

# 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

## VIDEO IMAGE ANALYSIS OF INTER-GROIN SURFACE FLOW BY USING ENVIRONMENT-FRIENDLY TRACER

藤田一郎  
Ichiro Fujita

正会員 学博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

Surface flow patterns between groins located in a middle reach of the Nagara river are visualized and measured by an image analysis method. Shock absorbing particles made of corn starch are used as tracer to visualize the surface flow as they are easily dissolved into water and harmless to the environment. Visualized flow patterns are shot by a digital video camera from an oblique angle, transferred to a personal computer as a movie file, which is divided into a series of bit map files, transformed into non-distorted images, and analyzed by PIV(Particle Imaging Velocimetry) to obtain instantaneous and average two-dimensional surface velocity distributions. In addition, streak patterns of recirculating flows between the groins are made clear by superposing hundreds of images. The results demonstrated that the respective inter-groin velocity pattern shows completely different flow features depending on their relative locations.

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

### 1. 序 論

多自然型河川工法の一つとして水制が見直されてきているのは衆知の通りである<sup>1)</sup>。水制の機能として注目されているのは航路保持, 護岸防御などの他に環境面での機能であるが, 水制周辺の流れは非常に複雑であり, 水制間の詳細な流速計測は重要な課題である。しかしながら, 大半の研究では直線実験水路に単純な水制を置いた流れが対象とされており, 実河川での実測例はほとんどない。

一方, 著者はこれまで河岸などから斜め撮影したビデオ画像から洪水流の表面流況を求める画像解析システムを開発してきた<sup>2-6)</sup>。このシステムでは, 洪水時に河川表面に出現する波紋, 流木, 泡などいわゆる自然発生的な事象を表面流とともに移流する可視化トレーサとしてとらえ, PIV (Particle Imaging Velocimetry) の適用によって二次元速度場の計測を可能としている。ただし, このような自然トレーサは平時時には発生せず, 洪水時においても常時出現するとは限らないため, その適用範囲には限界があった。そこで, 本研究では積極的にトレーサを投入することによって従来の手法の欠点を補完することとした。トレーサには環境面に配慮した材質のものを選択し, 実河川(長良川)に設置されて

いる透過性水制間の表面流況の計測に用いた。

### 2. 画像解析手法

#### (1) 画像変換方法

河岸等からの撮影は斜め撮影になるためビデオには歪んだ画像が記録される。これを補正するために図-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,Z)およびCRT座標系(x,y)を設定し, 各座標系間に式(1)に示す二次射影変換式を適用する。

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

変換係数 $b_1 \sim b_8$ は, 両座標系における4点以上の標定点座標から最小自乗法により求める<sup>2)</sup>。ただし, CRT座標の標定点は通常水面に一致しないので(標定点は水面より高い位置に設置されるため), ビデオカメラから見たときの鉛直方向の歪みが局所的には微小と考えて, CRT座標系のy座標値を補正する。補正量は, 各標定点に鉛直に立てた既知サイズ(1 m程度)のパネルを写し込んで局所的なCRT座標の1画素物理サイズを算出し, 標定点から水面までの標高差を画素数に換算して求める。

