

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

FIELD MEASUREMENT OF SURFACE VELOCITY DISTRIBUTION BY GRADIENT METHOD USING SPATIOTEMPORAL IMAGES

藤田一郎¹・椿涼太²

Ichiro FUJITA and Ryota TSUBAKI

¹正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

A new one-dimensional velocity measurement method using image analysis was developed. In this method, image intensity distribution for a line specified in the mean flow direction on a flow video image was cumulated in the temporal direction, thereby creating a spatiotemporal image with a striped pattern indicating the mean velocity on the specified line. The striped pattern is created due to the convection of image intensity conveyed by the mean flow. This method is applicable to river surface images videotaped from a riverbank during flood. Since the images are distorted the spatial resolution in the far field is relatively low; however, the presented method showed a favorable performance in the measurement of flood surface flow of the U River. The result was compared with that by the large-scale particle image velocimetry (LSPIV) and the new method's superiority was verified. Also a method for improving mapping relationship between the CRT coordinates and the physical coordinates was demonstrated.

Key Words : river flow measurement, image analysis, video image, small depression angle, gradient method, spatiotemporal image, LSPIV

1. まえがき

河川の管理や計画においては、流量のきめ細かな把握が必要である。そのため、対象が一級河川の場合は低水から高水に至るまでの定期的な流量計測が業務化されている。低水時にはプロペラ流速計による低水観測(2点法)、高水時には浮子による観測が行われている。ただし、上流域における国土交通省管轄外の河川区間や二級河川以下の河川区間では流量の観測は定期的なものではなく、情報量も極端に減少する。これは、流量観測そのものに多大な経費(人件費)がかかるからである。このように、現在行われている計測は自動化や省力化、あるいは洪水時の安全性などの点で問題をかかえている。

以上のような問題点を解消する方法として非接触型の流量計測法がいくつか開発されてきている。電波流速計などのように電磁波を水面に向けて発射し、反射波のドップラー効果を利用して放射方向の一次元表面流速を得ようとする方法¹⁻³⁾と、水面を撮影した画像から流速分布の情報を引き出そうとする方法⁴⁾がその代表的なものである。前者の方法は、リアルタイムで長時間の点計測が可能という点に最大の

特長があるが、計測機器を橋梁部分に設置しなければならないため、計測地点の設定に制約があり、また河川幅全体の流速分布を得るには機器を横断方向に移動させるなどの手作業が必要な点などに問題がある。

一方、著者らは後者の画像計測の考え方に基づいた非接触の流速計測法について研究を進め、いくつもの洪水流や平水流の計測を行ってきている⁵⁻⁸⁾。この手法では、河岸などから撮影された斜めビデオ画像を用い、河川表面の輝度分布パターンをPIV(Particle Image Velocimetry)法⁹⁾で追跡することによって表面流速分布を求めている。河川幅が100mを上回るような場合にも適用可能なことから、この手法をLSPIV(Large-Scale PIV)と名付けている¹⁰⁾。LSPIVでは特別な計測機器は必要ではなく、家庭用のビデオカメラで撮影した画像も利用可能など経済面での利点がある。また、両岸の見通しの良い所に標定点を設置することだけが計測における拘束条件であるため、橋梁などの河川横断構造物がないところでも問題なく適用できる。ただ、ビデオカメラの映像を利用するために空間解像度が低いという問題がある。解像度が良いといわれるデジタルビデオの場合でも高々720x480画素程度の情報しか得られない。この解像度もプログレッシブスキャンの可能なビデオカメラでのみフルに実現

できるものであり、通常のNTSC規格に基づいた画像出力では鉛直方向の情報量が半減する。したがって、特に俯角が小さい撮影状態では遠方の計測精度に問題が生じる。すなわち、遠方の河川表面パターンは非常にぼやけてしまうため、二枚の連続画像を用いたPIVにおけるパターンマッチングが破綻する場合がある。

