

画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討

A UTILIZATION OF A RIVER-DISCHARGE MEASUREMENT USING IMAGE-PROCESSING TECHNIQUE

島本重寿¹・藤田一郎²・萬矢敦啓³・柏田仁⁴・浜口憲一郎⁵・山崎裕介⁶
Shigehisa SHIMAMOTO, Ichiro FUJITA, Atsuhiro YOROZUYA, Jin KASHIWADA, Kenichiro HAMAGUCHI and Yusuke YAMASAKI

¹非会員 国土交通省九州地方整備局河川部 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2-10-7)

²正会員 学術博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 Ph.D. 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

⁵正会員 修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-6018 新宿区西新宿6丁目8-1)

⁶非会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

Monitoring of river-discharge is of great importance in river management. Measurement systems of river-discharge have been installed in many rivers in Japan, however it is quite difficult to measure a river-discharge with a float method appropriately in an extremely flood condition. In order to measure a river-discharge in any flood situations, we introduced image-processing techniques, namely space-time image velocimetry (STIV) and float particle tracking velocimetry (Float PTV) method. The results indicate that the performance of image-processing techniques was almost comparable to that of a float. Furthermore, CCTV camera is quite available for the river-discharge measurement.

Key Words : PTV, STIV, image analysis, river-discharge, surface flow measurement

1. 序論

九州地方整備局管内の直轄20水系では、高水流量観測技術として、浮子測法を採用している¹⁾。しかしながら、平成24年7月の九州北部豪雨による洪水では、浮子投下場所である橋梁の浸水等により、一部の水位流量観測所では観測を中断せざるをえなかった。また、観測が可能な状態であっても、観測員の安全確保や流量観測の精度、信頼性向上の観点から、浮子測法以外の観測技術の実用化が求められている。このような観点から注目されてきたのが非接触型流速計測法による流速計測である。非接触型流速計測法としては、水面へ照射した電波のドップラーシフトを捉えて照射面の水表面流速を計測する電波流速計法と、水表面の模様、流下物の軌跡を画像処理することで水表面流速を計測する流速計測手法（以下、画像解析法と呼ぶ）が挙げられる。画像解析法は、その解析手法に応じてPTV法、LSPIV法、STIV法の3つがあり、

これらは表層あるいは水表面流速の平面2方向あるいは主流方向流速の計測が可能な手法である^{2),3),4)}。

現在、国土交通省の流量観測技術として、画像解析法は採用されていないものの¹⁾、以下の3つの理由により、新たな観測手法として期待できる技術であり、実用化に向けての研究の必要性が高いと考える。1つ目は、既存の施設である河川沿いに設置されたCCTVカメラを利用できるため、新たな設備投資を必要とせず、技術面での課題が克服できれば、実用化が容易であること。2つ目は、CCTVカメラは堤防上の支柱に設置される事が多く、超過洪水時などにおいても監視映像を取得することは可能であり、かつ、観測員の安全性が確保されること。3つ目として、画像解析法におけるPTV法は浮子流下軌跡の定量的な把握が可能であるため、計測技術体系を大きく変えることなく浮子測法の観測精度の向上が期待できることである。

これまで、国土交通省が実施した録画像を用いた画像

解析による高水流量観測について先進的に導入した事例はあるものの³⁾⁶⁾、対象観測所に特化したスポット的な事例でありCCTVカメラを用いた事例は少なく、画像解析法はPIV法に限定されており、より河川流量観測に最適化されたSTIV法や、浮子測法との併用が期待されるPTV法の適用事例はほとんどない。このため、本研究では、九州地方整備局管内の水位・流量観測所近傍の既設CCTVカメラ録画像を用いた画像解析法による高水流量観測の実用化について試みた。ここでの画像解析法はSTIV法とPTV法とし、対象画像は、既存のCCTVカメラ動画と浮子観測地点での流量観測受注者（以下、流量観測員、と呼ぶ）が市販のビデオカメラにより撮影した動画の2ケースとした。流量観測員による動画撮影は、流量観測員への技術移転と実用化に向けた課題抽出を目的として行った。

