

淀川河川事務所における高度流量観測の 取り組み・課題について

弓場 茂和¹・岩本 演崇²

¹近畿地方整備局 六甲砂防事務所 建設監督官 (〒658-0052 兵庫県神戸市東灘区住吉東町3-13-15)

²日本工営株式会社 大阪支店 技術第一部 (〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満1-2-5)

淀川水系の水位流量観測所を対象に高度流量観測の適用性検討を行った。高度流量観測手法として、淀川・枚方地点（河口から25.9k）でH-ADCPおよび画像解析（STIV法）、桂川・天竜寺地点（合流点から18.6k）にH-ADCP、木津川・八幡地点（合流点から1.5k）に画像解析（STIV法）を適用し、試行的に連続観測を行った。流量推定については、対数則に基づく単純補間だけでなく合理的な流速の空間補間が可能な力学的内外挿法（DIEX法）も適用した。本観測結果と別途実施した浮子観測やADCP移動観測による流量と比較した結果、単純補間法では流量算出精度が確保されない地点でもDIEX法と組み合わせることで精度が向上する結果が得られた。

キーワード 高度流量観測、H-ADCP、STIV、遠赤外線カメラ、DIEX法、湛水区間

1. はじめに

平成25年7月に発生した島根・山口豪雨災害や同年9月に近畿地方から東北地方にかけて大きな被害をもたらした台風18号による洪水等、近年、豪雨や大規模台風による災害が頻発している。これら異常気象に対応するための基礎資料である水位・流量を安定的かつ自動連続的に観測することは、非常に重要である。しかしながら、堰の湛水区間や背水影響区間のような特殊な流況下においては、現行の水位流量曲線による流量観測では正確な流量が把握できない問題がある。また、未曾有の大規模出水時に橋周辺で溢水が発生し、観測員が浮子投下地点まで到達できず、観測を実施できないような状況下においては、流量観測さえ実施できないといった問題が露見してきている。

これらの問題に対して、安定的かつ自動連続的に流速計測可能な計測機器が開発され、我が国の河川で適用され始めている。例えば、ある高さの流速横断分布を計測可能な水平設置型超音波ドップラー流速分布計（H-ADCP, Horizontal- Acoustic Doppler Current Profiler）や河川表面の流速分布が計測可能な電波流速計および画像解析（STIV, Space-Time Image Velocimetry）が挙げられる。さらに、画像解析については、一般的に用いられる可視画像カメラでは夜間に対応できなかったが、遠赤外線カメラ技術が向上したことで夜間撮影が可能となっており、画像解析

の適用範囲は大きく広がりつつある。

淀川水系において主要地点として設定されている淀川・枚方地点は、平成25年台風18号出水時に高水敷のゴルフネット等の撤去が間に合わず、浮子流下の支障となったことで、観測が正確に行われない事象が発生した。また、桂川・天竜寺地点では河川水位が浮子投下位置である渡月橋の橋面まで達し、作業員の安全が確保されないため観測中止を余儀なくされた。また、木津川・八幡地点では淀川本川の背水影響を受けるため、水位流量曲線では正確な流量観測ができない可能性が指摘されていたため、流量算出には流速計測が必要であった。以上のことから、上述した観測地点に対して、河川流量をより正確に、かつ自動連続的に安定して観測するための施設整備が急務となっている。

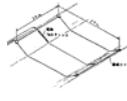
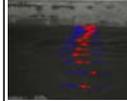
本報告では、各種高度流量観測手法の流況別、河道形状別の適用性を整理し、上述した淀川・枚方地点、桂川・天竜寺地点および木津川・八幡地点に対して、適用性の高い高度流量観測手法を選定し、流量観測を試行した結果を示す。