流量観測のための表面流計測が対象の場合は、流速の瞬間値や乱流特性よりも平均流速、中でも主流方向の平均流速の正確な把握が最重要視される。微妙な主流流線の変移を無視すれば、画像上で主流方向を指定するのは比較的容易である。そこで、本研究では主流方向の一次元平均流速分布を効率的に求める新たな手法を開発し、LSPIVとの比較を通してその有効性を検討することとした。また、どちらの方法でも斜め画像が対象となるため、いくつかの標定点座標を用いて行う画像の幾何補正の精度は流速の計測精度に直接的な影響を及ぼす。そこで、幾何補正の妥当性をチェックする考え方、あるいは標定点の有効な設置法についても検討も行った。

2. 新手法の概要

(1) PIV法の問題点

一般的にPIVでは2枚の連続画像から相互相関法によって瞬間流速ベクトルを得ることになるが、その際に常に注意が必要なのは連続画像間の時間間隔をどの程度にすればよいかという点である。時間間隔 Δt を短くすれば画像間のパターンの変化がわずかとなり、一見高い計測精度が得られるように思われるが、基本的な速度分解能 $\Delta U(= \Delta x / \Delta t; \Delta x = 1 \text{ 画素サイズ})$ は Δt が小さくなるほど大きくなり計測誤差が増大する。逆に Δt を長くとるとパターンの変形が大きくなり、パターンマッチングに支障を来すようになる。特にLSPIVでは斜め画像を用いるので Δx の値は空間的に分布し、計測精度は場所によって異なってくる。また、トレーサの制御が容易な室内実験とは異なり、河川表面の波紋などの自然発生的な事象をトレーサとして利用するため、パターンマッチングがうまくいかない場合も生じる。以上のようなPIVの問題点は瞬間的な流速分布を2枚の連続画像から得ようとしているために生じる。そこで、瞬間流速の取得は最初からあきらめる代わりに、画像時間間隔 Δt にとらわれることなく平均流速を求める方法について考えてみる。

(2) 時空間断面画像

洪水流のビデオ画像を注意深く調べると、河川表面の輝度（濃度）分布がほぼその分布形を保ちながら下流に移流している様子が観察される。LSPIVではある時間をおいた2枚の画像を対象としてその移流速度を求めるが、ここではビデオ画像に記録されている連続情報をすべて利用することを考える。すなわち、通常のビデオシステ

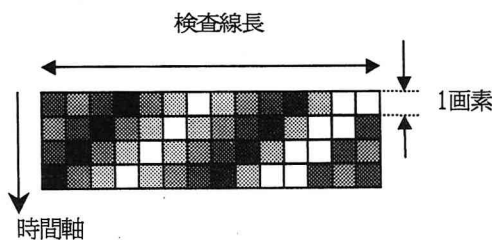


図-1 時空間断面画像の構成

ムでは30Hz、プログレッシブスキャンのビデオシステムでは15Hzでサンプリングされた画像の利用を考える。そのために、本手法では画像上にある検査線を設け、その線上の輝度分布の時間変化を調べてみた。すなわち、横軸に検査線上の空間軸、縦軸に時間軸をとって時空間断面画像を合成し、その合成画像からの流速情報の抽出を試みた。時空間断面画像の模式図を図-1に示す。この図は単位時間に1画素だけ左に移流する場合に相当するが、時空間画像上に現れた斜めの縞の傾きが流速に対応することは明らかである。ただし、ここでは検査線上の流速が近似的に一定と仮定している。

図-2に実際の洪水流（U川の融雪出水）画像上に設定した検査線、図-3に対応する時空間画像を後述の解析結果とともに示した。図-2中の四角形のパネルは標定用のパネルであり、その三次元座標が測量されている。図-3を生成する際の時間軸の単位時間は1/30秒であり、2秒間すなわち60枚の連続画像を用いて画像の合成を行っている。図-3から明らかのように検査線上の輝度分布が流れ方向に移流した結果、何らかの縞パターンが時空間画像上に現れており、しかもその縞パターンが直線状でこの検査線上の流速を一定とみなせることがわかる。

