河川流速計測の汎用化に向けたSTIV システムの精度検証

EVALUATION OF STIV TECHNIQUE AIMING AT CONSTRUCTING GENERAL-PURPOSE RIVER FLOW MEASUREMENT SYSTEM

藤田一郎¹・霜野充²・本田将人³・小阪純史³・萬矢敦啓⁴・本永良樹⁴ Ichiro FUJITA, Mitsuru SHIMONO, Masato HONDA, Yoshifumi KOSAKA, Atsuhiro YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA

¹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)
 ²学生会員 神戸大学工学部 市民工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
 ³学生会員 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)
 ⁴正会員 Ph.D 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)
 ⁴正会員 修(工) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

The recent tendency of increasing rainfall intensity and rain volume resulted in very large floods almost comparable to design floods. The problem sometimes encountered in such floods was incapability or missing of peak discharge measurement because of the difficulty of conducting a float method in such a severe flow condition. In order to overcome such problem, we have proposed a method to use image analysis techniques to river surface video images in the past years. The space-time image velocimetry (STIV) is one of such techniques capable to measure surface velocity distributions non-intrusively. In order to examine the accuracy of the method, we compared the STIV data with those measured by an ADCP for the same cross-section of the Uono River, with favorable success of measuring surface velocity distributions and discharges. Moreover, measurement during the night was overcome by using a far-infrared-ray camera, but several cares have to be made in using it under cold outdoor conditions.

Key Words : River flow measurement, flood, Image analysis, STIV, far-infrared-ray camera, CCTV

1. まえがき

近年頻発する我が国の豪雨災害には急増水を伴うゲリ ラ豪雨による中小河川災害と、時間降雨強度が100mmか それ以上に達するような大規模な洪水災害の二通りがあ る.前者には都市域を流れる中小河川の災害や、神戸市 内の都賀川で2008年7月に発生した事例¹⁾に象徴される 親水域での水難事故などがある。特に都賀川では2012年 7月にも相対的な規模は小さいながらも同様の出水があ り²⁾、危うく水難事故が再発するところであったと言わ れている。後者の最近の例には、2011年の新潟・福島豪 雨や2012年の九州北部豪雨災害などが挙げられるが、こ れらに共通する課題は流量情報が欠落するケースが相次 いだことである。その理由としては、そのような大規模 な洪水時には浮子観測の実施が危険を伴うために観測を 実施できなかったこと、内水氾濫等のため観測サイトへ のアクセスが交通規制などにより制限されたこと、ある いは激しい流れや洗掘などの影響で水位計が破損・流失 したことなどがあげられる.

前者,後者の規模にかかわらず,このような状況の中 で唯一記録されていたのがモニタリングカメラの映像で あったことは注目に値する.神戸市の場合には22河川30 箇所にモニタリングカメラが設置してあるが,都賀川や その他の河川におけるflash floodの様子を捉えること ができていた.ただし,2008年の段階では1分間間隔の 静止画での記録であったため,後述する画像解析手法を 適用することはできなかった.2012年の段階では動画情 報の提供が行われるようになっているが,配信能力の制 約のために画像の画質は逆に低下しているのが懸念され る.兵庫県では都賀川への河川モニタリングカメラの増 設を計画しており,今後の活用が期待されている.

一方,一級河川には多数のCCTVが設置されているが, プライバシーの問題やリアルタイムでの動画配信に重点 が置かれていることもあり,動画がデータとして記録さ れていることはまれである.平成24年の九州北部豪雨災 害の調査報告³⁾では、「今後の既往最大規模の河川災害 への対応についての提言」の中で、『水位や映像のデー タは、原因究明の際は航空機のフライトレコーダー、ボ イスレコーダーに匹敵するほど貴重なデータといえる.

「欠測でした」では済まされない.担当部局の緊張感を もった対応をお願いしたい.』と映像情報の重要性があ らためて指摘されている.

このような現状を解決できる可能性が高いものとして 著者らがこれまで提案してきているのが、CCTVなどの映 像情報から流れの定量的な情報を引き出せる画像計測手 法である.STIV (Space-Time Image Velocimetry)⁴⁻⁶⁾ がその代表であり河川表面の横断流速分布を計測できる. 画像を使った計測の利点は、リアルタイムでなくても過 去に記録された映像のアングルを再現できれば、流れの 計測が可能となる点である.また、一般的なCCTVには ズームやアングルの情報を予め記憶させておくプリセッ ト機能があるので、この手法を使うためには洪水計測用 に最適なアングルをプリセットしておくことも重要であ る.

