

河川表面流速の画像計測ソフトウェア KU-STIV 開発の背景とその応用

Development and Application of Image Analysis Software KU-STIV for River Surface Flow Measurements

藤 田 一 郎
Ichiro Fujita

1. はじめに

近年になっても、記録的な豪雨による洪水災害が多発している。比較的最近の平成 23 年だけをとってみても、7 月には新潟・福島豪雨が発生し、信濃川支流の魚野川では観測史上最大の洪水を観測した。9 月には台風 12 号による影響で奈良県、和歌山県を中心として広域な土砂・洪水災害が発生し、平成 24 年度 7 月には九州北部豪雨が発生し、大きな被害をもたらした。本年（平成 27 年度）では、一級河川の鬼怒川が破堤し、周辺の家屋が次々と破壊され流失していく様子や、屋根の上などから住民らが自衛隊ヘリで救出される様子が生々しく映像として映し出された。河川の河道に沿って線状降水帯が発達、停滞したことがひとつの要因と言われているが、一級河川の大規模な破堤は、平成 16 年の台風 23 号で発生した円山川の決壊以来のことであった。海外においても、オーストラリア、ブラジル、スリランカでの記録的な大洪水、ミシシッピ川での洪水、タイでの大規模な氾濫災害などが連続して発生している。このような最近の洪水のうち、我が国における洪水で特徴的なのは、時間降雨が 100mm 前後の大雨が数時間続くケースが頻発していることである。そのため、河川流量は急激に増大し、最悪の場合には氾濫に至っている。このような洪水災害に対する対策を講じるうえで重要なのは、流量や水位のハイドログラフを正確に計測しておくことである。これは、降雨に対する流出過程を正確に把握する上で不可欠であり、特にピーク流量の把握は重要である。しかしながら、長時間かけて流量が徐々に変化する大陸の洪水とは異なり、我が国の洪水は短時間に出水するために、流量を正確に計測することは容易ではない。しかも、報道で「未明から降り続いた雨が..」とよく伝えられるように、洪水のピークは夜間に発生することが多いことも計測を難しくしている。

我が国の洪水流量計測は長年、浮子法で行われてきたが、この方法の致命的な問題点もいくつか指摘できる。このたびの新潟・福島豪雨に関連して言えば、洪水流量が非常に大きかったために流量観測地点の橋梁がもぐり橋状態になったことや、危険のために橋梁へのアクセスが通行禁止になったことで計測作業を行えず、ピーク流量が欠測となった。九州北部豪雨においても非常に激しい洪水流のため、浮子法の適用自体が困難であったと言われている。つまり、堤防満杯に近い状態で夜間に浮子観測を行うことは非常に危険であり、人手を要する計測法には限界があると言える。計測作業を実施できる場合でも、第 1 見通し断面から第 2 見通し断面までの距離は 100m 程度と長いために、浮子は大規模乱流の影響などを受けて左右に振れ、この 2 断面での河床形状も一致しないことから流量の計測精度にはある程度の限界があることも確かである。

以上のような観点から注目されてきたのが、非接触法による計測である。水面へ照射した電波のドップラーシフトを捉えて照射スポット面における流速を求める電波流速計が一つの代表であり、橋梁に固定設置して定点連続計測をすることが可能となっている¹⁾。もう一つの代表が画像を利用する方法であり、著者らのグループが精力的に取り組んできたものである²⁻⁶⁾。画像を利用する場合には、主要な河川に数多く設置されている CCTV の映像や安全な場所から撮影し

た映像を用いて河川表面の横断流速分布を求めることが可能である。以上のような観点から、画像計測による流速計測は有用であることがわかるが、開発してきた手法を幅広く普及することも重要と考え、ユーザーインターフェイスなどを整えたソフトウェアを商品化した。名称は、KU-STIVであり、KUはKobe Universityから、STIVは解析手法のSpace-Time Image Velocimetry からとったものである。以降では計測のアルゴリズムや適用例について紹介する。

2. 洪水観測の難しさと重要性

河川の洪水時の流れは、流体計測の中でも最も困難な計測対象の一つと言える。それは、洪水流計測は風や雨などの自然条件に完全にさらされた状態で行わなければならない、計測環境が劣悪であることが第1のポイントである。第2のポイントは対象となる河川の物理スケールが数メートルから数百メートルのオーダーなどと非常に大きい点である。そのために、仮に直接的な計測を行えたとしても計測作業にはかなりの時間を要してしまう。また、洪水流は大小の礫混じりの浮流砂を大量に含んだ固液混相流であり、実験室で用いるプローブタイプの計測装置は使えないことが第3のポイントである。第4のポイントとしては、洪水時の初期には特に大量の流木やごみなどが流れてくることが多いために、ボートなどを用いて計測するには危険を伴う点があげられる。このように、洪水流の計測はあらゆる点で非常に困難を伴うものと言える。