(3) 変形法

図-3に現れた縞パターンは明確な輪郭を有しているわけではないため、その勾配を求めるためには特別な工夫が必要である。勾配計測の方法として、細線化法、勾配法¹¹⁾、変形法を考え、シミュレーション画像を用いてこの三手法の優劣を比較した結果、変形法が優れていることがわかった¹²⁻¹³⁾ので、ここではその測定原理を簡単に説明する。変形法では図-4に模式的に示すように、画像の上辺と下辺をサブピクセルレベルで順次平行移動させていき、縞模様の傾斜角が垂直になる角度 θ を求める。この角度は明らかに傾斜模様の傾斜角に対応している。実際には検索範囲内の変形角をいくつか試し、上下に隣接する点における輝度差の絶対値の累積値が最小になる変形角を傾斜角度とみなした。

以上のように、本手法は時空間画像上の濃度勾配を利用して主流方向の流速分布を求めるので、ここでは時空間濃度勾配法と呼ぶこととする。この方法を用いて図-3の時空間画像を解析した結果を図中に矢印で示した。変形法が縞パターンの傾斜角を概ね良好にとらえているこ

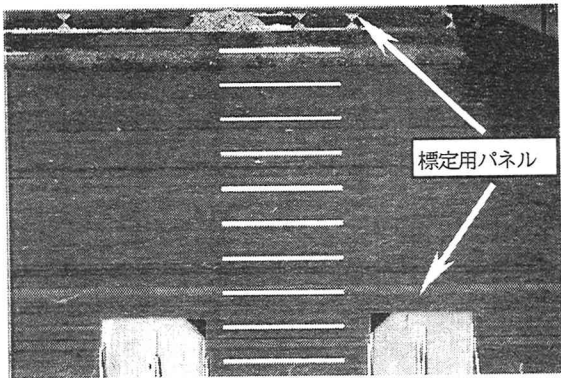


図-2 U川の洪水画像上に設定した検査線

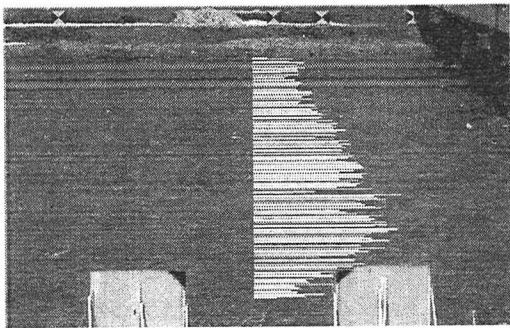


図-5 U川洪水の表面流速分布（歪補正前）

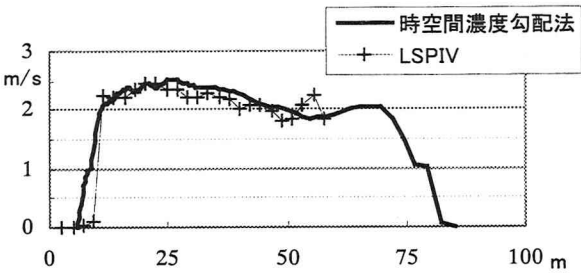


図-6 横断流速分布の比較（U川：2000年度）

とがわかる。図の右には各々の傾斜角および検査線長さ（場所によって異なる実長となる）から得られた流速値を示した。検査線の位置によっては矢印と縞パターンとの間にずれが見られるが、これは縞パターン以外の濃度分布の影響が強かったためである。ただし、今回の解析ではこのようなノイズが平均値に与える影響はほとんど見られなかった。なお、検査線長さは場所によって異なるので、縞パターンの傾きが同じでも遠方のもののほど流速が大きくなることに注意されたい。

(4) LSPIVとの比較

表-1 に時空間濃度勾配法と LSPIV との比較を示した。微細な流れの構造を計測できるなど汎用性の点では LSPIV が優れているが、洪水時の画像に含まれるノイズ

