

CCTVカメラと遠赤外線カメラを用いた 画像処理型流速測定法の実用化

A UTILIZATION OF ADVANCED RIVER-DISCHARGE MEASUREMENT USING A CCTV OR A FAR-INFRARED CAMERA

梅田真吾¹・柏田仁²・島本重寿¹・宮谷綾子¹・浜口憲一郎³・山崎裕介⁴・萬矢敦啓⁵
Shingo UMEDA, Jin KASHIWADA, Shigehisa SHIMAMOTO, Ayako MIYATANI,
Kenichiro HAMAGUCHI and Yusuke YAMASAKI, Atsuhiko YOROZUYA

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

³正会員 修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒300-4204 つくば市作谷642-1)

⁴非会員 博 (工) 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)

⁵正会員 Ph.D. 国立研究開発法人土木研究所ICARM (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Space-time image velocimetry (STIV) is a promising tool for river-discharge monitoring, from the viewpoint of reliability and accuracy. Closed-circuit television (CCTV) cameras have been installed in high position along the rivers. Therefore, we tried to build a river-discharge monitoring system with high reliability and accuracy, by combination with CCTV camera and STIV. The results indicate that 59 units of CCTV cameras can be used for river-discharge monitoring in Kyushu region. In addition, present systems are automatic, continuous and give good agreements with the observed data using floats.

Key Words : River-discharge, CCTV camera, far-infrared camera, STIV, image analysis

1. 序論

九州地方整備局管内の直轄20水系では、我が国の直轄河川と同様に、高水流量観測手法として浮子測法¹⁾を採用している。浮子測法は、トレーサ（浮子）を流し、ある区間の通過時間を計測して流速を計測する、という“古典的”な手法であるがゆえ、流量規模や流速機器の故障等の影響を受けず最も確実かつ簡便に観測できるという特徴を有している。河道計画の基礎となる高水流量の観測は、特に計画規模やそれを超過する大規模洪水時には、遅滞なくかつ確実に実施され、今後の河川計画等へフィードバックされる必要がある。

しかしながら、九州地方整備局管内の多くの河川で計画規模を超過した平成24年7月の九州北部豪雨では、①観測所周辺の道路や橋梁の冠水により観測所に到着できない、②浮子投下橋梁が冠水し、浮子を投下できない、③観測員の安全が確保できない、といった理由により、一部の観測所では観測の実施そのものが困難となった。

このように浮子測法の課題が顕在化する一方で、近年、多くの研究者・メーカーによる流速計測技術の開発が進んでおり、ADCP^{1)~3)}・電波流速計¹⁾⁴⁾・画像処理型流速

測定法^{1)5)~7)}といった種々の手法が実用化されつつある。これら流速観測手法のうち、ADCPは6.0m/s程度の流速規模までしか計測できず³⁾、電波流速計は固定式・可搬式ともに観測時に橋梁が必要なため、計画規模やそれを超過する大規模洪水時に用いることは困難であると考えられる。一方、画像処理型流速測定法は解析に適した流況を撮影した動画があれば室内で解析できる。特に、空間監視用に設置された河川系のCCTVカメラの多くはその使用目的のため高い位置に設置されており、①観測所周辺が冠水した場合においても河川流況の撮影が可能であり、②洪水時に観測員が現場にいる必要がないことから、計画規模相当の流量規模の洪水時においても、河川流況の動画を撮影することが可能である。

画像処理型流速測定法の中でも流量算出に必要な主流方向流速を高精度かつ横断的に密に計測可能であり、低解像度や低フレームレート等の悪条件の動画でも流速解析が可能なSTIV (Space-Time Image Velocimetry) が実用化に適していると考えられるものの⁶⁾⁷⁾、その実施手順や適用範囲が不明瞭なため実用化に至っていない。