ただし、夜間にピーク流量が生じることの多い洪水の 映像を明瞭に取得するためには従来のCCTVシステムでは 不十分な点もあるため、著者らは遠赤外線カメラとSTIV を組み合わせたシステムを最も汎用性の高いものと考え た提案も行っている⁷⁾.ただ、遠赤外線カメラの利用に 関しては注意すべき点もあり、また、流量計測の精度検 証には不十分な点があったため、本論文ではこれらの点 について詳細に検討した.

2. 河川モニタリングカメラの種類と性能

現在,河川のモニタリングには様々なタイプのカメラ が使われている.河川流計測の汎用化を考える上で,そ れらの特徴を把握しておくことは重要であるため,ここ ではその種類と性能についてまとめておく.

(1) 伝送方式の違い

映像の伝送方式によってネットワーク(ウェブ, IP)カ メラとアナログ出力カメラに分類できる.ウェブカメラ は個々にIPを有しており、ネットワークに接続してPCか ら操作することができる.映像は、MJPEG, MPEG-4, H. 264 などの形式で圧縮されて転送されるが、通信許容量の制 約のため映像はアナログカメラほど安定せず、ネット ワークに対する負荷が大きくなるとコマ落ち・映像欠損 することもある.高解像度の場合にはフレームレートが 低下する.アナログカメラは光-電気信号変換を経て同 軸ケーブルで映像が伝送される.一級河川のCCTVではこ の変換方式が多く採用され、我が国の場合、映像の形式 はNTSC(有効走査線本数が486本)で統一されている.映 像は安定しておりレンズの種類も多いため、河川監視の

表-1	モニタ	リン	⁄グ用カ	メラの)タイ	゚プ	と特	敳
-----	-----	----	------	-----	-----	----	----	---

カメラタイプ	可視カメラ	近赤外線カメラ	遠赤外線カメラ	
波長(μm)	0.4~08	0.8~1.7	8.0~14.0	
色	カラー	モノクロ	モノクロ	
原理	自然光や照明の反射光 を検出	自然光や投光器からの反 射光を検出	物体が発する熱や放射エネル ギーを検出	
夜間撮影	照明必要	投光器必要	不要	
波紋の識別	太陽光の向きに依存	照射範囲に依存	常時可能	
霧発生時の撮影	×	×	0	

ためにはアナログ出力カメラの利用の方が望ましいと思われる.

(2) 可視光を用いるモニタリングカメラ

可視光用カメラは一般にCCTVに採用されているカメラ であり,波長の範囲は0.38µm(紫)~0.78µm(赤)である. 可視光のため,太陽光の向きによって水面の見え方は変 化し,角度によっては水面の輝度が飽和状態(真っ白)に なる危険性もある.夜間の映像記録は基本的に難しいた めフレーム蓄積モードで輝度レベルを高めているが,フ レームレートはかなり低下してしまう.ただ,STIVでは 1fps(frame per second)程度までなら計測可能と考えら れる.また,夜間では対岸の家屋や街灯あるいは自動車 のサーチライトの高い輝度にホワイトバランスが作用し, 水面が視認できなくなることがあるため,カメラはその ような外光が入らないようなアングルにプリセットする 必要がある.

(3) 近赤外線を用いるモニタリングカメラ

一般に赤外線カメラと呼ばれる比較的安価なカメラが このタイプであり,波長の範囲は0.8µm~1.7µmの近赤 外線(NIR: Near Infrared)である.暗視カメラでは可視 領域を含めた0.3µm~1.4µmの帯域,すなわちVNIR (Visible and Near Infrared)を対象とするものもある. このタイプのカメラでは波長が0.94µm程度の赤外線を 投光器で照射し,物体からの反射を受光する.投光距離 は一般的には数十メートルである.映像はモノクロとな る.家庭用ビデオカメラのナイトショットモードでも同 様の機能をサポートしているが,投光距離は3m程度の ため他の投光器と組み合せなければ河川モニタには使え ない.夜間になると自動的に可視光モード(カラー)から 近赤外線モード(モノクロ)に切り替わる機種もある.こ のタイプのカメラは河川幅が20~30m程度のモニタリン グに適していると言える.

