

時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

APPLICATION OF TWO DIMENSIONAL FAST FOURIE TRANSFORM TO RIVER SURFACE FLOW MEASUREMENT WITH SPACE TIME IMAGE

原浩気¹・藤田一郎²
Ichiro FUJITA and Hiroki HARA

¹ 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)

² 正会員 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)

As one of the non-contact river flow measurement methods, an image analysis method using space-time image of river surface flow, namely space-time image velocimetry (STIV), has been developed by the authors. In this method, space-time image (STI) for a line segment placed along the streamwise direction is generated and the velocity can be calculated from the mean gradient of striped pattern that appeared on STI. In order to improve the accuracy by removing noise in STI, conventional STIV uses the smoothing filter in the physical domain. However, there still remains uncertainty in the measurement accuracy for deteriorated space-time images. In the present method, we transformed the STI into a Fourier space by using a 2D fast Fourier transformation (FFT) to extract only the information directly related to surface flow. It was made clear that the new method is more accurate and efficient than the previous method.

Key Words: STIV, 2D-FFT, river flow measurement, flood discharge, image analysis

1. はじめに

実河川の非接触型計測手法には、表面流速計測法として電波流速計¹⁾、UHFレーダー²⁾、航空写真解析^{3,4)}、ヘリ画像解析⁵⁾あるいはビデオ画像計測などがあり、流量計測法として超音波ドップラー流速計^{6,7)}などがある。これらの手法には各々特徴があるが、著者らはビデオ画像計測法として河川表面のパターンの相互相関から流速分布を求めるLSPIV(Large-Scale Particle Image Velocimetry)⁸⁻¹²⁾および検査線上の時空間画像から流れ方向の流速分布を求めるSTIV(Space-Time Image Velocimetry)^{13,14)}を提案してきている。このうち、LSPIVに関しては国外の実河川への適用例も増えてきており¹⁵⁻²⁰⁾、Musteら²¹⁾はこれまでの研究レビューを行っている。固定アングルの河川監視カメラを利用したリアルタイムの解析システムの構築も行われている²²⁾。

STIVは、LSPIVでは解析が困難か不可能と思われるような劣悪な撮影条件下での解析も行える可能性が高く、藤田ら²³⁾は夜間のコマ落ち画像やフィルターに水滴が付着した画像に対する解析例を示している。STIVの優位性は、2008年7月28日に神戸市内の都賀川で発生した水難事故時の流量を、カメラマン撮影のビデオ画像から良好に推定できた^{24,25)}ことから明らかである。他の手法ではこのような事後の計測は不可能である。このように、STIVを含めた画像解析の特徴は、通常は水深がほとんどないような

中小河川における突発的な出水に対しても、映像さえ記録されていれば、事後の解析で流速や流量を求めることができる点であるが、STIVをベースとしたリアルタイムシステムはまだない。今後の頻発が懸念される中小河川での突発的な出水について検討するためには、河川を常時モニタリングし、同時に計測するためのシステム開発が急務と考えられる。

ただ、これまでのSTIVの解析アルゴリズムでは時空間画像にノイズが含まれていた場合の処理パラメータの与え方に任意性があり、自動計測システムへのそのままの適用には若干の問題があった。そこで、本研究では、時空間画像に二次元FFT(Fast Fourier Transform)を施し、周波数空間を用いた画質改善を試みると同時に水面に発生する波紋の特徴について考察を行った。

2. STIV の概要

STIV は河岸や橋梁から撮影したビデオ画像から連続した画像を取得し、画像上に設置した検査線の輝度値を時間軸方向に積み重ねて時空間画像(STI: Space-time image)を作成し、この時空間画像に生じる縞パターンから角度から流速を算出する手法である。一例として、2007年に千種川で発生した洪水計測の際に用いた斜め画像と検査線の設置状況を図-1に示す。検査線は流れ方向に設置する必要があり、河川流に垂直な撮影アングルの場合にはその



