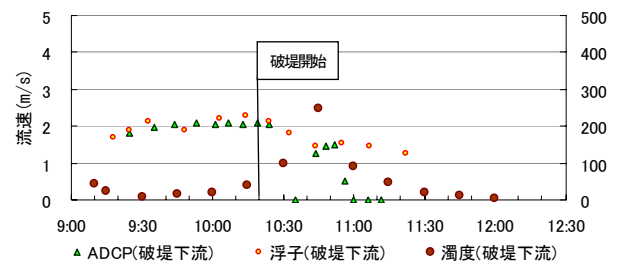


図-10 ADCP流速と濁度の関係(Case7破堤区間下流)

次に濁水の影響について特徴的な現象を紹介する。破堤実験では、破堤口からの氾濫流量を算定するために破堤部の下流側でも流量観測を行ったが、Case7では破堤の開始に伴い図-9のように濁水が発生し破堤部下流のADCP流速が異常値となった。図-10はCase7における破堤部下流の流速と濁度の関係を表したグラフであるが、破堤開始後に濁度が上昇し、以降のADCP流速は大きく乱れ異常値が目立つ。破堤後の濁度は最大でも300未満でありADCPが計測不能となる濁度としては小さいと考えられ、欠測の原因を濁水の影響と断定する根拠には乏しい。しかし破堤により生じる濁水は堤体材料が溶け出している状態であり、粒径の大きな土砂分が流下していたと推測され、それがADCPの音波を散乱させる要因として作用した可能性は考えられる。

ADCPの流速は、全てのケースにおいて概ね浮子流速と等しく、定常流時に観測を行ったCase1～4では、Case1の前半を除き両者の差は3%以内であった(図-11)。Case1の前半は、実際の通水量が目標流量より2割程度少なかったことから水深が60cm程度と浅く図-12のように流速データが十分に取得できていない。そのため流速の

