

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

IMPROVEMENT OF LSPIV IN MEASURING RIVER SURFACE FLOW AND ITS APPLICATION TO LARGE SCALE RECIRCULATING FLOW BETWEEN GROINS

藤田一郎¹・中島丈晴²

Ichiro FUJITA and Takeharu NAKASHIMA

¹正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 岐阜大学大学院修士課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

Large scale particle image velocimetry (LSPIV) is an efficient and powerful tool to measure river surface flow. In LSPIV oblique angled video images taken from a river bank or a bridge are used to measure two-dimensional surface velocity distributions. In the original LSPIV algorithm, water surface is assumed to be in a horizontal plane. This assumption holds true for a mild-slope channel, however, it can be a cause of error in the image transformation when a steep flow is viewed from an oblique angle. Hence, in order to generalize the LSPIV, a water surface equation is introduced to the image correction algorithm, which allows the image analysis on a tilted surface plane. In addition, a new formula for verifying velocity resolution is derived using an image transformation equation. As an application of LSPIV, large scale recirculating flows between the groins installed in the middle reach of the Nagara River were measured with the aid of non-toxic tracer particles. An improved LSPIV was found to be quite useful for analyzing surface flow with a reasonable accuracy.

Key Words : *image analysis, PIV, groin, river flow measurement, tracer, recirculating flow, river surface flow*

1. 序 論

著者らはこれまで実河川の表面流計測を可能とする画像解析手法の開発を進めてきた¹⁻⁸⁾。この解析手法の特長は河岸や橋などから斜め撮影されたビデオ画像を利用し、PIV (Particle Imaging Velocimetry) によって二次元表面流速場が得られる点にあり、簡便性、機能性、安全性あるいは経済性において他の現地計測手法よりも優れている。計測可能な対象領域の規模が大きい点を勘案して、著者らはこの手法をLSPIV (Large-Scale Particle Imaging Velocimetry) とも名付けている⁴⁾。なお、連続写真を用いた斜め画像解析には宇民・上野らの研究がある⁹⁾。

LSPIVの短所は、洪水時に現れる水面波紋等が現れなければ計測ができない点、現在のビデオシステムのままでは夜間計測が不可能な点、あるいはリアルタイム処理のためのアルゴリズムやシステムが未構築な点であるが、これらはそれぞれトレーサの導入(後述)、ビデオカメラの高性能化あるいは連続画像の取込みを自動化できるソフトウェアの開発によって解決可能な問題である。本手法の本質的な欠

点は表面流しか計測できない点であり、流れの内部構造を捉えるには多点プローブ計測あるいはADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)等の計測機器が必要となる。しかしながら、表面流ではあってもLSPIVで得られる二次元場の情報量は膨大であり、かつプローブ型機器の使用が不可能な大規模な洪水時にも安全に利用可能など優位な点も多い。

当初、LSPIVは河川表面の濃淡や凹凸が明瞭に現れる洪水流のみを対象としていたが、最終的に完全生分解されるため環境にやさしいと考えられるトレーサ(成分:乳白色コーンスターチ,形:棒状,長さ:5cm,直径:2cm)の導入によって平水時の計測も可能となった⁵⁻⁸⁾。また、トレーサの連続画像にデジタル多重合成法(Digital Multiple Superposing(DMS) Method)を適用することによって、表面流を流跡線群として可視化し、流れ場を定性的に把握する手法も示した^{6,7)}。

以上のように、LSPIVはある程度実用に耐え得る現地計測手法として発展してきたが、水位変動や水面勾配への対応あるいは計測精度の一般的な評価法に関しては不十分な点が残されていた。本研究では

これらの点に改良を加え、LSPIVの汎用化を試みた。また、長良川中流域に設置された水制間で観測された大規模循環流の計測にLSPIVを適用し、現地計測手法としての有効性も検討した。

2. LSPIVの概要

(1) 従来の画像幾何変換

従来の画像変換では河岸等から撮影したビデオ画像を幾何補正するために、図-1に示す二つの座標系、すなわち、X-Y平面(Z=0)が水面と一致するようにとった物理座標系(X, Y)およびCRT座標系(x, y)を想定し、各座標系間に式(1)に示す二次射影変換式を適用している¹⁰⁾。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, \quad Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (1a, b)$$