このような状況の中、著者らは、平成24年7月の九州北部豪雨の轍を踏まないため、九州地方整備局管内の直轄20水系の河川系CCTVカメラを対象に、CCTVカメラによる動画撮影とSTIVを組み合わせた高水流量観測システムの本格的な実用化を目指した検討⁸⁾を行っており、本報告はその進捗の一部を示したものである。具体的には、①九州地方整備局管内における河川系の空間監視用CCTVカメラを対象にSTIVに適した画角設定を行い、②実用的に使用可能な標定点とその設置方法、③画像処理型流速測定法の幾何補正の精度評価法、④STIVの計測精度について、それぞれ検討した。また、⑤夜間でも水表面の波紋を視認可能な遠赤外線カメラによる計測システムを現地に設置し、計測性能の評価および流速算出を行い、⑥それらの検討をとりまとめ「CCTVカメラを活用した水文観測ガイドライン（案）観測編、解析編」の作成を行った。

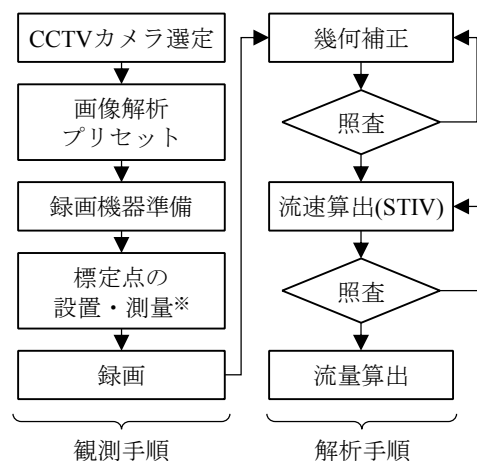
2. CCTVカメラを用いた高水流量観測の準備

(1) 高水流量観測に適したCCTVカメラの選定

九州地方整備局管内の直轄20水系には、河川の空間・施設監視を目的とした513基のCCTVカメラが設置されている。このうち、①流量観測所近傍にあり、②旋回・ズーム機能を具備する、の両条件を満足する機器を抽出したところ、高水流量観測に活用が可能なCCTVカメラとして、75基が選定された。選定したCCTVカメラについてSTIVによる高水流量観測を図-1に示す実施手順により観測・解析を行った。

(2) CCTVカメラのプリセット

CCTVカメラは河川空間・施設監視を標準の目的とするため、画角も上記の目的に応じた形でプリセットされている（以下、標準プリセットと称する）。そのため、画像処理型流速測定法の撮影装置としてCCTVカメラを用いるにあたっては、同手法に最適化された専用画角をプリセットする必要がある（以下、画像解析プリセットと称する）。画像解析プリセットは、本論文で採用するSTIVの特性や観測対象洪水規模、実運用における簡便性などを考慮し、①流速観測精度の向上のため河道の横断方向を望む、②対岸の計測精度の向上のため俯角を極力大きくとる、③画像解析に必要な水面状況を出来る限り撮影でき、かつ、太陽光の直射等による白飛び・黒つぶれを防止するために空を画角に含まない、④計画規模を超える大出水でも計測できるように左右岸水面際までを画角に含む、⑤流量算出に必要な水位計測地点の基準断面あるいは第一見通断面・第二見通断面のいずれかを画角内に含む、といった点に留意して設定した（図-2）。なお、前述の高水流量観測に活用が可能なCCTVカメラ（N=75）全てに対して画像解析プリセット設定を試みており、画像解析プリセットの一例を図-3に示す。