図-1 検査線の配置

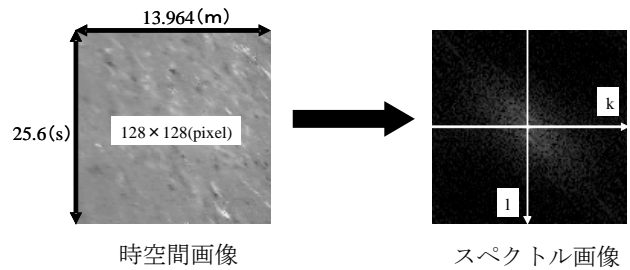


図-2 二次元フーリエ変換

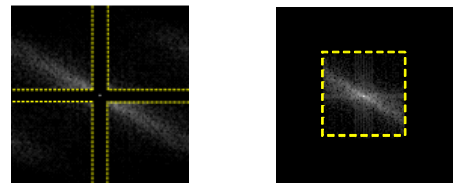
設置は比較的容易であるが、図-1のように斜めに撮影されている場合には、主流方向を決定するのは難しい。このような場合には一旦、斜め画像を幾何補正し、数秒程度の画像にLSPIVを適用して予め主流方向を求め、これに沿って検査線を設定するのが合理的である。図-1ではこの手順で向きを決定している。また、水面上の検査線長さは、場所によってスケールが異なるため、画像のスクリーン座標と水面に相当する物理座標の写像関係を、事前か事後に標定パネルなどを現地に設置して求めておかなければならない。ここでは二次射影変換式を用いて両座標の写像関係を決定している。

STIVを含めた画像計測における必要条件是、少なくとも水面に流れに追従する凹凸（以降、水面波紋と称する）が発生していることである。このような水面波紋発生は、前述の電波流速計やUHFレーダーでも計測の必要条件とされている。従って、流れ方向とは無関係な重力波が発生している場合や静止に近い状態では良好な計測結果は得られない。また、ある検査線に対するSTI上には、その上を通過する水面波紋の特徴が縞パターンの形で現れる。流速計測の目的だけであれば、STIVのアルゴリズム^{14,23)}で縞パターンの平均勾配を求めればよいが、縞パターンそのものは様々な波長の波動成分の影響を受けている。従って、時空間平面であるSTIを周波数分解すれば各波長の特徴を抽出できる可能性がある。そこで、本研究では、単なるノイズ除去の手段としてだけでなく、水面波紋を構成する任意の波長成分に関する検討をSTIに二次元FFTを適用することにより行った。

3. 二次元高速フーリエ変換(FFT)

(1) スペクトル画像

スペクトル画像は画像を二次元フーリエ変換することで得られる波数空間の画像のことである。図-2に具体例を示すが、横軸の k は元の画像を横方向にFFTした結果得られる波数、縦軸下向き l は縦方向にFFTした結果得られる波数となっている。スペクトル画像の中央部は波数が小さいため画像の低周波成分に対応し、逆に中央部から離れるにしたがって波数が増大するため、相対的に高周波の画像成分に対応している。



(a) High Pass Filter (b) Low Pass Filter

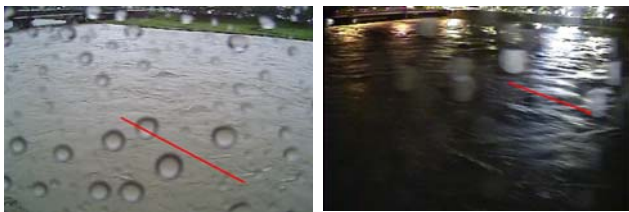
図-3 二次元逆フーリエ変換を用いたフィルタ

(2) 二次元逆フーリエ変換を利用したフィルタ

二次元逆フーリエ変換は、スペクトル画像から元の画像への逆変換である。したがって、逆変換の際に、スペクトル画像の必要な部分だけを用いれば周波数を取捨選択することになるため、周波数空間でフィルタを施したことになる。すなわち、低周波成分をカットしてHigh Pass Filterとして用いる場合には、図-3(a)に示したようにスペクトル画像の中央部分の値をクリアした後に逆変換を行えばよい。逆に、スペクトル画像の周囲の高周波成分をカットして、Low Pass Filterとして利用する場合には、図-3(b)に示したようにスペクトル画像の周辺領域の値をクリアして逆変換すればよい。一般的にHigh Pass Filterは輪郭強調、Low Pass Filterは平滑化フィルタとして知られているが、この2つのフィルタを組み合わせれば、Band Pass Filterとして任意の周波数に対応する画像を抽出できるはずである。本研究では、このようなBand Pass Filterを時空間画像へ適用した。画像処理の分野では二次元FFTの適用は一般的に行われているが、河川表面の時空間画像への適用から計測精度の改善や水面波紋の物理特性を検討した例はこれまでない。

