

十勝川千代田実験水路における 各手法別の流量観測

RIVER FLOW MEASUREMENT USING SEVERAL METHOD AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

稲垣 達弘¹・島田 友典²・横山 洋²・三宅 洋³

Tatsuhiro INAGAKI, Tomonori SHIMADA, Hiroshi YOKOYAMA, Hiroshi MIYAKE

¹正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 道東支所(〒085-0014 北海道釧路市末広町10丁目)

²正会員 独立行政法人 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条3丁目)

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, which is capable of generating artificial flooding, is the largest full-scale river experimental facility in Japan. Since 2007, we conducted preliminary experiments to clarify the basic characteristics of the channel, and experiments of levee breach in three-dimensions using Chiyoda Experimental Channel. The experiments used various types of observation instruments, which are ADCP, acoustic current meter, radio current meter to measure the detailed river flow. This report focused on the limitation of such observation under the high-speed velocity and muddy water condition. In addition, we attempted velocity correction of radio current meter using the ratio of surface velocity and cross sectional mean velocity. And we examined switching method for the sectional area of the stream before and after experiment smoothly by using the friction speed. As a result, the calculation value of both has agreed well with the actual measurement value observed with ADCP.

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

1. はじめに

近年、梅雨前線や台風の接近に伴う局地的な集中豪雨が頻発する傾向にあり、特に中小河川において氾濫による災害が多発している。国土交通省河川局が2009年に設置した「中小河川における局地的豪雨対策WG」の報告¹⁾では、減災対策として河川水位予測の高度化を挙げており、水文データ解析に基づく流出特性の把握が急務である。しかしながら中小河川は大河川に比べ流量データの蓄積が乏しく、その一因として現行の流量観測の非効率性の問題が挙げられる。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、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、画像解析などによる河川流量観測手法³⁾が開発され実地検証が進められている。

2007年に運用を開始した千代田実験水路⁴⁾においても、水理特性の把握や水理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計測データを蓄積している。本論文では、千代田実験水路で得られた数種類の計測機器による流量観測データを解析し、各手法別の計測精度及び計測特性について整理を行った。次に、流水に直接触れることな

く無人で流速を計測できることから安全性が高く、高水流量観測の自動化の実現を期待される非接触型電波式流速計について、流速補正手法ならびに適切な流水断面積を付与する手法の検討を行った。これらの結果は、高流速や高濁度の厳しい観測条件下における小規模河道の流量観測特性を示すものであり、中小河川の河川管理における基礎的な資料となる。

2. 流量観測の概要

(1) 千代田実験水路の概要

千代田実験水路は、十勝川中流部における流下能力向上を目的として掘削された千代田新水路内に設けられた幅30m、延長1,300mの実物大水理実験施設である。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実際の洪水に近い水量を人為的に精度良く再現できる。

北海道開発局と寒地土木研究所は千代田実験水路において、2007～2008年に水理特性の把握を目的とした試験通水⁵⁾を行い、2009年から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⁶⁾を実施している。試験通水および破堤実験時には、詳細な流況をモニタリングするために数種類の計測機器を用いて精密な流量観測を実施した。

表-1 観測実施状況

Case	実施日	通水流量	流量変化	ADCP	電波式	超音波
1	2007.6.13	40,120	あり	●	●	●
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(定常)	●	●	●
5	2009.4.30	50	あり	●	●	—
6	2009.6.30	50	あり	●	●	—
7	2010.4.27	70	あり	●	●	—
8	2010.8.4	35	あり	●	●	—

(2) 実験ケース

千代田実験水路における主な試験通水及び破堤実験の実施日と用いた流速測定法を表-1に示す。なおここに記載した流量は通水前に設定した目標流量であり実際の観測流量とは若干異なる。Case1～4は実験水路の全断面を使用した試験通水⁵⁾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は実験水路内に縦断堤を築き、その左岸側を河道、右岸側を氾濫域として破堤実験⁶⁾を行った。実験水路内に縦断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岸側の背割堤を破堤させることとし⁷⁾、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することとした。Case2～4は目標流量を終始定常流で通水させることとした。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させることとした。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、本検討には破堤部上流側の計測データを使用する。