※ 横断測量（洪水前後）、水位計・風向風速計の設置を合わせて実施

図-1 CCTVカメラとSTIVによる高水流量観測の実施手順

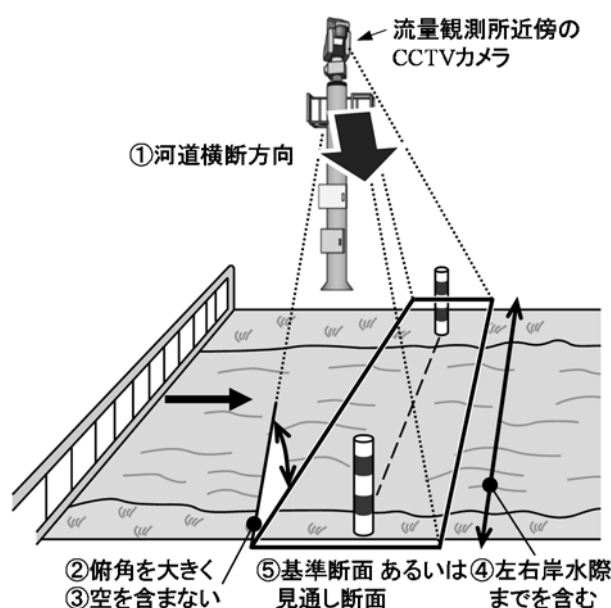


図-2 高水流量観測に適したCCTVカメラの配置および画像解析プリセットの模式図

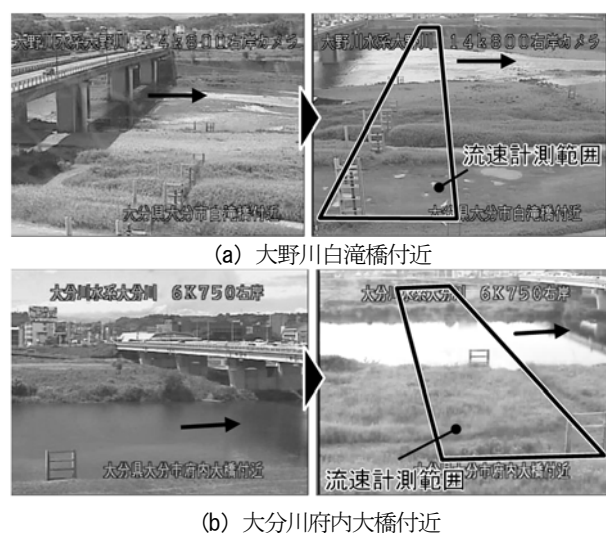


図-3 画像解析プリセットの事例（左：標準プリセット、右：画像解析プリセット）

表-1 遠赤外線カメラによる流量観測システムの構成
(山国川水系山国川 柿坂観測所)

機器	仕様
遠赤外線カメラ	VGA, 焦点距離16mm
スタビライザー	風によるブレ防止
エンコーダー	H.264, MPEG-4への変換
画像録画装置	500GB, リムーバブルハードディスク
風向風速計	表面流速補正用
カプセル型水位計	STIV計測断面水位の計測



図-4 遠赤外線カメラによる流量観測システム
(山国川水系山国川 柿坂観測所)

(3) CCTV動画の録画準備

既設CCTVカメラは録画機能を有していない機器も多い。また、録画機能を有する場合でも、録画容量の制約から、1～2週間程度で古いデータから上書きされることが多い。そのため、対象機器の録画機能について確認を行い、洪水後のデータ回収方法を事前に把握した。

(4) 標定点の設置と3次元測量

ピクセルと時間の情報しか持たないCCTV撮影画像から流速 (m/s) を算出するためには、同画像中に3次元空間座標が既知の標定点が存在する必要がある。また、標定点は既往の研究事例などから、①少なくとも6点以上、②流速計測範囲の周辺に水平・鉛直方向ともに満遍なく必要で、③既設構造物の活用、④確実に視認可能な色や大きさで配置し、測量を実施した。また、標定点と合わせて、CCTVカメラレンズの位置の測量も実施した。

