

非接触計測と水理解析による河川水位・流量 観測システムの確立に向けた検討

A NEW MONITORING SYSTEM FOR RIVER WATER-LEVEL AND DISCHARGE
USING NON-CONTACT MEASUREMENT AND HYDRAULIC SIMULATION

柏田仁¹・二瓶泰雄²・中西徹真³・鈴木佑弥⁴・平謙二⁵・上田英滋⁶・梶純也⁷・
藤田一郎⁸

Jin KASHIWADA, Yasuo NIHEI, Tetsuma NAKANISHI, Yuya SUZUKI, Kenji TAIRA, Eiji
UEDA, Junya KAJI and Ichiro FUJITA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) つくば技術研究センター (〒300-4204 つくば市作谷642-1)
兼 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程 (〒278-8510 野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 野田市山崎2641)

³非会員 東海旅客鉄道株式会社

⁴学生会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒278-8510 野田市山崎2641)

⁵非会員 三菱電機エンジニアリング(株) メディアシステム事業所郡山支所 (〒963-8586 郡山市栄町2-25)

⁶非会員 三菱電機(株) スマートコミュニティ・グローバル事業推進部技術政策課 (〒100-8310 千代田区丸の内2-7-3)

⁷正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前2-19-24)

⁸正会員 学術博 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This study is to present a new safe and stable monitoring system for river water level and discharge by cooperation of image processing and hydraulic analysis. The authors individually developed subsystems such as (1) CCTV camera control, (2) water surface detection algorithm, (3) STIV and (4) DIEX method, and these were integrated. To confirm the fundamental performance of the present monitoring system, the prototype system has installed into the Ongagawa River, and laboratory experiments have also conducted. The results indicated that the evaluated velocity and discharge give good agreement with the observed data. Furthermore, we proposed a method for rejecting outlier.

Key Words : water level, discharge, Image processing, STIV, DIEX method

1. 序論

豪雨時に雨量・水位・流量等の水文データの計測を精度良く、かつ、確実にすることは、洪水外力の適切な評価と対策立案において極めて重要であり、河川管理者により長年継続的に観測が行われている¹⁾。このうち、雨量に関しては、最新の観測技術が適宜導入・展開されている^(例えば2)。一方で、水位・流量観測に関しては、様々な計測法や水理解析法の新技術が開発されているにもかかわらず、観測体制は大きくは変わっていない。このため、大出水時には、接触式水位計の損壊・流失や人力作業を必要とする浮子流量観測が実施困難となり、データ自体の取得ができない、という長年の課題がある。このため、施設能力を超える洪水時でも安全で確実にデータを取得でき、一定の観測精度を担保し、かつ、観測コストを極

力抑制し得るリアルタイム水位・流量観測技術の確立が求められている。

このためには、河川に多数設置されているCCTVカメラなどの撮影画像・動画から水位・流速の非接触計測が可能な画像解析法が極めて有用である。この画像解析法では、量水標付近の水際線検出による水位計測法^{3) 4)}や、水表面の波紋の移流を用いた水表面流速解析法(STIV, Space-Time Image Velocimetry)⁵⁾等が提案されている。また、これら水位とSTIVによる「線」流速データから、「面」流速や流量を算出するためのDIEX法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method)^{6) 7)}が提案されている。近年、これらの手法による解析が可能な市販ソフトウェアの整備により、実務への適用例も増えつつある。しかしながら、これらの水位・流速解析法は個別に開発されており、一連の水位～流速～流量計測・算出システ

ムとして統合されていない。また、同手法による水位・流量観測および検証は単発的に行われており、長期・連続的に観測を行った例は皆無に等しい。さらに、自動化・リアルタイム化において必須となる観測異常値の検出・棄却手法に関する検討は十分になされていない。

そこで本研究では、画像解析（水面検出・STIV）とDIEX法による水理解析技術を融合した自動連続・リアルタイム河川水位・流量観測システムを新たに開発することを試みる。この中で、STIVの流速データに関する新たな棄却法を提案する。また、レーザー測距機能を有したCCTVカメラを用いることで、レーザーによる水位縦断分布計測についても合わせて検討する。本システムの適用性や基本性能を調べるために、現地観測と室内実験を実施した。

