

拡張ISO高感度カメラを用いた STIV画像解析とDIEX法による河川流量観測

RIVER DISCHARGE OBSERVATION BY STIV IMAGE ANALYSIS AND DIEX METHOD USING EXTENDED-ISO SENSIBILITY CAMERA

橋場雅弘¹・藤田一郎²・二瓶泰雄³・中本篤嗣⁴・林克恭⁵・甲斐達也¹・土田宏一¹
Masahiro HASHIBA, Ichiro FUJITA, Yasuo NIHEI, Atsushi NAKAMOTO
Katsuyasu HAYASHI, Tatsuya KAI, Koichi TSUCHIDA

¹正会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

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 博 (工) 東京理科大学理工学部教授 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁴正会員 修 (工) (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

⁵フェロー会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

In this study, the authors showed the discharge calculating method in the high runoff using Space-Time-Image-Velocimetry (STIV) and Dynamic Interpolation and Extrapolation (DIEX) method. We could measure the flood surface flow under the low light and bad weather condition using extended ISO sensitive camera in actual river. This reason was that surface wave image was capable to clearly analyzed at the night time and rainy condition. But, it was difficult to measure the Space-Time-Image (STI) at the low water. The water ripples corresponds to the brightness distribution. For the successful analysis using STIV was needed to require more than 10 standard deviations of brightness distribution. The calculated discharge by STIV and DIEX method had a higher correlation with H-Q equation. We showed it was possible to observe to the quickly observation and manpower saving.

Key Words : River Discharge, Extended-ISO Sensibility Camera, STIV, DIEX

1. はじめに

防災・減災に対する治水対策には、出水特性を把握する流量の実測値が求められる。洪水時の高水流量観測は、橋上などから浮子を投下し、あらかじめ設定した第1断面と第2断面の通過時間から流下速度を算出する。この流下速度に第1、第2断面の断面積の平均を乗じて流量を算出している。こうした現行の観測方法では、川幅に合わせた浮子投下点数が決められており、川幅100m規模の河川では、1回の計測に1時間程度の時間が必要になる¹⁾。近年多発している短時間強雨によって、中小河川では急激な水位上昇が発生するため、現行の観測方法では水位上昇に追いつかず観測すらできないという課題がある。急激な水位上昇に対応するには、迅速な観測を行わなければならない。河川砂防技術基準調査編²⁾では浮子観測の緊急法として通常よりも観測測線を減じた観測が示されているが、観測精度の低下が懸念される。また、現行の高水観測には浮子投下員や見通し員など最低5名の観測員が必要である。近年は技術者の高齢化や観測人

員不足が憂慮されており、複数地点での同時観測に必要な観測体制が敷けないという課題がある。一方で、高水時は水位上昇や流速変化によって流況が大きく変化するため、浮子を既定の測線に流下させるためには一定の習熟度が求められることや、第1、第2断面の見通し員については、昼夜問わず洪水時の川岸に近づかなくてはならず、安全性への懸念を含んだ観測を行っているのが現状である。これより、将来の高水流量観測には、観測の迅速化、省力化、簡素化(＝標準化)、コスト縮減、そして高い安全性が求められる。現在このような課題に対応できる可能性のある新たな流量観測手法として、藤田ら^{3) 4)}によるSpace Time Image Velocimetry(STIV)を用いた河川流速観測がある。しかし、高水流量観測は雨の降り出しによっては夜間に及ぶ場合があるため、夜間でも適用が可能な手法として、藤田ら⁵⁾はSTIV画像解析に遠赤外線カメラを用いた観測が有効としている。これは赤外線線の反射しやすい性質と、水面の状態や角度によって放射エネルギーが変化する性質を利用して、水面波紋の移流を映像化するものである。遠赤外線は可視光に比べて波長が長いので、散乱しにくく、霧の影響も受けにくい