3. 遠赤外線カメラ流量観測システムの整備

(1) 遠赤外線カメラを用いた高水流量観測の概要

CCTVカメラは、既存ストックの活用により低廉なシステム構築が可能な点で優れている一方で、光量が不足

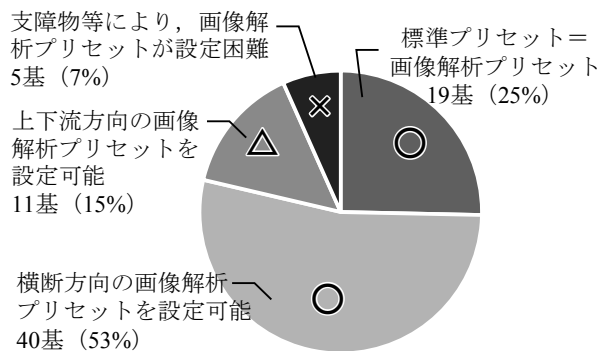


図-5 CCTVカメラの画像解析プリセット結果

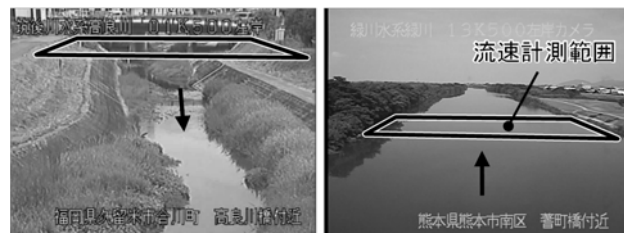


図-6 上下流方向の画像解析プリセットの一例

する夜間の撮影では、動画像による画像解析が困難である。そこで、夜間でも明瞭な撮影が可能な遠赤外線カメラによる流量観測システムを山国川柿坂観測所に設置し、平成26年4月より連続モニタリングを行っている。同観測システムは、表-1に示す機器により構成されており、図-4に示す様に現地に施工されている。遠赤外線カメラの画角は、第一見通～第二見通区間の全域を撮影域に設定することが困難であったため、第二見通断面でのSTIV解析を想定した画角設定を行い、機器を固定した。さらに、STIVの解析対象である表面流速に作用する風の影響を考慮するため風向風速計を設置し、連続モニタリングを実施している。標定点の設置や画像処理による流速測定、流量算出の手順はCCTVカメラと同様である。

4. CCTVカメラの適用にあたっての課題

(1) CCTVカメラの画像解析プリセット

九州地方整備局管内の水位観測所近傍に設置されているCCTVカメラ75基のCCTVに対し、画像解析プリセットの設定を試みたところ、概ね8割については良好な画角設定が可能であった(図-5)。一方で、良好な画像解析プリセットが困難であった理由としては、①CCTVカメラが河川のごく近傍に位置し、横断方向では水面が捉えきれず、上下流方向に画角設定を行わなければならなかった場合や、②CCTVカメラ前面の樹木・橋梁などにより適切な画角設定が困難な場合が見られた。

撮影方向を上下流方向とした場合には、図-6に示すように、標定点の設置が困難で、流速解析エリアが遠方で低俯角となるために、十分な流速算出精度を保持するために必要な検査線解像度を確保することが困難となる。

(2) 標定点設置について

幾何補正に必要となる標定点設置にあたっては、現地環境やCCTVカメラの性能から、設置が困難、または、設置しても視認が困難となるケースがあった。前者は、山付きの河道や樹木繁茂で標定設置箇所にアプローチができない場合が多く、後者は堤間幅が広い河道で対岸までの距離が長く標定点の視認性が困難となった。

標定点の設置が困難な場合には、河道内の岩などを標定点として代用することが可能であり、その際には、類似物との取り違えに注意した。標定点の視認が困難な場合には、対象物の着色により視認性の向上が可能であった。また、両問題への解決策として、カメラの設置角度を計測することで、幾何補正に必要な標定点数を減じる手法⁸⁾も提案されており、これらの組み合わせにより必要十分な標定点データを得ることが可能となる。