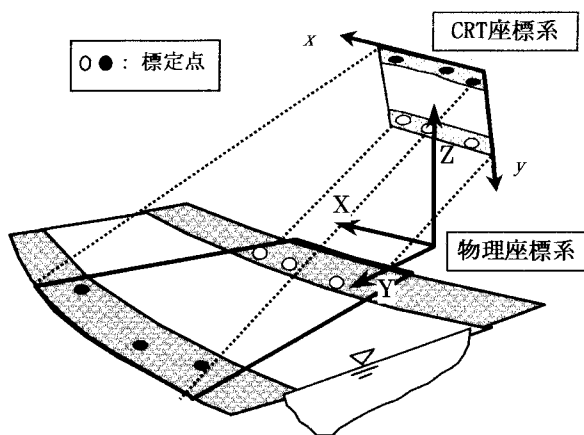


図-1 画像変換に用いる座標系

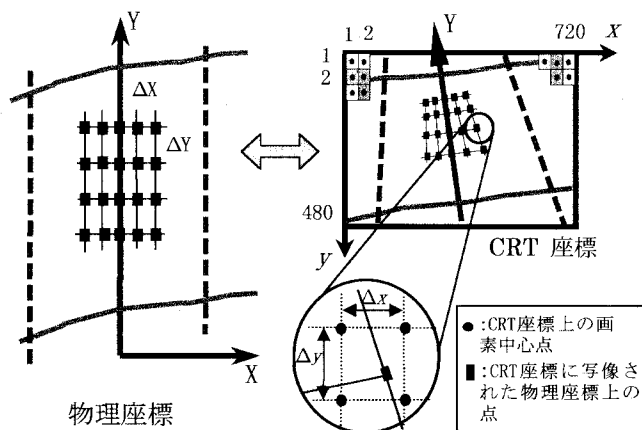
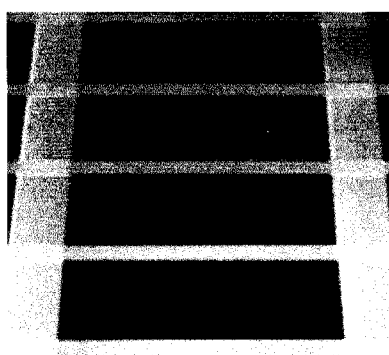
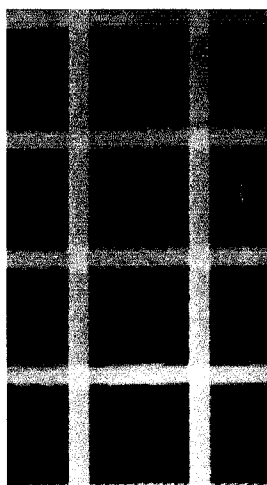


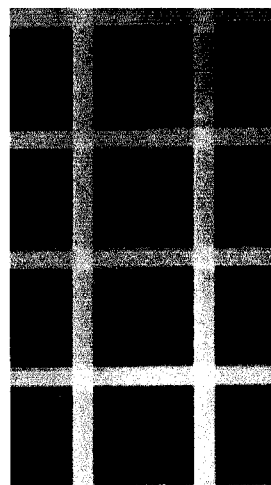
図-2 画像変換方法の模式図



(1) 原画像



(2) 線形補間



(3) 高次補間

図-3 画像変換に用いた補間法の比較

画像の変換は図-2を参照して次のように行なう。まず、物理座標上に間隔 $\Delta X, \Delta Y$ の格子点網を想定し、各格子点のCRT座標への写像点を以下に示す式(1)の逆変換式から算出する。

$$x = \frac{(b_5b_8 - b_7)X + (b_2 - b_3b_5)Y + (b_5b_7 - b_2b_8)}{(b_4b_7 - b_5b_6)X + (b_1b_5 - b_2b_4)Y + (b_2b_6 - b_1b_7)} \quad (2)$$

$$y = \frac{(b_6 - b_4b_8)X + (b_3b_4 - b_1)Y + (b_1b_8 - b_3b_6)}{(b_4b_7 - b_5b_6)X + (b_1b_5 - b_2b_4)Y + (b_2b_6 - b_1b_7)} \quad (3)$$

次に、計算された写像点の座標が整数であれば離散値空間であるCRT座標の輝度がそのまま物理座標面での輝度となるが、一般には整数とはならないため、通常は写像点を囲む4点の輝度から補間法によって物理座標面での輝度を算出する。このようにして得られる物理座標上の格子点輝度分布が無歪画像に対応する。したがって、格子密度を増せば見かけ上の空間分解能を高められるが、ビデオカメラを用いる場合、CRT座標の情報量は高々500x500点のオーダーなので、生成画像と原画像の情報量が同程度となるように格子間隔を設定することが重要となる。

## (2) 画像変換精度の改善

前述のようにこれまで無歪画像への変換には、写像点の周囲4点の輝度を用いる線形補間法、すなわち

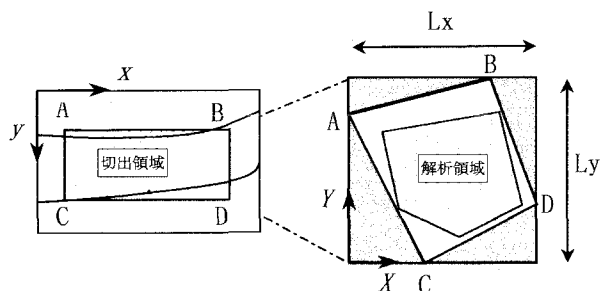
$$f(x_0, y_0) = f(x, y)(1 - \alpha)(1 - \beta) + f(x + 1, y)\alpha(1 - \beta) + f(x, y + 1)(1 - \alpha)\beta + f(x + 1, y + 1)\alpha\beta \quad (4)$$