(3) 各手法別の計測概要

ADCPは小型艇をワイヤで係留し、水面を横断移動させながら流速分布と河床高を同時に計測した。ADCP本体の移動速度はRTK-GPSにより除去し、表層部と河床部における不感帯は附属ソフトで補間(本例では水面部に第1層流速、河床部に理論式:power curve fit⁸⁾を適用)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。超音波流速計は、Case1は河床から40cmと90cmの高さに各一对、Case3～4は河床から45cmの高さに一对の超音波送受信器を設置して超音波測線上の流速を計測し、SIMK校正法⁹⁾により断面平均流速へと変換した。電波式流速計はCase1～4及びCase7～8は水路を横断する橋梁上から、Case5～6は水路

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(ハイスピート)・10cm
超音波流速計	JFEアドバンテック社製 TD-200 周波数 200kHz
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

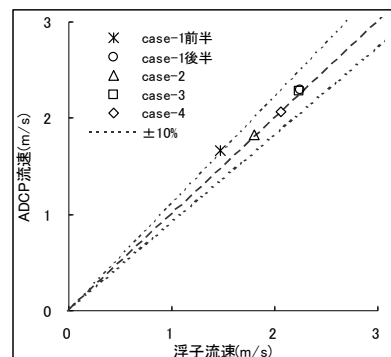


図-1 ADCPと浮子測法の流速比較(Case1～4)

左岸に設けた張り出し足場から、1台の電波式流速計で河道中心部の表面流速を計測した。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ため毎分データを5分間移動平均により平滑化した。浮子観測は横断方向に断面を3～6分割し、水深に応じた標準浮子(表面浮子、0.5mと1.0mの竿浮子)を用いた。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。

また、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に示す。

3. 各種計測手法の計測精度及び計測特性

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する。流速の比較検討に用いる流速値は、電波式流速計は表面流速とし、それ以外の計測手法は全て断面平均流速とする。

(1) ADCP

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、定常流で通水を行ったCase1～4では、Case1の前半を除き両者の差は3%以内であった(図-1)。本稿では、浮子に比べ詳細な流速分布が計測でき、後述する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い、以降の議論に用いることとする。ただし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、

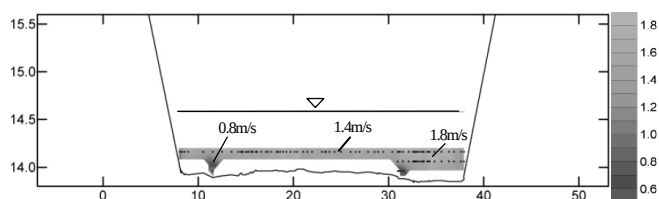


図-2 ADCPによる実測流速分布 (Case1 前半)

※表層部と河床部の空白はADCPの不感帯である。



図-3 ADCP計測状況(左:Case7, 右:Case8)

図-2のように流速データが十分に取得できておらず、大部分を補間したため検証用データから除外する。

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。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。図-3に示すようにCase7は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不能となった。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。

破堤実験では、破堤口からの氾濫流量を把握するために破堤部の下流側でも計測を行ったが、Case7では破堤に伴う濁水の発生により破堤部下流のADCP流速が異常値となった。図-4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ものの、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考えられ、それがADCPの音波を散乱させる要因として作用したものと考えられる。

(2) 超音波流速計

超音波流速計の流速はADCPに比べ-4.4%～-14.4%の差があった。差の平均値は-8.4%であり若干マイナス側に流速を評価する傾向がみられた。図-5に示すように、