5. 画像処理型流速測定法の結果

(1) 幾何補正精度

幾何補正は画像処理型流速測定法に不可欠な手順のひとつであり、幾何補正精度がSTIVによる流速観測精度に与える影響は大きい。本報告では、幾何補正精度の検証として、標定点座標の計算誤差を評価しており、その際には平面座標の実測値と座標変換値の差を算出した。図-7に肝属川王子橋観測所における標定点の実測値・座標変換値の平面分布を示す。同図から、CCTVの対岸側で標定点の実測値と座標変換値にややズレが認められる結果となった。さらに、定量評価として、縦断・横断方向の標定点間距離の誤差、全体の画角に対する検証のため多角形の面積誤差も合わせ算出した。縦断・横断方向の誤差はそれぞれ2.2%、1.9%、解析エリア周辺の面積の誤差は3.7%と十分に小さかった。河道幅が大きい場合などは、対岸側での標定点の視認性が低く、画面上での標定点の位置設定に誤差が生じ、幾何補正に誤差が生じる場合がある。このため、幾何補正精度の管理を適切に行い、十分な精度が確保できない場合には、画面上での標定点位置を見直すといった調整を行う必要がある。

(2) STIV解析による流速解析結果

75観測所のうち、今年度出水記録のあった15観測所映像を対象にSTIV解析を行った事例を以下に示す。解析に使用したソフトウェアはKU-STIV（㈱ビーシステム製）であり、特別な記述がない限り、ノイズ除去および流速検出を自動的に行うFFT-STIV⁹⁾を用いた。ここで、STIVの流速観測精度の検証において、参照データとして浮子観測値を用いているが、STIV解析エリアと浮子流下区間には空間的なズレがあり、また、双方とも更正係数を乗じることにより水深平均化処理を施していることに注意されたい。以下には、肝属川王子橋観測所（平成26年6月27日）、大淀川岳下観測所（同上）、山国川

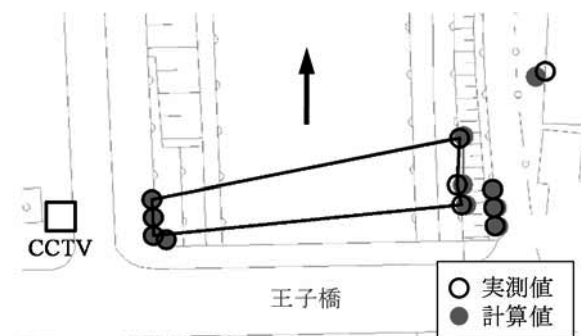
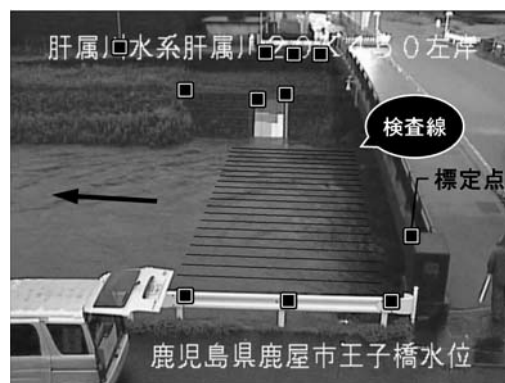
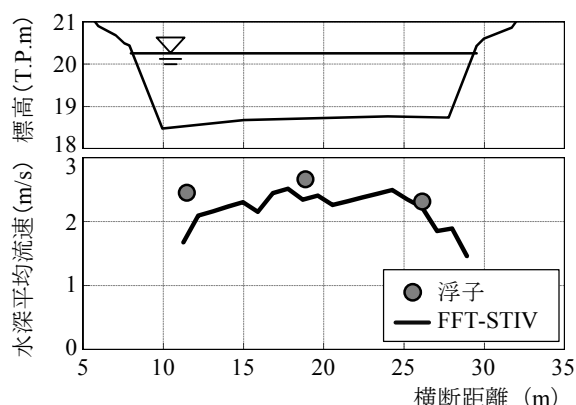