洪水流速を計測する直接的な目的は、河床横断形状のデータとあわせて河川流量(Q)を求め、そのときの水位(H)の情報とセットにして、いわゆる水位-流量曲線(H-Q 曲線)をできるだけ正確に求めることにある。洪水のたびに詳細な計測を実施することは難しいため、比較的計測の容易な水位との相互関係を予め求めておき、水位から任意時刻の流量を推定するわけである。流量は河川の基本方針や整備計画における最も基本となる水文量であり、河道の計画は流量の正確な値がわからなければ策定することができない。流域に施した様々な洪水対策の効果についても流量がわからなければ正確に評価・把握することができない。水位と流量の関係は河床変動や河川周辺の変化の影響を受けるため、この関係は常に更新していく必要がある。これは、高水敷の利用形態や植生分布の変化など、流水抵抗の変化による影響を受けるからである。流量と水位のデータセットと同様に重要なのは降雨の情報だが、こちらは従来のCバンドレーダーに加えて高い時間・空間解像度を有するXバンドMPレーダーなど最新機器が導入されつつあり、数分間隔で詳細な降雨分布を把握できるようになってきた。これに対し、現在の洪水流量観測は前述のように浮子法が基本となっている。浮子法は人手や時間がかかる古くからの手法であり、降雨データ計測の近代化と比較すると一歩も二歩も遅れていると言わざるを得ない。

降雨情報から流量を推算する手法を降雨流出解析といい様々な手法が提案されているが、これらの解析モデルには多くのパラメータが含まれるため、流量の正確なデータがなければこれらを同定できない。すなわち、流域に対するインプットとしての降雨のデータ計測が高度化しても、アウトプットとしての流量の計測が高度化されなければ、ある降雨に対する流域の応答を正確に把握したり、予測したりすることはできない。このような計測精度のアンバランス状態を解消するために有望なのが、非接触法としての画像計測法というわけである。

3. 映像情報の重要性

映像情報の強みは水位計などの河川における点計測とは異なり、空間的な情報が記録されていることである。1点における情報量は点計測のデータを圧倒する。また、水位計などは水中に取り付けられているために流体力や浮遊物によって破損する場合があります。現に北九州豪雨の際においても水位計が流失したために最も重要なピーク水位を欠測する事例もあった。北九州豪雨の際、このような状況の中で唯一わずかに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。一般的に、河川のCCTVは自由に動かせる雲台や高性能の望遠機能のために、プライバシーの問題から録画機能がないものが多いが、今回のような大洪水時でも貴重な動画がわずかに記録されていたケースもあった。平成24年の九州北部豪雨災害の調査報告⁷⁾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、原因究明の際に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。』と記述されているが、映像情報の重要性をあらためて指摘していることは注目に値する。したがって、開発するソフトウェアは映像情報

としての動画をそのまま処理可能であることが重要と考えられた。

4. 従来型の流速計測法

ここでは、従来型の流速計測法を示し、画像計測法の優位性について考察しておく。

4. 1 平水時の計測

河川流の計測は流速分布の計測と流量の計測に大別することができるが、これまでの計測は基本的には点計測であり、河川空間をカバーするように計測を行うには河川のサイズに比例した多大な労力が必要であった。点計測の計測装置としては、1方向の流速成分を測れるプライス型流速計（プロペラ式）や電磁流速計などがあるが、鉛直流速分布や平面的な流速分布を得るにはプローブの位置を逐一移動させる必要があるため、取得できるデータ量やデータ密度には限界があることに加え、非定常性が強い場合や大きな洪水時には使えないという欠点がある。ただ、これらの機器は河川の低水流量観測には現在でも有効利用されており、測線上の各水深と河床から40%の高さの各流速を用いて（1点法の場合）、横断面内の流量が算出されている。このような計測作業の労力を軽減するためには、河川表面にトレーサーを散布し、その表面流速分布から流量を推定することが有用で経済的と考える。

4. 2 洪水流の計測

従来の計測装置を用いて洪水時の流速分布や流量を計測することは容易ではないため、わが国では浮子を用いた計測が古くから行われており、得られた流量データは河川整備の基本方針や整備計画の策定の際に重要な基礎データとして活用されている。ただ、浮子観測には①欠測の可能性、②連続計測の困難さ、③洪水時計測の危険性、④浮子の偏流、⑤流量換算の更正係数の妥当性などの問題点が指摘されている。このうち、④の問題点を端的に示しているのが図1に示す浮子の軌跡である⁸⁾。この図は夜間の洪水流観測時に左岸側から撮影された発光浮子の軌跡を合成した後、画面全体を幾何補正したものである。この場合、浮子は河岸近くで河道中央に偏流する傾向を示している。これは河岸近くで強まる内部二次流の影響と思われるが、こ

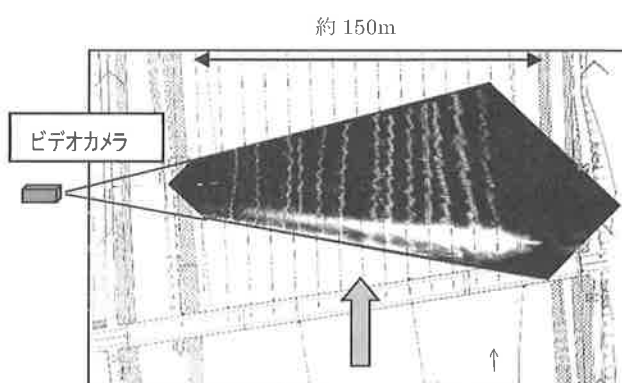


図-1 洪水中の浮子の軌跡（魚野川）⁸⁾

の偏流のために河岸に平行な測線上を移動すると仮定して算出される流量には自ずと誤差が含まれることになる。図-1のように比較的直線的な河道区間でさえこのように浮子の軌道が変化してしまうことを考えると、地形的な制約などからやむを得ず湾曲部などで行われる浮子観測流量には高い計測精度は期待できないことがわかる。