ことから、実河川で適用しやすいという長所がある。しかし、観測環境の温度差による遠赤外線カメラの輝度調整や、遠赤外線線で視認できる標定点の設置に工夫が必要となる。さらに、遠赤外線ではカメラ以外に画像記録部や外部電源が必要となることから、降雨時の観測には機材の防水対策や電源確保などで、即応性に欠ける点が課題である。一方、現行法での流量算出方法は、浮子の長さによって更生係数が決められており、一定値を乗じて平均流速としている。しかし、萬矢ら⁶⁾は、実河川では水面勾配や河床変動による河積変化などで係数に変化が生じることを指摘している。また、川幅に応じた浮子の投下点数が河川砂防技術基準調査編²⁾によって定められているが、点数が少ないため、十分な流速横断分布が得られないこと、点流速を区分断面に一樣に与えるため、相当の空間誤差が含まれることが指摘されている⁷⁾。これに対する解決方法として、二瓶ら⁸⁾、柏田ら⁹⁾は「点」流速値を「面」流速値に内外挿する力学的空間内外挿法（Dynamic Interpolation and Extrapolation：DIEX法）を開発し、実河川での有効性を示している。

本研究では、現地観測で迅速性、省力化、簡素化（＝標準化）、安全性に適用する観測手法の1つとして、拡張ISO高感度機能を有した市販の一眼レフカメラを用いて、夜間降雨時を含めたSTIV画像解析による適用性を検証した。さらに、DIEX法による流量算出を行い、算出流量の有効性を評価した。

2. 荒川の現地観測

現地観測は、図-1の福島県福島市に位置する阿武隈川の一次支川である荒川の3か所（荒川橋、日之倉橋、西大橋）において、2014年10月の台風18号、19号通過時に観測を行った。台風18号の通過時である2014年10月6日～7日は、図-2に示す7時～翌日の21時まで、台風19号の通過時である2014年10月13日～14日では、図-3に示す21時～翌日の13時まで、水位ピークを含む6回、水位の変動に応じた流量観測を実施した。また、比較調査として荒川、阿武隈川の流量観測所である、八木田、福島で観測を行った。前準備として、左右岸に3点ずつの標定点の設置と標定点を見通せる橋上にカメラの設置位置を決めて、それぞれ空間座標を設定した。また、自記水位計S&DL mini（応用地質(株)）を3地点に設置して10分間隔の水位を取得した。現地観測時には、基準水位と50m間の水位勾配を実測した。また、画像解析による流速の検証として、横河電子工業(株)のポータブル電波流速計（RYUKAN）を用いて比較を行った。使用したカメラはSONYの一眼レフカメラα7Sで、設定を1920×1080（30p）、昼間はISO感度を自動設定で、夜間はISO409600に設定して撮影を行った。すべて橋上からの撮影で、1回の撮影時間は20秒以上とした。