変換係数 $b_1 \sim b_8$ は、両座標系におけるN点($N \geq 4$)の標定点座標を用いて次式から最小自乗法により求められる。

$$\underline{B} = (\underline{C}^T \underline{C})^{-1} \underline{C}^T \underline{D} \quad (2)$$

ここに、

$$\underline{B} = (b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8)^T \quad (3)$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & -x_1X_1 & -y_1Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & 1 & -x_2X_2 & -y_2Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_N & y_N & 1 & -x_NX_N & -y_NY_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1Y_1 & -y_1X_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2Y_2 & -y_2X_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -x_NY_N & -y_NX_N & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\underline{D} = (X_1X_2 \dots X_NY_1Y_2 \dots Y_N)^T \quad (5)$$

である。 $(x_1, y_1) \sim (x_N, y_N)$ は各標定点のCRT座標、 $(X_1, Y_1) \sim (X_N, Y_N)$ は対応する物理座標である。

ここで、最も誤差混入の可能性が高いのが各標定点座標を求める際である。問題点は二つある。第一の問題点は、CRT座標が基本的にpixelという整数値のみで構成されているため、ビデオカメラから遠方の標定点の座標読み取り精度がかなり低下する点である。例えば、川幅が100mオーダーの場合、1m四方のパネルを設置したとしても対岸から見るとその一边が数pixelにしかならず、空間分解能の低下およびそれに伴う幾何補正後の画像の不正確さは避けられない。これを改善するには、高解像度のビデオカメラを利用するか、あるいはレンズのズーム機能を利用して局所的な解像度の向上を図る必要がある。

第二の問題点は、実際の解析作業では各標定点を水平と仮定した水面の延長面上に投影した点をCRT座標上で仮想的に求めている点にある。河岸にかなり高い建築物があり、そこから十分な撮影俯角が取

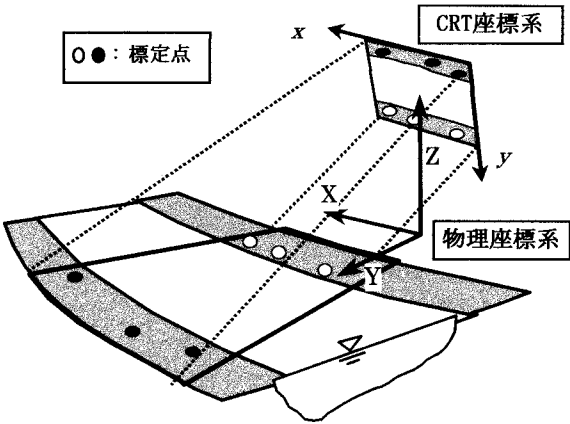
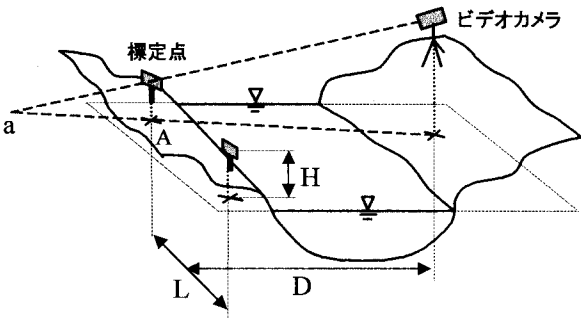
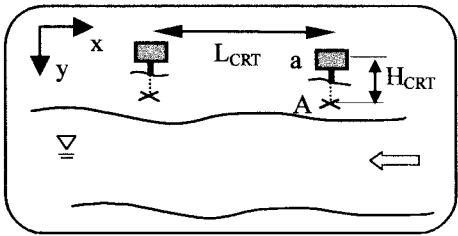