5. 非接触計測手法の特徴

5. 1 計測媒体について

表-1 非接触型流速計の特徴比較

	電波流速計	超音波流速計	LSPIV	STIV
計測原理	ドップラー効果		テンプレートパターンマッチング	テクスチャ解析
使用周波数他	マイクロ波 20.4KHz	超音波 10.525GHz	可視光	同左
計測対象	水面の凹凸 (3.6mm 以上)	水面の凹凸	表面画像濃淡分布	同左
計測領域	一辺 2~4m の楕円	一辺 2~4m の楕円	1 ベクトル当たり数 m~10m 四方, テンプレートの取り方により変化	主流方向の数 m から数 10m の線上
俯角	30~45 度	30~45 度	最遠点で 6 度程度以上~	2~3 度以上
偏角	0 度	0 度	制限なし	0 度
横断流速分布の計測	流速計を平行移動	流速計を平行移動	固定点 (河岸高所) からの全幅同時計測可能, 河川幅 100m/台(目安)	同左
測定範囲 (m/s)	0.5~10.0 (水面の状態により異なる)	0.5~10.0 (水面の状態により異なる)	0~10.0 (目安) 逆流も測定可能	0.1~10.0 (目安) 逆流も測定可能
流速成分	照射方向の 1 成分	照射方向の 1 成分	二次元成分	線分上の一次元成分
設置場所	橋 (水面まで 10m 以内)	橋 (水面まで 10m 以内)	河岸, 橋	同左
夜間計測	可能	可能	照明を利用, 暗視カメラ	同左
リアルタイム計測	可能	可能	水位計との連動で可能	同左
特徴	実際河川での計測実績が豊富にある	基本原理は電波流速計と同様	橋がない場所でも計測可能, 複数カメラ利用で 100m 以上の河川幅をカバー可能, CCTV カメラを利用可能	同左 LSPIV より効率的

河川流計測における非接触計測法は、画像計測による方法とドップラー効果を利用した方法に大別できる。前者の画像による方法には、Large-Scale Particle Image Velocimetry(LSPIV)や STIV に加えて時空間微分法 (オプティカルフロー) などがあり、後者の方法には電波流速計や超音波流速計などがある。計測原理は各々全く異なっているが、計測対象が表面流速という共通点がある。他の視点から見た共通点は、どの方法も河川表面流をひとつの移動媒体と見なしており、表面流とともに移動する何らかの移動体を追跡している点が同じである。

ドップラー効果を利用する方法では、電波流速計の場合、使用するマイクロ波の波長は使用周波数(10.525GHz)に対して 2.8cm 程度、超音波流速計の場合、使用周波数(20.4KHz)に対して 1.7cm(気温 20 度のとき)程度であるから、十分な散乱波強度を得るためには河川表面に少なくとも 1cm オーダーの凹凸が存在していなければならない。逆にいえば、この方法の場合、水面の凹凸が微小な平水時の計測には使えないことになる。

一方、画像を利用する場合の計測対象はあくまでも画面内の輝度分布 (通常 0 から 255 までの値をとる) だが、この輝度分布の大部分は自然光が水面の凹凸によって乱反射されることによって生じる。したがって、計測方法は異なるものの、基本的な計測媒体が水面の微細な幾何形状であると言う点ではドップラー効果を利用する方法と共通している。ただし、幅が 10m から 100m 程度までの水域をカバーする画像計測で通常のビデオカメラを用いた場合には、空間解像度が低いために必ずしもドップラー効果を利用する装置と同一の計測媒体を同じ状態で「視ている」ことにはならない。例えば、河岸からの斜め撮影では 1 画素のサイズが 1cm から 10cm のオーダーまで分布するため、カメラから遠ざかるほど水面の状況を巨視的に観察する結果となる。しかしながら、平均的な流れ場を考えると、微視的であれ巨視的であれ同じ平均流に載った多重スケールの水面凹凸形状を観測していることには変わりない。非接触手法の特徴を表-1 に示した。

5. 2 水面凹凸（水面波紋）の発生要因

非接触法で共通に観測している水面の凹凸は水面に凍結された状態で存在し移流されているのではなく、個々の微小な波が折り重なった渾然とした状態で存在している。個々の波は、船が作るような波高の大きな航跡波（重力波）とは異なって方向性がなく波長や波速も小さい。このような小スケールの波の発生要因としては、

- a) 開水路粗面乱流場における水面近傍の圧力変動
- b) ボイル渦等の水面への衝突
- c) 橋脚など河川構造物背後で発生した後流の痕跡
- d) 風の影響

などが考えられる。洪水時に観測されるのはこれらの要因が複合的に影響しあった結果生じる水面の擾乱である。したがって、単純にその波速を求めることは難しいが、洪水時に観察される水面凹凸の波長が1~10cm程度であるのに対し、水深がメートルオーダーの値をとることから、ちなみに深水波として波速を計算してみると10~40cm/s程度となる。ただ、現実にはこのような波があったとしても各々の波の波向は不規則で互いに打ち消しあうため、ビデオ画像上である種の移動媒体として認識されるのは、洪水の平均流（低平地では2~3m/s程度）に、平均流速の高々1割程度の群波速度を持つ水面の擾乱が重畳した場ということになる。通常、これらの微小水面擾乱には方向性がないため、これらのノイズ（微小波速の影響）は平均処理によって除去できる。ただし、強い風によって方向性の強い重力波が連続的に発生している場合は、その影響は無視できず、重力波の波速の方を追跡してしまう可能性が高い。ただし、この短所は画像利用法に限らずどの非接触法でも生じるものである。いずれにしても、このような水面の凹凸を河岸などから観察すると‘水面波紋’として認識できる。