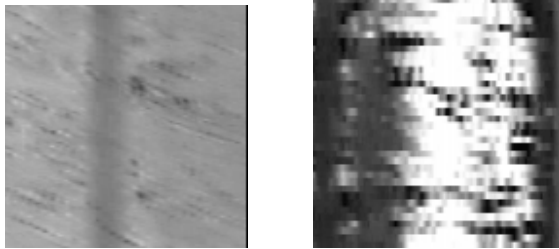
4. 逆フーリエ変換を用いたフィルタの適用

STIV解析では時空間画像内のパターンの傾きから流速を算出するため、LSPIVと比較すると画像のノイズや、遮蔽物の影響を受けにくい。例えば、図-4に示すように、カメラのレンズフィルタに雨滴が付着している場合や、夜間撮影のために光量が十分ではなく、撮影ビデオがコマ落ちしている場合などがそうである。雨滴があると特徴の強いパターンが固定するためにLSPIVのマッチングが良好に行えず、流速はゼロに近い値が算出されてしまう。ま



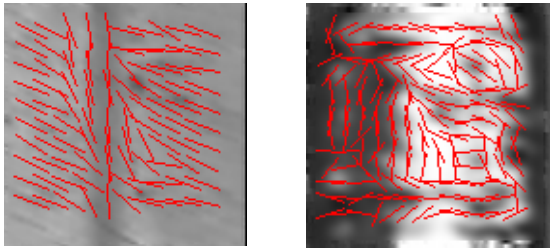
(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

図-4 千種川における低画質のビデオ画像



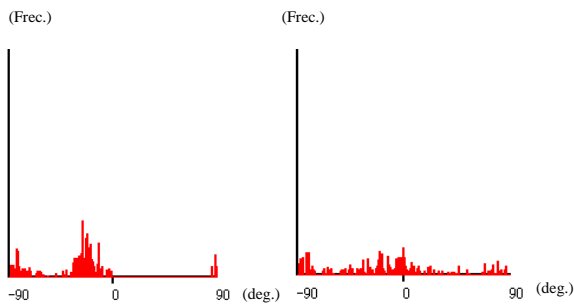
(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

図-5 時空間画像 (図-4 の検査線に対応)



(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

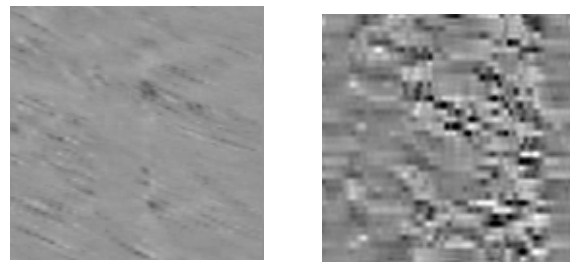
図-6 STIV の適用結果 (従来法)



(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

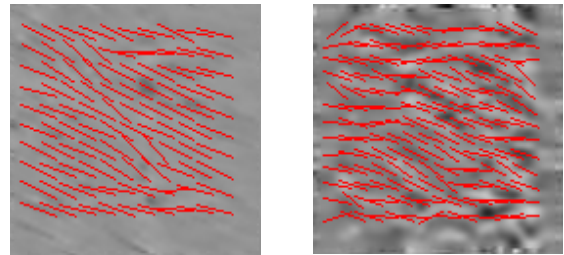
図-7 方向ベクトルの勾配ヒストグラム (従来法)

た、コマ落ちがある場合には、連続画像間の時間間隔が不等間隔になるため、正確な流速値は算出できない。図-5 は、図-4 に示した検査線に対応する時空間画像を示すが、図-5(a)では、雨滴の影響は中央部の縦線として現れているものの背景の縞パターンは明瞭である。図-5(b)はコマ落ちのために階段状のパターンが生じており、目視でもパターンの方向を識別するのは容易ではない。図-6 に従来型のSTIVを適用した結果を示す。STI上のパターンの方向



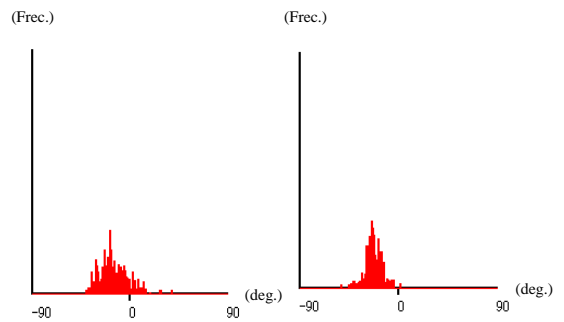
(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