図-1 調査箇所図

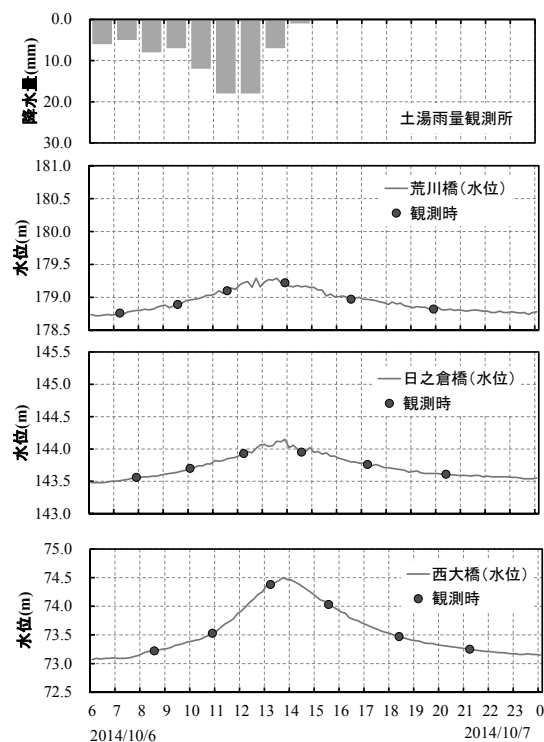


図-2 水位状況図（台風18号）

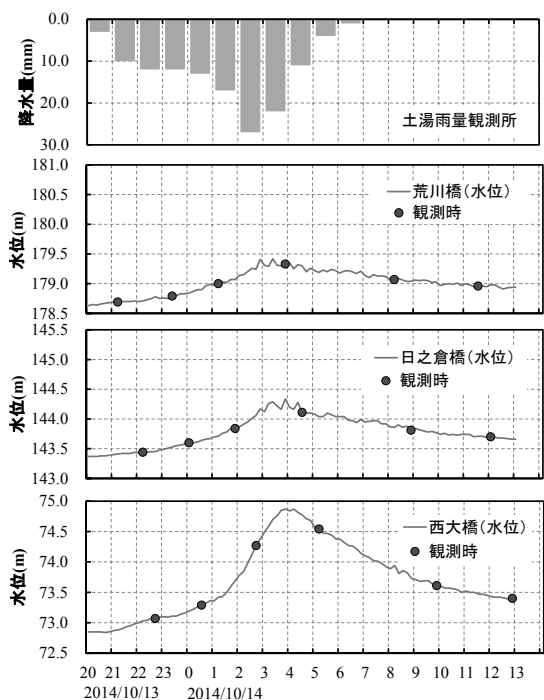


図-3 水位状況図（台風19号）

3. 拡張ISO高感度カメラを用いたSTIV解析

(1) 拡張ISO高感度カメラによる撮影

撮影は荒川3箇所とも橋上から行った。荒川橋，日之倉橋では，橋上の街灯が数か所あるのみで，周辺には明かりが無いいため，夜間は河川を全く視認することができない状況であった。最下流の西大橋は国道13号上の橋で街灯が多く，道路上は見通しがあるが，夜間は橋から河川流れを視認することはできなかった。図-4には西大橋での一般的なデジタルカメラ（Olympus Tough TG-310 ISO1600）と高感度カメラ（Sony α7S ISO409600）の夜間撮影画像を示す。いずれも照明・フラッシュは使用せずカメラのISO操作のみで撮影した。一般的なカメラでは画面は真っ暗で対象物を捉えることは不可能であったが，高感度カメラでは河川流れや左右岸の状況を明瞭に把握することが可能であった。

図-5～図-7に拡張ISO409600を用いた台風19号時のピーク時の撮影画像を示す。なお，観測はカメラのみで照明は一切使用していないものの，カメラ側の岸は標定点が認識できる程度の明るさが確保されている。一方，対岸側の標定点は視認しにくいいため，ケミカルライトなどの光源を設置した。

(2) STIV画像解析による流速算出

STIVによる流速算出方法は，画像上で主流方向と一致するように検査線を引き，波紋が検査線上を通過することによって変化する輝度分布を，図-8に示すような横軸に距離，縦軸に時間を配置した時空間画像（STI：Space-Time Image）の傾きから求めるものである。カメラを高感度化すると少ない露光量で明るい画像を再現しようとするため，信号にゲインをかける。この時に同時