2. 高度流量観測手法の整理

(1) 高度流量観測手法の種類

高度流量観測手法は、「河川砂防技術基準・調査編」に示されているように、接触型流速計と非接触型流速計に分類されており、対象とする流況や河道

表-1 高度流量観測選定表

分類	高度流速計測法(直接式)					従来流量観測手法		
	手法名	H-ADCP	開水路電磁流速計	電波流速計	画像解析法	回転式流速計	浮子	
計測原理	超音波の伝播速度を測定することで流速を求める。送信側と受信側のセンサが必要である。	超音波のドップラー効果により流速を計測する。一つのセンサで送受信を行う。	両岸および河床に設置した電極間に生じる起電力が断面平均流速に比例する原理により流量を算出する。	橋桁等に設置したセンサから水面に電波を発射し、反射の周波数変化より表面流速を計測する。	流下するごみや波紋を画像に捉え、画像解析により、表面流速を測定する。	水流の力によるプロペラ回転数を計測することで、流速を算出する。	橋や投下装置からトレーサを投下し、ある距離流下するまでの時間を計測することで、流速を算出する。	
機器設置写真								
流量算出方法	計測流速×断面積	計測流速×区分断面積	計測流速×断面積	計測流速×区分断面積	計測流速×区分断面積	計測流速×区分断面積	計測流速×区分断面積	
計測データ	設置高の横断平均流速	設置高の流速横断分布	断面平均流速	表面流速	表面流速	任意深さの流速	表層流速	
機器準備	50,000千円	7,000千円(ナロータイプ)	-千円(事例無し)	10,000千円(複数設置)	1,000千円(カメラ1台)	-千円	-千円	
流況・水深	適用川幅	100~200m	~200m(高濁度考慮)	50m程度	制限無し(機器数増の場合)	~100m程度(カメラ1台)	制限無し	
	適用水深	2m~	1m~	10m程度以下	1m~	制限無し	制限無し	
	適用流速	0~20m/s	0~10m/s(ナロー:5m/s)	- (不明)	0.5~20m/s	0.5~10m/s程度	0.5~2.5m/s	- (不明)
	複雑な流況	精度低下が懸念	精度低下が懸念	精度低下が懸念	計測不可	精度低下が懸念	適用外	真つぐ流下しない
	橋脚影響	精度低下が懸念	精度低下が懸念	精度低下が懸念	橋の上流側で計測可能	橋の上流側で計測可能	適用外	後流影響を受ける
	高濁度流況	○	計測範囲が減少	○	○	○	○	○
	感潮区間	△	△	△	表層と下層で流速相違	表層と下層で流速相違	○	表層と下層で流速相違
単断面	潜水区間	○	○	○	水面揺動が無い場合不可	水面揺動が無い場合不可	○	○
	砂州・中州	機器増設が必要	機器増設が必要	機器増設が必要	機器増設が必要	○	○	○
	河床変動	○	○	河床の計器が破損する	○	○	○	○
	低水観測	○	○	○	水面揺動が無い場合不可	水面揺動が無い場合不可	○	○
	高水観測	○	○	○	○	○	適用外	○
	機器コスト	低水のみ:50,000千円 低水+高水:50,000千円	低水のみ:7,000千円 低水+高水:7,000千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円	低水のみ:10,000千円 低水+高水:10,000千円	低水のみ:1,000千円 低水+高水:1,000千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円
	重複断面	低水観測	○	○	○	水面揺動が無い場合不可	水面揺動が無い場合不可	○
高水観測		○	○	○	○	○	適用外	○
機器コスト		低水のみ:50,000千円 低水+高水:100,000千円	低水のみ:7,000千円 低水+高水:21,000千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円	低水のみ:10,000千円 低水+高水:30,000千円	低水のみ:1,000千円 低水+高水:3,000千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円	低水のみ:-千円 低水+高水:-千円

○: 不適 △: 機器増設で対策可能 ○: 適用可能

条件によって適切な流速計を選定する必要があるとされている。

表-1は高度流量観測手法の選定表を示す。同表に示すとおり、高度流量観測手法には、川幅や水深および流速についてそれぞれ適用範囲があるため、対象河川において観測対象とする流況について適用性の高い手法を選定する必要がある。

(2) 高度流量観測の選定

本報告では、淀川・枚方地点、桂川・天竜寺地点および木津川・八幡地点を対象とした。高度流量観測手法の選定にあたっては、表-1に示す高度流量観測手法の特性や現地状況等を考慮して、枚方地点はH-ADCP観測および遠赤外線カメラを用いた画像解析(STIV)、天竜寺地点はH-ADCP観測、八幡地点は遠赤外線カメラを用いた画像解析(STIV)を採用することとした。