2. 本システムの概要

本システムは、図-1に示すように、[1]CCTVカメラによる河川水表面の撮影、[2]水面検出、[3]STIVによる水表面流速分布算出、[4]DIEX法による流速内外挿・流量算出、という4つのサブシステムから構成される。このうち、[1]ではCCTVカメラの制御ソフトウェアを任意の時間間隔で画角を自動操作するように改良した。[2]～[4]では、既存の装置・ソフトウェアをリアルタイム演算可能に改良して用いており、それぞれについて、前原ら⁴⁾の手法（画像相関）を実装した水位画像解析WDIC（三菱電機エンジニアリング㈱・三菱電機㈱製）、KU-STIV（㈱ビーシステム製）およびDIEX-Flow（パシフィックコンサルタンツ㈱製）をベースとした。それぞれの解析手法の詳細は、参考文献を参照されたい。なお、これらのサブシステム間は疎結合となるように配慮しており、観測サイトに応じて別の機器や手法を導入可能となっている（例えば、遠赤外線カメラの使用等）。

また、STIVの流速解析における異常値棄却法として、図-2に示す「STI分割法」を新たに提案する。一般のSTIVでは、検査線上の画素情報を時間的に蓄積したSTIを生成しSTI全体を対象として代表的な縞勾配を検出する。しかしながら、必ずしもSTI全体で一様な縞勾配が見られることは少なく、縞はSTIの一部のみで明確であり、その他は不明瞭な場合が多い。また、自動車等の高速移動する光源が映り込んだ場合に異常値を示すことがある。そこで、本研究では、STIを任意の数に分割し、それぞれに対して縞勾配を検出し、負値を除去した上で中央値を抽出する、というデータ棄却法を提案する。

