

STIVによる劣悪な撮影条件での 河川洪水流計測

FLOOD FLOW MEASUREMENTS USING STIV IN WORSE IMAGING CONDITIONS

藤田一郎¹・安藤敬済²・堤志帆³・岡部健士⁴

Ichiro FUJITA, Takazumi ANDO, Shiho TSUTSUMI and Takeshi OKABE

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学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生員 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 徳島大学大学院教授 工学研究科 (〒770-8501 徳島市新蔵町2-24)

The non-contact flood flow measurement techniques using video images have become available in the last decade, one of which is the large-scale particle image velocimetry (LSPIV). LSPIV yields successful results for various flood flow measurements such as the Yodo River, the Uono River and rivers in the other countries. However, since the method is based on the imaging techniques, the measurement becomes relatively difficult in worse imaging conditions such as low light or bad weather conditions. The space-time image velocimetry (STIV) is another candidate for surface flow measurements capable to yield streamwise velocity distributions more efficiently than LSPIV even in deteriorated image conditions. In this research, the performance of STIV is compared with LSPIV by applying them to the flood flow measurements in two rivers in Japan, the Chigusa River and the Yoshino River, both recorded during the night. It was confirmed that STIV yields reasonable results even in adverse conditions for imaging.

Key Words : surface flow measurement, STIV, LSPIV, image analysis, flood flow

1. はじめに

我が国において、河川の整備が一步一步進んできているのは確かなことであるが、河川に関連した最近の様々な出来事を考えると、河川災害や事故などを完全に防ぐには至っていないことも事実である。このような問題を解消するためにはその基本として、降雨流出過程の的確な把握が不可欠であり、特に降雨に対するアウトプットとしての流量の正確な把握は精度の高い流出予測モデルを構築していく上で最も重要である。

これまで、河川の洪水流量計測は浮子法により行われてきたが、大洪水時の計測作業の危険性や欠測あるいは計測精度について問題が指摘されている。中小河川では、流量観測そのものが行われていない場合も多い。従って、今後、河川防災の機能をより充実させるためには簡便でかつ高精度の計測法が必要となることは明らかである。このような計測法の一つとしてビデオ画像を用いた非接触法¹⁾があるが、あくまでも可視映像が計測対象であるため、ビデオ画像の画質が劣化する夜間や荒天時の計測

については検討が不十分な点もあった。そこで、本研究ではこのような画像計測にとって不利な条件下での流速計測の改善策や計測精度について調べることにした。対象は、千種川におけるCCTVの24時間映像と吉野川における河岸からの深夜撮影映像でどちらも出水期に撮影したものである。前者ではカメラフィルターに雨滴が付着するなどの劣悪な映像と深夜映像に対する処理について検討した。後者ではまったく照明がない場合の撮影法と合理的な計測法について検討を行った。画像計測法としては、Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)²⁾およびSpace-Time Image Velocimetry (STIV)³⁾を取り上げ、両者の計測性能について比較を行った。

2. 千種川の洪水計測

千種川は流路延長68km、流域面積730km²の兵庫県西端を流れる第二級河川である。水源は兵庫県・岡山県・鳥取県の県境江浪峠にあり、そこから兵庫県南西部を南流しながら播磨灘に注いでいる。この千種川は平常時の



図-1 千種川の撮影位置

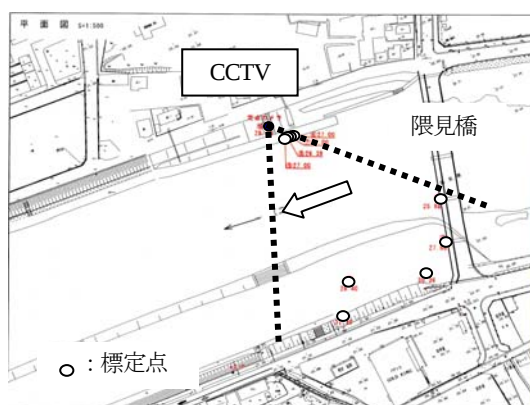


図-2 CCTVおよび各標定点の位置

水位は低いが、降雨によって水位が増しやすいという特徴をもっている。

ビデオ撮影は河口から約20km上流に位置する限見橋（図-1）の下流右岸に設置されたCCTVにより行った（図-2）。当初はネット回線によるリアルタイムの処理を目指していたが、実現できる転送速度が動画像にとっては十分ではなかったために、CCTVが設置された建屋の中にタイマーで制御したHDD（1TB）を併設し、CCTVからの映像を直接記録するシステムに変更した。タイマーは10分おきに1分間の動画(mpg形式)を記録できるように設定した。1台のHDDで約50日分のデータを記録できる。画像解析はHDDの設置後約50日でいったん引き揚げて、後処理として行った。なお、CCTVの撮影アングルは上郡土木事務所内でプリセットしており、設定したアングルの画像に対しては図-2に示した標定点の測量結果から、予め幾何補正係数を求めている。