図-8 逆変換フィルタ後の時空間画像



(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

図-9 STIV の適用結果 (新手法)



(a) 雨滴付着時 (b) 夜間撮影時

図-10 方向ベクトルの勾配ヒストグラム (新手法)

に対する勾配ベクトルは良好に得られているが、雨滴やコマ落ちなどの影響で滑らかな分布ではない。藤田らは²³⁾、雨滴付着の場合、図-7 に示した勾配ベクトルの角度のヒストグラムの範囲を適切に絞り込むことによって、波紋の動きのみに対応するデータの抽出に成功した。また、夜間撮影画像の場合には、ヒストグラムの平坦となるため、STIに適切なサイズの平滑化フィルタ (Gaussian Filter など) を適用して妥当な勾配ベクトルの抽出を行った。ただ、どちらのケースにおいても、ヒストグラムの範囲設定や平滑化フィルタのサイズ選択に任意性が残るため、汎用性に欠けていた。

そこで、同じ STI に前述の 2 次元 FFT と逆変換を適用した結果を図-8 に示した。低周波成分の除去により、雨滴の影響が良好に除去されていることがわかる。夜間撮影画像に対しては輝度分布が平滑化されコマ落ちの影響が弱められている。STIV による勾配ベクトルの算出結果を図-9、勾配のヒストグラムを図-10 に

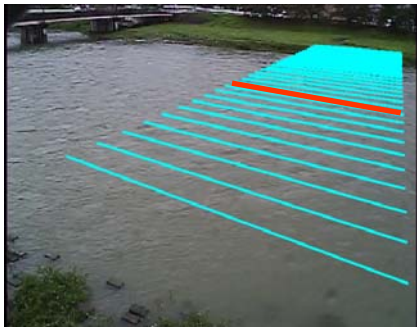


図-12 検査線 No.10 の配置図

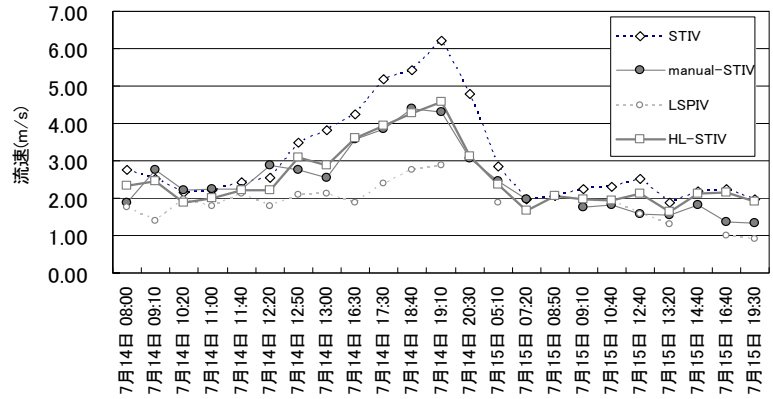


図-13 流速結果(検査線 No.10)

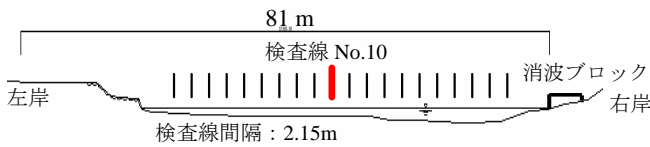


図-11 河床断面図

示すが、勾配のヒストグラムはどちらのケースでも明瞭なピークを与えており、従来法より良好な結果が得られることがわかった。なお、ここでは、波長に換算して0.42～4.66mのノイズをカットした。ノイズカット範囲の影響に関する考察については後述する。

5. 千種川洪水流への適用

ここでは、新手法である二次元FFTを用いたSTIV(ここではHL-STIVと称する)の有効性を調べるために、千種川洪水の約1日分の画像データを解析した。比較のために、LSPIV、従来型のSTIVおよび時空間画像のパターンの傾きをマニュアル操作で求めるmanual-STIVでも解析を行った。manual-STIVでは、モニタ画面上にSTIを大きく表示し、目視で確認できるSTIの縞パターン勾配にそって、マウスでラインを描画し、そのラインの平均的な角度を用いて算出している。したがって、manual-STIVは操作の手間はあるものの、妥当な平均勾配を代表するデータを与えるものとして比較に値する。