3. 現地観測

(1) H-ADCP観測

a) 観測概要

流速横断分布の計測を目的として、枚方地点(25.9k, 低水路幅約250m)および天竜寺地点(18.6k, 川幅約70m)にH-ADCPを設置し、それぞれ2014年1月および2014年8月から観測を開始した。流量推定に必

要となる水位データは、枚方地点は国土交通省により設置されている枚方水位観測所の計測データ、天竜寺地点においては高度流量観測用に設置した圧力式水位計による計測データを用いることとした。

b) 枚方地点における観測

枚方地点には、低水時の水深が小さいことに配慮して、H-ADCP300kHzナロータイプを設置した。本機種は、超音波ビームの拡がり通常1.7° であり、対し、1.0° とビームの空間的な拡がりを抑えたものであり、超音波ビームが水面や河床に干渉しにくい特徴を有している。

枚方地点におけるH-ADCP設置位置図を図-1に示す。同図より、H-ADCPから発信される超音波ビームは、左岸から右岸に向けて進行するが、後述するとおり、河道中央部がマウンド形状となっているため、超音波は河道中央部までしか届いていない状態であった。そのため、流速計測は左岸から河道中央部の範囲しか計測できなかった。これより、高精度な流量推定を行うためには、未計測エリアに対して外挿を行うことが必要である。

c) 天竜寺地点における観測

天竜寺地点は、観測対象流況を高水のみとしたため、H-ADCP300kHzノーマルタイプを設置した。天竜寺地点におけるH-ADCP設置位置図を図-2に示す。天竜寺地点では、低水時はセンサが気中に露出するた