2.1 観測概要

今回、対象とする洪水は2007年7月14日から2007年7月15日の早朝にかけて発生したものであり、1つのハイドログラフに相当する河川表面流の映像を10分間隔で取得することができた。観測日は12日から続く降雨により、

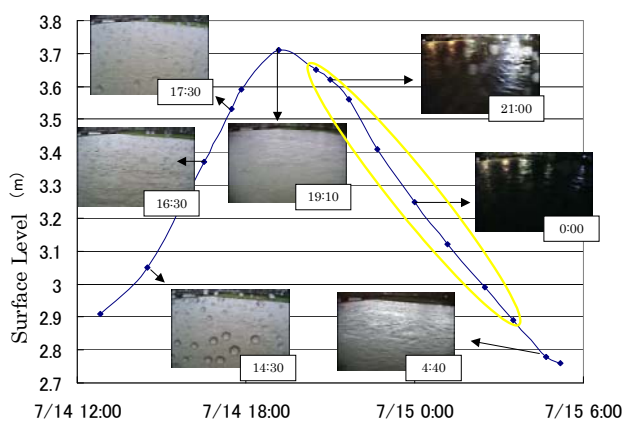
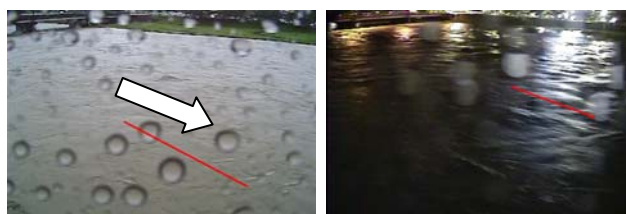


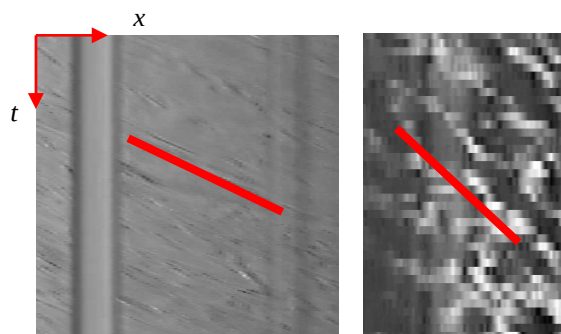
図-3 水位ハイドログラフと各時間帯の撮影画像状況



(a) 雨滴付着時

(b) 夜間撮影時

図-4 千種川における低画質のビデオ画像



(a) 雨滴付着時

(b) 夜間撮影時

図-5 時空間画像

平常時は1mを下回る水位が最大3.71mになるほどであった。計測対象は、水位の高い14日11:40から翌15日05:10までとした。図-3にハイドログラフといくつかの時刻における取得画像の例を示した。時刻によっては画面に雨滴が付着している様子、また、時間の経過に伴って夜間に移行し、翌日になって輝度が回復する様子がわかる。

2.2 STIVの適応

河川表面流の画像計測法であるLSPIVは、パターンマッチングに基づく一般的なPIV(Particle Image Velocimetry)を河川流計測用に修正したものであり、国内外に多くの適用事例がある^{5,7)}。この手法は適切な照明がない場合などにはパターンマッチングの精度が低下することが懸念されるため、本研究ではSTIV^{3,8)}を中心に解析を行うこととした。STIV解析では、図-4に示すよ