(1) 洪水の概要

対象とした洪水は、2007年7月14日から2007年7月15日の早朝にかけてのものである。観測日は7月12日から続く降雨により、平常時は1mを切る水位が最大3.71mになるほどであった。前述のように撮影の時間帯によっては、カメラのレンズに水滴が付着していたり、夜間のため波紋がほとんど見えていなかったりしており、通常の画像解析では困難と思われる画像も含まれていた。また検査線の位置を図-11に示した河岸横断面図に記入している。

(2) 解析結果

今回の解析は、流速の時間変化を把握するため、図-12に示す検査線No.10(太線)を対象を絞った。

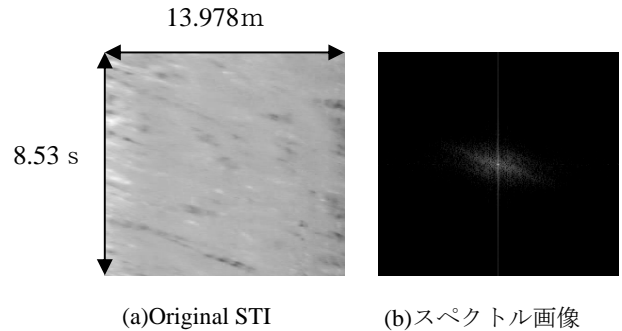


図-14 周波数解析に用いたデータ

検査線の物理長さは16.1m、流速は10sの平均で算出している。解析結果を図-13に示す。ただし14日の20時30分から15日の5時10分までの時間帯は、周囲の街灯が完全に消灯し、解析が困難であったため省略している。そしてここでは、前述のようにmanual-STIVによる結果を代表値と考える。図-13より、従来型STIVは昼間の計測は良好であるが、夜間においては過大な流速値を与えている。これは、図-7(b)にも示したように、STIに対する平滑化処理が十分ではなく良好なヒストグラムが得られなかったことが要因と思われる。LSPIVの結果はノイズが比較的少ない昼間では良好であるが、雨滴の影響や夜間では流速値の大幅な低下が見られる。これらに対し、新手法のHL-STIVは、全体にわたって良好な結果を与えている。ノイズカットの範囲は4章で示した値と同じである。洪水波の到達に伴って流速が2m/sから4.5m/s程度まで急激に増大し、その後再び2m/s程度まで低減している様子がよくわかり、新手法の有用性を検証することができた。

6. 時空間画像の周波数解析

時空間画像(STI)には、河川表面に発生した様々な波長の波が混在した形で写しこまれている。そこで一つの試みとして、FFT解析のバンドパスの周波数(波長)を変化させ、各成分の波の特徴を調べてみた。対象にはノイズの少ない時間帯のSTIを選んだ。用いたSTIとそのスペクトル画像を図-14に示す。スペクトル画像では、1ピクセルが1波数に相

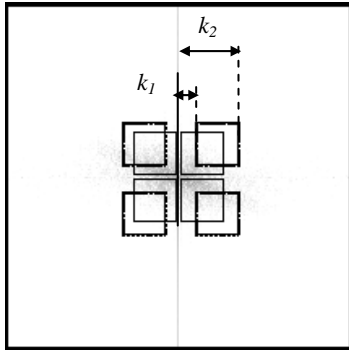


図-15 カット周波数の範囲:スペクトル画像上(画像の輝度は反転して示した)

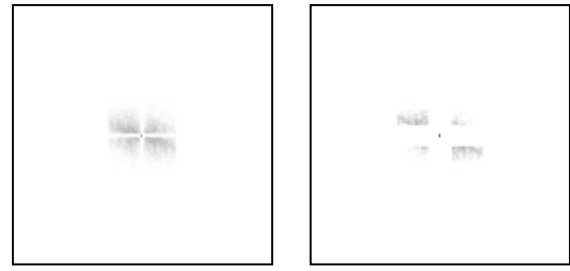
表-1 カット周波数の範囲

| CASE | k1 | k2 | λ min(m) | λ max(m) |
|------|----|----|------------------|------------------|
| 1 | 1 | 33 | 0.424 | 13.978 |
| 2 | 2 | 34 | 0.411 | 6.989 |
| 3 | 3 | 35 | 0.399 | 4.659 |
| 4 | 4 | 36 | 0.388 | 3.494 |
| 5 | 5 | 37 | 0.378 | 2.796 |
| 6 | 6 | 38 | 0.368 | 2.330 |
| 7 | 7 | 39 | 0.358 | 1.997 |
| 8 | 8 | 40 | 0.349 | 1.747 |
| 9 | 9 | 41 | 0.341 | 1.553 |
| 10 | 10 | 42 | 0.333 | 1.398 |