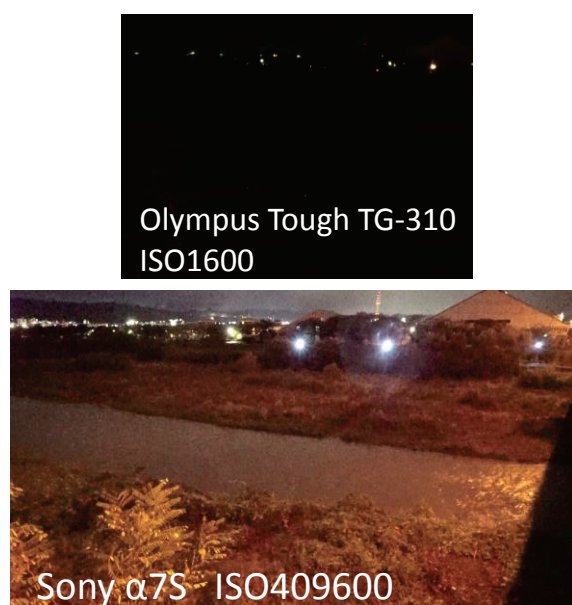


図-4 荒川 西大橋の夜間撮影状況

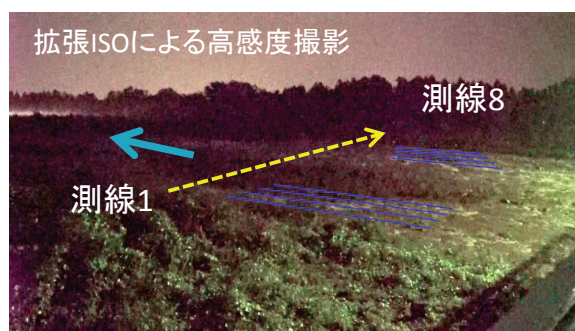


図-5 荒川橋ピーク時(2014.10.14 3:50)



図-6 日之倉橋ピーク時(2014.10.14 4:30)

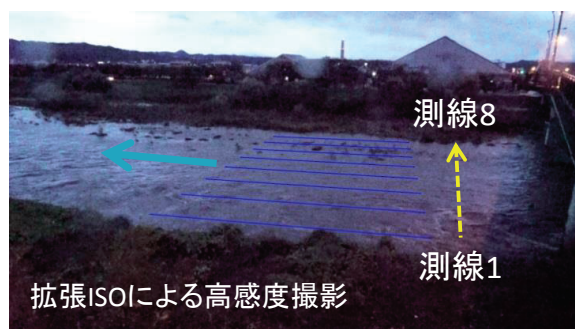


図-7 西大橋ピーク時(2014.10.14 5:10)

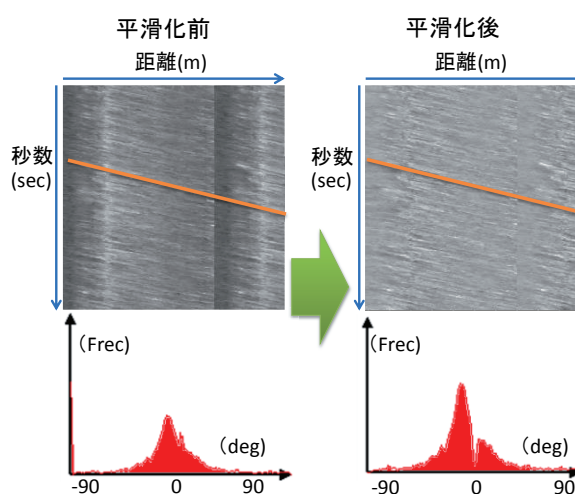


図-8 平滑化フィルタによるSTI画像のノイズカット

にノイズにも同じだけのゲインがかかってしまうことから高感度ノイズが発生する原因になる。

図-8は、2014年10月14日の日之倉橋での夜間雨天時の時空間画像の一例である。平滑化前でも縞模様は明瞭であるが、縦方向の線が混入する。原因としては、雨粒や河岸の草本の映り込みなどが予測される。夜間での拡張ISOによる撮影では、拡張ISOのゲインにより強調されたノイズが混入することによって、分離が困難になることが推察される。藤田ら^{10) 11)}によるCCTVを用いた研究によると、こうした劣悪な条件下での画像から流速を取得するために、画像の平滑化フィルタを用いる手法を推奨している。当手法を拡張ISO高感度カメラでの画像に適用してみると、FFT解析の低周波成分の除去によって、方向ベクトルの勾配ヒストグラムは明瞭なピークを示し、ノイズ除去ができています。しかし、夜間雨天時の画像は一定周波数の除去や標準偏差 σ を一律に設定したガウシアンフィルタでは算出流速が安定しない場合があるため、STIの縞模様をトレースして数点の傾き線を引き、平均化するマニュアル解析で傾きを求める方法も併用した。ノイズ除去については今後データを積み重ねて検証する必要がある。