2. 高水流量観測の概要

(1) CCTVカメラを用いた高水流量観測の概要

a) 流量観測対象箇所

従来の浮子測法に比べて、流量観測員の安全確保と高水流量観測の信頼性向上のためCCTVカメラ動画を用いた画像解析手法の実用化について検討した。

河川系のCCTVカメラは、河川管理を目的として設置されており、水文観測目的で画角はセットされていない。そこで、プリセット画角が設定されていない平成24年出水録画像と、直轄18水系の計28観測所で平成25年出水に備えて出年水期前までに画像解析に適した画面のプリセット設定を行った録画像を、それぞれ対象とした検討を行った。平成24年洪水では事前に画角設定がされていないため、録画像から画像解析が可能と判断した1観測所の洪水を対象とした。平成25年の洪水では、8水系12観測所で出水時のCCTVカメラ画像が取得できたものの中から、画像解析法を適用できると判断した5水系の計5観測所の観測映像から流量算出を行った。

b) 画像解析に用いるCCTV画像と解析手法の選定

流量算出が困難であった観測所の課題としては、①水面が左右岸際まで撮影されていなかったため流量を流速横断面分布の計測からの算出が不可能、②流速計測範囲を定めた際にその周辺に標定点を6点以上設置できなかった、③標定点を流速計測範囲の周辺に満遍なく設置できなかったため幾何補正が低精度であったため、④出水時にCCTVカメラを流量観測用のプリセット画角が変更されていたためである。画像解析法を適用できなかった3水系7観測所については、左右岸とも水際まで動画撮影できなかったことが主要因である。今後、この点について改善したプリセットを行う予定である。

解析手法は、浮子をトレーサーとして追跡する浮子PTV法と水面に現れる波紋の移流速度を検出するSTIV法を用いた。解析手法についてはFujita et al.⁴⁾を参照され

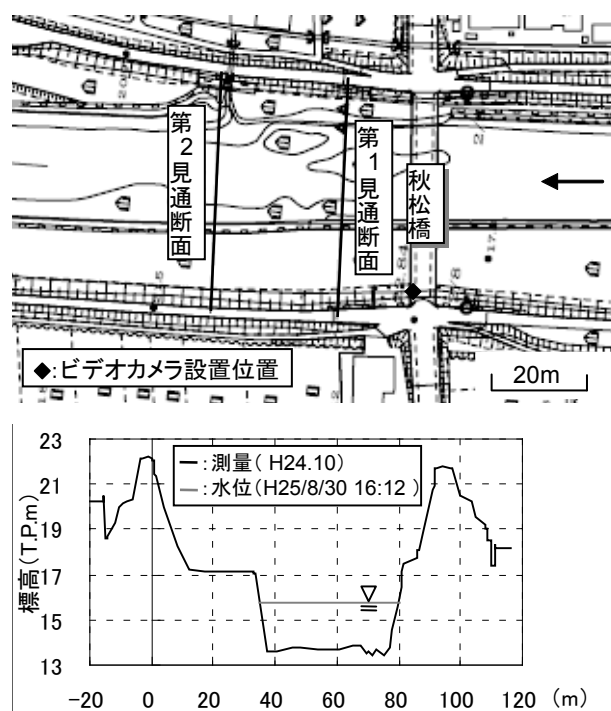


図-1 秋松橋観測所の平面及び横断面図
(横断は第1見通断面、同図中の水位は観測時水位)



写真-1 秋松橋観測所の標定点設置状況

たい。

(2) 市販のビデオカメラを用いた高水流量観測の概要

a) 流量観測対象箇所と実施日時

市販のビデオカメラを用いた高水流量観測は、観測精度の確保を目的に、これまで定量化されていなかった浮子の計測時間と浮子の流下軌跡を把握するために実施した。また、流量観測員による観測及び画像解析の実用化に向けた課題を得るため、秋松橋の流量観測員が観測を実施した。