3. 室内実験による基本性能検証

(1) 実験概要

STIVの基本的な計測特性や本研究で提案するデータ棄却法の有効性を検討するために、室内実験を実施した。

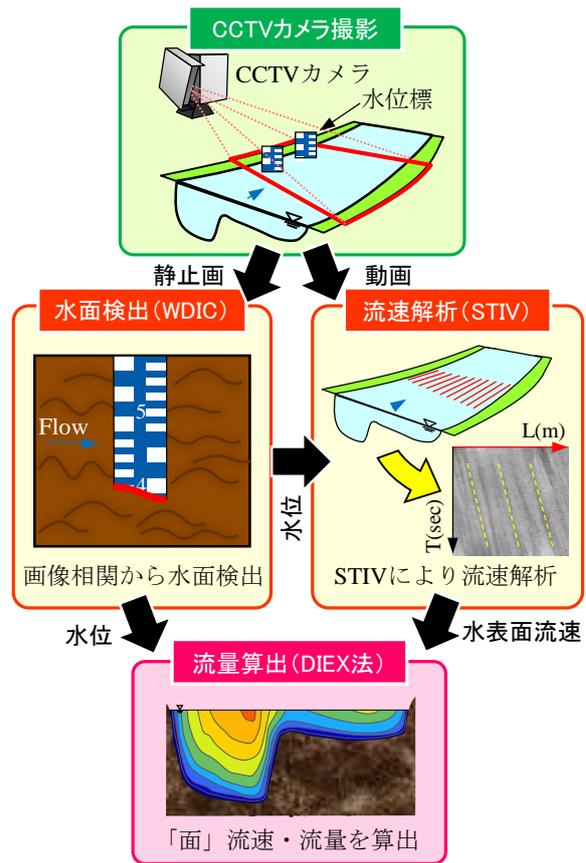


図-1 本システムの模式図

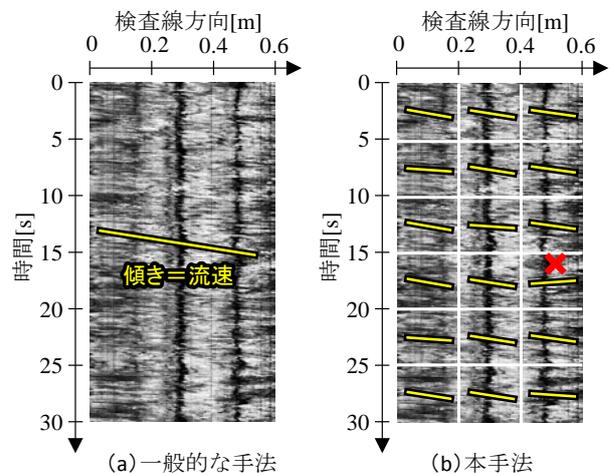


図-2 STIVの流速解析における新たな異常値検出・棄却手法

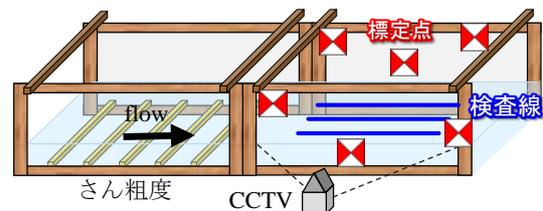


図-3 室内実験の概要

東京理科大学所有の小型水路（長さ 9.0m、幅 0.60m、高さ 0.44m、勾配 1/1000）を用い表面流速横分布を計測する（図-3）。撮影区間（長さ 2.08m）の上流にさん粗度を設置し波紋を起し、CCTVカメラ（FF-200、三菱電機

エンジニアリング(株製)により撮影した。撮影条件は FULL HD, 30FPS, 撮影時間は 30 秒である。流量 Q は $0.021\text{m}^3/\text{s}$ で一定とし、区間平均水深は 0.077m とした。検証用にピトー管を用いた。標定点を 24 点、長さ 0.60m の検査線を 9 本を設けた。STIV では Band pass filter (BPF)¹⁰⁾ 使用の有無と、本棄却法使用の有無(縦 30sec, 横 0.60m の STI を縦 5sec, 横 0.20m の 18 個に分割)を選定した。光条件は、照度が 130lx , 約 10lx , 約 2lx の 3 ケースとする(一つ目が昼間, 残り夜間相当)。さらに、同じ夜間照度で水面に光の直接照射有と無の場合を設けた。

(2) 結果

昼間条件の流速横断分布を図-4 に示す。ここでの STIV として、本棄却法および BPF の使用有無に関する計 4 ケースの結果を表示している。また、検証用データとしてピトー管の結果も図示する。これより、本棄却法無のケースに関して流速値のばらつきが大きく、特に、BPF 無では表示範囲 ($0\sim 1\text{m/s}$) を越える結果となった。一方、本棄却法有のケースでは、本棄却法無で見られたばらつきは小さく一定の効果が見られ、かつ、BPF 有では検証データとほぼ一致した。このように、本棄却法の有効性が示されるとともに、BPF との併用が必須であることが明らかとなった。

次に、本棄却法の計測精度に対する光環境の影響を見るために、各光条件下の流速計測誤差値 Err を図-5 に示す。ここでは、本棄却法有かつ BPF 有の解析結果に関して、各横断位置におけるピトー管計測値との差の RMS 値 Err_{RMS} を表示する。また、光照射条件としては、水表面に直接当てる場合(直接照射有)とそうでない場合(無)に分けて示している。これより、昼間条件では Err は 0.074m/s と小さい。夜間条件では、直接照射無では Err は 0.5m/s 強の大きな誤差となるが、直接照射有の場合には昼間条件と同程度の Err となっている。

以上のように、本棄却法は、既存ソフトウェアでも実行可能と比較的簡便でありながら、BPF との併用や照明環境に配慮することで、安定的かつ良好に水表面流速を計測可能であることが示された。

4. 本システムの現地実証試験

(1) 現地観測の概要

実河川にて本システムの有効性を検証するために、福岡県・遠賀川勘六橋地点(河口から 19.9km) にレーザースキャナ搭載型高感度 CCTV カメラ(FV-2000, 三菱電機エンジニアリング(株製))を右岸側建物屋上に、蓄光型量水板を第一・第二見通断面の流木避け用の H 鋼にそれぞれ設置し、2016 年 9 月より連続観測を開始した(図-6)。なお、本観測サイトは、直線的な河道で、かつ見通しが良好であり、本システムにとって理想的な環境を備えているが、これらの要件は浮子測法と類似する。自動