図-1 画像変換に用いる座標系



(1) 物理座標



(2) CRT 座標

図-2 標定点座標の補正方法（従来法）

れる場合にはこの誤差は無視できる程度になるが、俯角が小さい場合には変換誤差の大きな要因となる。例えば、図-2(1)において本来点Aの座標を用いるべきところが、誤って点aを指してしまうことになる。このような誤差をできるだけ解消するため、従来手法では、図-2に示すようにビデオカメラの対岸側に設置した二つの標定点に対し、 $D \gg H$ がほぼ成立することから局所的なスケール比に大きな変化がないと考えて $L_{CRT}/L = H_{CRT}/H$ とおき、これから得られる補正量 $H_{CRT} = H \cdot L_{CRT}/L$ を標定点自身のCRT座標(y座標)に加算して標定点の水面への投影点座標(x_1, y_1)等を求めた。ここにHは標定点の水面からの高さ、Lは標定点間の距離、添字CRTはそれらのCRT座標上での値を示す。手前の標定点に対しては、標定点用パネル（一辺1m程度の白板）の一辺長に相当するpixel数を求め補正量 H_{CRT} を求めている。

従来の標定点座標の補正操作は以上のような方法

で行っていたが、手作業で行うために非常に煩雑であり、自動化に向けてのシステム開発という観点からは大きな障害になるものと考えられた。また、水位変化への対応にも無理があった。したがって、本研究では以下に順次示すようなさらに一般的な画像変換式を用いることとした。

(2) 画像幾何変換の一般化

これまでの変換では簡単のために物理座標系で水面を $Z=0$ とし平面对平面的変換を行ってきたが、ここでは以下の平面对空間の関係式を用いる¹⁰⁾。

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (6a)$$

$$y = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (6b)$$

ここで、11個の係数 $A_1 \sim A_4$, $B_1 \sim B_4$, $C_1 \sim C_3$ は M 点($M \geq 6$)の標定点座標を用いて次式から最小自乗法により求めることができる。

$$\underline{E} = (\underline{F}^T \underline{F})^{-1} \underline{F}^T \underline{G} \quad (7)$$

ここに、

$$\underline{E} = (A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \ B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4)^T \quad (8)$$

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -x_1 & -y_1 & -z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -x_2 & -y_2 & -z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_M & Y_M & Z_M & 1 & -x_M & -y_M & -z_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_1 & -x_1 & -z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_2 & -x_2 & -z_2 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_M & -x_M & -z_M & X_M & Y_M & Z_M & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\underline{G} = (x_1 x_2 \dots x_M \ y_1 y_2 \dots y_M)^T \quad (10)$$

$(x_1, y_1) \sim (x_M, y_M)$ は各標定点のCRT座標、 $(X_1, Y_1, Z_1) \sim (X_M, Y_M, Z_M)$ は対応する物理座標である。式(6)は三次元の物理座標から二次元のCRT座標を求める関係式なので、物理空間上で水面を与えれば平面間(CRT平面と水面)の関係式を得ることができる。

(3) 水面方程式の導入

ここでは水面を任意の傾きを有する平面と仮定する。このとき、水面は平面の方程式として次式で表せる。

$$Z = D_1 X + D_2 Y + D_3 \quad (11)$$

係数 D_1 , D_2 , D_3 は水面上で3点以上の座標を与えれば求められる。ただし、水面が緩勾配ならば、 $Z \doteq D_3$ とおける。式(11)を式(6)に代入すると、式(1)の逆変換式と同形の関係式が得られる。すなわち、

$$x = \frac{(A_1 + A_3 D_1)X + (A_2 + A_3 D_2)Y + (A_3 D_3 + A_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)} \quad (12a)$$

$$y = \frac{(B_1 + B_3 D_1)X + (B_2 + B_3 D_2)Y + (B_3 D_3 + B_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)} \quad (12b)$$

計測対象の物理空間で間隔 ΔX , ΔY の格子網を設定し、式(12)を用いて各格子点の画像濃度をCRT座標上の濃度情報から(cubic convolution methodによる補間法¹¹⁾)で順次求めることによって水面を基準面とした幾何補正を行うことができる。これらの式を用いることの利点は、一度、式(6)の変換係数を求めておけば数点の水位情報のみから水面方程式の係数を決定できるので、従来法のようにパネルを使った煩雑な作業を行わずに任意の水位に対して画像変換を行える点である。