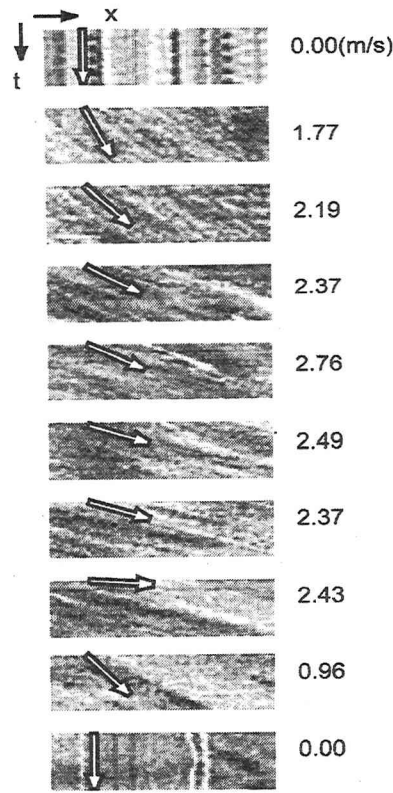


図-3 実河川洪水流に対する時空間断面画像（図-2の各検査線に対応）

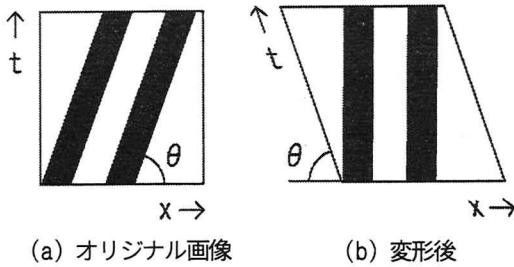


図-4 変形法の説明

に強い点、あるいは解析に要する時間が LSPIV よりも短いという点では、新手法の方が実用的である。すなわち、河川流量の計測に対象を限定すれば時空間濃度勾配法は有望な方法と言える。

表-1 LSPIV と時空間濃度勾配法の比較

	空間解像度	速度成分	耐ノイズ性	相対解析時間	外部メモリ必要容量	渦・乱流の計測	ビデオカメラの撮影方向
LSPIV	数m四方	二次元	不良	長い	多い	可	任意
濃度勾配法	1画素幅×(数m～数10m)	一次元	良好	短い	少ない	不可	主流に垂直

3. 実河川洪水流計測への適用

(1) U川の融雪出水(2000.4)

図-5 に図-2 と同様の検査線を 1 画素ピッチで設定し時空間濃度勾配法で求めた流速分布を示す。ただし、この図ではまだ幾何補正は行わず、斜め画像上の移動ベクトルをそのまま示している。この流速分布は 2 秒間の平均流速の様子を示している。ただ、洪水流の時間スケールからみると瞬間流速分布とも見なせる。この図を見るとノイズに強い手法とはいうものの若干のばらつきが含まれている。そこで、数分間の“瞬間”データの平均をとり、幾何補正を行って得られた平均流速分布を LSPIV の結果と比較した (図-6)。

LSPIV では 1 画素サイズを 10cm として幾何補正画像を生成し、0.1 秒間隔の連続画像約 200 枚から平均流速分布を求めた。撮影地点から離れるほど異常ベクトルの生成が著しかったため、相互相関係数が 0.4 以上のデータをピックアップし平均操作を施した。その結果、図からもわかるように遠方のデータに欠損が生じた。これは、この融雪出水の撮影機器が 8mm ビデオカメラであり、対岸側ほど画像のメリハリがなくなった結果、パターンのマッチングに支障を来したためである。これに対し、時空間濃度勾配法では左岸から右岸まで良好に流速分布が得られていることがわかる。