当するため、波数は整数単位でしかカウントできない。ここでは、図-13(b)に示したスペクトル成分のうち、有意な値の範囲が順次部分的にカバーされるように、図-15に示した正方形の範囲内のデータのみを活かして逆変換を行っていった。すなわち、低波数側の波数1を k_1 、高波数側の波数を k_2 としてそれぞれの値を変化させて逆変換した。ただし、今回の解析では、波数の差は一定とした。なお、図-14では、見やすくするために色を反転させている。後述の図-16でも同様である。

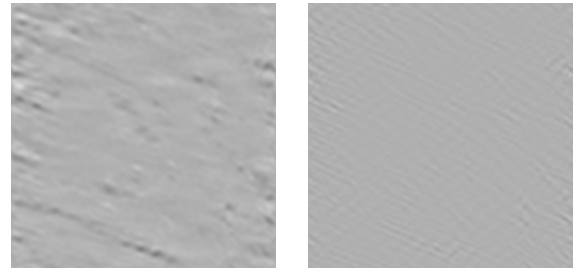
今回、チェックした周波数の範囲を表-1に示す。具体的には低周波側の k_1 の値を1から10まで変化させた。 k_1 に対応するのは波紋の最大波長であり、その範囲は実スケールで1.4~14mに相当する。逆に k_2 に対応するのは波紋の最小波長であり、0.33~0.42mが今回の実スケール範囲である。例として、表-1のCASE1とCASE10について周波数カット後のスペクトル画像を図-16、これらを用いて逆変換によりSTIを再生したものを図-17に示した。長い波長が含まれているCASE1は、図-14に示したオリジナルのSTIと大差ないSTIが生成されているが、波長の範囲が狭いCASE10では、微細な波紋のみが抽出されている。微細な波紋でも斜めの縞パターンは明瞭に現れている。

各CASEで最小波長に大きな差はないので、CASEの違いには最大波長の影響が反映されている。そこで、各CASEの再生STIに対してSTIVを適用し、波紋の移流速度の比較を行ってみた。結果を図-18に示した。波長が短くなるにつれて波紋の



(a) CASE 1 (b) CASE 10

図-16 周波数カット後のスペクトル画像



(a) CASE 1 (b) CASE 10

図-17 周波数カット後のSTI

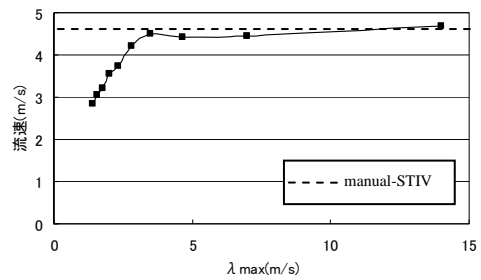


図-18 最大波長毎の波紋移流速度

移流速度が明らかに減少していることがわかる。逆に見ると、最大波長の増大とともに波紋の移流速度は一定値に漸近する傾向が見られる。洪水時に水面に発生する波紋は、非常に高いレイノルズ数での粗面乱流場において水面下の乱流構造の影響を強く受けて水面が変形した結果出現するものである。その変動の中には長さスケールが数メートルのものから数センチのものまで含まれている。STIの中で明暗がはっきりし、特徴的な縞パターンとして現れているのが波長が5メートル程度の波紋であり、その移流速度はこれ以上のスケールの波紋が含まれていてもほとんど変化していない。実河川を対象としたLSPIVでは一辺が数メートルから十メートルオーダーの矩形面内のパターンの移動を追跡するが、一般にテンプレートサイズを変えても流速値に大きな変化が見られないのはこのような波紋の特性のためと考えられる。逆に言えば、微細な表面パターンが捕らえられていなくても大スケールの波紋の移流を把握すれば十分であると言える。