(4) 逆変換式

LSPIVの解析領域はCRT座標上で設定するため⁸⁾, CRT座標値から物理座標値を求めるための逆変換式が必要となる。式(12)の逆変換式を示すと以下のようになる。

$$X = \frac{c_1 x + c_2 y + c_3}{p_1 x + p_2 y + p_3} \quad (13a)$$

$$Y = \frac{q_1 x + q_2 y + q_3}{p_1 x + p_2 y + p_3} \quad (13b)$$

ここに、

$$c_1 = (B_2 C_3 - B_3 C_2) D_3 + (B_3 - B_4 C_3) D_2 + (B_2 - B_4 C_2)$$

$$c_2 = -\{(A_2 C_3 - A_3 C_2) D_3 + (A_3 - A_4 C_3) D_2 + (A_2 - A_4 C_2)\}$$

$$c_3 = (A_3 B_4 - A_4 B_3) D_2 + (A_2 B_3 - A_3 B_2) D_3 + (A_2 B_4 - A_4 B_2)$$

$$p_1 = (B_3 C_2 - B_2 C_3) D_1 + (B_1 C_3 - B_3 C_1) D_2 + (B_1 C_2 - B_2 C_1)$$

$$p_2 = (A_2 C_3 - A_3 C_2) D_1 + (A_3 C_1 - A_4 C_3) D_2 - (A_4 C_2 - A_2 C_1)$$

$$p_3 = (A_3 B_2 - A_2 B_3) D_1 + (A_4 B_3 - A_3 B_1) D_2 + (A_4 B_2 - A_2 B_1)$$

$$q_1 = -\{(B_1 C_3 - B_3 C_1) D_3 + (B_3 - B_4 C_3) D_1 + (B_1 - B_4 C_1)\}$$

$$q_2 = (A_4 C_3 - A_3 C_1) D_3 + (A_3 - A_4 C_3) D_1 + (A_4 - A_4 C_1)$$

$$q_3 = -\{(A_3 B_4 - A_4 B_3) D_1 + (A_4 B_3 - A_3 B_1) D_3 + (A_4 B_2 - A_2 B_1)\}$$

である。式(13)を用いることによりCRT座標上で指定した解析領域の実際の物理サイズを求めることができ、幾何補正時に空間解像度($\Delta X, \Delta Y$)を合理的に(過大あるいは過小のサイズの画像を生成しないようにするという意味で)与えることが可能となる。

(5) 計測誤差の評価式

LSPIVにおいては原画像が歪んでおり、ビデオカメラから遠ざかるほど情報量が減少するために、速度の計測精度は遠方ほど低下する。特に、河岸などから流れを真横に撮影している場合は、流れ方向の情報はある程度捉えることができても、横断(川幅)方向の情報量は十分でないことが多い。この傾向は、撮影俯角が大きくなるほど著しくなる。したがって、LSPIVで得られた流速分布の精度には異方性が含まれることになる。従来は、この異方性を十分考慮しなかったために、 Δt を画像時間間隔、 $\Delta X(\sim \Delta Y)$ を幾何変換後画像の1 pixel長として計測誤

差の目安を

$$\Delta u(\sim \Delta v) = C_E \Delta X / \Delta t \quad (14)$$

で与えられるものとした⁸⁾。係数 C_E はPIVで検出できる1.0 pixel以下の微小移動量に対応しており、河川流のような平行流では $C_E=0.1\sim 0.2$ 程度と考えられる。

一方、画像のひずみを正確に考慮した計測誤差（あるいは速度分解能）は以下のような考え方で求めることができる。実際にレンズを通じて得られる画像情報はあくまでもCRT座標上で記録されるため、CRT座標上での微小移動量が計測誤差を考える上での基準とみなせる。CRT座標上の微小移動量を $(\Delta x, \Delta y)$ とすると、その移動量に対応する水面上（物理平面上）の微小移動量 $(\Delta X_C, \Delta Y_C)$ は式(13)より次式で与えられる。

$$\Delta X_C = \frac{s_1 y + s_2}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta x + \frac{-s_1 x + s_3}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta y \quad (15a)$$

$$\Delta Y_C = \frac{s_4 y + s_5}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta x + \frac{-s_4 x + s_6}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta y \quad (15b)$$