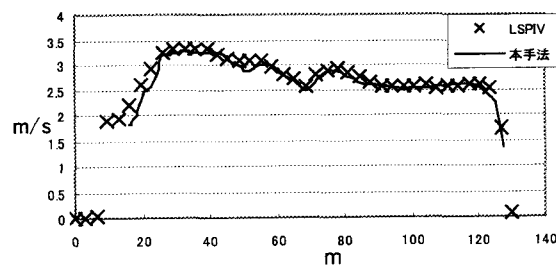


図-7 横断流速分布の比較 (U川：2001年度)

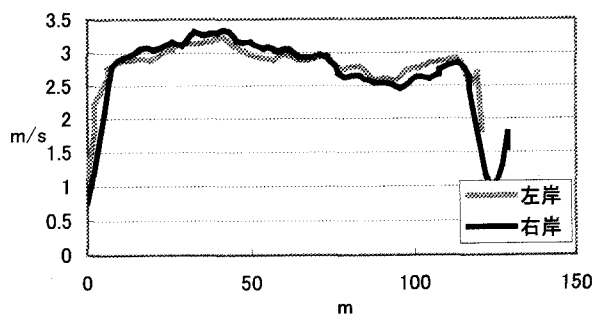


図-8 両岸からの撮影結果 (時空間濃度勾配法)

保っており、1年後の河床形状に大きな変化がないことが推察できる。

4. 幾何補正精度の検査法

(1) 幾何補正の変換式

LSPIV では、CRT (Cathod-Ray Tube, モニター画面) 座標(x,y)と物理座標(X,Y,Z)の間に以下のような写像関係式を想定している。式に含まれる 11 個の変換係数は標定点の座標を利用して、最小二乗法によって求めることができる。

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (2)$$

未知数が 11 個なので、標定点は少なくとも 6 点あれば変換係数を決定できる。実際の手順としては、変換係数を決定後、物理座標上で水面を表す

$$Z = D_1 X + D_2 Y + D_3 \quad (3)$$

を式(1)および式(2)に代入し、平面对平面の関係式として幾何補正を行っている。時空間濃度勾配法においては幾何補正画像を生成する手間は省けるが、式(1)～(3)の関係式は同様に必要となってくる。それは、前述のように検査線の長さは、CRT座標上では一定でも実際には場所によって長さが異なるため、変換係数は計測精度に直接影響を及ぼすからである。ところが、実際に標定パネ

(2) U川の融雪出水(2001.4)

図-7 には 2001 年度の計測結果の比較を示した。ただし、ここでは橋梁を隔てた下流側の計測結果を示した。2001 年度の洪水は流量規模も前年度より大きく、水面波紋もより明確に現れていた。また、プログレッシブスキンの可能なデジタルビデオカメラ (SONY, VX2000) を用いたため、対岸側においても比較的明瞭な映像が得られた。したがって LSPIV においても河川幅に渡って良好な流速分布が得られた。時空間濃度勾配法による結果は LSPIV の結果にほぼ一致し、新手法の有効性をあらためて確認することができた。図-7 の流速分布には河川の中央部に局所的な減速領域が現れている。これは、直上流側の橋脚による洗掘土砂がその下流部に堆積し、水深が局所的に減少しているためである。このように画像を利用した計測により非常に詳細な表面流の構造を容易に明らかにできることがわかる。

図-8 では両岸から撮影したビデオ映像を用いて解析した結果を比較した。場所は図-6 と同じ橋梁の上流側である。左岸ビデオおよび右岸ビデオによる結果は、河川幅全体に渡ってほとんど一致しており、空間的な解像度に差異がないことがわかる。詳細にみると左岸からの結果と右岸からの結果には、系統的な差異が認められるが、これは画像の変換誤差に起因するものと思われる。