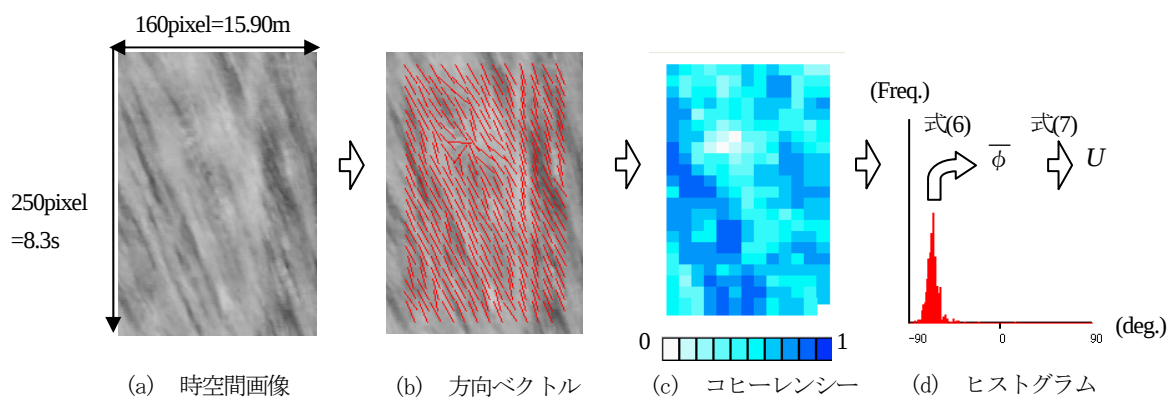


図-6 STIVの手順

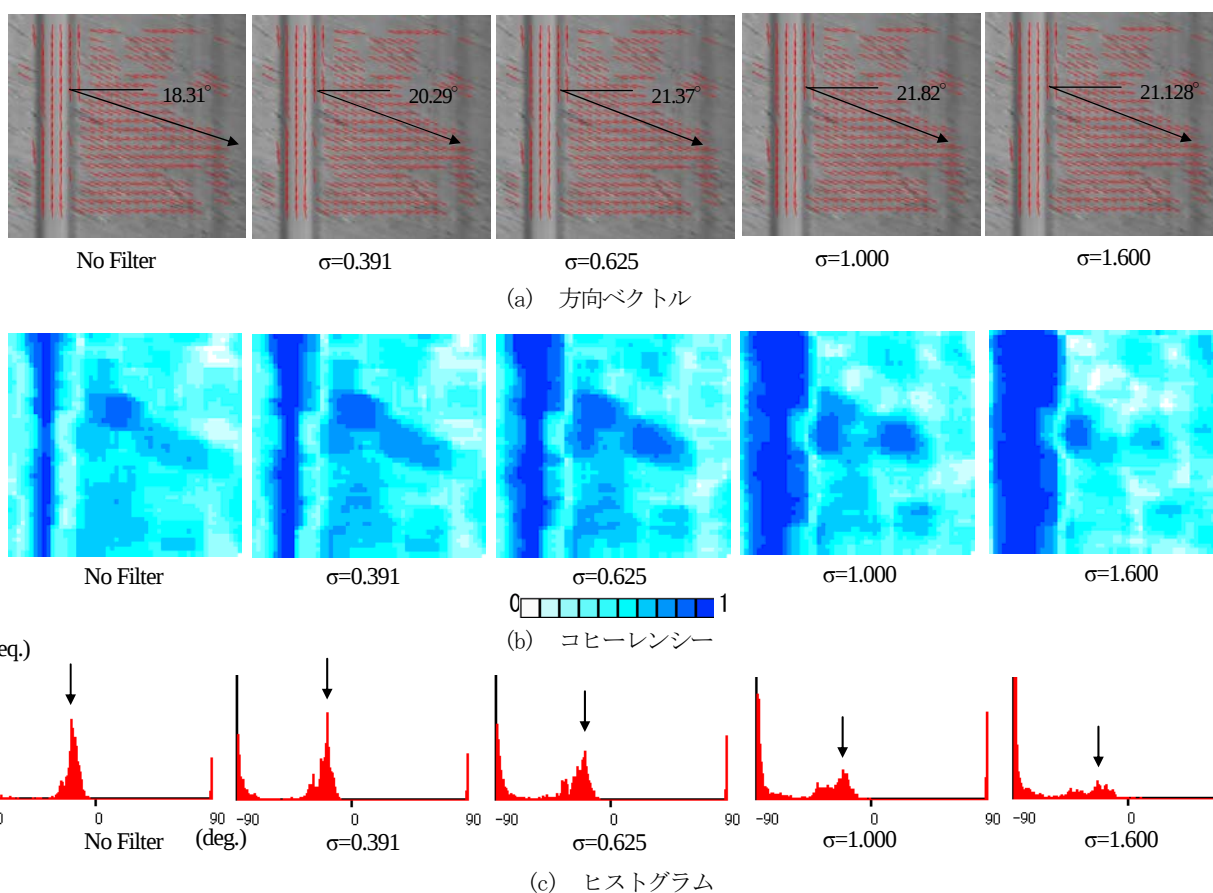


図-7 平滑化フィルタによる影響

うに流れの主流方向に沿うように検査線を設置し、検査線上の輝度の時間変化を表す時空間画像上のパターンの傾きから平均流速を求める。図-4には敢えてLSPIVでは解析が困難な画像ケースを示した。

図-5にこの検査線から得られる時空間画像を示す。図-5(a)では、時間的に変化しない縦方向の線が数本現れているが、これはレンズフィルターに付着した雨滴に対応する。この部分を除けば斜めの縞パターンが明瞭に現れている。図-4(b)は夜間画像の例で雨滴の付着に加えて全体的に光量が不足しているため暗い部分も多い。水面を明るくしているのは背景の橋の街灯や人家からの

光であり、CCTV側からの人工的な照明は使用していない。図-5(b)には図-4(b)に引いた検査線の時空間画像を示すが、図-5(a)とは異なったパターンを示している。通常、CCTVでは暗くなった場合の光量不足を補うために撮影モードがノーマルモードからフレーム蓄積モードへと自動的に変更される。その際にいわゆるコマ落ちが発生するために、時空間画像のパターンは階段状のものへと変化する。ただ、図-5(b)にも示したように、目視では斜めのパターンを識別することは容易である。LSPIVでは画像時間間隔が重要なパラメータであるため、このようなコマ落ち画像への適用は難しい。

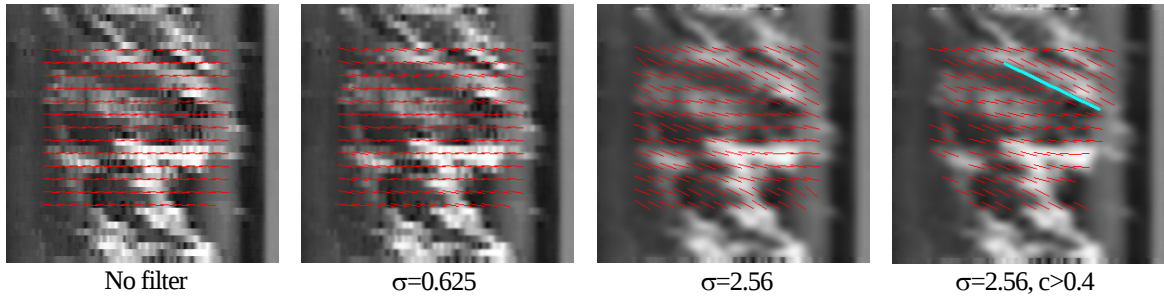


図-8 不鮮明な時空間画像への適応結果

2.3 STIVの概要