ここに、

$x = [x_0], y = [y_0], \alpha = x_0 - [x_0], \beta = y_0 - [y_0], [w]: w$ を超えない最大の整数、 $(x_0, y_0)$ : 着目点の座標、 $(x, y): (x_0, y_0)$ の周囲の格子点座標、を輝度分布 $f(x, y)$ に対して適用してきた<sup>2-5)</sup>。しかしながら、式(4)を用いると変換画像に図-3(2)に示されるような変換誤差に伴う画像の乱れが現われ、画像計測精度の低下が懸念された。そこで、本研究では写像点の周囲16点の輝度値を用いる三次補間法<sup>7)</sup>の適用を試みた。関係式を以下に示す。

$$f(x_0, y_0) = \sum_K \sum_L f(x_K, y_L) C(x_K - x_0) C(y_L - y_0) \quad (5)$$

ここに、 $(x_K, y_L): (x_0, y_0)$ の周囲の格子点座標、 $C(x)$ は



(1) CRT座標 (歪画像) (2) 物理座標 (無歪画像)

図-4 解析領域設定

標本化関数の3次近似式で

$$C(s) = \begin{cases} 1 - 2|s|^2 + |s|^3 & , 0 \leq |s| < 1 \\ 4 - 8|s| + 5|s|^2 - |s|^3 & , 1 \leq |s| < 2 \\ 0 & , 2 \leq |s| \end{cases} \quad (6)$$

と表わされる。

変換画像の比較を図-3に示す。これは平板に一辺10cmの格子を描き、斜め撮影した原画像(図-3(1))を変換したものである。本手法により無歪画像(正方格子)が生成されること、また、線形補間で生じていたノコギリ状の画像の乱れ(ノイズ)が高次補間で完全に解消されていることがわかる。

### (3) 解析領域の設定

一般に撮影されたビデオ画像には計測対象以外の余分な背景などが含まれている。そこで、効率的なPIV解析のために解析領域を以下の手順で絞り込む。

#### a) 対象領域の切り出し

CRT座標上で対象領域が含まれるような矩形領域を決める。すなわち、図-4(1)に示す切出点(点A~D)のCRT座標 $(x_A, y_A) \sim (x_D, y_D)$ を求める。

#### b) 空間解像度および画像サイズの設定

式(2, 3)より切出点の物理座標 $(X_A, Y_A) \sim (X_D, Y_D)$ を算出し、切出し画像の物理範囲 $(Lx, Ly)$ を次式から求める。

$$Lx = \max(X_A, X_B, X_C, X_D) - \min(X_A, X_B, X_C, X_D) \quad (7)$$

$$Ly = \max(Y_A, Y_B, Y_C, Y_D) - \min(Y_A, Y_B, Y_C, Y_D) \quad (8)$$

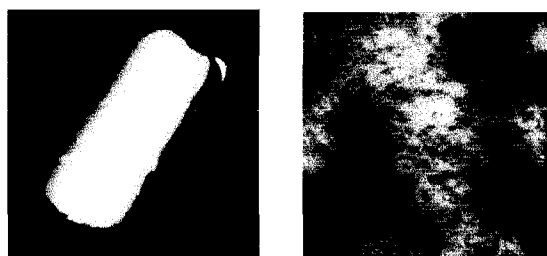
次に、無歪画像サイズ $Nx, Ny$ を物理面での格子間隔 $\Delta X, \Delta Y$ 、すなわち空間解像度を調整しながら次式で求める。

$$Nx = Lx / \Delta X, \quad Ny = Ly / \Delta Y \quad (9, 10)$$

前述のように $\Delta X, \Delta Y$ の値は原画像の情報量が有効に利用されるように決める必要がある。

#### c) 解析領域

通常、生成された無歪画像には水面以外の部分や、俯角が小さく精度が期待できない領域が含まれる。したがって、図-4(2)に示すようにPIVの適用領域(解析領域)を指定する。具体的には解析領域内の輝度値が0、その他の領域が0以外の値をとるような補助画像を予め生成しておき、この補助画像を参