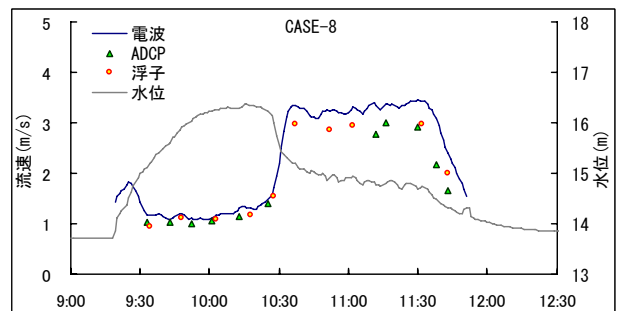
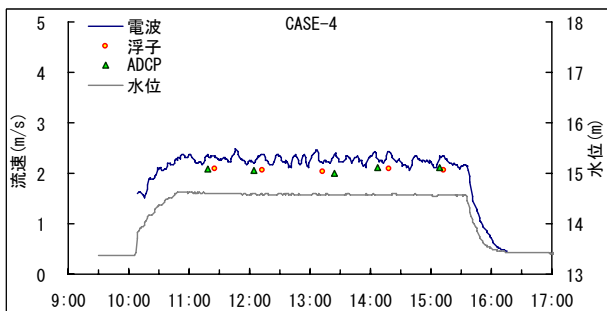
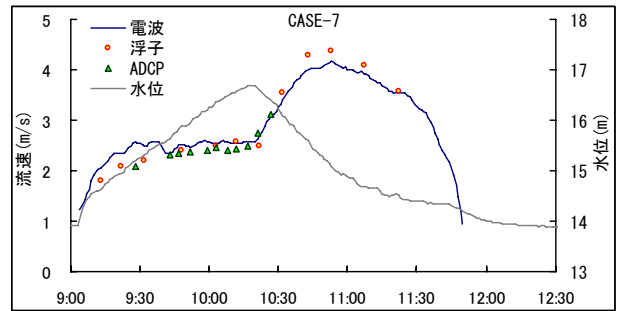
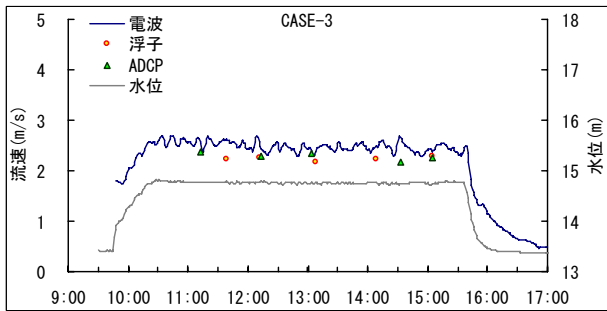
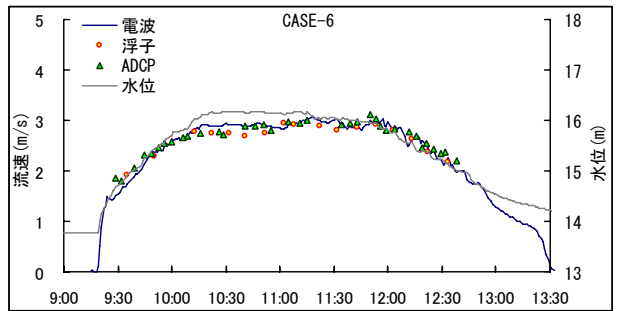
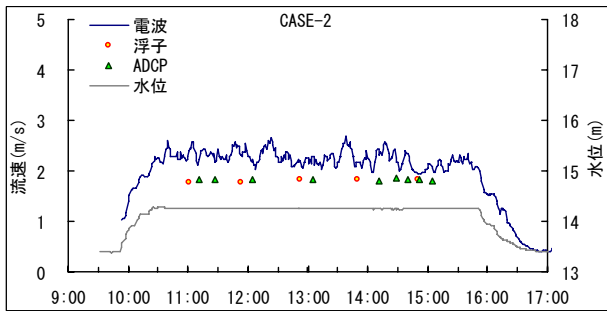
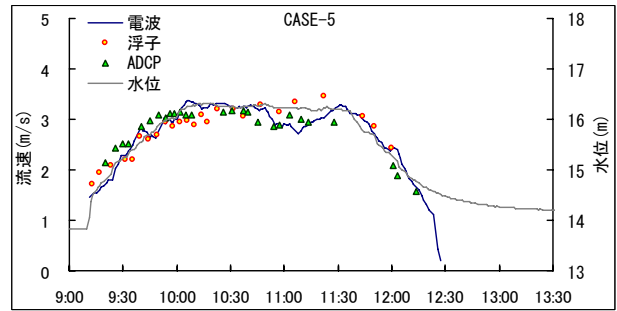
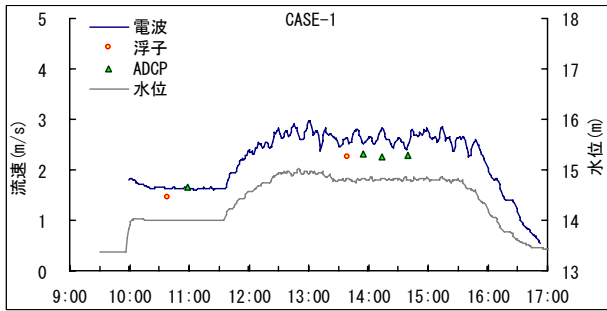


図-7 流速の観測結果(Case1~8)

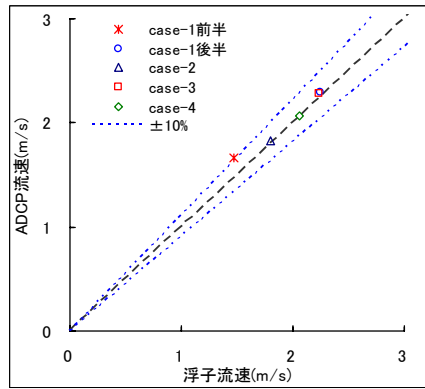


図-11 ADCPと浮子測法の流速比較(Case1~4)

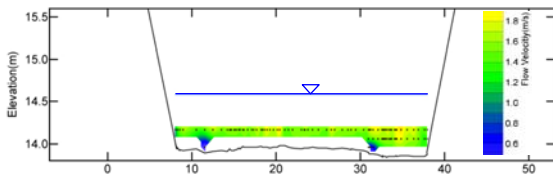


図-12 ADCPによる実測流速分布 (Case1 前半)