対象観測所は、①上流部に位置し住民避難情報に重要な洪水予報等を発表する観測所であり、②川幅が市販のビデオカメラ撮影でも両岸が収まる川幅の観測所の中から、遠賀川水系穂波川の秋松橋水位流量観測所を選定した(図-1)。

流量観測に先立ちビデオカメラにより第1見通断面から第2見通断面範囲が撮影可能なカメラ位置を秋松橋左岸側に設定し、その画角内に標定点を配置して、流量観

測員による事前観測を実施した。平成25年8月25日 8:00～16:30及び8月30日 16:00～8月31日 3:30の2日間を対象に、浮子測法による高水流量観測を実施した。

b) 画像解析

画像解析に必要な標定点は、画像内に満遍なく6点以上設置し、標定点は新たに設置するだけでなく、既設の水位計支柱や護岸、樋門を活用した（写真-1）。また、画像上で浮子の流下状況を視認できるように、浮子に装着する赤旗を大きくした（通常：10cm×15cm、今回：27cm×39cm、）。市販のビデオカメラの選定基準は、映像素子（1/3型以上の大きさを持つ物）及びレンズに関する仕様（開放F値は1.8以下、焦点距離：31mm以下、映像記録：AVCHD規格準拠）の条件を満たすビデオカメラを使用した（HDR-CX720V（SONY 社製））。

取得した画像データに対し、藤田ら^{2）、3）}による幾何補正をした上で浮子PTV法による解析を実施し、表層流速横断分布を得た。

c) 流量観測請負業者による画像解析の実施

本検討では、浮子PTV法による高水流量観測を実施した秋松橋の流量観測員とそれ以外の水系の流量観測員を対象に画像解析を実際に実施してもらい、画像解析法による高水流量観測についてアンケートを行った。ここで用いた画像解析法は神戸大学と土木研究所が共同研究により作成したFloat-PTV法である²⁾³⁾⁴⁾。

3. 結果及び考察

(1) CCTVカメラを用いた高水流量観測

a) CCTVカメラ画面のプリセットの必要性

画面のプリセットの例として、写真-2に筑後川水系花月川花月水位流量観測所のCCTV画面のプリセット前後の画像を示す。ここでは、高水流量観測時に浮子を視認することが困難であったため、画像解析法はSTIV法とした。

両画像を比べると、プリセット前の画像では横断全体にわたる流速計測範囲を設けることができないため、横断全体の流速横断分布を算出することができず、流量算出も困難である。また、流速計測範囲の周辺に満遍なく標定点を配置することもできないため、幾何補正精度の保持にも課題がある。一方、プリセット後の画面では左右岸とも水際部まで撮影でき、かつ、その周辺に概ね満遍なく標定点を配置しているため、画像解析法により横断全体の流速横断分布を算出でき、流量も算出可能である。プリセット後のCCTV動画を用いた解析事例を、図-2に示す。ここで、画像解析により算出した水表面流速は第2見通断面よりも下流約110mに位置しているため、本解析結果から画像解析精度の議論はできない。参考値として第2見通断面形状と浮子測法による水深平均流速を同図に示している。画像解析により得られた水深平均