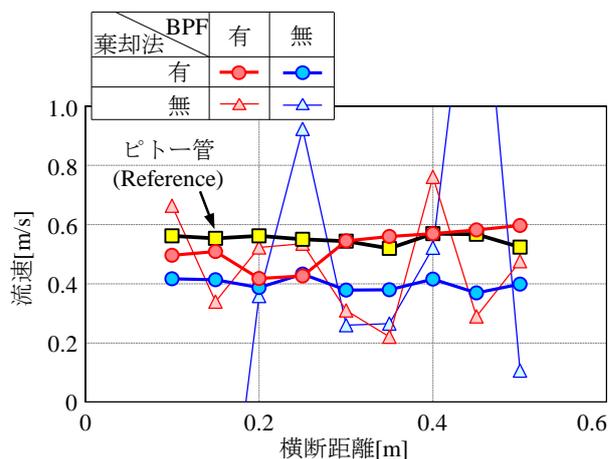


図-4 流速横断分布の計測結果(昼間条件)

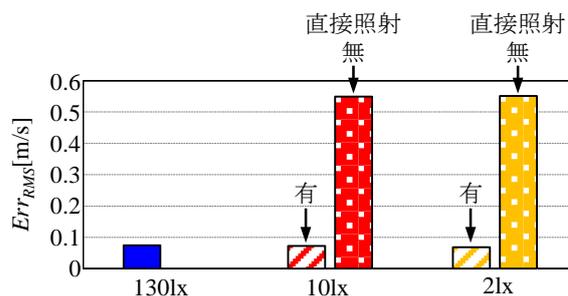


図-5 各光条件における流速誤差値 Err (本棄却法有, BPF 有のケース)

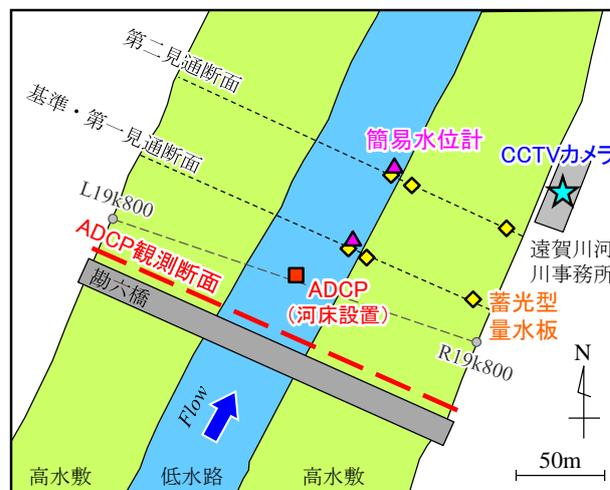
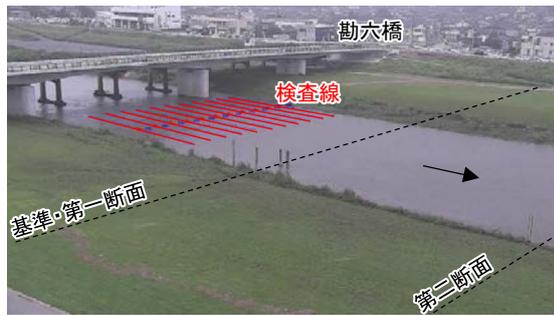


図-6 観測サイトと測器設置概要

制御された CCTV カメラは、一定時間間隔で流速解析用動画、水位解析用静止画、3次元点群データの取得を行った。検証用として、自記式水位計(U-20, Onset 製)を第一・第二断面に、ADCP(Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI 製)を上向きに底面設置した。同じく検証用流量データとして、勘六橋において ADCP 移動観測を実施した(橋梁架替工事のため、2016 年 11 月以前は約 700m 上流の新橋にて観測実施)。STIV の対象画角および検査線の配置は図-7 に示すとおりであり、室内実験結果を踏まえて、夜間における街路灯等の照明を考慮して配置した。