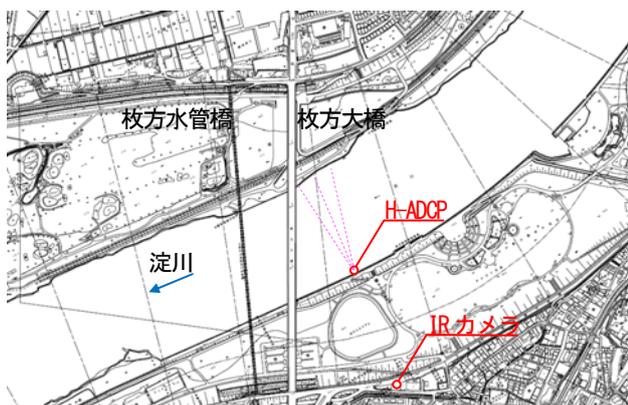


図-1 枚方地点におけるH-ADCP、カメラ設置位置

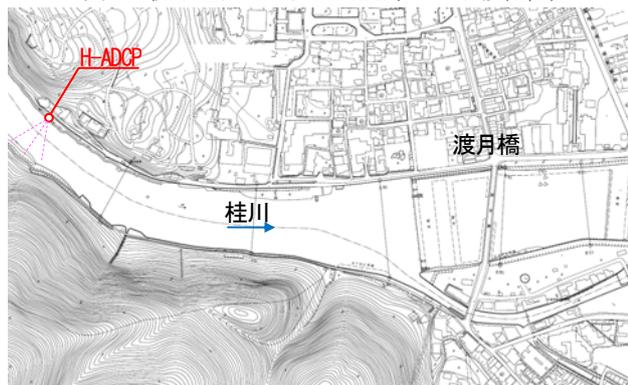


図-2 天竜寺地点におけるH-ADCP設置位置

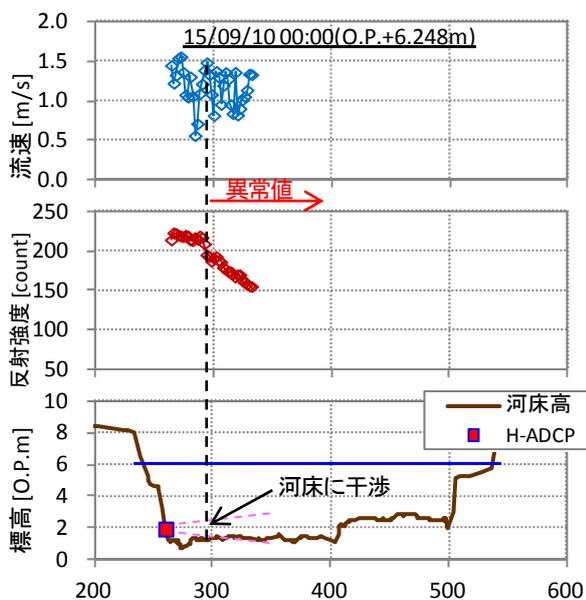


図-3 枚方地点におけるH-ADCP計測結果

め、計測はできないが、高水時はH-ADCP設置高における流速横断分布を全幅計測できる位置に設置した。

d) H-ADCP観測状況

観測期間に発生した出水において枚方地点および天竜寺地点に設置したH-ADCPで計測された結果をそれぞれ図-3および図-4に示す。枚方地点については、図-3より、超音波ビームが河床に干渉した影響により、センサから30m程度しか計測できていない。同図の反射強度横断分布は、それを裏付けるようにセンサか

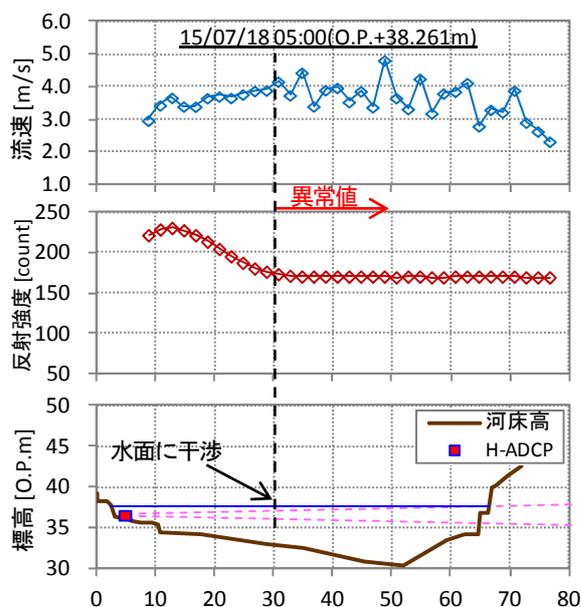


図-4 天竜寺地点におけるH-ADCP計測結果



図-5 八幡地点における遠赤外線カメラ設置位置

ら30m程度のところでピーク値が出現しており、流速横断分布については同位置から右岸側で流速が乱れた値となっている。

一方、天竜寺地点については、濁度が大きくなれば対岸付近まで流速計測ができていたことが確認された。しかしながら、高濁度下では、図-4に示すとおり、超音波が減衰し、計測範囲が狭められる事象が発生した。

以上より、枚方地点は、地形の制約から計測層数が狭められるため、上述したとおり、適切な流速補間が必要であり、天竜寺地点は超音波減衰により計測範囲が狭められるため、適切な流速補間が必要であると言える。

(2) STIV観測

a) 観測概要

STIV解析画像を取得するためのカメラは遠赤外線カメラとし、枚方地点および八幡地点に設置した。遠赤外線カメラの機種選定にあたり、様々なレンズ

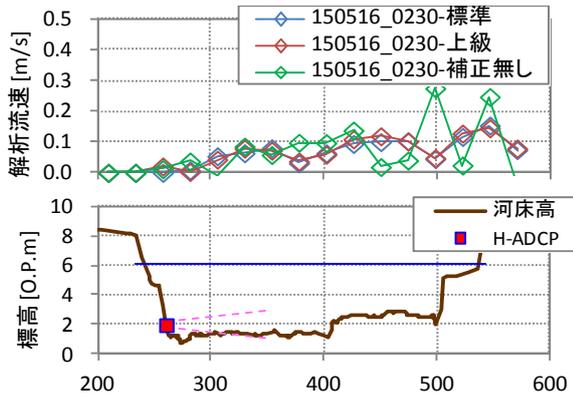


図-6 画像鮮明化装置有無の流速比較

(13mm, 25mm, 50mm, 100mm) を用いた現地テスト撮影を行い、解析にあたり適切な画角が撮影可能なレンズを選定した。また、遠赤外線カメラ画像は距離による減衰や気温等外的要因による減衰で画像の鮮明度が低下する事象が生じたため、画像鮮明化装置 (SSOG, GreenTEL社製) を用いた画像鮮明化を試みた。

b) 画像鮮明化装置の適用結果

本検討では、遠赤外線カメラで撮影された画像に対する画像鮮明化装置の有用性について検証した。

図-6は画像鮮明化装置 (標準機種, 上級機種) ありの場合と無しの場合の画像を用いたSTIV解析による流速横断分布を示す。これより、画像鮮明化装置標準機種および上級機種を適用した画像用いた解析結果は概ね一致するとともに、画像鮮明化装置無しの場合では異常値と判断できる右岸側の流速が妥当な値で得られている。