STIVは図-5に示したような時空間画像に現れる縞パターン³⁾の平均勾配を自動的に算出する手法である。この方法ではノイズや遮蔽物による影響を受けにくく、図-5のような悪条件を含む様々な画像条件下でも縞パターンの平均勾配を抽出できる。計算アルゴリズムも比較的簡単であるため計算の高速化が図れる。STIVのアルゴリズムでは、縞パターンの勾配 ϕ を次式で求めることができる³⁾。

$$\tan 2\phi = \frac{2J_{12}}{J_{22} - J_{11}} \quad (1)$$

$$J_{11} = \int_A \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial g}{\partial x} dx dx, \quad J_{12} = \int_A \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial g}{\partial t} dx dt, \quad J_{22} = \int_A \frac{\partial g}{\partial t} \frac{\partial g}{\partial t} dt dt \quad (2,3,4)$$

ここに、 $g(x,t)$ は時空間画像の輝度分布、 A は画像上で細分化した積分領域を示す。STIVで重要なパラメータは次式で与えられるコヒーレンシーである。

$$C = \frac{\sqrt{(J_{22} - J_{11}) + 4J_{12}^2}}{J_{11} + J_{22}} \quad (5)$$

この値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で1、全くパターンがない場合に0の値をとる指標である。