図-7 幾何補正精度のチェック（王子橋）



(a) 解析対象画像



(b) 流速横断分布

図-8 肝属川王子橋観測所（6月27日 19:38）

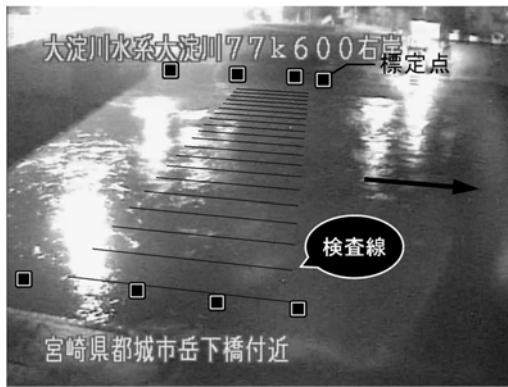
柿坂観測所（平成26年7月3日）の結果を例示する。

① 肝属川王子橋観測所（CCTV，日中）

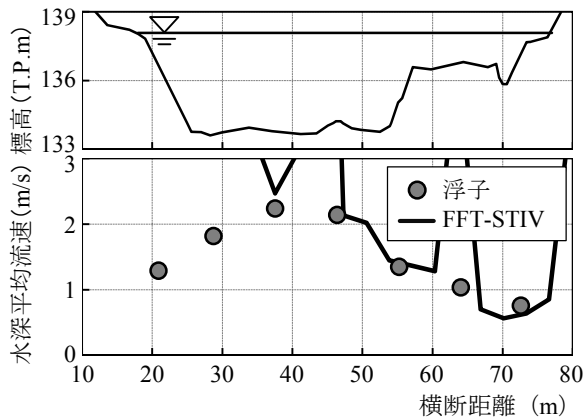
はん濫注意水位程度の洪水における解析対象画像とSTIVによる流速解析結果を図-8に示す。同図には、浮子測法の結果を合わせて示した。これより、本地点において、浮子とSTIVの流速は概ね良好に一致している。

② 大淀川岳下観測所（CCTV，夜間）

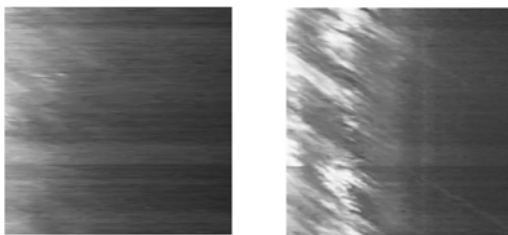
はん濫注意水位程度の出水における解析対象画像とSTIVによる流速解析結果を図-9に示す。ここでも、浮子観測結果を合わせて図示した。なお、出水のピークが夜間であったため、橋梁の街路灯を光源として解析を行った。流速横断分布は、CCTVカメラが設置されてい



(a) 解析対象画像



(b) 流速横断分布



(c) STI (左から, y=25m, y=64m)

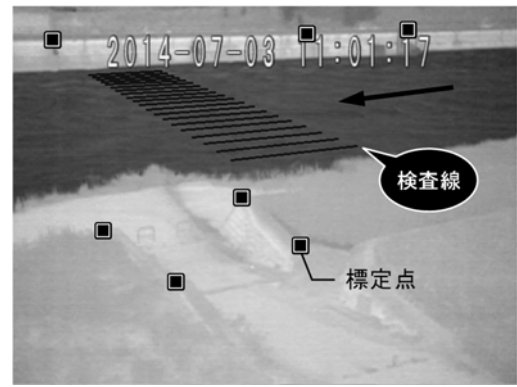
図-9 大淀川岳下観測所 (6月27日20:41)

る右岸側ではSTIV流速値は浮子測法と概ね一致するが、対岸側を中心に過大評価となる。STIを見ると、カメラ近傍側では明瞭な斜め模様が視認できるが、カメラ対岸側では視認困難であり、かつ、CCTVカメラの露出調整と推察される横方向の縞模様が卓越している。