大部分を補間で求めており浮子との差が大きくなった。

(2) 電波式流速計の計測特性

電波式流速計による流速データの取得性能を見ると、電波式流速計は急激な流速増加や高濁度にも影響されず安定的に連続計測が可能であった。例外としてCase5~6では水面に波がたたない鏡面の状態が発生したため十分な反射波が得られず機器の反応が鈍ることがあった。このため図-13のようにADCPの下流に発生する波を利用して計測を行うことになった。

電波式流速計と同時刻のADCP流速の比較結果を図-14に示す。はじめにCase1~4, 7~8では、電波式流速計はADCPに対し概ね15%程度大きめの流速を観測している。これは表面流速と断面平均流速との差と考えられ、この傾向は既往の知見¹²⁾と一致する。次にCase5~6では、電波式流速計はADCPに対しほぼ等しいか、むしろ小さめの流速を観測している。この現象を電波式流速計の計測方法の違いから考察する。

Case5~6は河岸から張り出した計測用足場が河道中央部まで届かないため、図-15に示すように19.9°の偏角を付けて流心部へ斜めに電波を照射している。偏角に対する流速補正は機器の設定により自動的に行われるが、電波が流心を捉える水位は実験時の最高水位(水深2.5mに相当)に合わせており、それより低い水位では電波の照射エリアが徐々に流心からずれ、測岸部の遅い流速を捉えたことがADCP流速との関係を逆転させている。またADCPと電波式流速の差が小さい部分については、電波の照射エリア内に流心部以外の遅い流れも含まれたことが影響したものと考えられる。本ケースのように川幅が狭い観測サイトで偏角を設ける場合には、このような現象に留意する必要があることが明らかとなった。



図-13 電波式流速計とADCP(Case5)

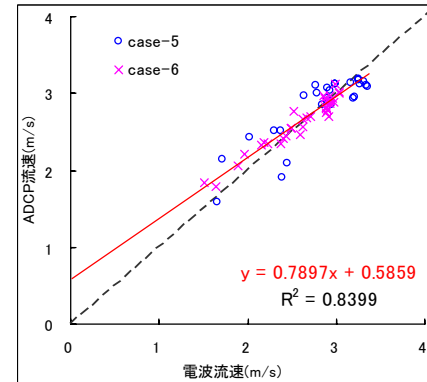
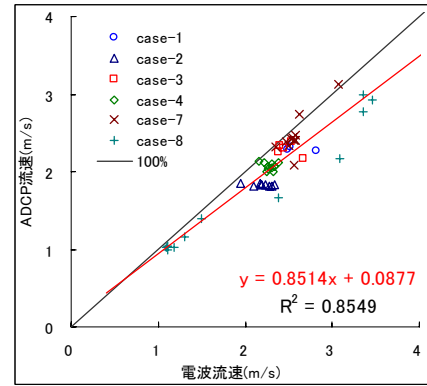


図-14 電波式流速計とADCPの流速比較
(上:Case1~4及びCase7~8, 下:Case5~6)

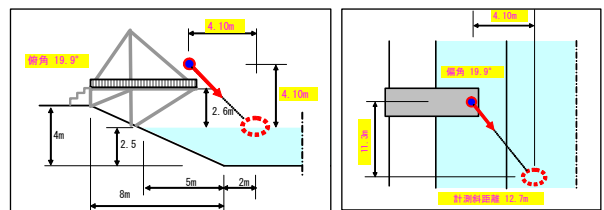


図-15 電波式流速計の俯角と偏角(Case5~6)

4. 電波式流速計の流速補正と流水断面積補正

上記の計測特性から、電波式流速計は悪条件下においてもデータの取得性能が高く、洪水時の流速モニタリング手法として優位性が高いことを確認した。しかし電波式流速計の流速を流量算出に用いる際には、表面流速を流水断面全体の流速へ補正する必要がある。また、流量算出に付与する流水断面積は、出水前後いずれかの横断

測量データから算出するのが一般的だが、出水前と出水後で横断形状が大きく異なる場合には、出水初期には前横断を、出水後期には後横断を適用することでより正確な流量の評価が可能になると考えられる。さらに前横断から後横断へ移行する過程を時系列で推定できれば、現実に近い流水断面積の再現が可能になると考えられる。以下に、電波式流速計の流速補正と、断面変化を考慮した流水断面積の付与手法について検討を行った。なお本稿では、浮子に比べ詳細な流速分布が計測でき、流水断面積についてもリアルタイムデータを有するADCPの計測値を真値として扱うこととする。