(1) 初期状態 (2) 5分後の状態

図-5 トレーサの変形状態

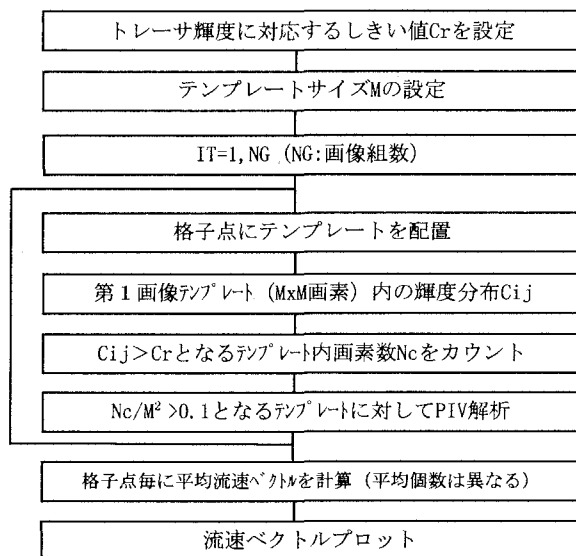


図-6 トレーサ画像の処理手順

照しながらテンプレートが解析領域に含まれる点に対してのみPIV解析を適用する。

### (4) 撮影俯角の影響

図-3(1)と同一の格子板を用い、撮影俯角を種々変化させてその影響を調べると、俯角が約10度までは正方格子が得られたが、それよりも俯角が小さくなると奥行き方向に正方格子からのずれが生じた。したがって、俯角が約10度以下になる領域では、撮影方向距離の変換誤差が無視できなくなると考えられる。

### (5) 環境にやさしいトレーサの利用

本研究では、梱包用に使用されているバラ状緩衝材(NOVON FOAM, (株)日祥製)をトレーサとして利用した。材質のベースはコーンスターチであり、完全生分解する性質を有している(カタログでは45日で80%以上の生分解率)。形は直径2cm、長さ5~10cmの中空の円柱形である。特徴は水面に浮べると同時に水を吸い始め、約1分で70パーセント程度が水没し、5分後には全体が分解して完全水没する点である。その状態を図-5に示す。したがって、投入初期の段階でトレーサが風による抗力を受け、水面

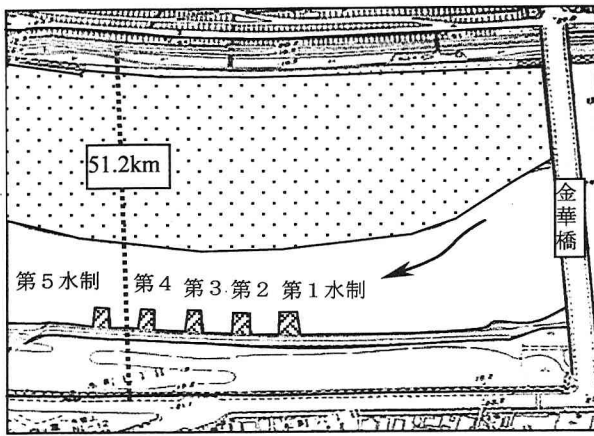


図-7 水制の設置状況(長良川51.2Km地点)

を”走る”可能性を除けば、水面流動に対する追従性は十分あると考えられる。幸い、撮影当日(1997年7月24日)の天候は快晴微風であり、風の影響は認められなかった。トレーサは乳白色であり、流水中でも良好に識別できた。

PIV解析では、効率化を図るために図-6に示すような手順でトレーサが存在する部分だけを解析した。すなわち、予めトレーサと背景とを識別できる輝度のしきい値Crを求めておき、テンプレート内にCrよりも明るい画素が10パーセント以上含まれる点に対してのみ解析を行なった。平均値は各格子点で有効なベクトルだけをピックアップして算出した。