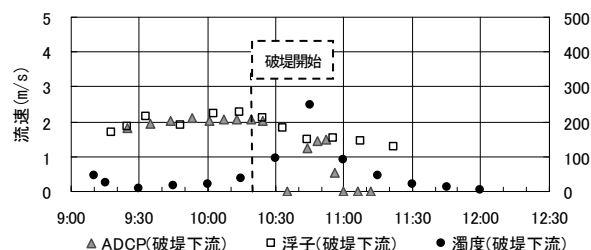


図-4 ADCP流速と濁度の関係(Case7破堤区間下流)

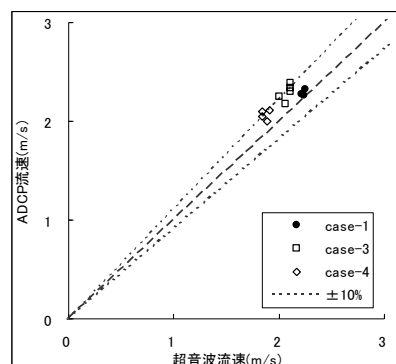


図-5 超音波流速計とADCPの流速比較(Case1,3,4)

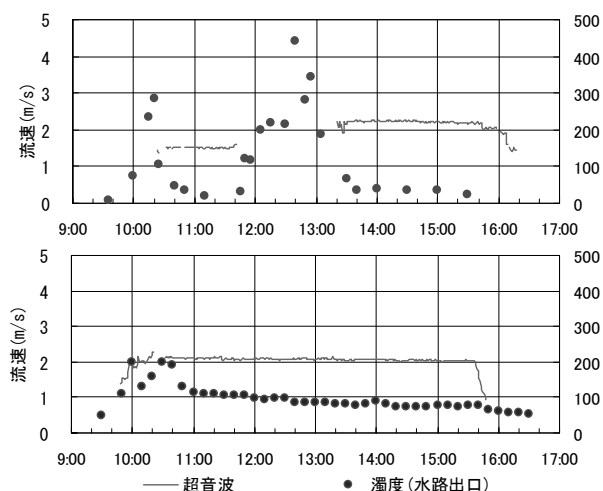


図-6 超音波流速計と濁度の関係(上:Case1, 下:Case3)

過小評価はCase1よりもCase3,4に見られることから、超音波送受信器の設置台数および設置標高の違いが計測精度に影響している可能性がある。全体的にみれば超音波流速計は実用レベルの流速を連続的に計測することができたが、Case1では濁度の影響と見られる欠測が生じた。超音波流速計の欠測原因は、水中雑音の発生、高濁度や気泡の発生などによる超音波の減衰が挙げられ、中でも濁度の影響把握は実河川の観測において重要である。

図-6は超音波流速計の流速に濁度をプロットしたグラフである。Case1では通水開始後まもなく濁度が300付近まで上昇した後に一旦下降し、通水量の増加に合わせ再び440まで上昇した。流速の欠測は濁度が上昇した時間帯と一致しており濁度が概ね120を超える時間帯に欠測

が起きている。Case3では濁度が200程度まで上昇したが、超音波流速計は連続観測に成功した。なお10時30分頃のブランクは機械調整のため計測を一時中断したものであり濁度による欠測ではない。今回の観測においては濁度が概ね200を超えると超音波流速計が欠測する可能性があることが伺えるが、欠測となる閾値の存在とその値については今後とも検討したい。

(3) 電波式流速計

電波式流速計と同時刻のADCP流速の比較結果を図-7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¹⁰⁾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、電波式流速計は俯角のほか、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。

計測データの取得性能から見ると、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-8のようにADCPの下流に発生する波を利用して計測を行った。

4. 電波式流速計の流速補正と流水断面積補正

上記の検討結果から、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。電波式流速計の流速を流量算出に用いる場合には、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、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