以上より、画像鮮明化装置による解析精度向上が確認されたため、枚方地点および八幡地点に画像鮮明化装置を設置することとした。

c) 枚方地点におけるSTIV観測

枚方地点では、撮影対象エリアを左岸高水敷および低水路とした。遠赤外線カメラは、SR-612 (FLIR社製) の50mmレンズを採用し、左岸の枚方出張所の屋上に設置した。なお、設置した遠赤外線カメラは30フレーム/秒のタイプである。枚方地点で撮影された画像の一例を図-7に示す。なお、同図の赤枠内は画像鮮明化装置を適用した範囲を示す。

d) 八幡地点におけるSTIV観測

八幡地点では、枚方地点同様に撮影対象エリアを左岸高水敷および低水路とした。遠赤外線カメラはSR-645 (FLIR社製) の13mmレンズを採用し、左岸堤防天端に設置されている河川看板近傍に設置した。なお、設置した遠赤外線カメラは、30フレーム/秒のタイプを選定した。撮影画像の一例を図-8に示す。図-7同様に図-8中の赤枠内は画像鮮明化装置を適用した範囲を示す。

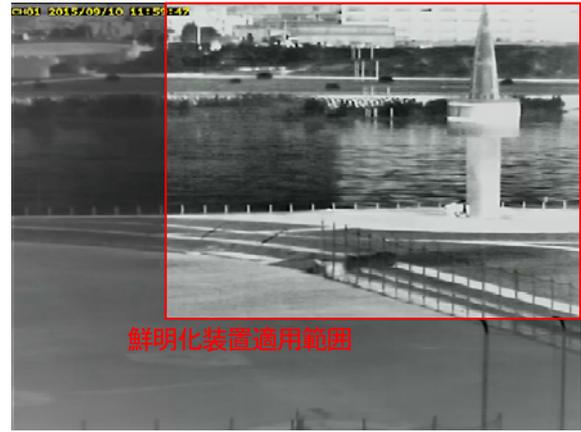


図-7 枚方地点で撮影された画像



図-8 八幡地点で撮影された画像

e) STIVによる流速解析

撮影された動画データを用いた流速推定は、STIV解析により行った。STIV解析を行うにあたり必要となる画像の平面幾何補正は、標定点測量を行い実施した。標定点は、一般的に必要とされる6点以上とした。

4. 流量算出結果と考察

(1) 流量算出方法

H-ADCPおよびSTIVで計測した流速を用いた流量算出は、(2)で示すように対数分布則に基づく区分求積法による方法 (以下、単純補間法と呼ぶ) を基本とした。しかしながら、計測上の問題から対岸側の流速が正確に計測できず、流速の空間外挿が必要となる場合については、DIEX法 (力学的内外挿法, Dynamic Interpolation and Extrapolation method) を適用し、より正確な流量算出を行った。なお、DIEX法の詳細については、二瓶・木水(2007)を参照されたい。

(2) 更正係数

計測流速から水深平均流速に変換するための更正係数は、別途実施したADCP計測結果を基に算定した。各地点における流速鉛直分布は概ね対数分布則と一致する結果が得られた。一例として、天龍寺地点お