まとめると、ドップラー効果を利用する計測法が比較的小スケール（センチメートルオーダー）の水面波紋（水面の凹凸）を微視的に追跡しているのに対し、画像を利用する方法では中小のスケールが混在した水面波紋の場を巨視的に追跡していることになる。ただ、このような水面波紋の発生条件やその強度と河川における水理条件との関係は必ずしも明らかになってはおらず、今後の研究が必要である。

6. STIVの概要

6. 1 STIV法の位置づけ

ビデオ画像のような動画から移動体の動きを捉える方法としてよく知られているのは、前述のPIV法とオプティカルフロー法である。PIV法はもっぱら流体計測分野で用いられており、オプティカルフロー法はリアルタイムで物体の動きを識別する必要があるロボット工学で用いられることが多い。一般にオプティカルフロー法はノイズが生じやすいため、様々な工夫が加えられてきている。PIV法では二枚の連続画像から、オプティカルフロー法では二枚あるいは数枚の連続画像から二次元の瞬間速度場を求めるが、本研究におけるSTIV法では連続する数十枚の画像から一次元（主流方向）の平均速度場を求めるのが大きな特徴である。このような発想で流速計測をした例は国内外に全くない。

利用する画像に関して各手法の違いを模式的に示したのが図-2である。通常のビデオ画像ではフレーム画像の最小時間間隔(ΔT)は1/30secである。流れ場にもよるが、PIV法では計測精度を高めるために対象物の画像上での移動量

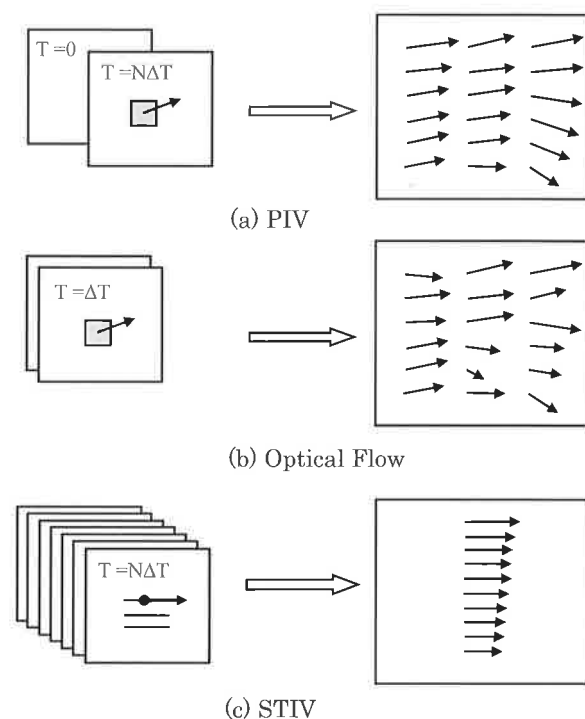


図-2 各手法の比較

が5~10画素となるように二連続画像の時間間隔を調整するのが通例である。図-2の例では最初の画像とN番目のフレーム画像から速度場を得ている。一方、オプティカルフロー法では輝度分布の移流方程式から移流速度を算出するので、時間および空間方向の輝度の勾配値を精度よく求める必要がある。そのため、図-2(b)に示すように最小時間間隔 ΔT の連続画像が用いられる。

これに対し、STIV法は数秒間のビデオ画像すなわち数十枚のフレーム画像の情報から流れ方向の流速成分を求める方法である(図-2(c))。輝度の空間勾配を求めるという点では、オプティカルフロー法の一次元版とも言えるが、輝度の勾配値を移流方程式ではなく画像処理によって求めている点が従来の方法と大きく異なる。また、前述の方法では一辺が10~50画素程度の正方領域が計測対象だが、STIV法では流れ方向に50~100画素程度、横断方向に1画素の線状領域が計測対象となる。そのため、横断方向に非常に高密度の流速分布を求めることができる。

6. 2 時空間画像の構成要素

STIV法で用いる時空間画像の一例を図-3(b)に示す。この画像は、図-3(a)に示した検査線上の輝度分布を時間軸方向に積み重ねて生成したものである。この例では、時空間画像の生成に約1秒間30フレームのビデオ画像を用いている。対象河川では水面に多数の水面の凹凸(水面波紋)が確認できる。図-3からわかるのは、全体的な傾向として右下に向かう縞模様を確認できる点である。この中で相対的に黒い部分は水面凹凸の谷の部分、白い部分は水面凹凸の峰の部分に対応している。これらの縞模様は途切れ途切れではあるが局所的には連続しており、しかも各縞パターンがほぼ平行であることから、微小時間内においては水面凹凸(波紋)の形状がほぼ凍結された状態で移流されていると見なせる。STIV法では、検査線上を通過中の平均流がこの移流状態を引き起す要因と考えている。従って、この縞パターンの傾きを求めれば検査線状を通過している表面流の流速が得られることになる。従来の研究^{9,10)}ではこの傾きを変形法によって求めていたが、ここでは、別の手法として輝度勾配テンソル法を用いて比較検討した。