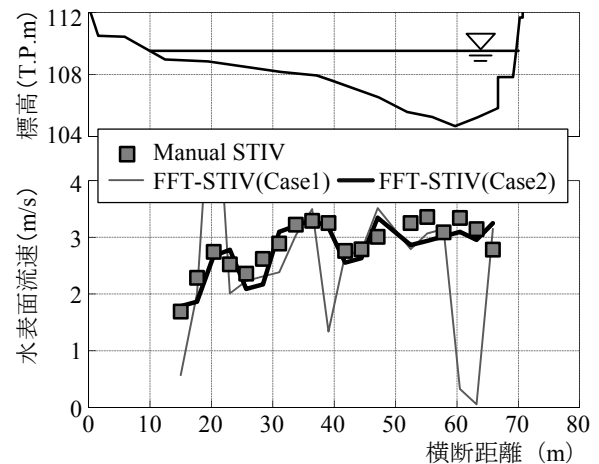
以上に示すように、夜間などの特異な環境下においては、ノイズ等によって、STIV流速値に異常が含まれる可能性がある。このため、解析結果の照査として、元画像およびSTIの品質・状態チェックにより、STIV解析異常値を棄却する必要がある。また、必要に応じて手動解析 (Manual-STIV) を実施する。さらに、欠測データが多く、十分な精度で流量算出が困難な場合などは、DIEX法¹⁰⁾などの流速内外挿手法を併用することで横断面全体の流速および流量を算出することが必要となる。

③ 山国川柿坂観測所 (遠赤外線カメラ)

水防団待機水位を超過し平成26年度最高水位を記録した7月3日洪水ピーク時における解析対象画像とSTIVに



(a) 解析対象画像



(b) 流速横断分布

図-10 山国川柿坂観測所 (7月3日11:01)

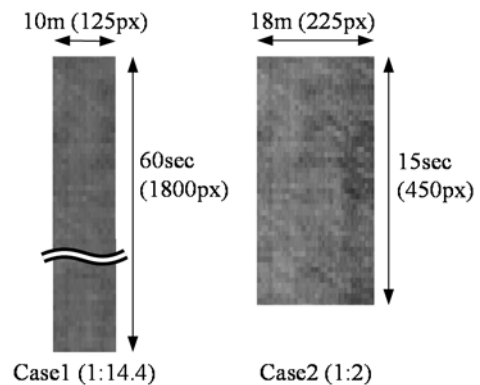


図-11 山国川柿坂観測所におけるSTIの形状

よる流速解析結果を図-10に示す。STIV解析結果としては、Manual-STIVとFFT-STIVの結果を示しており、後者については、検査線長・検査時間を変化させた2ケースを想定した。検査線長10m、検査時間60秒としたCase1では、流速分布に大きな乱れが認められた。一方で、検査線長18m、検査時間15秒としたCase2では、FFT-STIVの解析結果はManual-STIVと良好に一致した。Case1, 2では、STIの縦横比がそれぞれ14.4, 2.0であり、極端に縦横比が大きい場合には自動解析が正常に行われないことが示唆された。なお、出水規模が小さかったため浮子観測は実施されておらず流速値の検証はできない。