(1) 電波式流速計の流速補正

既往の知見¹²⁾によると実河川における電波式流速計の流速補正係数は、0.85～0.90程度に設定されており、表面浮子の更正係数0.85を適用する事例も多い。千代田実験水路のCase 1～4,7～8における断面平均流速と表面流速の比は、図-14の近似曲線が示すように0.85に近い値となり実河川の傾向と一致した。よって表面浮子の更正係数をそのまま適用しCase 1～4,7～8の流速補正を行った。計算結果を図-16に示す。流速補正により電波式流速計の流速はADCP流速に対して概ね±10%の範囲内に収めることができた。しかしながらCase7では高流速の部分で範囲を外れているデータがあり、本手法による課題が残された。

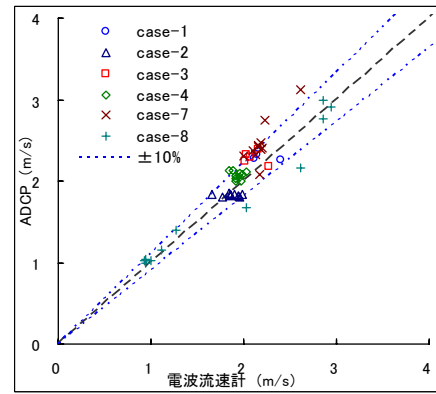


図-16 流速補正結果(Case1～4及びCase7～8)

(2) 摩擦速度を用いた流水断面積の補正

実験による通水の結果、特にCase6とCase7において顕著な断面変化が起こり、観測地点の横断形状は図-17のように通水前後で大きく変化した。Case6における断面変化は、主に河道の右岸法面にあたる破堤実験用の土堤の侵食とそれに伴う河床への土砂堆積として、Case7では河床の低下として生じた。通水前横断と通水後横断を使用してピーク水位時の流水断面積を求めると、両者にはCase6で+11.1%、Case7で+31.4%もの差が生じている。このことは、横断の選択によって流量に同様の差が生じることを意味しており、流量算出においては適切な流水断面積の付与が非常に重要となる。

ここでは電波式流速計による無人流量モニタリングを想定し、通水前後横断、連続流速、自記水位データを用いて河床変動を引き起こす物理的な力の発生状況を調べ、前横断が後横断へ徐々に変化する過程を横断形状ではなく、あくまでも流水断面積として時系列的に再現することを試みた。

横断形状の変化は流速の増加に伴い掃流力が増し、河床や河岸を形成する土粒子が移動したことにより生じたものと推測される。土粒子の移動は摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時に発生し、移動量はその強さに依存すると仮定すれば、それらの数値から断面変化が生じた時間帯と変化量が推定できる。

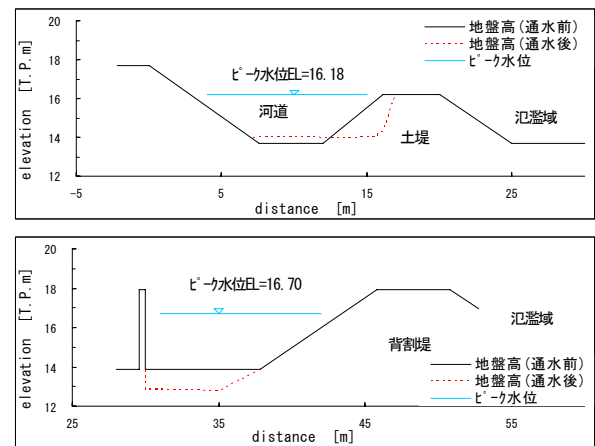


図-17 通水前後の横断面図(上:Case6, 下:Case7)

表-3 千代田実験水路の水力パラメータ

粗度係数 n	土粒子密度 $\rho_s [g/cm^3]$	水中比重 s	河床粒径 $d_{50} [mm]$	土堤粒径 $d_{50} [mm]$
0.024	2.63	1.63	14.7	2.7