(a) 昼間



(b) 夜間

図-7 現地河川におけるSTIV画角・検査線の設定

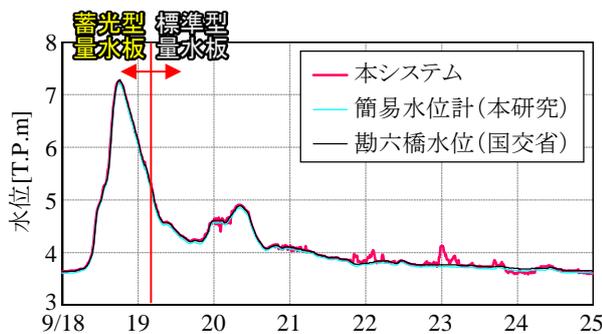
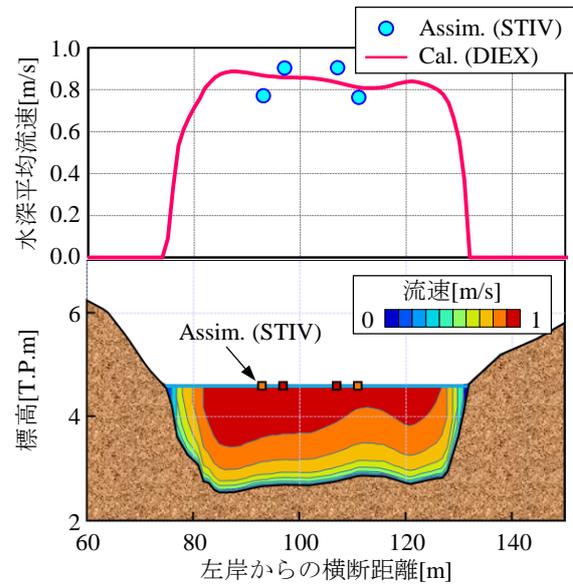


図-8 本システムによる水位の時系列変化 (2016年, 第一見通)

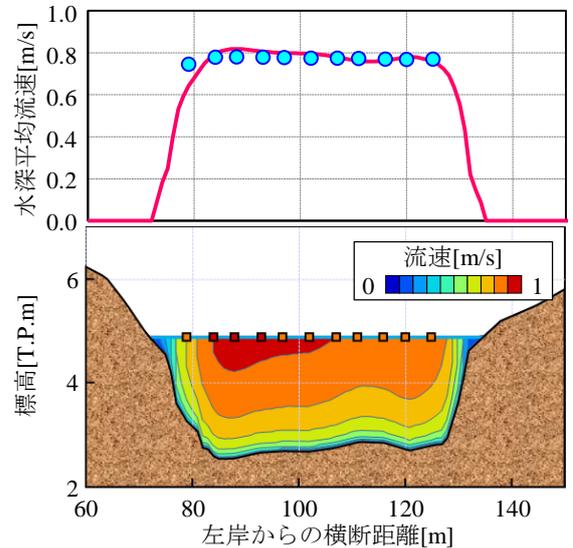
以下に示す解析データは、現地で回収した観測データを持ち帰り、ポストプロセス処理により解析した結果である。なお、2017年3月時点で、本研究成果を踏まえてシステム改修を行い、現地サーバーにて自動連続・リアルタイムで水位・流速・流量を算出している。

(2) 実洪水における本システムの有効性

本システムによる得られた水位の時系列データを図-8に示す。ここでは、第一見通を対象とし、簡易水位計・既設水位計による検証用水位計測値も合わせて示す。また、9/19の減水期で低水位量水標を用いる範囲では、ゴミ付着のため、標準型量水板を解析対象とした。これより、蓄光型量水板を用いている期間においては、本手法の水位は日中・夜間を問わず検証用データと良好に一致した。一方、標準型量水板を用いた範囲では、日中は良好であるが、夜間の計測精度の低下がみられた。これらの結果は、現在の画像相関による水面検出法では、量水板にゴミ付着が十分少なく、かつ、視認可能な照度であることが望ましいためである。今後、蓄光型量水板を下流側H鋼に移設し、ゴミ付着を極力低減する予定である。



(a) 2016/9/20 3:00 (夜間)



(b) 2016/9/20 8:00 (昼間)