STIVの解析手順を図-6に示す。まず、ある検査線に対して図-6(a)のような時空間画像を生成する。次に、時空間画像を細分割した積分領域に対して式(1)から勾配ベクトルを算出する(図-6(b))。同時に各勾配ベクトルに対するコヒーレンシーを求める(図-6(c))。このコヒーレンシーを重み関数として勾配ベクトルの角度の無次元発生頻度を示したのが図-6(d)であり、この分布から次式により平均角度を算出する。

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^N \phi(i)C(i)}{\sum_{i=1}^N C(i)} \quad (6)$$

ここに、 N は勾配ベクトル級数、 $\phi(i)$ 、 $C(i)$ は各積分領域に対する勾配ベクトル及びコヒーレンシーである。最後に、検査線上の平均流速 U を次式から算出する。

$$U = \frac{S_n}{S_t} \tan \bar{\phi} \quad (7)$$

ここに、 S_n ：時空間画像の空間軸のスケール(m/pixel)、

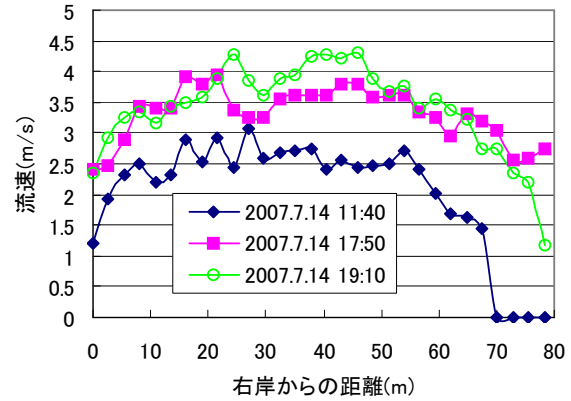


図-9 STIVにより求めた表面流速分布

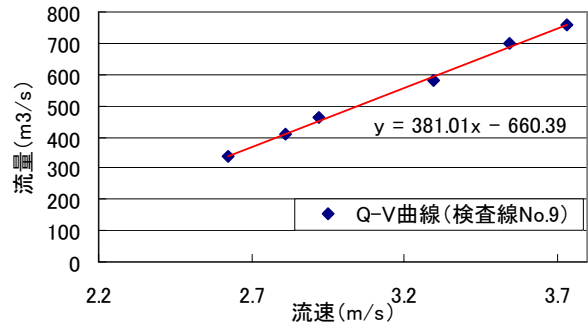


図-10 Q-V曲線

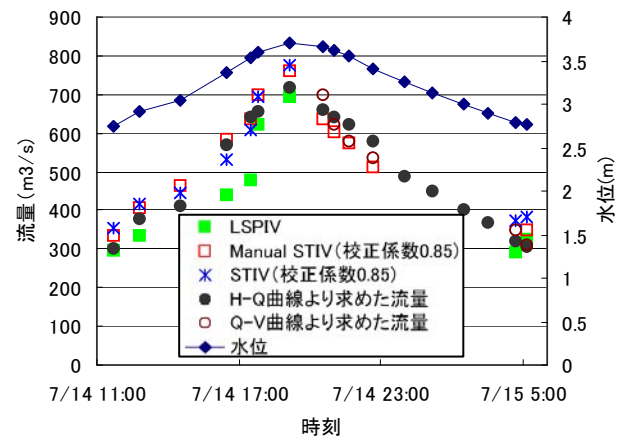


図-11 流量および水位のハイドログラフ



図-12 撮影画像 (2007. 7. 14 0:51)