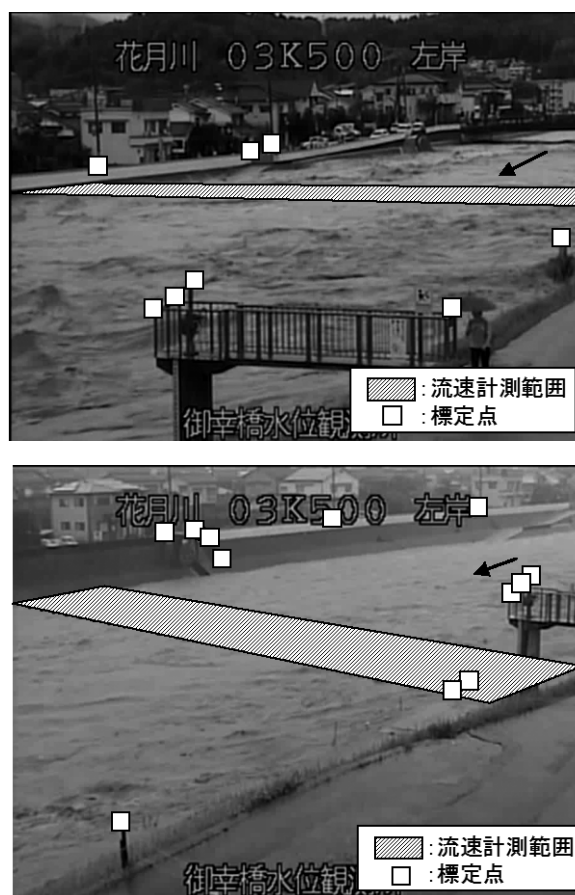


写真-2 プリセット前後のCCTV画像の比較
（上段：プリセット前、下段：プリセット後）

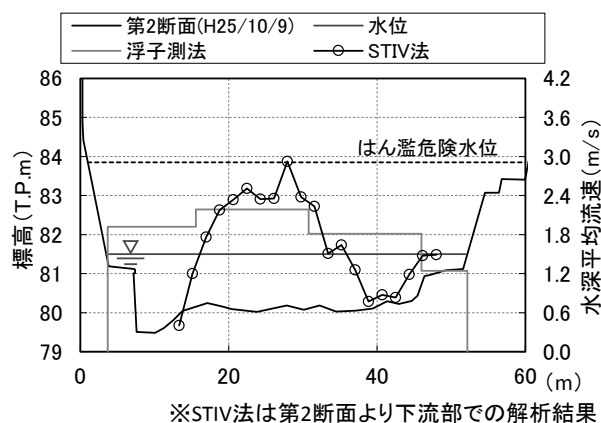


図-2 プリセット後画像を用いた画像解析事例
（花月水位流量観測所、H25/8/25 13:31）

流速は、水表面流速に一律0.85を掛け算出した。これを見ると、プリセット前のCCTV画像では水表面流速解析が不可能であったものの、事前に画角をプリセットすることで既設のCCTVカメラを用いた高水流量観測が可能であることが示された。

河川系CCTVカメラを用いた高水流量観測を実施するためには、予め、高水流量観測に適した画角にプリセットしておくことが重要である。ここで、高水流量観測に適したプリセット画像は、以下の条件を満足することが望ましい。

- ①標定点を画角内に満遍なく6点以上設置
- ②流速計測部に対し左右岸の水際部まで撮影できる画角
- ③浮子測法の流速観測値と比較する場合には、第1見通断面から第2見通断面区間の撮影が可能な画角
- ④出来る限り河道内の映像が必要なため、画像解析に必要な空が広範囲に撮影されていない画角

b) CCTVカメラ画面を用いた高水流量観測

5水系の計5観測所で撮影されたCCTVカメラ動画のうち、浮子測法で流速計測をしている第1見通断面から第2見通断面近傍で流速解析を実施した遠賀川水系中元寺川の春日橋水位流量観測所と川内川水系川内川の栗野橋水位流量観測所の2観測所の結果を示す。2観測所とも出水期前にCCTVカメラのプリセットを完了させている。両観測所ともに浮子に旗を装着していなかったため画像から浮子流下状況の視認が困難であったため、画像解析法はSTIV法を採用した。春日橋水位流量観測所はH25/8/25の計4回、栗野橋水位流量観測所はH25/6/26の計8回のそれぞれの浮子測法による高水流量観測と同時刻の画像に対し、STIV法により水表面流速を算出し、浮子測法による流速と比較した。