(4) 遠赤外線を用いるモニタリングカメラ

熱赤外線カメラあるいはサーマルカメラとも呼ばれて いるのがこのタイプのカメラで,様々な用途に利用され てきている⁸⁾.遠赤外線(FIR: Far Infrared)の波長は 一般的には4.0μm~1000.0μmとされているが,遠赤外



(a) 4月20日18:00(b) 4月21日14:00図−1 結露による画質低下の状況

線カメラで捉えているのは波長範囲が8.0um~14.0um の遠赤外線である. これは絶対零度以上において物体が 放射エネルギーの形で発している赤外線の波長範囲に相 当する. 遠赤外線は放射エネルギーに加えて熱(温度)も 捉えているため、 高機能のサーマルカメラでは物体の温 度分布などを求めることができる.ただ、河川水の温度 はほとんど一定と考えてよいため、熱と放射エネルギー だけでは流れを波紋の移流として捉えることはできない. 実際には赤外線は非常に反射しやすい性質を持っており, 物体表面の状態や見る角度によっても放射エネルギーが 変化する. この点が河川モニタリングにおいて最も重要 であり、この性質の効果で水面の微細な凹凸の形状を映 像化できる. 別の例を挙げれば, 温度一定のアイスボッ クス内の氷の配置状況も容易に識別できる. 遠赤外線の 別の利点は、可視光に比べて波長が長く散乱しにくい性 質を有しているため、煙や霧の影響を受けにくい点にあ る. さらに、前述のように夜間のCCTVにおいて問題とな る可視光の直射の影響も全く受けない点も汎用性という 点で重要なポイントである. ただし、一般的な遠赤外線 カメラは単焦点のレンズを使っているため、撮影範囲に 合わせて適切な焦点距離の機種を選択する必要がある. 以上の3タイプのカメラの特徴は表-1にまとめておいた.

(5) 遠赤外線カメラを用いる際の注意事項

以上のように、遠赤外線カメラは汎用的な河川モニタ リングカメラとして最適な機器と考えられるが、魚野川 や信濃川下流において著者らが使用した機器(フリアー システムズ、SR334、焦点距離13mm、解像度320x240画素、 7.5fps, モノクロ)での撮影⁷⁾においては注意すべき点 があることもわかってきた. 第1の注意点はレンズに付 着した結露の影響である。2012年4月に実施した魚野川 の観測では、堤防上に残雪のある気温数℃での撮影で あったが、2日目の撮影では水面波紋やその移流状態を ほとんど認識できない映像が記録された. 図-1(a)(b)に その際の画像と問題解消した3日目の画像を比較した. 流れの状態は二日間でほとんど変化ないにもかかわらず 波紋の状態がまったく違うことがわかる.詳しく調べた 結果、結局カメラ内部と外気の温度差によってレンズの 内側に目視ではほとんど確認できないほどのわずかな結 露が生じており、それが遠赤外線を散乱させていたため とわかった. そのため, 図-1(a)からわかるように画面





(a)斜め画像上の検査線(b)幾何補正画像上の検査線図-2 検査線の設定(4月21日10:00,遠赤外線カメラ)

の中央部分のみ画像がぼやけた状態となっている.カメ ラ内部にはヒーターも取り付けてあるものの十分には機 能していなかったことになる.本来,このような機種の 使用目的は、歩行者の検知⁸⁾や海上での遭難者の捜索な どであったため、微細な画像のパターンの消失は本来問 題視されていなかったことも考えられる.今回の2回目 の撮影では、事前にカメラ本体を暖かい状態に保ってお くことで問題を解消できたが、本来的にはカメラ内部の ヒーターの機能強化が望まれる.

また,この機種では,画像のコントラスト形成のため に,定期的な画像のリフレッシュや,AGC(オートゲイン コントロール)機能による画像の自動補正が行われるが, そのために定期的(時間間隔で1時間程度)に画質の低下 を招くケース(信濃川下流における観測)も見られた. 今後,この種の映像機器を汎用的に河川流計測に適用す る際には,自動補正をコントロールできる機器の導入が 必要である.

3. STIVの特徴と手法

実河川における河川表面流の状況は幾何学的には河床 形状,河床粗度,側岸の状態,河川構造物などの影響を 受け,水理学的には流速やフルード数の変化あるいは大 規模乱流や風の影響を受けて時間・空間的に大きく変化 する.河川表面流の画像計測法として開発してきたSTIV にはいくつかの手法があるが,一つの手法ですべての河 川表面流の状態を計測するのは容易ではない.ここでは, 各手法を簡単に整理しそれぞれの特徴について述べる.