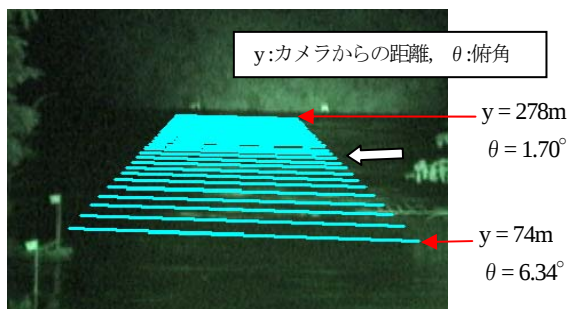


図-13 検査線位置と俯角

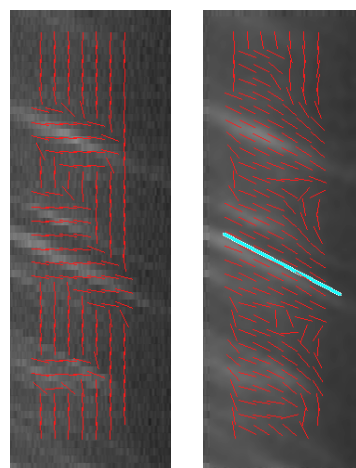
St : 同じく時間軸のスケール(s/pixel). ただ、実際のSTIV解析では、時空間画像のノイズを除去するために平滑フィルタの適用が有効となる. 図-7は標準偏差の異なるガウシアンフィルタを適用させた場合の比較図である、ヒストグラムの尖鋭性およびコヒーレンシー分布からこの場合の適切な値はおおよそ $\sigma=0.391$ だと判断できる. また、図-7(c)には雨滴と流れの縞パターンに対応して2つのピークが現れているが、表面流に対応するヒストグラムの部分のみを用いれば雨滴の影響を容易に排除できる. 図-7(a)にはSTIVにより得られた角度、図-7(c)にはその値を矢印で示しているが得られた角度は縞パターンの角度に良好に一致していることがわかる.

2.4 コマ落ち画像への適応

コマ落ち画像にSTIVを適応した場合の結果を図-8に示す. フィルタリングをしないまま解析を行うとコマ落ちのために水平方向にベクトルが生成される. ガウシアンフィルタのサイズを大きくすると適切なベクトルが現れ始める. 今回の場合、 $\sigma=2.56$ が適切な角度をもたらしている. さらに、コヒーレンシーをピックアップの閾値 (例えば $c>0.4$) とすることで目視の角度に一致する方向ベクトルが得られる (図-8の右端の図).

以上のような手順で求められた表面流速分布を図-9に示す. 水位変化に応じて流速分布も全体的に変化している. ただし、深夜においては川幅全体で流速を求めることは困難であったため、流れの代表点 (今回は右岸から30mの点) の表面流速と流量の関係 (Q-V曲線: 図-10) を昼間時のSTIV解析から求めておき、夜間時にはその点の表面流速のみから流量の推定を行った.

図-11にはいくつかの方法で得られる流量を比較した.



(a) 元画像 (b) フィルタ適用画像
図-14 ガウシアンフィルタ($\sigma=2.5$)の適用

LSPIVの解析結果が過少となっているのは雨滴付着の影響である. 図には、現地のH-Q曲線から求められる流量も示しているが、STIVからも同様の流量ハイドログラフが実測値として得られている. Q-V曲線を用いた推定も良好であった. ただし、川沿いの照明が消え、さらに暗くなった0:00から3:30までの時間帯においては解析が困難であった. 今回の計測地点は河川改修による河川幅の増幅が予定されており、改修後は従来のH-Q曲線を使用できなくなるため、STIVによる流量計測の妥当性が得られたことは有意義なことと考える.

3. 吉野川の洪水計測

3.1 洪水計測の概要

対象は平成19年7月14日22:30から翌15日00:51に吉野川で夜間に発生した洪水である. 撮影場所は徳島県三好市三野町太刀野付近であり、解析を行った時間帯は7月14日22:30, 23:12, 00:08, 00:51の4ケースである. 現地には外光はほとんどないため、河川表面は強力なハロゲン光源 (株オーム電機製、超ウルトラサーチャイ: 光量1000万カンデラ) で照明し、家庭用のビデオカメラの赤外線モード (night vision mode) で撮影した. 撮影された画像例を図-12に示す. 今回の撮影方法により、深夜にもかかわらず対岸まで良好に水面が視認できていることがわかる.

3.2 STIVの適応

STIVの検査線位置を示した画像を図-13に示す. 撮影は左岸堤防から行っているため、撮影の俯角は最も近いところで6.78度、最も遠いところで1.82度であった. 対岸までは約300mの距離である. 図-14(a)に時空間画像の例を示すが、元画像では輝度分布が階段状に変化しておりコマ落ちが発生している. そこで、千種川の場合と