6. 3 輝度勾配テンソル法

この方法では、時空間画像内に含まれる縞パターンの傾きを求めるために、縞パターンの勾配ベクトル ∇f と局所的な方向単位ベクトル \vec{n} の内積の二乗値、

$$H(x,t) = (\nabla f^T \vec{n})^2 \quad (1)$$

が最大となるような方向ベクトルを局所的な検査領域 A に対して求める。すなわち、

$$\int_A H(x,t) dx dt = \vec{n}^T \left(\int_A \nabla f \nabla f^T dx dt \right) \vec{n} \rightarrow maximum \quad (2)$$

が目的関数である。式(2)におけるカッコ内の積分は画像の輝度勾配に関連するテンソルで

$$J_{pq} = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_p} \frac{\partial f}{\partial x_q} dx dt \quad (3)$$

とおける。ここに、 p, q は時空間の成分を表す指数でここでは、 $x_1=x$ および $x_2=t$ とする。 J_{pq} は対称テンソルなので座標系を適当に回転すれば対角化でき、そのとき式(2)を成分表示すれば(回転後の変数に'をつけて)次式のように表せる。

$$[n'_1, n'_2] \begin{bmatrix} J'_{11} & 0 \\ 0 & J'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n'_1 \\ n'_2 \end{bmatrix} \rightarrow maximum \quad (4)$$

この形にすれば、 $J'_{11} \geq J'_{22}$ としたとき、単位ベクトル $\vec{n}' = [1 \ 0]^T$ がこの条件を満たすことが容易にわかる。このことから、テンソル(マトリクス) J_{pq} の固有値を与える回転角が求めるべき角度ということがわかる。二次元問題の場合の固有値を λ_1 および λ_2 とすると固有値と回転角の関係は次式で与えられる。

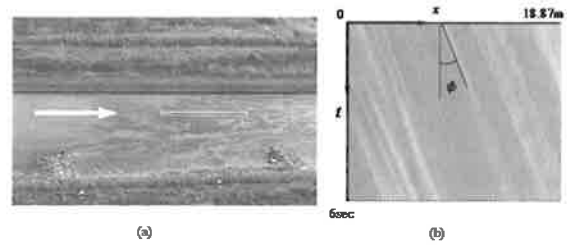


図-3 時空間画像の例

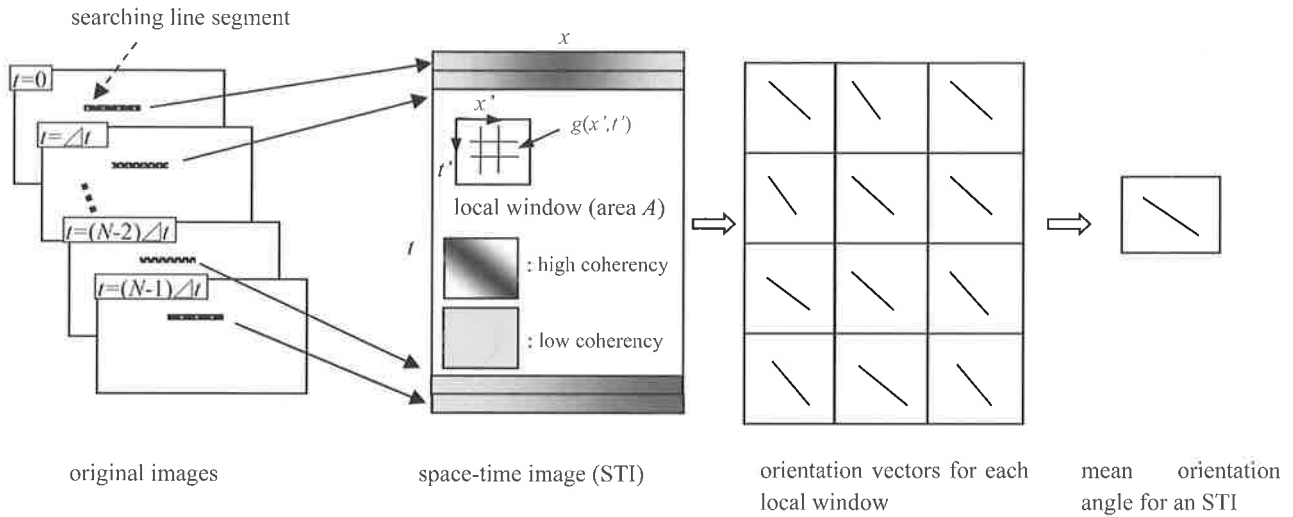


図-4 STIVのプロセス

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

この式の非対角成分の比較より

$$\frac{1}{2}(J_{11} - J_{22})\sin 2\phi + J_{12} \cos 2\phi = 0 \quad (6)$$

が得られる。式(6)より、回転角 ϕ すなわち縞パターン勾配は次式から求めることができる。

$$\tan 2\phi = \frac{2J_{12}}{J_{22} - J_{11}} \quad (7)$$

また、縞パターンのコヒーレンシーは次式で与えられる。

$$Cc = \frac{\sqrt{(J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2}}{J_{11} + J_{22}} \quad (8)$$