図-6 と比較すると表面流速の分布形はほぼ相似形を

ルを設置して三次元測量を行い、標定点座標とCRT座標の対応から幾何補正画像を生成すると、補正に失敗するケースが往々にして生じる。

(2) 誤差の要因

画像の幾何補正に失敗した場合、生成された画像の変形が極端に大きい場合には異常に気づくが、単にサイズが小さいか大きい場合にはそのまま解析が進められ、そのサイズ誤差が流速値にそのまま反映されてしまうことになる。基本的な誤差としては、標定点の現地測量に伴う誤差、CRT座標上で標定点を決定する際の誤差、水位データの誤差、あるいはビデオカメラのレンズの収差に伴う誤差などが挙げられる。ただ、変換係数を最小自乗法で決定する際、平面的な数値は十数メートルから数百メートルまで幅広い値を示すのに対し、鉛直方向は高々数メートルのオーダーのため、これまでのケースでは鉛直方向の微妙な計測誤差が変換係数に大きく影響を及ぼすケースが多かった。

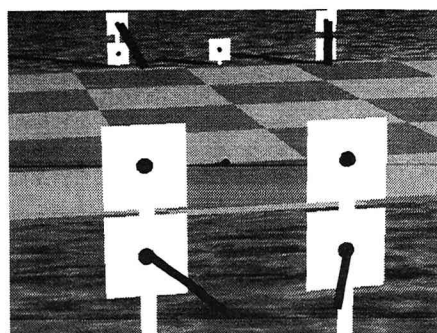
(3) 変換精度の検査法

この検査法の基本的な考え方は、「変換係数が正しければ変換式に基づいて標定点から水面におろした線分はCRT画面上でも鉛直になり、その線分長は遠近に応じて変化するはずである」という単純なものである。この点を確認するために、まず、CRT座標上で求めた標定点座標(x_c, y_c)と、最小自乗法による変換係数を用いた標定点の測量データ(X_m, Y_m, Z_m)を式(1,2)に代入して求めた標定点座標(x_m, y_m)をCRTモニター上に表示して比較できるようにした。変換が正しければすべての標定点に対して両座標は完全に一致するはずだが、前述のような誤差があれば両者は微妙にずれてくる。

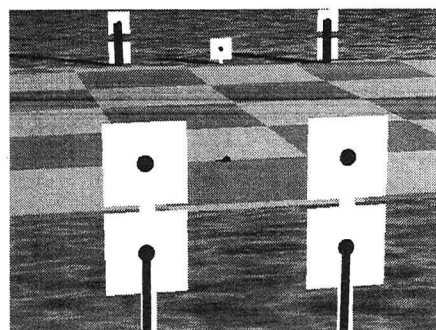
次に、水面形を表す式(3)に標定点の平面座標(X_m, Y_m)を代入し、標定点の場所における仮想的な水位 Z_s を算出し、座標(X_m, Y_m, Z_s)を式(1,2)に代入して対応するCRT座標(x_s, y_s)を求める。変換が正しければ、(x_m, y_m)と(x_s, y_s)を結ぶ線分はCRT画面上でほぼ鉛直になるはずである。すなわち、 $x_m \div x_s$ となる。

(4) 検査例

図-9に実際の測量データをもとに生成したCG(Computer Graphics)画像に本手法を適用した例を示す。CGを利用したのは、水面位置や座標などを完全に制御できるからである。図中のメッシュ部分は河道、白い正方形は標定用パネルである。河川をまたいで兩岸に9個の標定用パネルが設置された状況を再現している。黒い太線が変換係数に基づいて標定点から水面に降ろした線分である。図-9(a)は、左上の標定点のCRT座標を本来の位置からわずかにずらしたケースに対して本手法を適用した例である。図より、水面に降ろした線分は鉛直にはならず傾いており、その影響は手前の標定点にまで