ここに、

$$s_1 = p_1 c_2 - p_2 c_1, s_2 = p_1 c_3 - p_3 c_1, s_3 = p_2 c_3 - p_3 c_2$$

$$s_4 = p_1 q_2 - p_2 q_1, s_5 = p_1 q_3 - p_3 q_1, s_6 = p_2 q_3 - p_3 q_2$$

である。したがって、計測誤差はその異方性を考慮して次式で評価できる。

$$\Delta u = \frac{C_E \Delta X_C}{\Delta t} \quad (16a), \quad \Delta v = \frac{C_E \Delta Y_C}{\Delta t} \quad (16b)$$

$$\Delta U = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2} \quad (17)$$

ここで、 $\Delta u, \Delta v$ はそれぞれ物理座標における X, Y 軸方向の計測誤差、 ΔU はそれらの合成値を表している。式(15)から明らかなようにこれらの値は空間的に分布を示す。ただし、式(15)では $\Delta x = \Delta y = 1$ (pixel)とする。

3. 実河川水制間流れへの適用

本研究では前報⁸⁾と同様、長良川51.2Km地点に設置された5基の水制間の流れを対象とする。この水制はテトラポットを積み上げた透過性水制であり、対岸(右岸)に発達した砂州により湾曲した流路が左岸堤防に直接当たるのを防御している。その様子を図-3に示す。LSPIVの解析に用いた画像解析システム等は前報⁸⁾と同様である。

(1) 標定点の測量

図-4に測量した標定点の座標を示す。標定点は、テトラポットや高水敷のコンクリート面に白色スプレーで印をつけることによって設けた。ビデオカメラのアングルによっては標定点が視界に入らなくなる場合があることを配慮し、各水制区間に対し20数点の標定点（総計100点程度）を設け、光波測距器を用いて各標定点の三次元座標を測量した。実際に



図-3 水制の設置状況

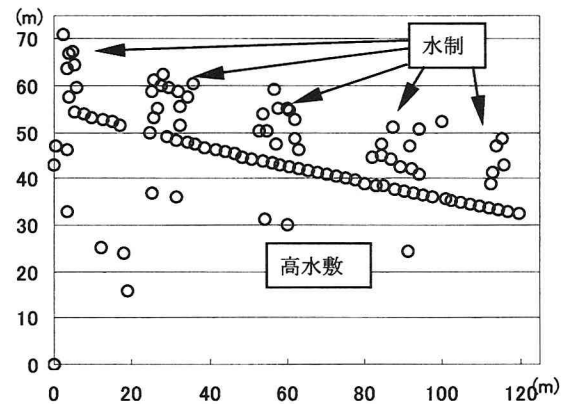


図-4 標定点の測量結果(1998年度)

使った標定点の数は各水制区間で約10数点であった。標定点は三次元の座標データに最小自乗法を適用することを配慮し、各々の標定点のZ座標にある程度の高低差が含まれるように設置した。水位は光波測距器の反射鏡を水面に近づけて計測した。今回の実測では各水制区間の水面はほぼ水平であったが、新たな幾何変換式の導入によって画像解析における作業効率が格段に改善されることを確認できた。

(2) LSPIVの諸条件(1998年度)

LSPIVによる解析は、 $\Delta X = \Delta Y = 0.03$ (m)、 $\Delta t = 0.5$ (s)、テンプレートサイズ $M = 31 \times 31$ (pixel)として行った。生成した無歪の画像サイズは、上流側の区間から $764 \times 615, 967 \times 710, 972 \times 769, 921 \times 602$ (pixel)である。使用した画像枚数は同じく上流側から229, 214, 231, 339枚でこれは実時間では100～150秒程度に相当する。計測当日の流量は約 $140 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、前年度(1997年度)における流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ とほぼ同程度の規模であった。トレーサはポリ袋に入れたものをロープに逆さまに取り付け、任意の地点でゆるく閉じた口をほどいて散布できるように工夫をした。ただし、ボイルの発生が著しい地点では、トレーサが放射状