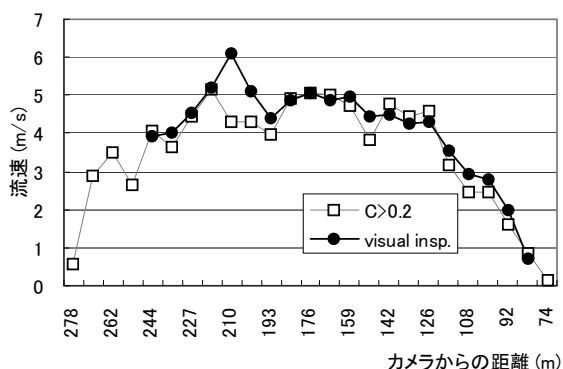


図-15 表面流速分布(2007. 7. 14 23:12)

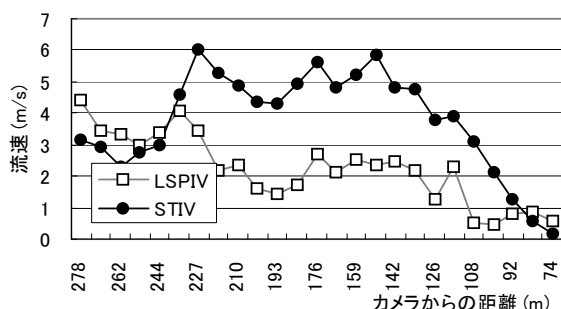


図-16 STIV解析とLSPIV解析の比較
(2007. 7. 15 00:12)

同様に比較的大きなサイズのガウシアンフィルタ ($\sigma=2.5\text{pixel}$) を適用した。結果を図-14(b)に示すがこの平滑化処理により明瞭な勾配ベクトルが得られている。

図-15は縞パターンの勾配を目視とSTIVアルゴリズムで求め、表面流速分布を比較した結果である。STIV解析ではコヒーレンシーの値が0.2以上の勾配ベクトルを用いて重み付けを行っている。多少のばらつきは見られるが両者はよく一致している。STIVでは目視での勾配検出が困難な場合でも流速が得られた。

図-16にはLSPIVとの比較結果を示した。コマ落ちのためにLSPIVで使用する画像の適切な時間間隔が得られないことが原因で、良好な結果は得られなかった。LSPIVを適用するには、コマ落ちの発生しない超高感度ビデオカメラが必要である。

4. 結論

非接触の河川表面流計測法として著者らが開発したSTIV法を比較的規模の大きな実河川の洪水流計測に適用した。河川幅は千種川では100m程度、吉野川では300m程度であった。撮影条件としては、レンズのフィルタに水滴が付着した場合や夜間撮影のためにコマ落ちが発生した場合など、従来のLSPIVでは解析が困難なケースを対象とした。気象条件から見たSTIVの適応限界は、強風により水面波紋の良好な移流状況が発生しない場合や豪雨により視界が遮断される場合が考えられる

が、本研究ではこのような問題は発生しなかった。本研究の結論をまとめると以下のようである。

1. 雨滴付着などの影響は勾配ベクトルのヒストグラムを適切に設定することで排除可能
2. 夜間撮影に伴うコマ落ちの影響は平滑化フィルタの適用で低減可能
3. 強力な照明装置と赤外モードの撮影で川幅300m程度までの計測が可能
4. 俯角が数度の撮影アングルでもSTIVで計測可能
5. コマ落ちがある画像ではLSPIVの適用は困難

本研究では、時空間画像の前処理として平滑化フィルタを用いているが、フィルタサイズの選択には任意性が残されている。今後は画質に応じたフィルタサイズの自動決定法の開発、また、CCTVからの映像を自動取得して連続解析可能なシステム等の開発を進めていく予定である。

謝辞

千種川の計測では、上郡土木事務所および株式会社NTTインフラネットから協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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，pp.5-12，2007.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 藤田一郎：実河川を対象とした画像計測技術，土木学会水工学委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ0.3-A-2，2003.
- 5) Fox, J.F. and Patrick, A.: Large-scale eddies measured with large scale particle image velocimetry, Flow measurement and Instrumentation, 19, pp.283-291, 2008.
- 6) Kantoush, S.A., De Cesare, G., Boillat, J.L. and Schleiss, A.J.: Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling, Flow measurement and Instrumentation, 19, pp.139-144, 2008.
- 7) Meselhe, E.A., Peeva, T. and Muste, M.: Large scale image velocimetry for low velocity and shallow water flows, Journal of Hydraulic Engineering, 130(9), pp.937-940, 2004.
- 8) 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.

(2008. 9. 30受付)