図-9 本システムに基づく水深平均流速横断面分布および流速横断面コンター

次に、流速解析結果として、夜間・昼間の水深平均流速横断面分布と流速横断面コンターを図-9に示す。同図中のプロットはDIEX法における同化データとして用いられたSTIVの流速解析値を示し、実線およびコンターはDIEX法による流速推定値を表す。なお、ここでのSTIVとしては、本棄却法有かつBPF有の解析結果を用いている。また、DIEX法におけるパラメータ設定として、簡単のため、粗度係数は $0.025[m^{-1/3}s]$ を断面全体に与え、付加項 F_0 は横断面内に一様に与えた。これより、昼間では、STIVは全検査線(11本)において良好に流速分布計測を行うことができている。一方で、夜間においては、検査線11本中4本のみ流速データを得ることができ、波紋視認性の等の問題に起因している。しかしながら、DIEX法による流速内外挿操作を施すことで、横断面全体の流速分布を得ることができた。このような過程を経

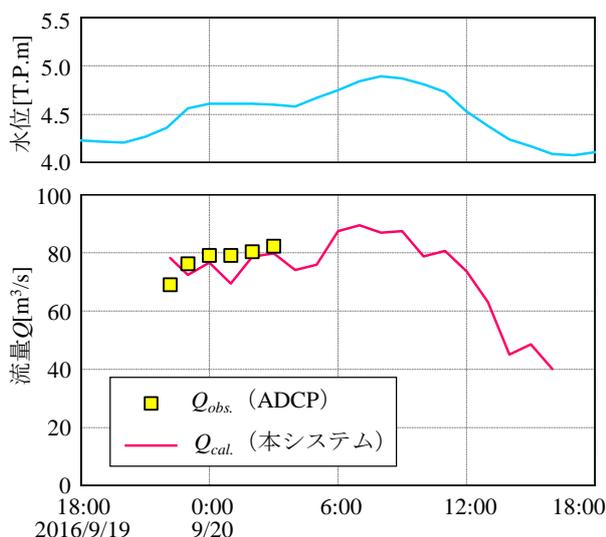


図-10 現地実証試験における本システム・検証用ADCPによる流量の時間変化図

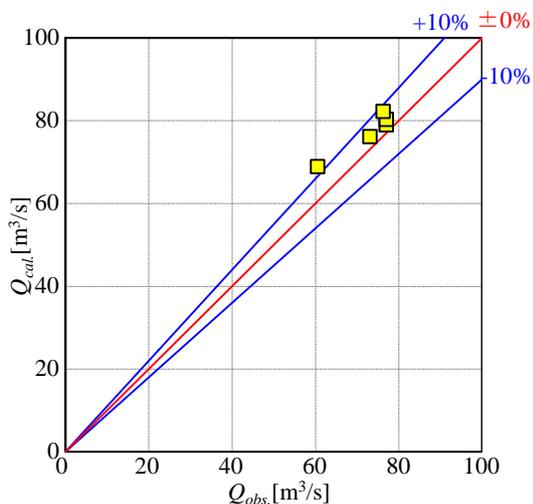


図-11 流量推定値 Q_{cal} (本システム) と観測値 Q_{obs} (ADCP) の相関図

て算定された流量の時間変化を図-10 に示す。これより、本システムは夜間から昼間にかけて連続的に、かつ、ADCP 観測値と概ね一致する流量を算出できている。さらに、流量推定精度を評価するために、図-11 に流量の観測値と推定値の相関図を示す。これより本システムでは、ADCP に対して 10%程度の誤差以内で流量を算出できている。

さらに、本システムによる連続的な流量データの算出状況を確認するために、観測開始日から2週間における流量の時系列データを図-12 に示す。ここでは、本システムによる流量推定値と、検証用データとして $H-Q$ 式 (国交省水水文質データベースの公開データから独自に作成) から得られた流量を示す。なお、本システムとしては、解析の都合上から BPF は未適用であり、また、基本的に 1 時間間隔の解析であるが、一部の低水時では 2~6 時間間隔となっていることに注意されたい。これより、出水時には差があるところも見られるが、ピーク流