#### (6) 計測精度

PIVによる計測精度は、画像時間間隔( $\Delta t$ )、テンプレートサイズ(M)あるいは、画像生成における空間解像度( $\Delta X, \Delta Y$ )等の影響を受ける。PIVの基本的な速度分解能はトレーサの1画素移動量に相当する速度、すなわち、

$$\Delta u = \Delta X / \Delta t \quad (11)$$

で与えられるが、相関係数の空間分布を利用した sub-pixel interrogation により平行流では  $0.2 \Delta u$  程度まで分解能を高めることができる<sup>8)</sup>。ただし、 $\Delta t$  が大きすぎるとパターンが流れのせん断変形による影響を受け、十分なマッチングが実現できなくなるため、おおまかな目安として最大移動量が10~20画素程度となるように $\Delta t$ を設定する必要がある。これより、PIVによる計測可能範囲は

$$u = (0.2 \sim 20) \Delta X / \Delta t \quad (12)$$

程度となる。ただし、最大移動量はせん断変形が小さければさらに大きくてもよい。テンプレートサイズはパターンが十分に含まれるように物理サイズを合わせて決めればよいが、物理サイズが同程度であれば空間解像度の影響が小さいことが示されている<sup>9)</sup>。また、計測誤差は平行流では  $0.2 \Delta u$ 、せん断流では  $(0.2 \sim 1.0) \Delta u$  程度と考えられる。

### 3. 実河川における水制間流れへの適用

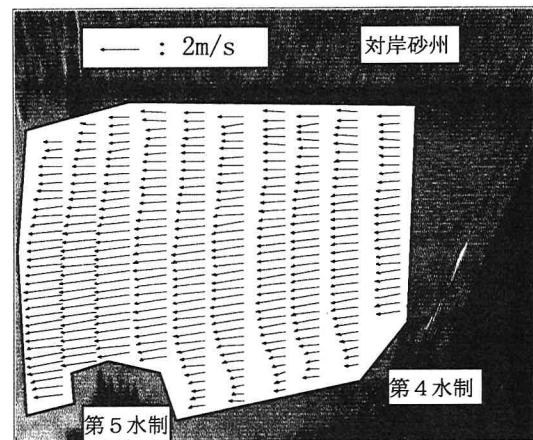


図-8 主流の流速分布(第4,5水制前面)

本研究で対象としたのは、長良川51.2Km地点に設置された5基の水制間の流れである。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。図-7にその様子を示す。水制サイズは、突出長さが約16m、水制幅が8m程度、中心間隔が約30mである。水制は上流側から第1水制、第2水制等と名づけた。俯角による制約から主流の流れ(遠景)は左岸堤防上から、水制区間(近景)は高水敷から撮影を行なった。撮影にはデジタルビデオカメラ(Sony製、CDR-VX1000)を用いた。標定点としては対岸砂州には発泡スチロールの板を鉛直に固定し、水制側はブロックや護岸に白色スプレーで印をつけた。ビデオカメラ設置場所を原点とする各標定点の物理座標は光波測距器を用いて測量した。

#### (1) 画像解析システム

PIV解析には、デジタルビデオの記録形式であるDVファイルをリアルタイムでハードディスクに転送可能なパソコンベースのノンリニア編集システム(Epson製、CREASANCE)を用いた。連続ビデオ画像は、ムービーファイル(AVIファイル)として記録されるため、BMPファイル群への変換、続いてバイナリのモノクロ濃淡画像への変換をしてPIV解析に用いた。モノクロ画像への変換により記憶容量を約1/3に節約できる。各画像は、8ビット、720x480画素で構成され、1分間当り最高1800枚の連続画像が得られる。画像は650MB(2000枚弱のモノクロ画像に対応)のデータを格納できるCD-R(YAMAHA製、CDR4000tx)を用いて保存した。

#### (2) 水制前面の流れの解析

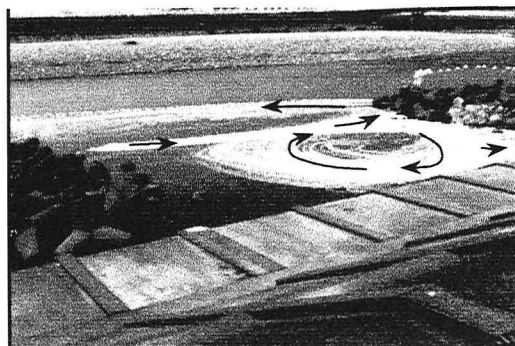
トレーサの投入は水制前面の主流に対しても試みたが容易ではなかったため、今回は水面波紋を利用して第4,5水制前面の流れを解析した。水面波紋は目視で容易に確認できた。解析では、 $\Delta X = \Delta Y = 0.05m$ として1094x1066画素の画像(54.7x53.3mに相当)を生成し、 $\Delta t = 1(sec)$ 、 $M=31$ として49組の瞬間値から50秒間の平均値を求めた。結果の流速分布を