摩擦速度 $[u_*]$ 及び限界摩擦速度 $[u_{*c}]$ は式(1)、(2)により求めた。計算に用いるパラメータは表-3に示す2007年～2008年の試験通水より得られた千代田実験水路の実測値とした。また摩擦速度の計算に付与する流水勾配 $[I]$ は、連続流速が得られる電波式流速計の特性を利用して、式(3)によりエネルギー勾配 $[I_e]$ を算出し用いた。

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (1)$$

$$u_{*c} = \sqrt{0.05sgd} \quad (2)$$

$$I_e = \left(\frac{nV}{\frac{2}{h^3}} \right)^2 \quad (3)$$

表-4 ADCPの実測流水断面積に対する誤差の平均値

Case	通水前横断 使用断面積	通水後横断 使用断面積	提案手法 (推定断面積)
6	-7.3%	+5.2%	-1.2%
7	-8.2%	+30.7%	-2.8%

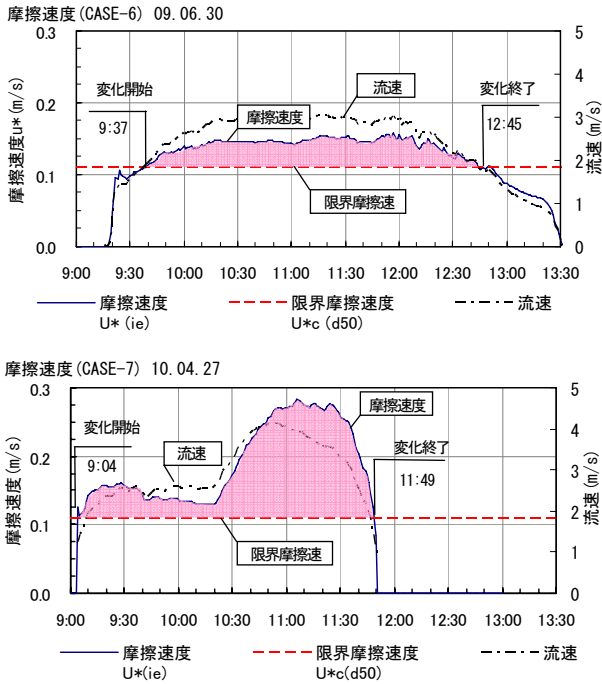


図-18 摩擦速度の時系列分布状況(上:Case6, 下:Case7)

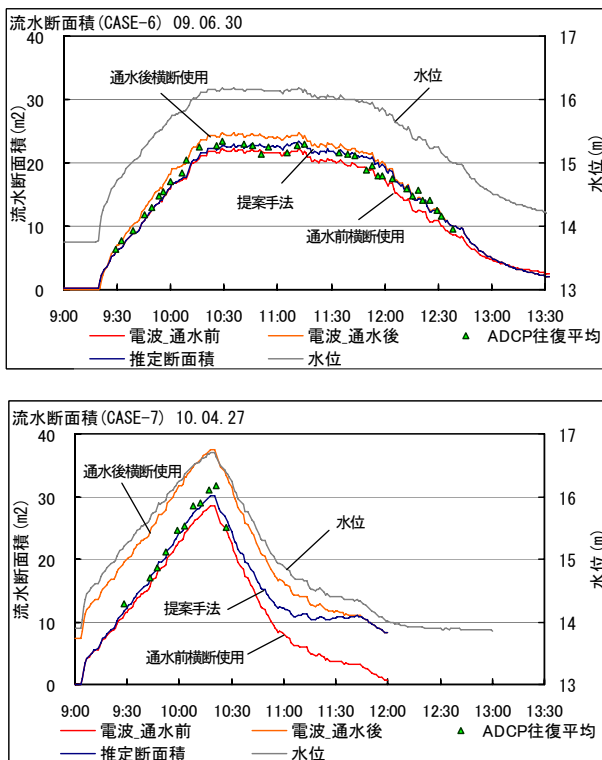


図-19 流水断面積の推定結果(上:Case6, 下:Case7)

図-18に、摩擦速度と限界摩擦速度の計算結果を示す。着色部は限界摩擦速度を超過する摩擦速度を現しており、摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時間帯と摩擦速度の強さが分かる。特にCase7は堤防の破堤開始(10時20分頃)と共に流速が急激に増加し、摩擦速度が追従して大きくなっている。摩擦速度が限界摩擦速度を超過した