(1) 時空間画像の比較

STIVでは、ビデオ画像上で主流方向に設定した検査線 上の輝度分布の時間変化を、横軸に検査線長さ、縦軸下 向きに時間軸をとった時空間画像(STI:Space-Time Image)によって表示する.通常、ビデオ画像は斜め撮影 されており主流方向を正確に知ることはできないため、 斜め画像を幾何補正により真上から見た画像に変換し、 その画像上で河岸に平行に検査線を設定する.魚野川に おける設定例を図-2に示す.検査線の本数は25、長さは 18、11m、間隔は5.6mとした.図-2(b)より検査線を河岸 に平行に設定できていることがわかる.この地点での魚



図-3 左岸遠赤外線カメラ(カメラA)で得られた各検査線に対するSTI(横=17.8m,縦=10sec): コントラスを強調するためにヒストグラム均等化による画像処理を行った後の画像(4月21日10:00)



図-4 左岸通常ビデオカメラ(カメラB)で得られた各検査線に対するSTI(横=17.8m,縦=10sec): コントラスを 強調するためにヒストグラム均等化による画像処理を行った後の画像(4月21日10:00)



図-5 右岸通常ビデオカメラ(カメラC)で得られた各検査線に対するSTI(横=11.4m,縦=10sec): コントラスを 強調するためにヒストグラム均等化による画像処理を行った後の画像(4月21日10:00)

野川の水面幅は約150mであるが、25本の検査線で約137m の範囲をカバーしている. 図-2(a) に示した検査線のう ち、手前(左岸側)から一本置きの検査線に対して10秒間 の画像300枚から生成したSTIを図-3に示す。斜め画像上 では、検査線の長さは見かけ上は異なっているが、物理 長さはほぼ一定なので、比較を容易にするためにSTIを 同じサイズに統一して並べた. ただし, 画像のコントラ ストを強調するために輝度のヒストグラム均等化処理を 施している. STI上には、水面波紋の移流を示す斜めの パターンが明瞭に現れている. xの値は, 最も手前の検 査線の位置を原点として横断方向にとった距離である. これより、カメラから125.4m離れた地点(22本目)でも斜 めパターンが検出できていることがわかる. ちなみに, この検査線に対する撮影俯角は3.6度と非常に小さいが、 波紋の検出に支障は見られない.ただし、手前側 (x=0,11.4)のSTIには河岸近くの低流速の変動や河岸に向 かう流れとは異なるさざ波の影響などで傾きの異なる2 種類のパターンが混在している. このように明瞭なパ ターンが混在する場合,流れに対するパターン勾配(急 な方の勾配)を自動検出することは難しいため、後述の マニュアルSTIVで求めるのが有効となる.

図-4と図-5には、同じ場所を通常のビデオカメラで撮 影した映像から得られた各検査線のSTIを図-3と同様の 画像処理を施して示した. 使用した遠赤外線カメラの解 像度が320x240 画素なのに対し、通常ビデオでは 1920x1080画素と解像度は非常に高いが、得られる縞パ ターンには大きな差は見られない. 逆に可視光の場合, 図-4(d)は水面で発生した白波,図-5(a)は縦縞のノイズ, 図-5(1)は河岸からの波のため画像が乱れている.また, カメラから遠方ほど(左岸カメラはx=120.1m側,右岸カ メラはx=0m側) 画像がぼやけており、後述のアルゴリ ズムのみでパターン勾配を検出することは難しくなる. 各図中には、平均的なパターン勾配を斜めの線で記入し ているが、各カメラで検出されたSTI上のパターンは同 じ場所の検査線では同様の傾きを示しており、水面波紋 の成すパターン勾配に汎用性があることを確認できた. 図-5の傾きが異なるのは検査線長さが違うためである.

STIVの種類

STIVにはSTIのパターン勾配を求める手法にいくつか の種類がある.最も単純な方法は目視で求める方法 (Manual STIV)である.開発したソフトウェア上では, マウスでパターン勾配に沿うように線分を描けば直ちに 流速がわかるようにしている.ただし,パターンが複雑 になるほど個人差が出てくる.また,初期の段階では⁹⁾, STI上で斜め方向に輝度値を積分し,積分値がピークを 示す方向を探すことでパターン勾配を検出していたが, 精度に問題があった.そこで,輝度勾配テンソル法^{4,10)} を導入し,区分分割したSTI上の局所的なパターン勾配 とそのヒストグラムおよびコヒーレンシー (パターンが





明瞭なら1,ホワイトノイズなら0となる指標)の分布 から,自動的に流速値を検出するようにした(Original STIV).最後に,気象状況などによってレンズに付着した 雨滴の影響や図-4や図-5にも現れた様々なタイプのノイ ズを除去するために,STIを一旦二次元FFTで周波数空間 に変換し,バンドパスフィルターを介してノイズを除去 した後に逆変換してSTIを良質なものにし,そこに輝度 勾配テンソル法を用いる方法を開発した(FFT STIV).こ の際には図-3~5にも用いたヒストグラム均等化による コントラスト改善を逆変換後のSTIに適用している.