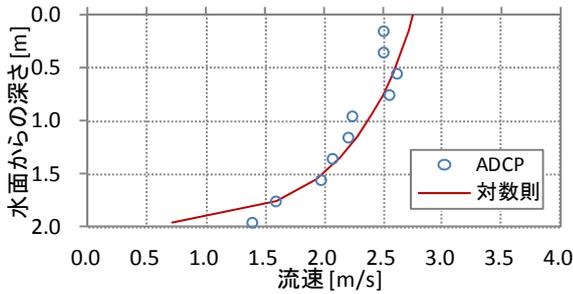


図-9 天竜寺地点における流速鉛直分布

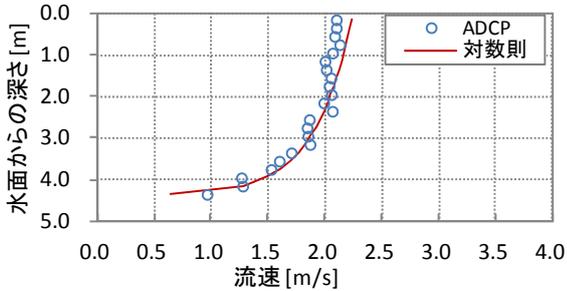


図-10 八幡地点における流速鉛直分布

よび八幡地点において高水時にADCP移動観測により計測した流速鉛直分布をそれぞれ図-9および図-10に示す。

以上から、本検討では更正係数は対数分布則に基づき各計測位置毎に設定した。なお、更正係数の設定に係る詳細な検討内容については紙面の都合から割愛する。

(3) 枚方地点における流量観測結果

枚方地点の平成26年台風11号出水における流量観測結果を図-10に示す。ここに、図-10(a)は単純補間法による流量時間変化、図-10(b)はDIEX法による流量時間変化を示す。これより、H-ADCP観測については、洪水第一波では単純補間法およびDIEX法による流量算出結果とも浮子観測値と概ね一致している。しかしながら、洪水第二波では単純補間法もDIEX法も浮子観測値と差異が生じている。

一方、STIV観測については単純補間法による流量算出結果は浮子観測値と一致しないが、DIEX法による流量算出結果は浮子観測値と概ね一致している。これは、右岸側で低解像度となった範囲の解析流速を用いず、DIEX法により数値的に流速を推測したことが要因として考えられる。

(4) 天竜寺地点における流量観測結果

天竜寺地点の平成27年台風11号出水における流量観測結果を図-12に示す。これより、単純補間法による流量算出結果は浮子観測値と一致しないが、DIEX法による流量算出結果は浮子観測値と一致することが分かる。これは、図-4に示したようにH-ADCPから発信された超音波がy=30m付近で減衰したことで、外岸

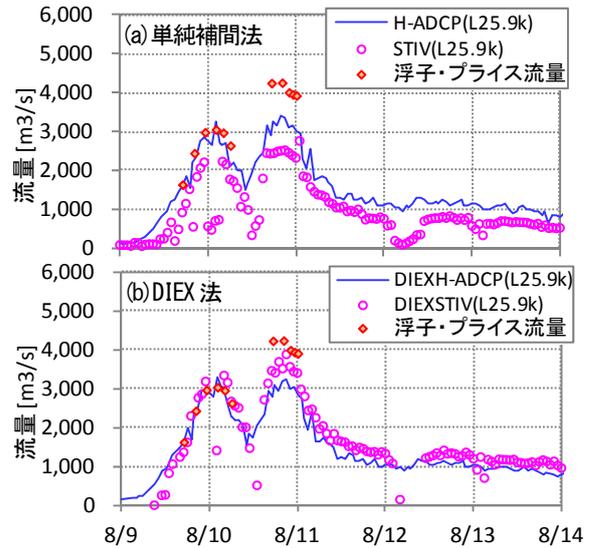


図-11 枚方地点における流量算出結果

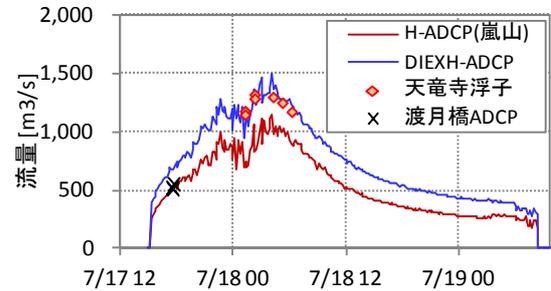


図-12 天竜寺地点における流量算出結果

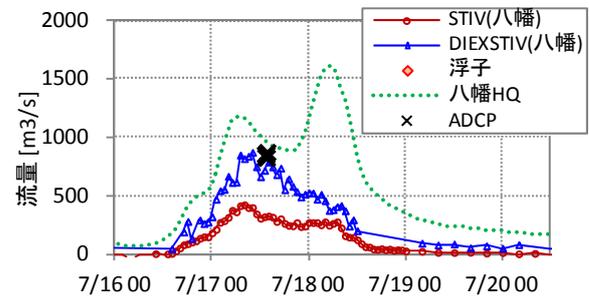


図-13 八幡地点における流量算出結果



図-14 八幡地点の流況(上:増水期、下:水位ピーク時)