このコヒーレンシーは、縞パターンの強さを示すパラメータであり、理想的な縞パターンの場合に1、全くパターンがない場合に0の値をとる指標である。

以上より、式(3)を用いて時空間各方向の輝度勾配の積をある検査領域内(A)で積分すれば、式(7)を用いて縞パターンの局所的な勾配が算出できる。なお、本研究では、輝度勾配の計算には5次精度の中央差分を用いた。この差分式を空間軸方向について示せば

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_{i+3} - 9f_{i+2} + 45(f_{i+1} - f_{i-1}) - 4f_{i-2} - f_{i-3}}{60\Delta x} \quad (9)$$

となる。解析においては、検査領域を一边が10~20画素程度の正方領域として時空間画像上で ϕ およびコヒーレンシー Cc の値の分布を求め、 Cc があるしきい値以上となる検査領域での ϕ の平均値を水面波紋の移流に関わる縞パターンの角度とした。

以上の一連の解析プロセスをまとめたのが、図-4である。まず、左端の各画像からある検査線上の輝度分布の時間変化を中央の図のように時空間表示し、時空間画像 Space-Time Image(STI)を生成する。次に、STIを多数の領域に分割し、各領域に対して局所的に輝度勾配を式(7)を用いて求める。これらの輝度勾配のヒストグラムを作成した後、コヒーレンシーで重みづけした平均勾配を算出する。流速値は、この平均輝度勾配を用いて次式を用いて求めることができる。

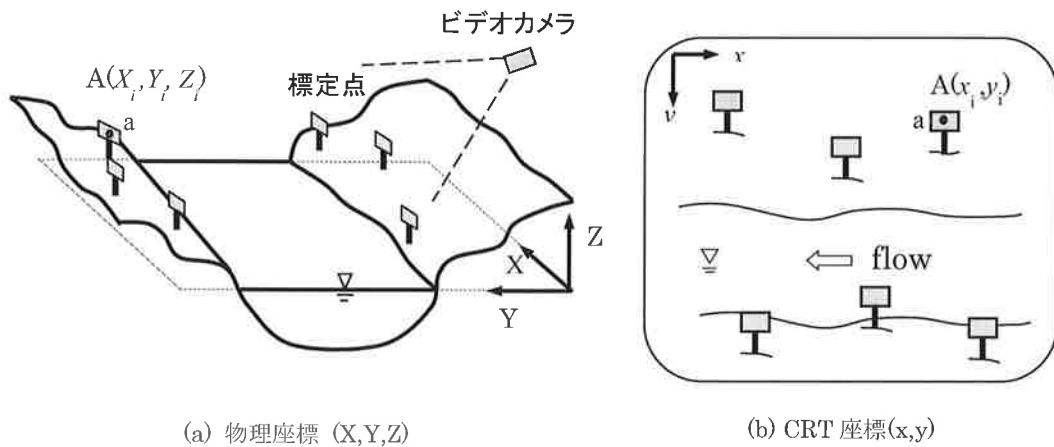


図-5 標定点の設置と各座標の関係

$$U = \frac{S_x}{S_t} \tan \phi \tag{10}$$

ここに、 S_x (m/画素)は検査線軸の単位長さスケール、 S_t (sec/画素)は時間軸の単位時間スケールを表す。

6. 4 画像の幾何補正

これまで、説明してきた LSPIV や STIV は、どちらの手法においても斜めから撮影された画像を用いるために、画面上の座標と物理座標(測量座標)の関係を求める必要がある。一般的には各々の座標系において6点以上の標定点(GCP: Ground Control Point)を必要とする。これらのデータを用いると斜め画像の幾何補正(image rectification)を行うことができる。両座標間の関係は、次式で示す二次射影変換式で表せる。

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}, \quad y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \tag{11}, (12)$$

ここに、 A_1 から C_3 までの 11 の係数で、これを決定するために 6 点の標定点座標が必要だった。一般的な撮影の状況は、図-1 に示す通り、基本的には河岸からの撮影を想定している。あるいは、式(13,14)に示すように、写真撮影における共線方程式、すなわち

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \tag{13}$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \tag{14}$$

ここに

$a_{11} = \cos \phi \cos \kappa$	$a_{12} = -\cos \phi \sin \kappa$	$a_{13} = \sin \phi$
$a_{21} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa$	$a_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa$	$a_{23} = -\sin \omega \cos \phi$
$a_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa$	$a_{32} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa$	$a_{33} = \cos \omega \cos \phi$



(a) メインメニュー



(b) オープニング画面

(c) 動画入力, キャリブレーション後



(d) キャリブレーション時の標定点チェック画面

(e) 検査線を設定した画面

図-6 KU-STIVにおけるいくつかのシーン

を用いることもできる。φ, κ, ωは、カメラの角度、 X_0 , Y_0 , Z_0 はカメラの中心座標、 c は焦点距離である。式(11,12)と式(13,14)は、基本的には等価な式であるが、カメラ角度を陽的に示したのが後者の式であり、以降ではこの関係を用いる。式(13,14)における変換係数の数は、写真測量において外部変数とよばれる3つのカメラ角度、カメラ座標、および焦点距離の7つとなり、式(11,12)を使う場合よりは数が減る。カメラのレンズの内部ひずみを考える場合には、変数が増えるがここでは内部変数は無視した。また、式(3,4)の逆変換式は

$$X = (H - Z_0) \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + X_0 \quad (15)$$

$$Y = (H - Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + Y_0 \quad (16)$$