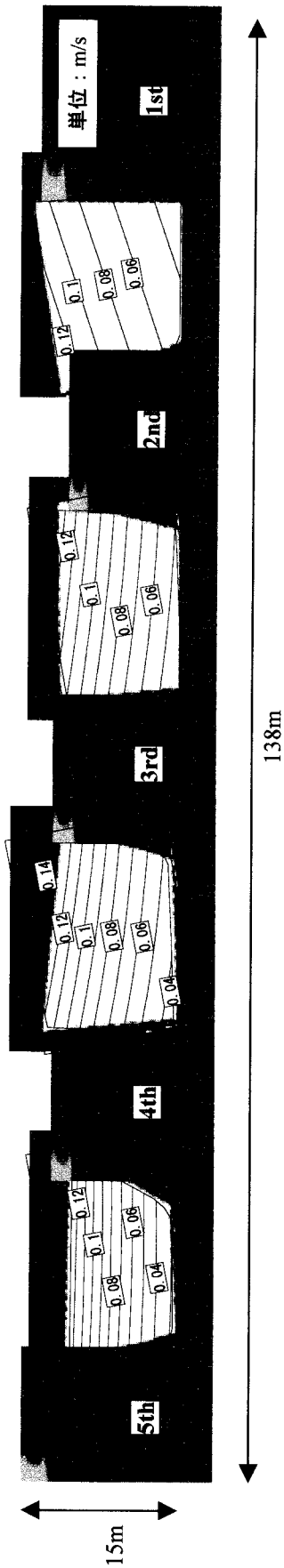


図-5 計測誤差 (速度分解能) の分布 (1998年度)

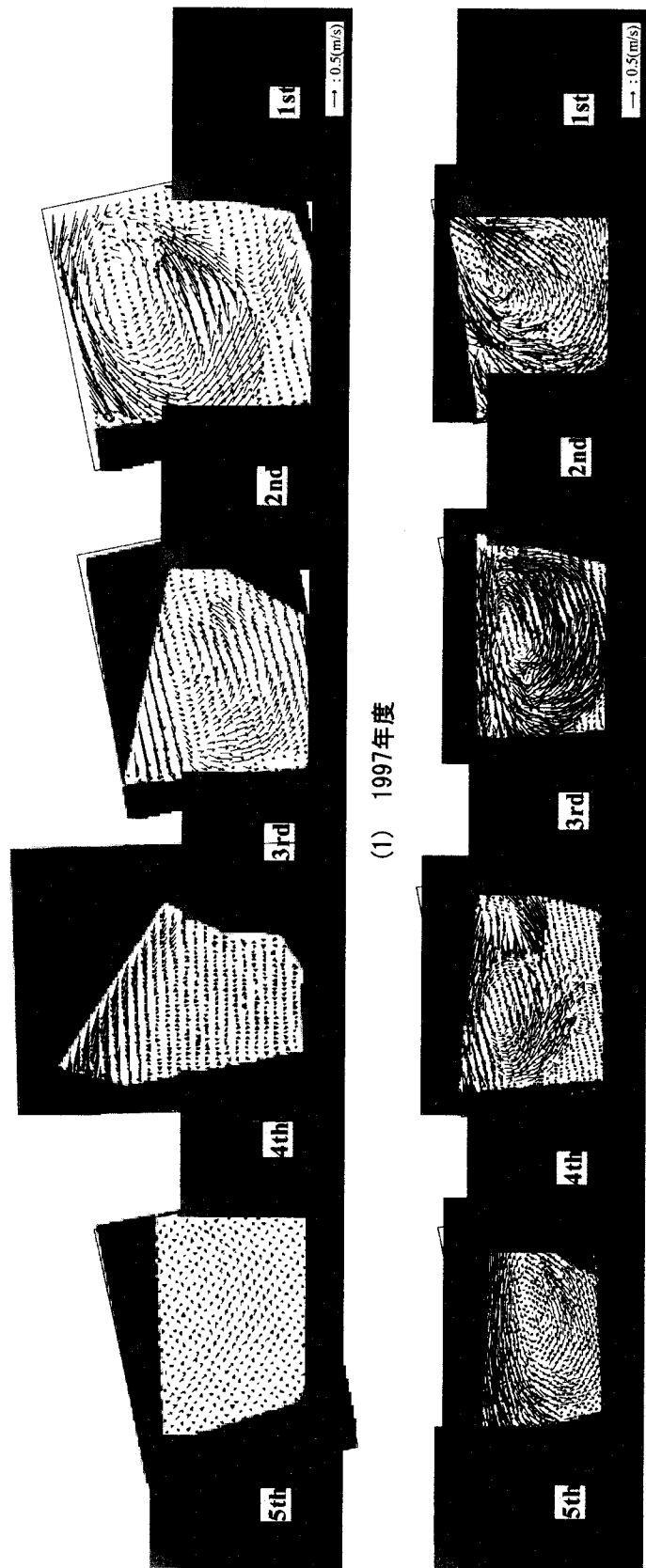


図-6 LSPIVによって得られた表面流速分布

にしかも高速に逸散するためにトレーサの散布は容易ではなく、ある程度適切な投入位置を知るためには数度の試行錯誤が必要であった。

(3) 計測誤差 (速度分解能)