(3) 拡張ISO高感度撮影の限界

STIVによる画像解析では流れの条件によって発生する波紋の輝度分布によって観測成功の有無が左右される。撮影動画から流水部分を抽出し256段階のグレイスケールに変換した輝度分布を図-9に示す。輝度抽出には、アメリカ国立衛生研究所（NIH）のフリーソフトImage-J¹²⁾を用いた。画像の輝度は0～255階層に分け、0が黒、255が光の最大値である白を示す。ここで、STIの縞模様の鮮明度により3種類に分類する。Favorableを縞模様が鮮明で平滑化フィルタや手動解析が必要ないもの、Criticalを縞模様が不鮮明で平滑化フィルタや手動解析が必要なもの、Difficultを縞模様の識別が不可能なものに分類する。図-9に示す例は以下の5つの観測から抽出した。

- ①：夜間の低水時（阿武隈川福島水位流量観測所）
- ②：夜間の低水時（荒川 荒川橋）
- ③：夜間の洪水時（台風19号）荒川 荒川橋
- ④：昼間の洪水時（台風18号）荒川 荒川橋
- ⑤：昼間の低水時（荒川 西大橋）

STIが明瞭なFavorableに分類される輝度分布は、昼間、夜間で輝度の平均値が異なるが、輝度分布幅が広く、④のようにきれいな正規分布を示す。Criticalに分類される輝度分布は②と⑤で、尖度の高い分布形となり標準偏差が10程度であった。一方、STIが不明瞭で流速が算出できなかったDifficult画像は、最も尖度が高く、標準偏差が10未満であった。輝度分布は水面波紋の強弱と対応するため、輝度の標準偏差10以上が、STIVによる流速算出の最低条件と推察される。この判定方法は他の河川での検証が必要であるが、事前に対象箇所の画像をコンパ