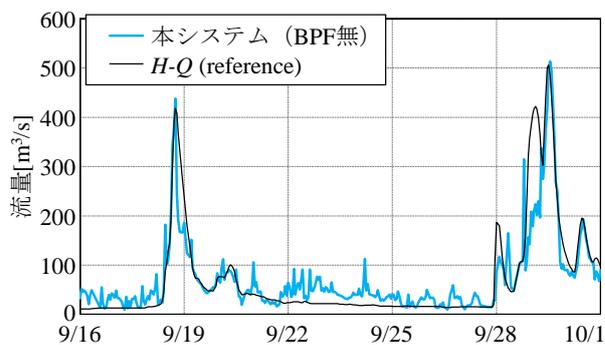


図-12 本システムによる流量の時系列データ

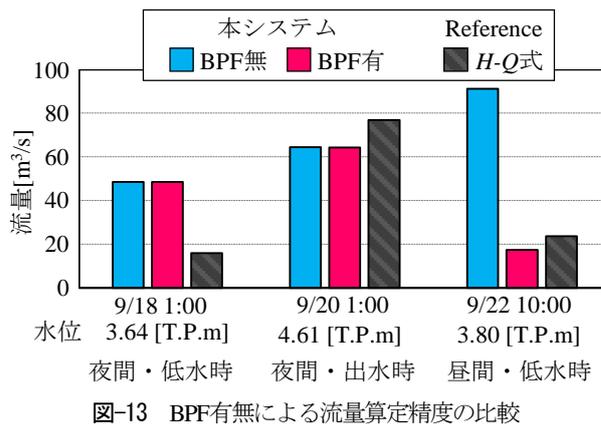


図-13 BPF有無による流量算定精度の比較

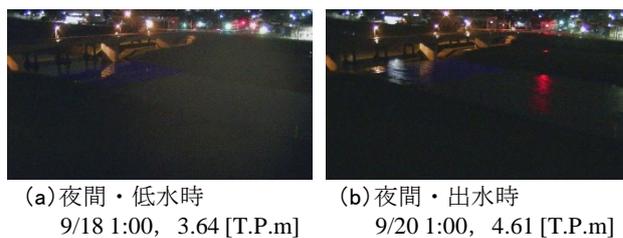


図-14 夜間における低水時・出水時の映像比較

量などは概ね一致している。一方、低水時では、 $H-Q$ 式による流量値が $10-20\text{m}^3/\text{s}$ と一定にもかかわらず、本システムの推定値は大きく変動しており誤差が大きい。

上記 STIV では BPF 未使用が精度に関係するため、任意時刻における BPF 適用の有無による流量算出結果を図-13 に示す。これより、BPF 適用により昼間・低水時や夜間・出水時には流量推定精度は大幅に向上した。一方、夜間・低水時は BPF の有無によらず流量推定精度は低い。夜間における撮影画像を確認すると、出水時には水位が上がり照明がうまく水面を捉えているが、低水時にはほとんど見えていない (図-14)。これが、低水時・夜間で本システムの流量推定精度が低下した一因である。

さらに、レーザー計測による 3 次元点群データを図-15 に示す。同図では、点群データ上にカメラで撮影した色情報を付与して表示している。これより、水域では近赤外線レーザーが正常に反射せず、有効なデータが取得されない。この特性を活かして、水際線すなわち水位縦断分布の計測が可能と考えられる。水際部の座標デー

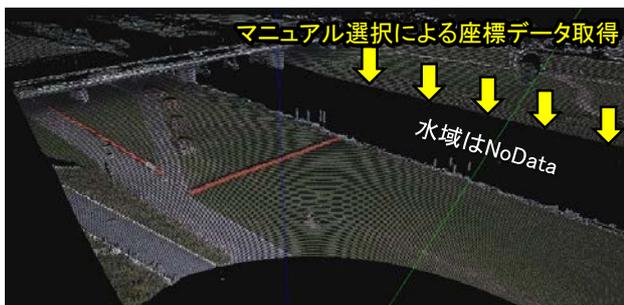


図-15 3次元点群データの一部 (2016/10/21 12:50)