図-3に春日橋水位流量観測所と栗野橋水位流量観測所のCCTVカメラ位置図を、図-4に春日橋水位流量観測所（H25/8/25 8:16）と栗野橋水位流量観測所（H25/6/26 13:55）の浮子測法とSTIV法による流速横断分布図をそれぞれ示す。春日橋水位流量観測所は第2見通断面を、栗野橋水位流量観測所は第2見通断面近傍をそれぞれ対象としてSTIV法による水表面流速解析を実施し、表面流速に0.85を乗じて水深平均流速を求めた。

図-4から、春日橋水位流量観測所及び栗野橋水位流量観測所の画像解析法と浮子測法による水深平均流速の横断分布が概ね一致していることが分かる。

これより、既設の河川系CCTVカメラについて、出水期前に画像解析法に適した画角にプリセットしておき、洪水中に録画すれば、高水流量観測の実施が可能であることが示された。

(2) 市販のビデオカメラを用いた高水流量観測

平成25年度の秋松橋水位流量観測所における画像解析法と浮子測法による高水流量観測は、H25/8/25及びH25/8/30の出水時に実施した。H25/8/25は5回、H25/8/30は3回の観測を実施しており、本研究ではH25/8/30の観測結果を示す。画像解析法による浮子流下速度は、第1から第2見通断面区間の流下区間長を浮子の流下時間で除することで算出し、その際、第2見通断面まで浮子を

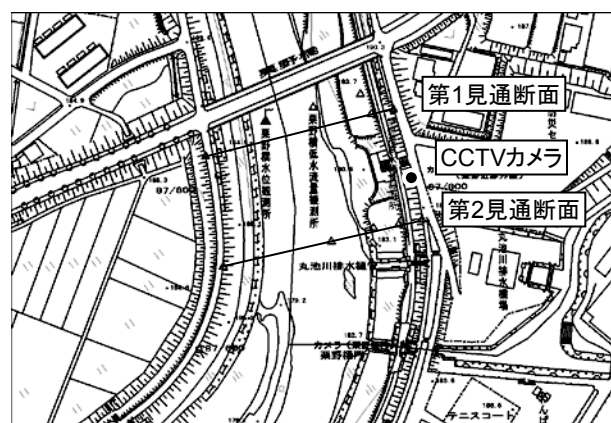


図-3 CCTVカメラ設置位置図

(上段：春日橋観測所，下段：栗野橋観測所)

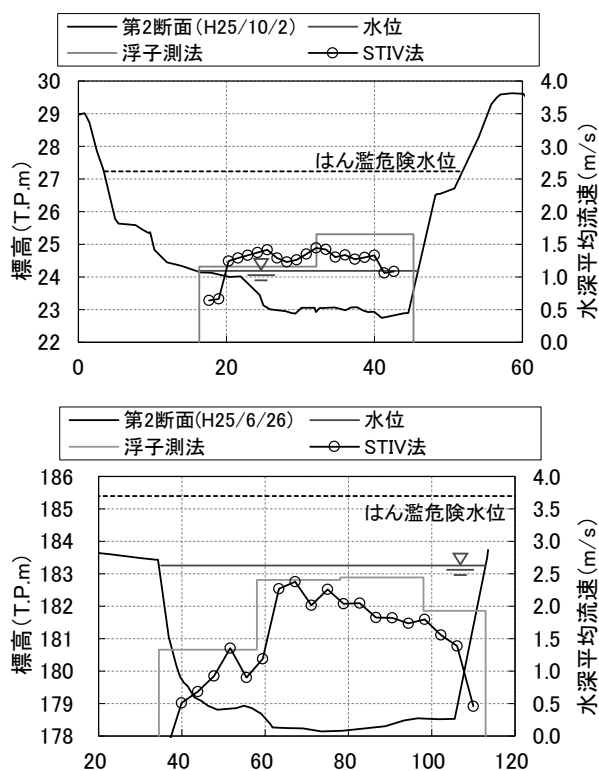


図-4 浮子測法とSTIV法による流速横断分布図

(上段：春日橋観測所，下段：栗野橋観測所)