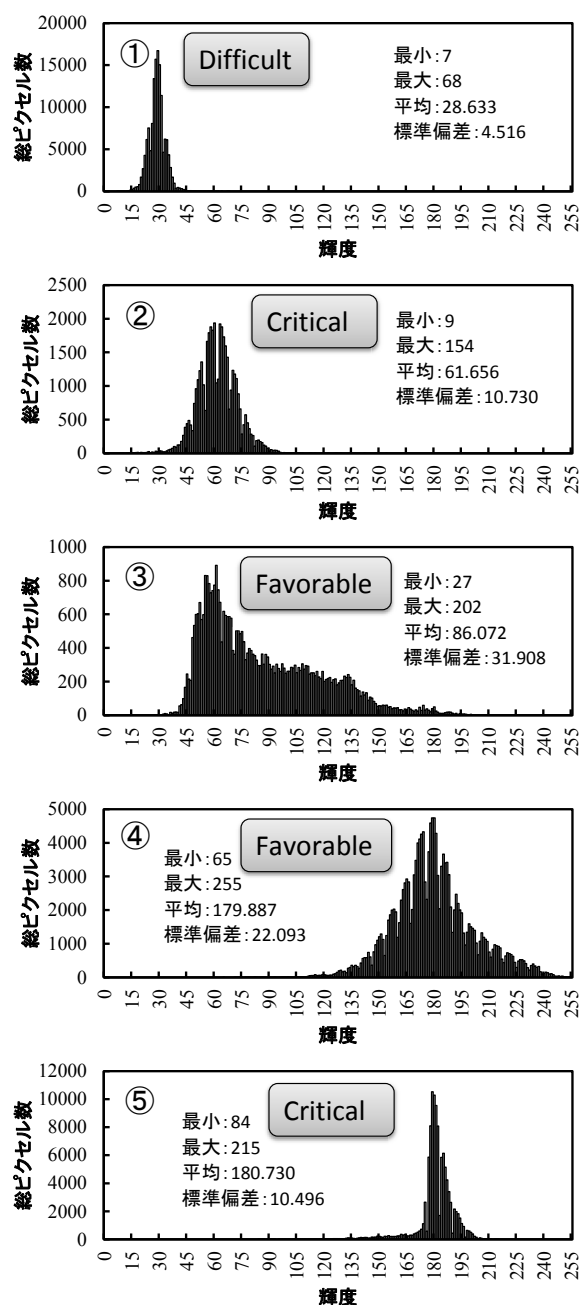


図-9 水面の輝度分布

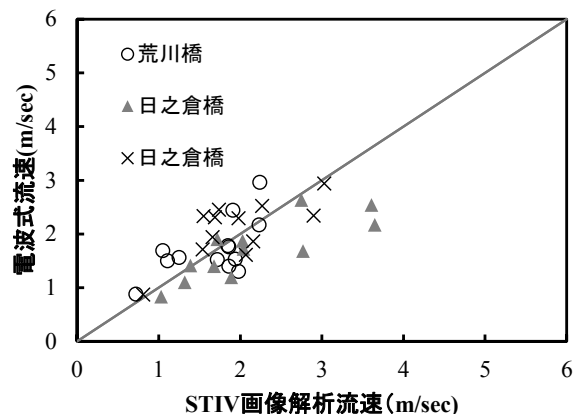


図-10 STIVと電波式の流速比較

クトデジタルカメラやスマートフォンなどのカメラで撮影することでSTIVによる流速算出が可能かを判定できる指標になる可能性がある。図-10のSTIVと電波式流速計との比較では、概ね1対1の関係がみられ荒川橋で平均差分-1%、最大差分52%、日之倉橋で平均差分27%、最大差分68%、西大橋で平均差分-6%、最大差分-33%であった。日之倉橋はSTIVが橋上流、電波式が橋下流と測定断面が異なるため差分が大きくなっている。

4. DIEX 法を用いた流量算出

DIEX法は、複数地点の「点」流速データから「面」データを推定でき、かつ、複雑な力学条件を取り込むことが原理的に可能である。基礎式を式(1)に示す。

$$Fa + gI + A_H \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left(\frac{C_f}{h} + \frac{aC_D}{2} \right) u^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 y は横断方向、 u は主流方向水深平均流速、 A_H は水深平均された水平渦動粘性係数、 h は水深、 C_f は底面摩擦係数 ($= gn^2/h^{1/3}$, n : マニングの粗度係数)、 I は水面勾配、 g は重力加速度、 a は植生密度パラメータ、 C_D は植生の抵抗係数である。本研究では、低水路、高水敷それぞれのマニングの粗度係数を $n = 0.0343 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ を設定し、付加項 Fa の鉛直分布は一様とした。これより、式 (1) に実測流速値を代入して求められた付加項を横断面内で内外挿し、観測範囲内外の付加項を算出した。なお、上述した計算方法や手順、係数設定等の詳細に関しては 二瓶ら⁶⁾を参照されたい。

2014 年 10 月の台風 18 号、19 号通過時に、荒川の八木田水位流量観測所と阿武隈川の福島水位流量観測所で、STIV+DIEX と現行の水位流量曲線式 (H-Q 式) との比較を行った。図-11 より、荒川八木田観測所では差分が 2.3~4.7%、阿武隈川福島観測所では差分が -2.1~-10.3%で、いずれも高い相関を示した。