である。

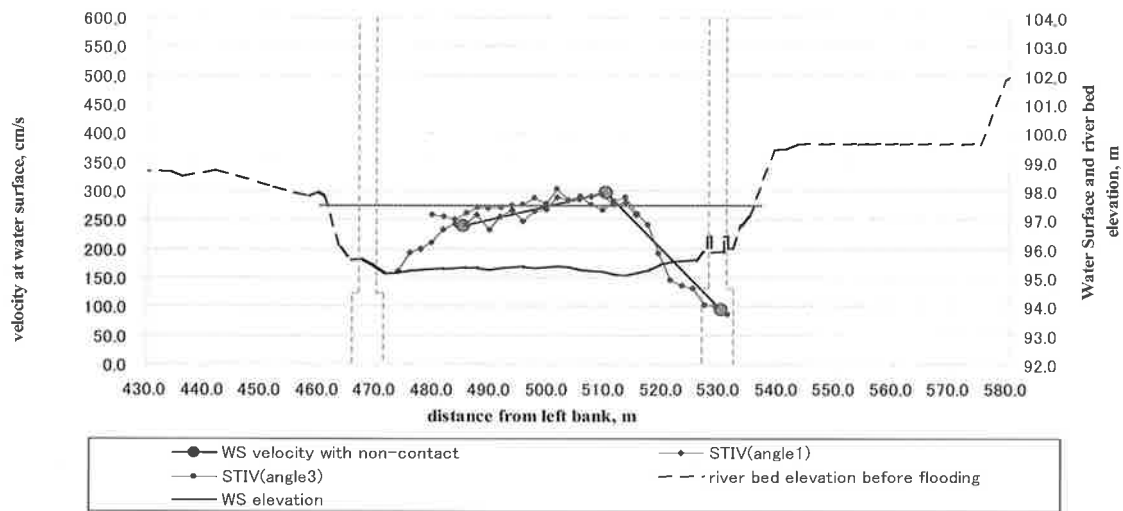


図-7 鬼怒川における表面流速分布の比較 (2011年9月)

7. ソフトウェアKU-STIVの概要

これまで、説明してきたSTIVによる解析手法を一つのプラットフォームにしたソフトウェアを開発した。このソフトウェアの機能はおおよそ以下の通りである。

- 河岸などから斜め撮影されたビデオの動画を直接読み込める。動画の再生、停止、切り取りなども可能。
- 斜め方向から撮影したひずんだ画像を幾何補正する。標定点の物理座標とスクリーン座標を個別に入力して幾何補正画像をチェックできる。
- STIVの検査線を斜め画像と幾何補正画像のどちらにおいても設定できる。
- 時空間画像(STI)を連続表示すると同時に輝度勾配テンソル法によって得られた輝度勾配の線を重ね合わせ、解析の妥当性を確認することが可能である。
- STI画像の画質を調整する様々な機能がある(ガウシアン平滑化、FFTフィルターなど)。
- 浮子追跡を可能とする、Float-PTVの機能もある

このうち、最後のFloat-PTVについての説明は割愛するが、浮子が通過時の数秒間隔の映像を多重合成画像を生成することで、浮子の追跡をマニュアルで行える機能である。図-6に、KU-STIVのいくつかのスクリーンを示した。基本的には、①動画を読み込み、②キャリブレーションで幾何補正画像をチェックし、③検査線を設定して流速を求めると、いう3つのステップで解析が行われる。最も面倒なところは、キャリブレーションであり、測量誤差や測量ミスなどがあると幾何補正が正常に行えなくなるので、標定点の測量には十分な注意が必要である。STIVによる解析は検査線が20本程度であれば1分程度で終了するために高速に解析を行える。

8. KU-STIVの適用例

最後に、いくつかの計測事例を示す。まずは、図-6に示した事例であり、図-7に結果の一例を示した。河川は鬼怒川で、2011年に9月における出水が対象である。この観測では、いくつかの角度から同じ新鬼怒橋下流の地点を撮影した画像と電波流速計による結果を比較したが、いずれも良好に一致していることがわかる。最大流速は、3m/s程度であるが、横断分布形を含めてうまく計測できている。