図-5に式(17)を用いて得られた計測誤差(速度分解能)の分布を示す。白く見えている部分が各区間の解析領域に対応している。各解析領域は、高水敷に沿う直線状の護岸ブロックの線が基準となるように若干回転させて合成している。また、図中の水制形状は計測当日、水面上に現れていたテトラポット群の突出長さや幅の測量値を用いて便宜的に矩形で表している。図より計測誤差は河岸から離れるほど増大するが、水制内の計測誤差は0.1m/s程度と十分な精度を有していることがわかる。また、水制先端付近の主流速が2m/s程度であることを考えると、相対誤差はそれほど増大はしていない。この範囲の撮影俯角は少なくとも10度程度あり、局所的な流れ場を計測するには十分な計測条件だったといえる。

(4) 表面流速分布

図-6に1997年度と1998年度の同一地点の計測結果を比較した。水制の形状に若干の差が見られるのは年度によって水位が多少異なっており、水制形状の測り方にもずれがあったことが原因である。図より年度によって表面流の流況が全く異なっていることがよくわかる。このような差が生じた最大の要因には、1998年度の実測直前に大きな出水(台風10号による)があり、その影響で水制前面の砂州が大きく(数10m程度)下流側に移動したことが挙げられる。この移動に伴って局所的に滞筋が下流側に移動し、1997年には第1水制に衝突していた主流が1998年には第2水制に向うようになっている。そのため、規模や循環流速の最も大きい区間が1区間分だけ下流側にシフトした。1998年度の循環流速が相対的に大きいのは、流量規模が4割程度増大していたためと思われる。

両年の実測結果に共通する点は、主流が直接衝突した水制区間の循環流はかなり強いが、それよりも下流側の区間はいわゆる水はね効果の影響で淀んだ領域となっており、絶対流速が著しく低下している点である。また、周辺の河床面を観察すると洪水時に流失したと思われる数多くのブロックが散見され、それらが水制群周辺の流れをより複雑なものにしていた。なお、今回の実測でも明らかのようにこの地点の対岸砂州は下流に移動する傾向が見られるため、滞筋の変遷には十分な注意が必要と思われる。

4. 結論

本研究では、斜め画像を対象としたLSPIV解析に関していくつかの改良を加えるとともに、水制間の河川表面流計測に対する適用例を示し、以下の結論を得た。

- 1) 斜め画像の幾何補正において水面の傾きを考慮できる画像変換式を誘導した。
- 2) LSPIVの計測誤差に関する算定式を画像の歪みを考慮して示した。
- 3) 主流が水制群に衝突する場合の表面流速分布の特徴を、LSPIVを用いた現地計測によって明らかにした。
- 4) 本研究で提示した計測手法は、撮影アングルを固定し三次元画像変換係数を予め求めておけば、水面の式(緩勾配の場合は水位のみ)を与えるだけで正確な画像変換ならびにPIV解析を行うことができるため、計測システムの自動化を目指す上で非常に有効な手法とみなすことができる。

謝辞：本研究は河川整備基金の援助を受けて行われたことをここに記す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Fujita, I., Hara, M., Morimoto, T. and Nakashima, T.: Visualization and PIV measurement of river surface flow, *Summary of the International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal and Combustion Flow*, S3-8-1, pp.252-253, 1998.
- 6) Fujita, I. and Nakashima, T.: Image-based technique for river monitoring, *Proceedings of the 28th Congress of IAHR, Fluvial Systems-Processes, Functions and Management*, p.425, 1999.
- 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) 宇民正, 上野鉄男, 木下良作, 松本直也, 室元孝之: 斐伊川における洪水流況と河床形状の同時計測, 水工学論文集, Vol.38, pp.739-746, 1994.
- 10) 日本写真測量学会編: 写真による三次元測定, 共立出版, 1983.
- 11) 大林成行編著: 実務者のためのリモートセンシング, フジテクノシステム, pp.85, 1995.

(1999. 9. 30受付)