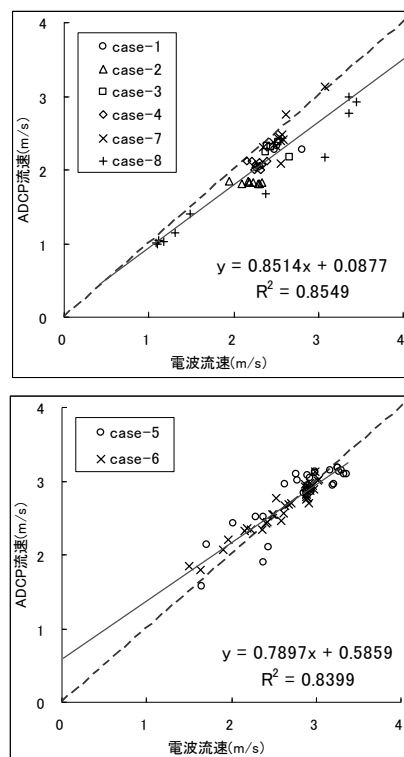


図-7 電波式流速計とADCPの流速比較
(上: Case1～4及びCase7～8, 下: Case5～6)



図-8 電波式流速計とADCP(Case5)

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。

(1) 電波式流速計の流速補正

既往の知見¹⁰⁾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-7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、ここでは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-9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%の範囲内に納まった。

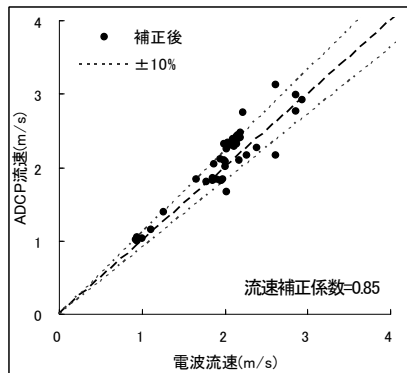


図-9 流速補正結果(Case1～4及びCase7～8)

(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-10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。摩擦速度 $[u_*]$ 及び限界摩擦速度 $[u_{*c}]$ は式(1)、(2)により求める。

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

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

計算に用いるパラメータは表-3に示す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 $[I]$ は河床勾配または水面勾配を用いることもできるが、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 $[I_e]$ を算出し用いることとした。

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

表-3 千代田実験水路の水利パラメータ

河床勾配 I_b	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 $d_{50} [mm]$
1/500	0.024	2.63	1.63	14.7	2.7

河床勾配：千代田実験水路の計画河床勾配、粗度係数・土粒子密度・河床粒径：2007年～2008年の試験通水における千代田実験水路の平均実測値

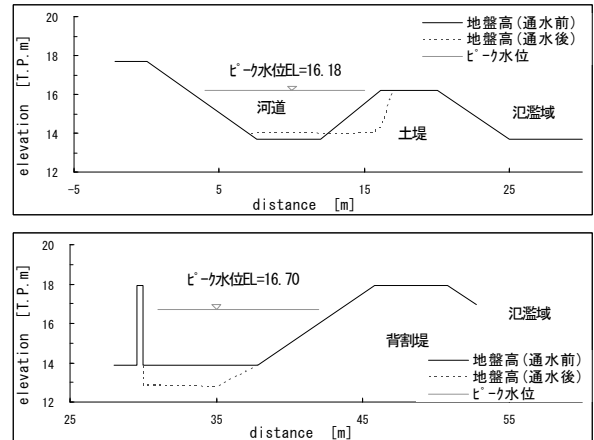


図-10 通水前後の横断面図(上: Case6, 下: Case7)