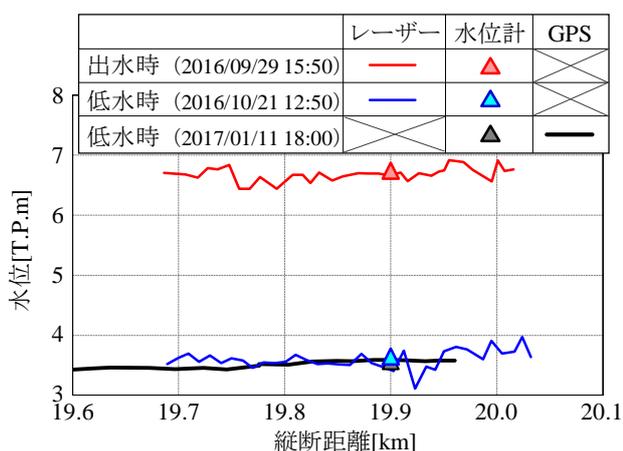


図-16 レーザー計測による水位縦断分布計測結果

データをマニュアルで取得し、図-16 に水位縦断分布例を示す。同図には、参照値として、同時刻の勘六橋水位 (国交省) と別日の低水時に行われた RTK-GPS による水位縦断計測値を合わせて示している。これより、低水時・出水時ともに、縦断方向に 300m 以上にわたり連続的に水位データを取得でき、かつ、別途行われた観測値と概ね一致することが示された。

5. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 水位・流量観測が困難な超過洪水でも安全・安定的に観測可能となるように画像解析による非接触計測と水理解析を組み合わせた水位・流量観測システムを構築した。同システムの構築にあたっては、既存の機器・手法を一部改良の上で接続した他、新たに簡易な流速異常値棄却手法を提案した。
- (2) 室内実験で本システムの有効性を検証したところ、Band pass filterを適用するとともに、本異常値棄却手法を導入することで、流速計測値は検証用データと良好に一致した。
- (3) 現地に本システムを試験的に導入したところ、水位は概ね安定的に計測可能であった。また、流量はADCP観測値と良好に一致し、十分な精度が確認された。

本研究は、非接触計測と水理解析を融合した水位・流量観測システムの構築・実用化に向けた第一報である。システムの検証と改良は、現在進行中であり、データの蓄積によって、風向風速や降雨強度等への環境依存性を定量的に評価していく予定である。また、今後、ロバスト性を向上させたSTIVと新たな品質評価指標¹⁾を導入する予定である。

謝辞: 本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募河川技術分野 (研究代表者: 二瓶泰雄) の成果の一部である。国土交通省九州地方整備局および遠賀川河川事務所には、現地観測実施に際して便宜をはかって頂いた。日本ミクニヤ(株)や日米電子(株)の皆様には観測作業の一部を、(株)ビーシステムや四葉システム開発(株)の皆様には本システム構築の一部を実施して頂いた。現地観測・室内実験の双方について、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏にご助力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, 第2章 第1節-1- 第2章 第8節-7, 2014.
- 2) 国土交通省: 川の防災情報XRAIN GIS版 (<http://www.river.go.jp/x/xmn0107010.php>)
- 3) 福浦悟史, 岡田拓也, 栗城稔: CCTVを使った水位観測システムの開発, 平成19年度河川情報シンポジウム講演集, pp.6-1-6-7, 2007.
- 4) 前原秀明, 長瀬百代, 平謙二: 濁水時の量水板画像を利用したCCTVカメラ映像からの水位計測方法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.1, pp.66-68, 2016.
- 5) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 6) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP観測と河川流量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, 土木学会論文誌B, Vol.63 No.4, pp.295-310, 2007.
- 7) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, Vol.44, WOOD20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 8) 柏田仁, 二瓶泰雄, 高島英二郎, 山崎裕介, 市山誠: 力学的内外挿法 (DIEX法) に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築, 河川技術論文集, Vol.17, pp.23-28, 2011.
- 9) 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, 水工学論文集, Vol.57, pp.I-739-I-744, 2013.
- 10) 原浩気, 藤田一郎: 時空間画像を用いた河川表面流解析における二次元フーリエ変換の適用, 水工学論文集, 第54巻, pp.1105-1110, 2010.
- 11) 能登谷祐一・藤田一郎・建口沙彩: 河川表面流画像計測STIVにおける新手法とSTI画質評価法の開発, 土木学会論文誌B1 (水工学), Vol.73, No.4, 2017.

(2017. 4. 3受付)