(1) 第1, 2水制間(最上流)



(2) 第2, 3水制間



(3) 第3, 4水制間



(4) 第4, 5水制間(最下流)

図-9 水制間の流跡線合成画像

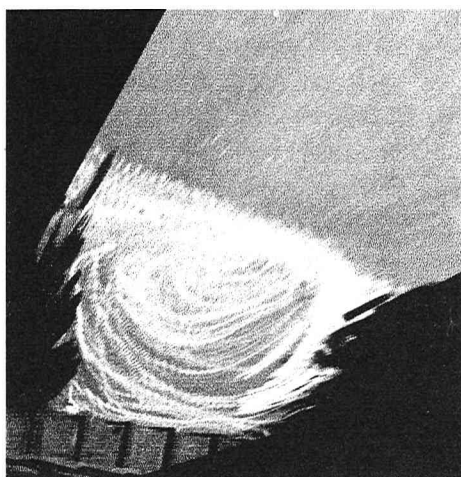


図-10 第2, 3水制区間の無歪画像  
(740x863画素,  $\Delta X = \Delta Y = 0.03\text{m}$ )

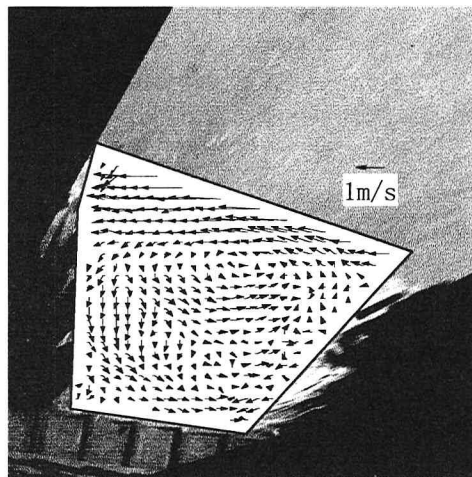


図-11 第2, 3水制区間の平均流速分布

図-8に示す。この地点では本堤の線形は緩やかな蛇行性状を示しているが、図-7からわかるように平水時は固定砂州に沿って主流が低水路内を大きく偏流し、左岸に向かう強い蛇行流を生じさせている。解析結果は左岸に向かう流速の増大傾向を良好にとらえている。なお、最大表面流速は約 $2\text{m/s}$ 、最大水深は水制先端間の中点付近で約 $4\text{m}$ 、また、計測日当日の河川平均流量は約 $100\text{m}^3/\text{s}$ (速報値)であった。水面幅に対応する俯角は $5\sim 8$ 度であり、本来の計測条件( $10$ 度以上)を満たしていないが、流向が撮影方向にほぼ垂直だったため、比較的良好な結果が得られたものと考えられる。

### (3) 水制間の定性的な流況

水制間の流況は前述のトレーサを用いて可視化した。トレーサは $0.1\sim 0.2\text{m}^3$ の量を水制端や高水敷側から投入した。投入と同時にトレーサ群は水制内の循環流にのってゆっくりと回転を始め、水制先端付近に達したトレーサの一部は主流に連行され本川を流下した。また、循環流はゆっくり回転するため、水制間の水面はほぼ平面の状態が保たれていた。前述のように風による影響は認められなかった。水制区間の平均水深は $2\text{m}$ 程度で水制前面の深掘部との水深差は約 $2\text{m}$ であった。撮影は各ケース約 $5$ 分間行なった。

まず、定性的な流況を把握するために $1$ 秒間隔でデジタル化した数百枚の画像を合成し、トレーサの流跡線画像を求めた(図-9)。以下、合成画像に基づ

き各水制区間の流況について考察する。

#### a) 第1, 2水制間の流況(最上流部)

主流は第1水制先端に当たり、白波が立っている。水制前面の速い流れのために水制内には、反時計周りの循環流が生じると同時に、その副流として規模の小さい時計周りの流れが生じている。また、第1水制の根元付近のトレーサは水制側に引き寄せられた。これは、対象としたのが透過性水制であり、第1水制上流側の流体が主流に連行されるために水制背面が相対的に負圧になるためと考えられる。