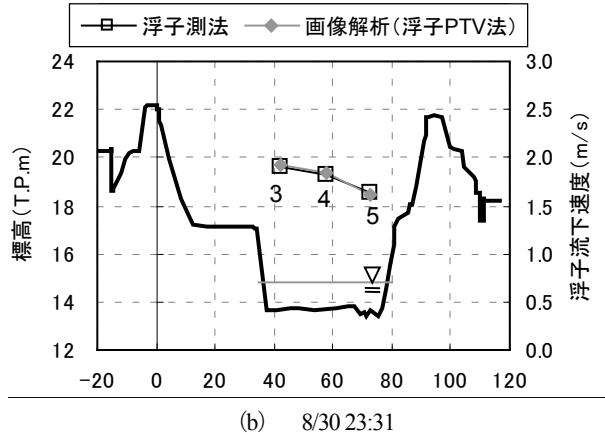
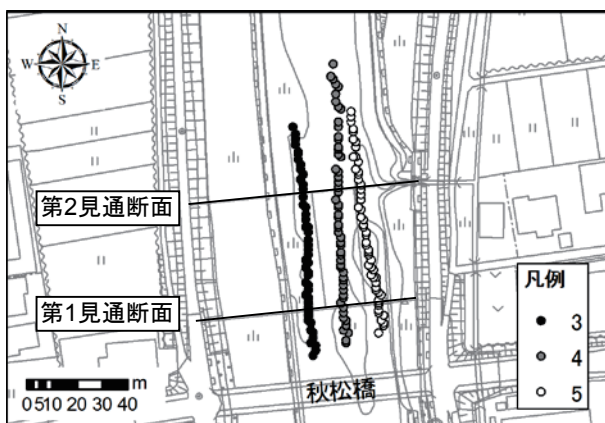
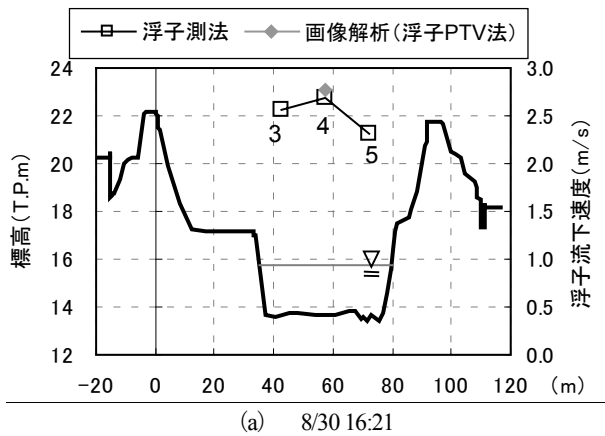
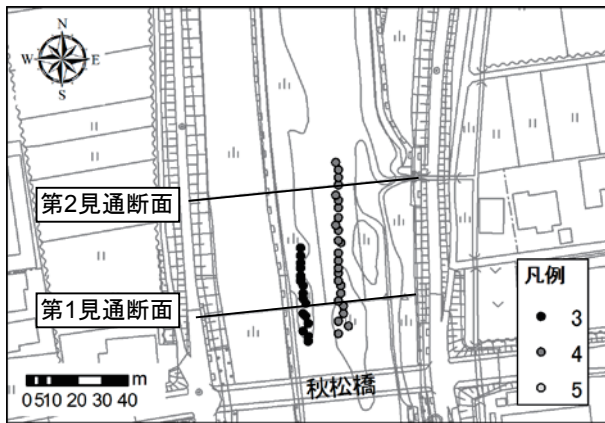