(a) 不良なケース



(b) 良好なケース

図-9 変換係数の検査法

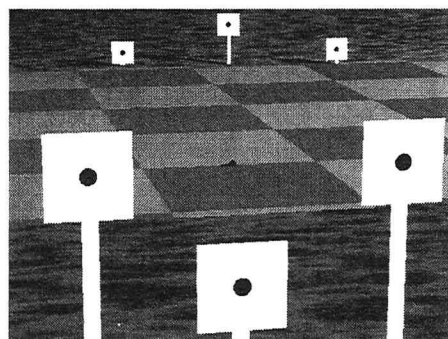


図-10 標定用パネルの配置法

及んでいることがわかる。このような状況は実画像を対象とした場合でも比較的頻繁に発生した。

この誤差は明らかにCRTにおける標定点座標の誤差に起因している。そこで、CRT上で標定点座標を本来の位置にシフトさせ、その座標値を用いて変換係数を再計算し、本手法を適用したのが図-9(b)である。水面への垂線が良好に再現できており、再計算された変換係数の方が妥当な値を与えていることがわかる。なお、以上の操作は、すべて対話形式で行えるように開発したカスタムソフトを用いて進めた。

(5) 標定点の設置方法

ここでは、標定用パネルの最適な配置を模索すべく、同じくCG画像を用いて検討した。様々な配置について

検討した結果、a)標定点を立体的に配置することで変換精度が向上する、b)標定点の数は多すぎても精度向上にはつながらない、c)立体配置の場合、高低差が大きいほど精度は向上するなどの知見が得られた。従って、標定点の配置としては、兩岸各3点ずつ配置し光学的なひずみの少ない中心部をパネルで邪魔しないような図-10に示すような方法が好ましいと考えられる。

5. あとがき

本研究では、洪水表面流の実用的な計測法として新しく時空間濃度勾配法を提案した。この方法は粒子画像流速計測であるPIV(Particle Image Velocimetry)と対比するならば、別に時空間画像流速計測法、すなわちSPIV(Spatiotemporal Image Velocimetry)とも命名できる。二次元的な二枚の連続画像の濃度勾配から瞬間流速分布を求める方法としては時空間微分法（あるいはオプティカルフロー法）があるが、一次元流速分布を対象をしぼり数十枚の連続画像から画像処理によってその間の平均流速を求めるという点は従来にはない新しい方法である。一方、当然ながら変換係数は計測精度に直接影響するため、その精度を調べておくことは今後の実用化に際して非常に重要な事項となる。また、本手法の有用性を示すためには、LSPIV以外の流速計測法との比較も必要と思われる。本研究で示した画像変換の検査法は完全なものではないが、様々な座標値入力時の過誤や測量ミスなどを容易に調べ、さらに矯正できる点で有効である。今後は、水位変動などとダイナミックに連動させた計測システムの開発が必要と考えている。

謝辞：現地計測画像の撮影に関してはアジア航測(株)の小林範之氏らの協力を得た。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) 山口高志：H-Q地点で水面勾配をはかるう！，河川技術に関する論文集，Vol.5，pp.35-40，1999.
- 3) 山口高志：電波流速計による洪水流量観測（'98,'99）-洪水時の流速変化と河床変化-，東京電機大学理工学部建設環境工学科水文環境研究室，2000.
- 4) 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，Vol.38，pp.733-738，1994.
- 5) 綾史郎，藤田一郎，柳生光彦：画像解析を用いた河川の洪水時の流れの観測，水工学論文集，Vol.39，pp.447-452，1995.
- 6) Fujita, I., Aya, S. and Deguchi, T.: Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle, *Proceedings of the 27th Congress of IAHR, Environmental and Coastal Hydraulics*, pp.227-232, 1997.
- 7) 藤田一郎，原基樹，森本貴生：多重合成法による現地河川流の可視化画像解析，応用力学論文集，Vol.1，pp.729-736，1998.
- 8) 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，Vol.42，pp.505-510，1998.
- 9) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J. : Particle image velocimetry - A practical guide-, Springer,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, IAHR*, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 11) 平工良三：単視点粒子画像を用いた三次元非定常流場計測法の開発に関する研究，大阪大学博士論文，2000.
- 12) 藤田一郎，椿涼太：時空間濃度勾配を利用した河川表面流の計測，可視化情報，pp.25-28，2000.
- 13) 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，河川技術に関する論文集，Vol.7，pp.475-478，2001.

(2001. 10. 1受付)