以上より、汎用的なSTIVシステムとしては次の手順で 検査線上の流速を求める手法を提案する.

- a)ノイズに強いFFT-STIVによりパターン勾配を求める b)得られた勾配線一本をSTI上に表示する
- c)勾配線とSTIの背景のパターン勾配が目視で一致して いればその勾配から流速を求める
- d)c)で勾配が不一致なら、Manual STIVを用いて流速を 更新する

4. ADCPの表層近傍流速との比較

STIVの前提である水面波紋の表面流追随性については、 既報で詳細^{7,11)}に説明し、風速が1m/s程度であった今回 の現地観測の現場では非常に良い波紋の追随性が確認で きている. ここでは、同時に計測が行われた根小屋橋下 流の測線でのADCPによる計測結果の内、表層近傍の流速 分布(水面下約40cm程度)および電波流速計との比較を 行う. 図-6に、10時、13時、15時および20時における結 果を比較した. この間の水位は夜間の融雪出水の影響で 約50cm上昇しており、流速もおよそ50cm/s増大している. 黒丸がADCPの結果で計測時間が短いこともあって横断方 向のばらつきは大きいが、概ね各計測結果と一致した分 布を示している. 電波流速計との対応も良好である. 横 断距離が85m付近の流速の低下と河床の上昇は橋脚の影 響であり、STIVもその傾向を捉えることができている。 可視光を使うカメラB.Cのデータが対岸近くでばらつく のと比較すると遠赤外線カメラ(カメラA)は比較的安定 した結果を示している. これは可視光のように日差しの 方向によって波紋が識別しにくくなることがないためで ある. 夜間の20時における遠赤外線カメラのデータが良 好なことからも、今後の汎用計測における機器として有 用であることがわかる. 図-7に遠赤外線カメラと通常カ メラの表面流速分布から推定した流量(表面流速から鉛 直平均流速への変換係数を0.90として求めた)とADCPで 直接計測した流量を比較した. これより, STIVによる流 量推定値は相対誤差は5%以内で良好にADCPによる流量 と一致していることがわかる.

5. あとがき

本論文では、ビデオ画像による流速・流量計測の汎用 化を目指すために、最適な機器として遠赤外線カメラを 提案し、STIVと組み合わせて求めた流量の計測精度が ADCPによる値と同程度であることを明らかにした.また、 本論文で問題視した遠赤外線カメラの特性については、 その後の調査で高機能版(FLIRシステムズ、Fシリーズ) の利用で解決できる目途が一応ついている.今後は唯一 の大きな課題である風の影響に関して現地レベルでの調 査・検討を行う必要がある.

謝辞:本研究は、土木研究所(ICHARM)との合同観測に参加していただいた数多くの方々の協力によって実現できた。特に、水文環境(株)、横河電機(株)の方々には大変お世話になった。また、本研究の一部は平成23年度(財)河川情報センター研究助成の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。



参考文献

- 土木学会平成20年度都賀川出水調査団(団長:藤田一郎):
 2008年7月28日突発的集中豪雨による都賀川水難事故に関する調査研究報告書,2009.
- 2) 宇野宏司・加古祐太:表六甲河川・都賀川の親水空間利用に 関する一考察 - 2012年7月のヒヤリ・ハット事例を例に -, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1657-I_1662, 2013.
- 3) 土木学会九州北部豪雨災害調查団(団長:小松利光):平成 24年度7月九州北部豪雨災害調查団報告書, p.101, 2013.
- 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)藤田一郎・原浩気・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,水工学論文集,55巻,pp.S 1177-S1182,2011.
- 6)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,53巻, pp.1003-1008,2009.
- 7)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, I_703-I_708, 2013.
- 8) 齋藤裕昭・萩原剛志・畑中健一・澤井孝典:遠赤外線カメラ を用いた歩行者検知システムの開発, SEI テクニカルレ ビュー,第171号, pp. 80-85, 2007.
- 9)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,9巻,pp.55-60,2003.
- 藤田一郎・渡辺英樹:時空間画像の輝度勾配テンソルを用いた主流速分布の新計測法,可視化情報, Vol. 24, Suppl. No. 1, pp. 207-210, 2004.
- 11) 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, L_739-L_744, 2013.

(2013.4.4 受付)