#### b) 第2, 3水制間の流況

この区間では一つの大きな循環流が生じている。この区間に対する画像解析結果、考察は後述する。

#### c) 第3, 4水制間の流況

大きな特徴は他の区間とは異なって時計周りの循環流が生じている点である(図-9(3))。これは水制先端を結ぶ細長い領域で非常に強いせん断層が形成され、それに伴う強い逆流が誘因となっている。

#### d) 第4, 5水制間の流況(最下流部)

第5水制先端から投入したトレーサはすべて逆流し第4水制側に吸い込まれた(図-9(4))。一方、第4水制先端から投入したトレーサは主流には乗らず、回り込んで上流側の区間へ移動した。

#### e) 全体の流況

以上のように、水制の各区間の流れは各々かなり異なった複雑な流況を呈することがわかった。5基の水制を一体化した一つの透過性構造物とみなすと、水制前面の高速流れが水制の取り付け部に沿う全体的な逆流を誘引しており、それが水制間の流体輸送と連動している。

#### (4) 第2, 3水制間の流速分布

最も大きな循環流を呈した第2, 3水制区間の表面流速分布をPIV解析により求めた。図-9(2)に示した黒枠内を切出画像領域とし、 $\Delta X = \Delta Y = 0.03\text{m}$ として740x863画素の無歪画像(22.2x25.9mに相当)を0.5sec間隔で250組生成して解析を行なった。計測誤差は1~6cm/s程度である。合成画像に対する無歪画像を図-10、得られた平均流速ベクトルを図-11に示す。俯角範囲は11~23度で十分だったが、撮影地点が対象領域に近かったため、水制区間全域をうつし込むことはできなかった。しかしながら、この区間の特徴的な表面流況をとらえることができた。すなわちこの区間の循環流は、水制先端間に中心軸を持つ楕円状の渦が駆動力の一つであること、その渦の中心は時間的に変化しないこと、流跡線(定常なので流線にも一致)はその渦を中心とする非対称な円群からなること等が明らかとなった。また、流跡と平均流速ベクトルの方向は良く一致した。

## 4. 結論

トレーサを利用したPIV解析を水制間の河川表面

流に対して適用し、以下の結論を得た。

- 1) 環境にやさしいトレーサとしてコーンスターチを原材料とする緩衝材を用い、河川表面を良好に可視化できることを示した。
- 2) 画像変換に高次補間を用いることによって、高精度の画像が得られることを示した。
- 3) 撮影俯角の限界が10度程度であることを示した。
- 4) PIV解析により水制間の循環流の流速分布を得、流れの特徴を把握することが可能となった。
- 5) 画像の合成によって水制間流れの流跡線を示し、水制の相対的な位置関係によって流況がまったく異なることを示した。
- 6) 本計測では、水制高さに対して比較的水位が小さい場合を対象としたが、今後は様々な水位や流量に対する計測を行ない、流況の変化過程を明らかにする必要がある。また、河床形状の詳細な計測も必要と思われる。

**謝辞：**本研究を行なうにあたり、日本建設コンサルタント小原一哉氏からはトレーサを紹介していただき、現地計測、画像解析では大学院生原基樹君、学部生森本貴生君らをはじめとする研究室諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996。
- 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，Vol. 38，pp. 733-738，1994。
- 3) 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。
- 4) 藤田一郎，綾史郎，石川貴大：ビデオリモートセンシングによる河川表面流速の計測精度，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集pp. 115-120，1995。
- 5) 綾史郎，澤井健二，藤田一郎，富永晃宏，後野正雄，村上正吾，石井義裕：画像解析を用いた河川の洪水流の観測—基礎水理部会研究分科会報告，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，pp. 59-65，1995。
- 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) 村上伸一：画像処理工学，東京電気大学出版局，1996。
- 8) 藤田一郎，神田徹，門脇正夫，森田卓光：開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析，土木学会論文集，No. 539/II-35，pp. 79-88，1996。

(1997. 9. 30受付)