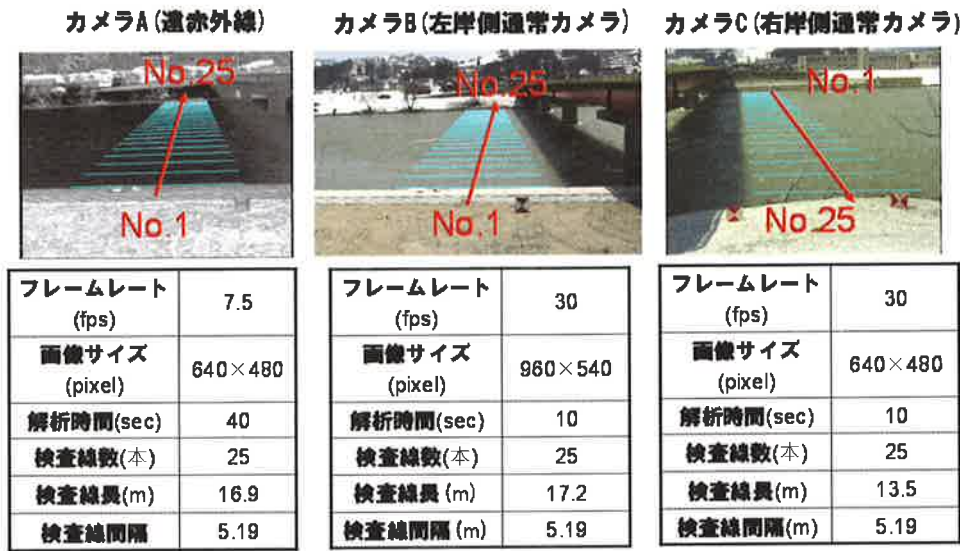


図-8 魚野川における解析条件

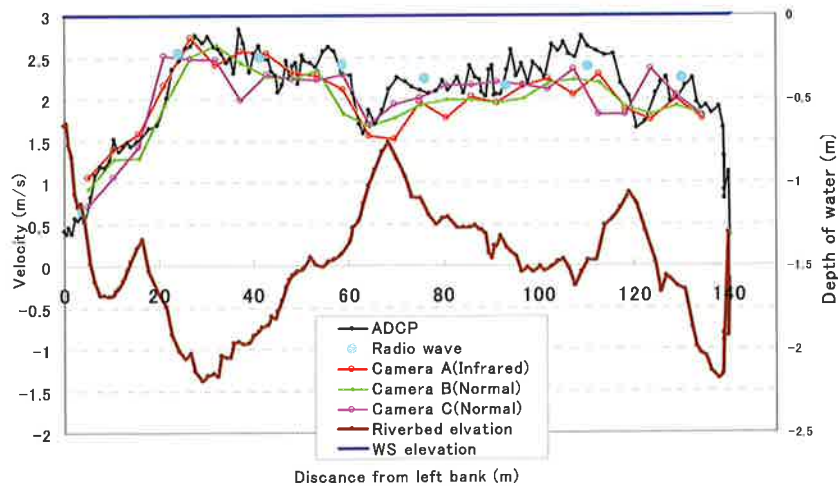


図-9 各計測手法による比較：2012年4月魚野川融雪洪水

次の適用例は、信濃川水系魚野川における2012年4月の融雪出水である。このケースでは、根古屋橋の下流断面の流れを左岸および右岸に設置したビデオカメラ、および左岸に設置した遠赤外線カメラで撮影し解析した。解析条件と検査線の設置状況を図-8に示す。ここでは水面幅約140mを25本の検査線でカバーしている。これは、厳密ではないが、浮子を同時に25個投下して得られる流速分布にも対応すると言える。得られた流速分布を比較したのが図-9である。この観測では、STIVだけでなく電波流速計やADCPによる計測も同時に実施されており、各計測手法の比較が可能である。ADCPは水面に最も近い層(水面下約30cm)におけるデータである。図-9から、多少のばらつきはあるものの、いずれの方法によっても同様の流速分布が得られていることがわかる。この中でも、STIVは家庭用ビデオカメラを利用できる点で経済的であり、計測精度に対するコストパフォーマンスに非常に優れていると言える。

9. おわりに

本稿ではビデオ画像による河川流の非接触計測手法であるSTIVについて、他の手法に対する優位性、経済性、頑健性などに解説を加えた。STIVの利点は、現在、数多く設置されている河川監視カメラの映像を利用して流速計測

を行える点であり、例えば、国土交通省九州地方整備局では、CCTVを用いてSTIV解析するためのガイドラインを作成しており、普及が進んでいる。兵庫県においても、いくつかのCCTV映像にSTIVを適用する試みが始まったところである。画像計測へのCCTV利用が広まるにつれて明らかとなってきたのは、夜間における画像の低画質化である。本来の目的である河川監視には使えても、夜間では画像が真っ暗になったり、コマ落ちが非常に多い画像情報になったりして動画を解析できるレベルにないケースが多々見られる。流速や流量の必要な箇所には、遠赤外線カメラや超高感度のカメラ等、目的に応じた機器を新たに設置すべきと考える。KU-STIVは、今後、リアルタイム化や他手法との連携などが予定されており、現地観測を支える一つのプラットフォームになることが期待される。

なお、鬼怒川における現地観測は土木研究所 (ICHARM) との共同研究によって実施されたものであり、魚野川における現地観測は、それに加えて土木学会水工学委員会流量観測技術高度化小委員会も参加して行われたものである。研究室の数多くの学生諸君の貢献度も高い。また、KU-STIVの商品化に際しては、(株)ニュージェック、(株)ビーシステムならびに神戸大学連携創造本部による多大な支援を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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，No. 497/II-28, pp. 41-50, 1994.
- 2) 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，38巻，pp. 733-738, 1994.
- 3) 藤田一郎：非接触型流速計測法を用いた実河川流の計測と問題点，ながれ，第26巻，5-12, 2007.
- 4) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of Hydraulic Research, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 5) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. : Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resources Research, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 6) 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.
- 7) 土木学会九州北部豪雨災害調査団 (団長：小松利光)：平成24年度7月九州北部豪雨災害調査団報告書，p.101, 2013.
- 8) 青木政一，藤田一郎，澤田豊明：洪水と土砂の観測モニタリング，河川技術論文集，Vol.9, pp.7-12, 2003.
- 9) 藤田一郎，椿涼太：小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発，河川技術論文集，Vol.7, pp.475-478, 2001.
- 10) 藤田一郎，椿涼太：時空間濃度勾配法による主流方向表面流速分布の現地計測，水工学論文集，46巻，pp.821-826, 2002.

著 者

藤田 一郎 所員，学術博士，河川工学