図-5 ビデオカメラ動画を用いた浮子PTV法例

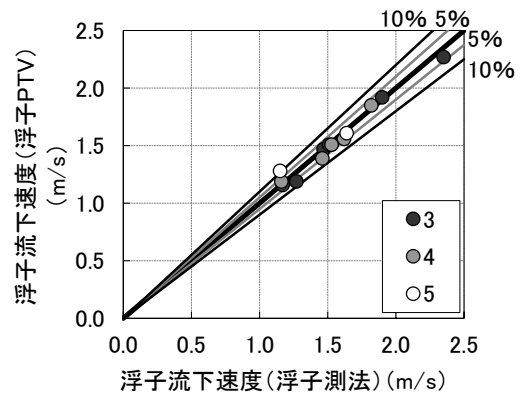


図-6 浮子測法と浮子PTV法の浮子流下速度比較図

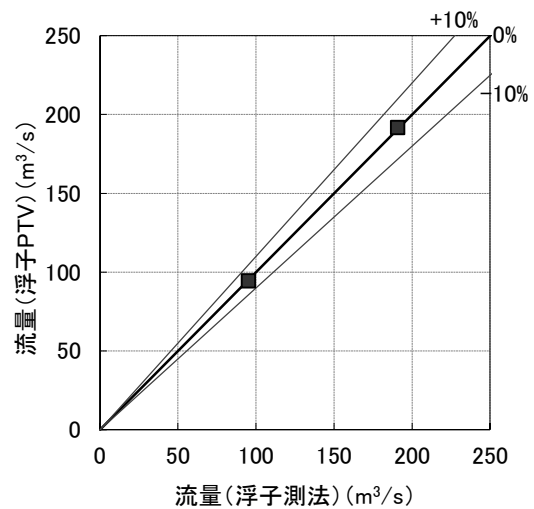


図-7 流量比較図

視認できなかった場合には浮子流下速度は欠測と見なした。流量算出は、従来からの浮子測法に準じ、浮子流下速度に更正係数を乗じることで水深平均流速を算出し、区分求積法により流量を算出した。

図-5にH25/8/30の第1回目（16:12）と第3回目（23:31）における浮子測法と画像解析法（浮子PTV法）による浮子流下速度横断分布図を示す。

これをみると、画像解析法により浮子流下速度を算出できた場合は、従来の浮子測法と画像解析法による浮子流下速度が良好に一致していることが分かる。図-6に、浮子測法と浮子PTV法による測線毎の浮子流下速度の相関図を示す。これより、浮子PTV法と浮子測法でその誤差のほとんどは5%以内であることが分かる。

一方、浮子の流下状況をビデオカメラ画像上で視認でき画像解析法により浮子流下速度を算出できる場合とできない場合があることが分かる。浮子流下速度を算出できなかった理由として、①レンズに雨滴が付着することで生じた視認不能範囲を浮子が流下する場合があり浮子の追跡が困難、②旗の向きによっては撮影画像上の投影

面積が小さく視認が困難、③河道中央部では視認が概ね容易であったが河岸近傍の影になっている範囲や植生の付近では視認が困難、が挙げられる。浮子流下状況を視認できないことへの対応策としては、第1見通断面近傍の浮子流下速度を算出し、第1見通断面での流量のみを算出することで画像解析法による流量算出が可能になるものと考えられる。

図-7にH25/8/25及びH25/8/30での高水流量観測の浮子測法と画像解析（浮子PTV法）による流量の相関図を示す。ここでは、3つの測線全てについて見通し区間全体を視認できた2回の流量値のみを示している。これより、画像解析（浮子PTV法）により全ての浮子流下速度を解析できた場合は、両者の流量が良好に一致しており、浮子測法に対する相対誤差は1%未満と極めて小さい。