側で高流速となる右岸側の流速が計測できなかったことが原因として考えられる。単純補間法では、 $y=30\text{m}$ 付近の正確に計測できた流速値から対数分布則により摩擦速度を逆算し、その摩擦速度を用いて流速未計測範囲の流速を推定しているため、流量が過小評価となっている。DIEX法では、流体の運動方程式を用いて流速を推定する手法であり、水深の大きい右岸側の流速を適切に推定できたため、流量算出結果が浮子観測値と概ね一致する結果が得られたと考えられる。よって、天竜寺地点ではH-ADCP計測とDIEX法を組み合わせることで流量算出精度が向上することが分かった。

(5) 八幡地点における流量観測結果

八幡地点の平成27年台風11号出水における流量観測結果を図-13に示す。これより、単純補間法による流量算出結果は、ADCP観測値と一致しないが、DIEX法による流量算出結果はADCP観測値と概ね一致する結果が得られた。よって、八幡地点では、STIV観測とDIEX法を組み合わせることで流量算出精度が向上することが分かった。

5. おわりに

本報告では、H-ADCPおよび遠赤外線カメラ画像を用いた流量観測を実河川に適用し、その適用性検証を行った。得られた知見は以下に示すとおりである。

H-ADCP計測値が河川横断距離に対して極めて狭い場合は、DIEX法を適用することで、推定精度の高い流速値、流量を算定することが可能であることが示された。

遠赤外線カメラ画像を用いたSTIV解析結果は、撮影範囲内の遠方ほど、流速推定精度が低下した。これは、空間解像度の低下だけでなく、距離減衰や雨滴等の外的要因によるものと推測され、画像鮮明化装置を適用することにより流速解析精度が向上することが分かった。

今後、あらゆる流況下でADCP移動観測やその他流量観測による検証データを蓄積し、本報告で試行した高度流量観測手法の精度検証を行っていく必要がある。

最後に、高度流量観測手法は流速計測の高精度化だけでなく、安全性、自動連続化、省力化を実現する手法であるため、リアルタイムモニタリング化の視点が重要である。本検討では、STIV観測のリアルタイム化を別途進めており、既に枚方地点でリアルタイムモニタリングの試行を実施する段階であり、今後試行していく計画である。

謝辞：本報告では、神戸大学・藤田教授や東京理科大学・二瓶教授に技術的な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省河川砂防技術基準調査編, 2014.
- 2) 国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所:河川維持管理計画(淀川), 2012.
- 3) 国土交通省近畿地方整備局河川部:平成 25 年台風 18 号災害概要, 2013.
- 4) 二瓶泰雄・木水啓:H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.4, pp. 295-310, 2007.
- 5) 岩本演崇・二瓶泰雄:H-ADCP 計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング, 水工学論文集, Vol.53, pp.1009-1014, 2009.
- 6) Ichro Fujita, Yohei Kunita: Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera, Journal of Hydro-environment Research 5, 2011.
- 7) 藤田一郎・安藤敬済・堤志帆・岡部健士:STIV による劣悪な撮影条件での河川洪水流計測, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009.
- 8) 柏田仁・藤田一郎・本永良樹・萬矢敦啓・二瓶泰雄・中島洋一・山崎裕介:統一された流速内外挿法に基づく様々な流速計測技術の流量推定精度, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_739-I_744, 2013.
- 9) 御厨純・二瓶泰雄・鈴木大樹・中山朝陽:2 台の H-ADCP 計測と DIEX 法に基づく複断面河道の洪水流量計測～台風 1112 号出水を例に～, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I_1345-I_1350, 2012.
- 10) 藤田一郎・原気・萬矢敦啓:河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, I_1177-I_1182, 2011.
- 11) 山本泰督・本永良樹・栗城稔:KU-STIV を用いた流量観測の検証, 平成 26 年度 河川情報シンポジウム 講演集, pp.8-1～8-6.
- 12) 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(水工学), Vol. 69 (2013) No. 4 p. I_745-I_750.