図-12 には台風 18 号と 19 号時の水位と流量 ($\sqrt{Q}$) の関係を示すが、いずれの線形も高い相関を示している。比較的大きな流量にばらつきがみられるが、図-13、図-14 をみると、上流の荒川橋と日之倉橋では反時計回りのループを描いており、水位と流量の関係が二価性を有していることが原因であると推察される。これに対し、下流の西大橋では図-15 に示すように、概ね直線に近似した変化を示した。水位勾配の大きい上流部では流れの乱れが強く、下流では比較的安定していることが示唆される。このように川幅 100m 以下の中小河川でも水位と流量の二価性があらわれることから、水位流量曲線式を用いた流量を算出するには、水位上昇期と水位下降期を含むハイドロ観測を実施しないと水位流量曲線式 (H-Q 式) の信頼性に欠けることが推察できる。



図-11 流量算出精度の比較

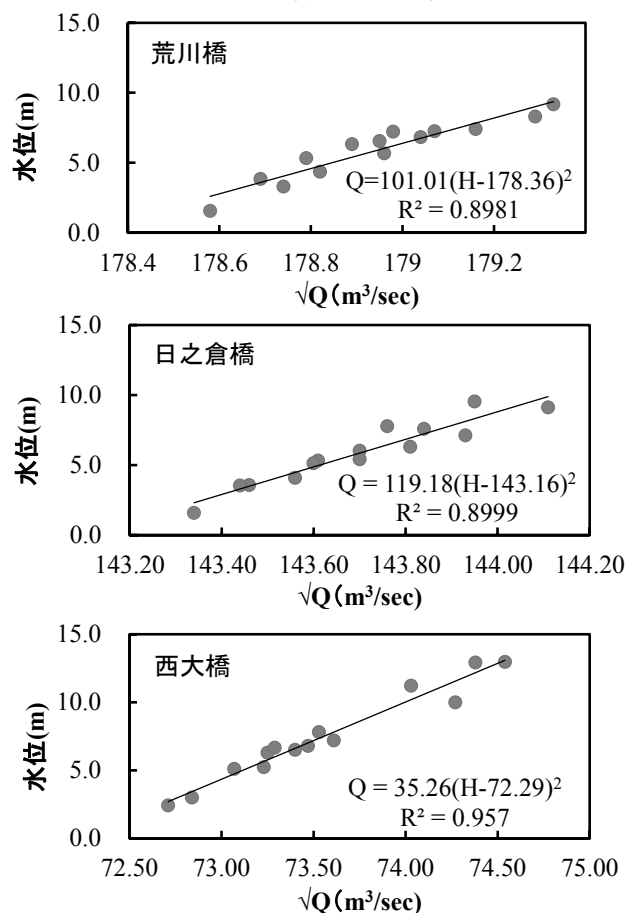


図-12 H- $\sqrt{Q}$ の関係

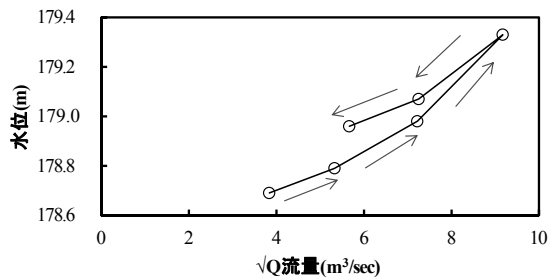


図-13 荒川橋 洪水ループ (台風19号)

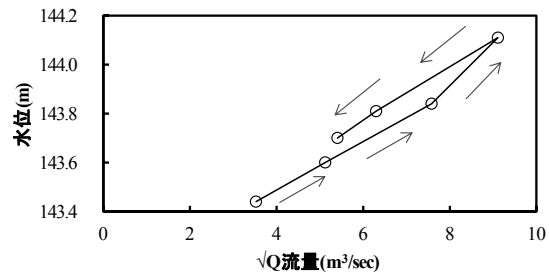


図-14 日之倉橋 洪水ループ (台風19号)