時刻に断面変化が始まり、限界摩擦速度を下回る時刻に全ての断面変化が終わると仮定し、超過量の累計(図-18における着色部全体に占める任意時刻までの超過量の割合)を前後の流水断面積に加重配分して推定流水断面積を計算した。

計算結果および通水前後横断から各々算出した流水断面積の比較を図-19に示す。本手法で推定した推定流水断面積は、通水の初期には前横断を使用しており、摩擦速度の増加に応じて徐々に後横断へと変化していく。この軌跡はADCPによる流水断面積の実測値とほぼ一致した。残念ながらCase7は後半のADCPが欠測しているが、ピーク水位付近の流水断面積をほぼ正確に評価している。

ADCPの流水断面積に対する誤差の平均値は、Case6が前横断使用=-7.3%、後横断使用=+5.2%、提案手法=-1.2%であり、Case7は前横断使用=-8.2%、後横断使用=+30.7%、提案手法=-2.8%となった(表-4)。なお、Case6の断面変化は右岸側土堤の侵食を原因としていることから、限界摩擦速度の算出に土堤の材料粒径を与えて試算をしてみたが、計算結果にほとんど違いは現れなかった。

ただし本手法は前横断から後横断への時間的な変化過程を推定したに過ぎず、実現象では掃流力が卓越する時間帯に大規模な洗掘が生じ掃流力の減衰と共に埋め戻しが行われることがある。このような状況下ではADCP等を用いた河床高のリアルタイム計測以外の方法で真の流水断面を把握することは極めて困難である。よって通水前後の横断だけでは推定できる流水断面積の精度に限界があるので注意が必要である。

5. おわりに

千代田実験水路におけるADCPと電波式流速計による流量観測の結果、計測特性に関しては、高流速や高濁度の厳しい観測条件下では、ADCPによる計測が困難となる状況が見られた。Case8では水面の波立ちによりADCPを搭載する観測艇の横断移動が困難になり観測を中断することになった。この要因の一つとして考えられるのは使用した観測艇が高流速に耐えられないことがある。よって高流速に対応可能な観測艇¹²⁾を導入することで適用範囲を拡大できる可能性がある。

濁水によるADCPの異常については関係の詳細を明ら

かにすることはできなかった。今回の観測においては破堤による粒径の大きな土砂分が影響したものと推測されるが、ADCPが計測不能となる境界条件等については今後の検証が必要である。

一方、電波式流速計は安定的に連続流速の取得に成功し、高水流量観測における優位性を確認できた。例外として水面の波が少ない状況で流速の計測が困難になる事がありADCPの後流を利用して計測を行ったが、この現象から、電波式流速計が不得意とする鏡面状の流れにおいても、何らかの方法で人工的に波を発生させることで計測が可能になることがわかった。

電波式流速計を用いた流量算出精度の向上を目的に、表面流速の補正手法と、通水前後横断から求めた2つの流水断面積をスムーズに擦り付ける手法を検討した。流速補正では電波式流速計の計測値にADCP流速との比から求めた補正係数(0.85)を乗じて概ね±10%の精度で断面平均流速を評価できることを確認した。流水断面積については、摩擦速度の時系列的な分布状況を基に、通水の初めから終わりまで実測の値に近い流水断面積を再現することができた。しかしながら、前述したADCPの欠測により高流速時の検証データが十分に得られていないことから、今後もデータの蓄積を図り両手法の検証を行うこととしたい。

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集平成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) 大串正紀・東海秀義・川井淳一：千代田実験水路での各種観測を踏まえた実河川への適用の可能性について，平成21年度北海道開発技術研究発表会，2010.
- 7) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋：十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測，河川技術論文集，第17巻，pp41-46, 2011.
- 8) 市原哲也・島田友典・渡邊康玄・辻珠希：十勝川千代田実験水路の水理特性及び河床形態，河川技術論文集，第15巻，PP243-248, 2009.
- 9) 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.
- 10) 島田友典・横山洋・平井康幸・三宅洋：千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第55巻，pp841-864, 2011.
- 11) Win River 操作手順書，株式会社SEA，pp31, 2005.
- 12) 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，pp307-312, 2008.
- 13) 岡田将治：ADCPを搭載した橋上操作艇による洪水流観測技術の進展，河川流量観測の新時代，pp34-45, 2010.

(2011. 7. 31 受付)