以上より、ビデオカメラを用いた高水流量観測の実施と観測精度はビデオカメラによる浮子の視認性に依存するものの、前述したように、浮子流下速度を第1見通断面から第2見通断面区間で算出せずに、例えば、確実に視認できる第1見通断面周辺で浮子流下速度を算出するなどの対応をすることで、ビデオカメラによる高水流量観測の目的を達成することができると考えられる。

(3) 画像解析法を用いた高水流量観測の実用化

遠賀川水系穂波川の秋松橋水位流量観測所で浮子流下状況をビデオ撮影した画像について、九州地方整備局管内の3水系の流量観測員等が浮子PTV法による画像解析を実施した。ここでは、将来、画像解析法を用いた高水流量観測を実用化することを目的に、その課題を抽出するとともに、改善策を検討した。

具体的には、8名のヒアリング対象者に対し、画像解析実施後にヒアリングを行った。ヒアリング対象者はある年齢層偏らず全年代で同人数割合であった。ヒアリング結果を図-8に示す。

同図から、6割以上が画像解析法に対する抵抗感がなく、難易度に対しても難解だと感じていないことが分かる。画像解析法の解析精度については、8割以上が浮子測法と同程度と感じている。

一方、画像解析法を実施する際の平面幾何補正の精度（人的誤差）が課題であると感じているという意見も挙がった。この課題については、例えばCCTVカメラであればカメラ画角を固定し、画像内の標定点位置を予め対応させておけば、平面幾何補正に対する人的誤差は最小で済むと考えられる。市販のビデオカメラを用いた画像解析法についても、市販のビデオカメラを設置する箇所を予め決めることができれば、CCTVカメラと同様であると考えられる。

5. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

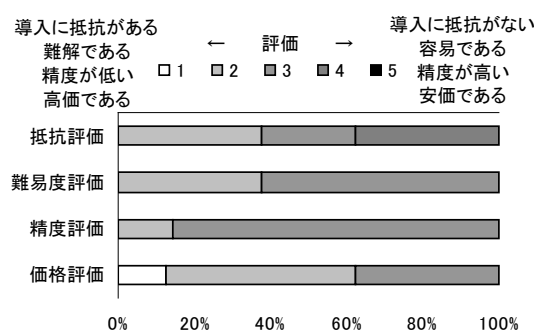


図-8 ヒアリング結果

(1) CCTVカメラを用いた画像解析法（STIV法）の実用性の確認：水表面流速解析に適したカメラ画角に調整することで、STIV法により水表面流速を計測でき、流量算出に実用性があることが明らかになった。

今後は、目的とする超過洪水時に確実に水表面流速が計測でき、かつ、所定の精度を持った流量を算出できるようにしていく必要がある。

(2) 浮子測法に画像解析法（浮子PTV法）を適用する有用性の確認：浮子測法に浮子PTV法を適用することにより、浮子流下状況を定量的に把握でき、かつ、高精度な浮子流下速度の算出が可能であることが明らかとなった。一方で、今後は、ビデオカメラ等の動画上で浮子を視認できるように旗などの目印を浮子に装着する工夫が必要である。

(3) 流量観測受注者による画像解析法（浮子PTV法）の試み：流量観測員等の8名が実際に浮子PTV法による画像解析法を実施した。この結果、6割程度の対象者が画像解析法の導入に抵抗感がなく、かつ、比較的容易であると感じていることが明らかとなり、画像解析法を実用化させることが可能であることが分かった。

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，pp.51-85，2012。
- 2) 藤田一郎，中島丈晴：実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用，水工学論文集，Vol.44巻，pp.443-448，2000。
- 3) 藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み，水工学論文集，第38巻，pp.733-738，1994。
- 4) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a nonintrusive 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。
- 5) 原田隆史：CCTV画像を活用したPIV法による流速・流量観測について～（粒子画像速度計測法[Particle Image Velocimetry]）～，2003。
- 6) 伊藤仁志・林満ら：与田切川流域における流量モニタリングについて，砂防学会研究発表会，2008。

(2014. 4. 3受付)