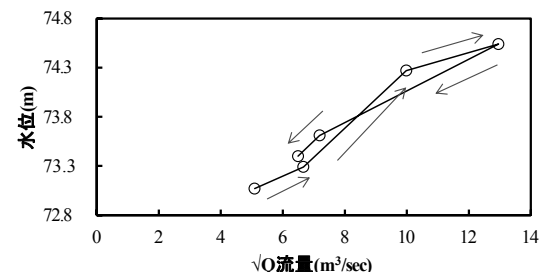


図-15 西大橋 洪水ループ (台風19号)

5. 観測の迅速化と省力化

本研究での流量観測は、移動時間を含めて1箇所約40分程度で観測が完了している。1班3名で、観測地点3箇所×6回の観測が可能であった。しかし、今回は比較のために、横断上の複数測点での電波流速計での観測を行っている。よって、STIV+DIEX法の場合のみは、20秒程度の撮影で結果が得られるため、さらに観測時間を短縮することが可能である。また、現地作業としては、標定点を含めた画角での動画撮影のみであるため、観測精度はカメラの性能に依存し、観測員の習熟度による差異は発生しにくい。よって、観測方法が標準化しやすく、精度維持が容易な手法として、将来懸念される観測人員不足などの解決策の一つとして期待される。

6. まとめ

本研究では、高水流量観測の迅速化、省力化、精度向上を目的として、STIVとDIEX法を用いた河川流量観測手法を試行し、以下の結論を得た。

- 1) 川幅100m以下の河川において、拡張ISO409600を使用すると、高水時では夜間でも河川流を明瞭にとらえ、STIVによる流速算出が可能であった。一方、水面波紋が少ない低水時では困難であった。
- 2) 夜間の拡張ISOで発生するゲインノイズなどはFFTによる周波数除去で平滑化が可能であるが、一律の周波数除去では流速が安定しない場合があるため、今後事例を増やして検証する必要がある。
- 3) 水面波紋は輝度分布に対応し、STIVの適用には、輝度の標準偏差10以上が必要であった。
- 4) DIEX法による流量はH-Q式との相関が高く、ハイドロ観測値が線形に集約した。また、洪水ループによる水位と流量の2価性が明瞭となった。
- 5) 本手法は1回の観測での撮影時間が20秒程度であること。橋上での作業であることから、観測の迅速性、省力化と安全性に優位性を示した。

謝辞：本研究は、国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所発注の“平成26年度荒川河道整備検討業務”内で実施しており、福島河川国道事務所の関係職員の方々には多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋場 雅弘・甲斐 達也・津田 哲也・土田 宏一：「新たなステージ」に対応した河川流量観測の提案，河川流量観測の新時代，第5巻，pp.28-37，2015。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 調査編，2014。
- 3) 藤田 一郎・椿 涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測，河川技術論文集，第9巻，pp.55-60，2003。
- 4) 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。
- 5) 藤田 一郎・小阪 純史・萬矢 敦啓・本 永良樹：遠赤外線カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測，土木学会論文集B1 (水工学)，Vol.69, No.4, pp.703-708, 2013。
- 6) 萬矢 敦啓・大平 一典・菅野 裕也・深見 和彦：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，河川技術論文集，第16巻，pp.53-58, 2010。
- 7) 原田 靖生・二瓶 泰雄・酒井 雄弘・木水 啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，Vol.51, pp.1081-1086, 2007。
- 8) 二瓶 泰雄・木水 啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No.803/II-73, pp.155-160, 2005。
- 9) 柏田 仁・二瓶 泰雄・高島 栄二郎・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，第17巻，pp.23-28, 2011。
- 10) 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，pp.1003-1008, 2009。
- 11) 原 浩気・藤田 一郎：次空間画像を用いた河川表面流解析における二次元高速フーリエ変換の適用，水工学論文集，第54巻，pp.1105-1110, 2010。
- 12) ImageJ : <http://rsbweb.nih.gov/ij/>

(2015. 4. 3受付)