一方、波長が1mに満たない波紋は波長の減少とともに移流速度が低下している。微小振幅波理

論に基づく解析では波紋の移流速度が表面流速より低下するとの指摘²⁶⁾もあるが、今回の解析では最大波長が1メートル程度の波紋がこれに対応しているのではないと思われる。流木の流下速度などとの比較から、表面流速は図-18で漸近した値にほぼ等しいことがわかっているため、FFT解析で高周波分を除去すればSTIV解析による高精度で安定的な流速・流量解析が期待できる。

7. あとがき

本研究では、河川表面に想定した検査線上の輝度の時空間分布から流れ方向の流速を求めるSTIV法の精度向上と解析の効率化を実現するために、二次元FFTを用いたフィルタリング手法を時空間画像に適用し、以下の結論を得た。

- 1) 雨滴やコマ落ちの入ったビデオ画像に対しても、適切なband pass filterによりその影響を良好に除去できることを確認した。
- 2) 新手法の適用により、夜間や荒天時を含めた洪水流の解析が行えることを示した。
- 3) 時空間画像の周波数解析より、大スケールの水面波紋の移流速度に変化はないが、小スケールの水面波紋はスケールに比例して移流速度が減少することを明らかにした。

本研究では、一河川の一洪水に関する検討しか行っていないため、水面波紋のスケールや移流特性に関する一般的な考察はまだ十分ではない。今後は、規模や特徴の異なる様々な洪水流ビデオ画像について検討を行っていく予定である。

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) Wang, C.J., Wen, B.Y., Ma, Z.G., Yan, W.D. and Huang, X.J.: Measurement of River Surface Currents With UHF FMCW Radar Systems, J. of electromagnetic waves and applications, 21(3), 2007, pp. 375-386, 2007.
- 3) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345/II-1, pp.1-19, 1984.
- 4) 宇民 正，上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，No.503/II-29, pp.1-17, 1994. R.L. Gordon: Acoustic measurement of river discharge, J. Hydr. Engng., 115 (7), pp.925-936, 1989.
- 5) Fujita, I. and Hino, T.: Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter, J. of Visualization, Vol.6, No.3, pp.245-252, 2003.
- 6) R.L. Gordon: Acoustic measurement of river discharge, J. Hydr. Engng., 115 (7), pp.925-936, 1989.
- 7) 酒井雄弘・二瓶泰雄：ADCPを用いた中小河川の流量計測法に関する検討，水工学論文集，50巻，pp.721-726, 2006.
- 8) 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.
- 9) 藤田一郎：トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析，水工学論文集，42巻，pp.505-510, 1998.
- 10) 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.
- 11) 綾史郎・露口肇・柿木理史・室田有紀・藤田一郎：淀川下流部におけるPIVを用いた洪水時の流速観測，水工学論文集，44巻，pp.455-460, 2000.
- 12) 藤田一郎・中島丈晴：実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用，水工学論文集，44巻，pp.443-448, 2000.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, A. and Dramais, G.: Application and Evaluation of LS-PIV Technique for the Monitoring of River Surface Velocities in High Flow Conditions, Flow Measurement and Instrumentation, doi:10.1016/j.owmeasinst.2007.11.004, 2008.
- 19) Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Bradley, Weber, L., Koh, D.: Uncertainty Analysis for LSPIV In-situ Velocity Measurements, Proceedings 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, 2007.
- 20) Hauet, A., Creutin, J.-D. and Belleudy, P.: Sensitivity Study of Large-Scale Particle Image Velocimetry Measurement of River Discharge using Numerical Simulations, Journal of Hydrology, 349(1-2), 178-190, doi:10.1016/j.jhydrol. 2007. 10.062., 2008.
- 21) 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.
- 22) Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J.-D. and Wilson, M.: Experimental System for Real-Time Discharge Estimation using an Image-Based Method, Journal of Hydrologic Engineering, 13(2), pp 105-110, 2008.
- 23) 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.
- 24) 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，河川環境管理財団河川整備基金報告書，2009.
- 25) 國田洋平・藤田一郎・安藤敬済：局地的集中豪雨による都賀川水難事故時の流量・流況の推定，河川技術論文集，第15巻，pp.61-66, 2009.
- 26) 宮本仁志：河川ローカルリモートセンシングのための可視化トレーサとしての水面波紋の基礎性能評価，土木学会論文集B, Vol. 63, No. 4, pp.357-367, 2007.
- 27) 酒井幸市：デジタル画像処理入門，CQ出版社，pp170-194, 2002.

(2009.9.30 受付)