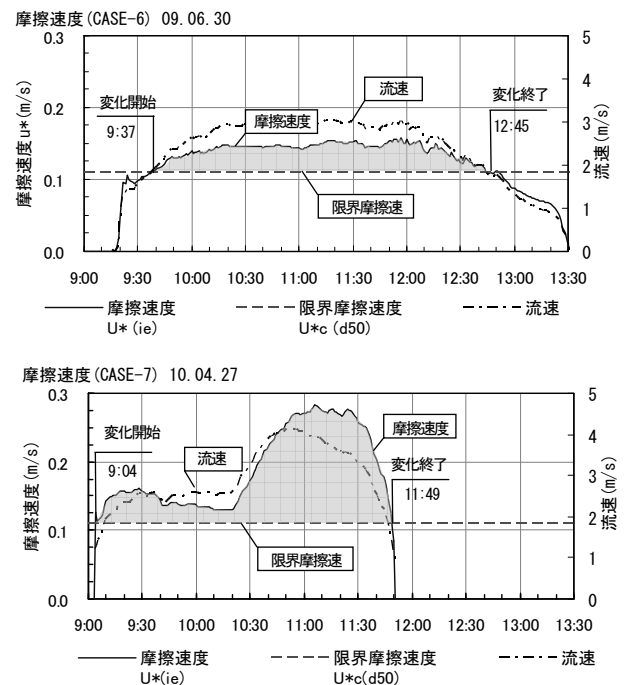


図-11 摩擦速度の時系列分布状況(上: Case6, 下: Case7)

図-11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、摩擦速度も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

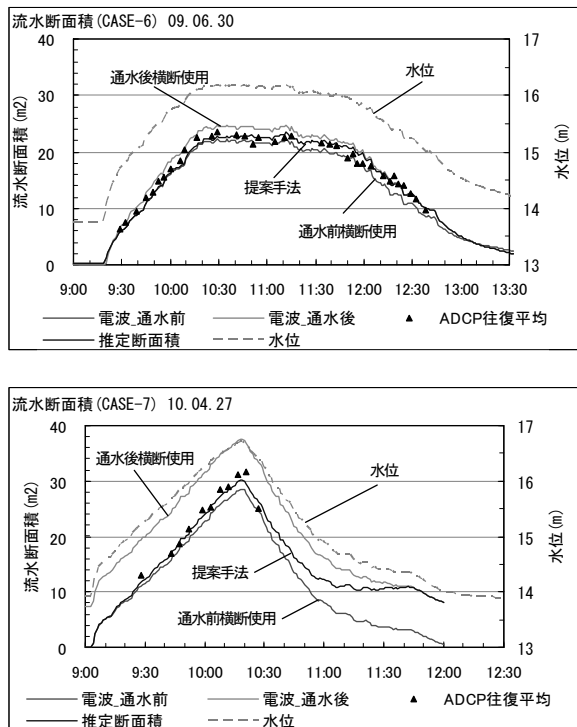


図-12 流水断面積の推定結果(上:Case6, 下:Case7)

全ての断面変化が終わると仮定し、超過量の累計(図-11)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。

計算結果を図-12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。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してみたが、計算結果にほとんど違いは現れなかった。

本手法の適用により通水の初めから終わりまで実測値に近い流水断面積を再現することができた。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各手法別の流量観測結果から以下の知見を得た。

1. 高流速や高濁度の厳しい観測条件下では、ADCP及び超音波流速計による計測が困難となる状況が見られ、高水流量観測における電波式流速計の優位性を確認した。
2. 電波式流速計の表面流速とADCPの断面平均流速を比較した結果、両者の比は表面浮子の更正係数0.85とほぼ等しい値となり、表面浮子の更正係数をそのまま流速補正係数に適用しても表面流速から概ね±10%の精度で断面平均流速を評価できることを確認した。
3. 電波式流速計の連続流速データから求めた摩擦速度を用いて河道断面の時系列的な変化量を推定し、通水前後の流水断面積を滑らかに切り替えることで、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できた。

参考文献

- 1) 中小河川における局地的豪雨対策WG報告書，2009。
- 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) 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。
- 4) 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>
- 5) 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利特性及び河床形態，河川技術論文集，第15巻，PP243-248，2009。
- 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) 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。
- 8) Win River 操作手順書，株式会社SEA，pp31，2005。
- 9) 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。
- 10) 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。

(2011.5.19受付)