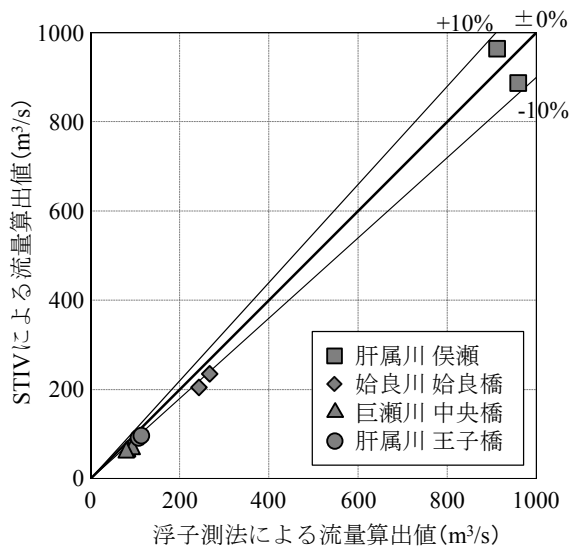


図-12 STIVと浮子測法の流量比較

(3) 浮子測法との流量比較

CCTVカメラと浮子による同時観測に成功した4観測所を対象に、STIVによる流速計測値から流量を区分求積で算出した結果を図-12に示す。浮子測法とSTIVによる流量算出値は概ね一致した。流量規模が100m³/s程度では、数m³/sの流量誤差が比較的大きな相対誤差として現れる。浮子測法の流量値は、浮子流下軌跡や更正係数による誤差が含まれるため、参考値として評価されたい。

6. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 九州地方整備局管内の空間監視目的に設置された河川系513台のCCTVカメラを対象に高水流量観測への適用が可能なCCTVカメラを抽出し、STIVによる流量観測への適用性を検討した。その結果、少なくとも高水流量観測地点近傍の75台のうち、59台は適切な画角に設定することでSTIVに適用できることが分かった。

(2) 通常のCCTVカメラでは困難な夜間でも高水流量観測が可能な遠赤外線カメラを山国川の柿坂観測所に設置し洪水時に試験運用した。この結果、STIVを適用することで水表面流速を解析し流量算出を行う恒久施設として運用が可能であることを確認した。

(3) STIVでは、夜間などの特異な環境下では、自動での画像処理では適切な流速を計測できない場合が生じた。解析結果と合わせて元画像およびSTIを照査する必要がある。また、自動解析により異常または欠測となる場合であっても、手動解析により適切な流速を得ることが可能となるケースが見られた。

(4) STIV解析が困難となり、異常値や欠測が生じる場合には、DIEX法などの流速内外挿法の併用により横断面全体の流速および流量を算出する必要がある。

(5) 上記の検討を踏まえ、九州地方整備局では河川事

務所及び流量観測業者がCCTVカメラの画角設定からSTIVを用いた流速・流量算出に至る一連の解析が実施できるような技術指針として「CCTVカメラを活用した水文観測ガイドライン(案) 観測編, 解析編」を作成した。今後、「流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編)」³⁾に加筆する予定である。また、本ガイドラインの活用によりCCTVカメラ画像を用いた非接触・自動連続観測の実用化により、洪水初期の欠測や計画流量規模相当時の計測不能な状態が改善され、流量観測の確実性と安全性の向上が図られることを期待するものである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、九州地方整備局の各河川事務所の水文担当職員の方には、カメラ画角の設定、標定点設置や測量の実施、高水流量観測成果などのデータ提供、ガイドライン作成に多大なご協力を頂いた。また、神戸大学藤田一郎教授には、STIVの精度検討やガイドライン作成に多くの有益な助言を頂いた。ここに深甚なる謝意を表する。

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.第2章第4節-16-第2章第4節-20, 2014.
- 2) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之：超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.
- 3) 独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター：流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.0, pp.1-23, 2013.
- 4) 山口高志, 新里邦生：電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, 497/II-28, pp.41-50, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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, Vol.53, pp.1003~1008, 2009.
- 8) 島本重寿, 藤田一郎, 萬矢敦啓, 柏田仁, 浜口憲一郎, 山崎裕介：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, 河川技術論文集, Vol.20, pp.37-42, 2014.
- 9) 秋田紘征, 藤田一郎：河川流画像計測に傾斜計を導入した実用的な幾何補正とSTIVの計測精度の評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, pp.I_847-I_852, 2015.
- 10) 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, I_739-I-744, 2013.

(2015. 4. 3受付)