

## 多重合成法による現地河川流の可視化画像解析

## Visualization and Image Analysis of River Surface Flow by Multiple Superposing Method

藤田一郎\*・原 基樹\*\*・森本貴生\*\*\*

Ichiro FUJITA, Motoki HARA and Takao MORIMOTO

\*正会員 学博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

\*\*非会員 工修 (株) アイ・エヌ・エー, \*\*\*非会員 (株) 若築建設

River surface flows were visualized by using special tracers and their surface velocity fields were analyzed by an image analysis method. Environment-friendly tracers made from corn starch, normally used as shock absorbers, were used in the visualization. Surface-streaklines were found to be clearly visualized by the multiple superposing method proposed by the authors. In the image analysis, oblique-angled video images observed from a river bank or a bridge were made possible to use in the PIV(Particle Image Velocimetry). In this research, flood flows in a curved section of a river and large-scale recirculating flows between groins, structures installed in a river to protect a river bank, were investigated by the above methods. In addition, the accuracy of the method was examined in detail by analyzing the spatial distribution of velocity resolution.

**Key Words** : PIV, river surface flow, multiple superposing method, tracer, groin

## 1. 序 論

実河川を対象とした流速計測には、プロペラ流速計に代表される点計測法あるいは浮子法がよく用いられ、最近では航空写真解析のような平面計測なども行われるようになってきたが<sup>1-2)</sup>、これらの手法はいずれも簡便さや経済性あるいは臨機応変性の点で十分でない。そこで、著者らはこのような問題点を解消するために、斜め撮影されたビデオ画像の利用を可能とする簡便な画像解析手法の開発を行ってきた<sup>3-7)</sup>。この手法では洪水時の河川表面に現れる色の濃淡、浮遊物、あるいは表面波紋をトレーサの代替物とみなして表面流速分布の計測を行っている。しかしながら、平水時にはこのようなトレーサ代替物が生じないため、手法としての普遍性に問題があった。そこで、平水時、あるいは洪水時でもトレーサ代替物が得られない場合には積極的にトレーサを投入することを基本的な方針として、実河川での画像計測を行った。ただし、実験水路ではなく、自然環境の重要な構成要素である実河川を対象とするため、トレーサの選択は慎重に行った。

## 2. 画像解析手法

画像解析手法としてはパターンマッチングに基づく PIV (Particle Image Velocimetry) の内、濃淡画像相関法を用いた。ただし、局所的に分散するトレーサ群

を取り扱うためにいくつかの工夫を行った。

## 2.1 斜め撮影画像の取扱い

斜め画像の補正には二次射影変換(透視変換)を利用する。変換係数は現地に設置した標定点のモニター画面における CRT 座標 $(x, y)$ と、現地での物理座標 $(X, Y)$ (平面を仮定した水面に投影した標定点の座標)から求める。この画像変換方法は、見かけの空間分解能 $(\Delta X, \Delta Y)$ を任意に設定できる点に特徴がある。

## 2.2 トレーサの選択

本手法は実河川を対象とする計測法であるため、トレーサの選択は重要な事項である。すなわち、トレーサ散布による環境への影響を最低限にとどめなければならない。そこで、ここでは梱包用の緩衝材として製品化されている NOVON FOAM(日祥製)を利用した<sup>8)</sup>。理由は素材がコーンスターチなので最終的には完全生分解する性質を有しているからである。サイズは長さ 5~10cm、直径 2cm 程度の中空円筒型である。ちなみに、このトレーサを静水面に浮かべ、その変形過程(吸水過程とも言える)を横から観察した様子を図-1 に示す。静水面に浮べた後、約 4 分程度でトレーサ本体が完全に水面下に没していることがわかる。これ以降の変形はほとんどなく水面下近くを漂うことになるため、少なくともトレーサ自身は、現地計測で問題となる風の影響を受けにくいという大きな利点があることがわかる。幸い、今回の現地計測は微風状態で行われ

たので風の影響は無視でき、トレーサが投入後から流れによく追従することを確認している。

2.3 PIV 解析

個々のトレーサは高々数 cm の大きさで実際には流下に伴って分解していくため、河岸や橋から撮影した画像から個々のトレーサを識別することは、ビデオカメラの解像度の点からも非常に困難である。すなわち、粒子を追跡する PTV(Particle Tracking Velocimetry)的な取扱いとはできないため、トレーサ群の分布パターンを追跡する PIV 手法の方が有効となる。ただし、照明などを完全に制御できる実験水路とは全く異なり、日射や雲の状態によって画像の濃淡に大きな偏りが生じるため、背景除去操作でトレーサの輝度分布を一様化させておく必要性が生じる。また、アナログ系のフレームメモリを利用する際には、画像取り込みの際にノイズ（横縞）が入ることがあるので、median filter によりノイズ除去を行う必要がある。

また、トレーサを河川表面全体に様に散布することは事実上不可能であるため、各々の画像でトレーサの存在している部分だけを対象として PIV 解析を行う。すなわち、トレーサを識別できる輝度のしきい値を予め調べておき、第 1 画像テンプレート内の輝度分布で、このしきい値を下回る白っぽい画素の割合が 10%以上となる場合についてのみ計算を行う。以上の解析手順のフローチャートを図-2 に示す。この中で変換領域とは、対象画像から切出した流れ場だけの領域、解析領域とはその変換領域内でトレーサが存在している部分のことであり、PIV はこの解析領域に対して適用することになる。

3. 多重合成法

ここでいう多重合成とはデジタル化された連続画像を計算機上で合成することをさす。合成においては、対象とする連続画像の濃淡分布をすべてスキャンし、各画素の位置における輝度値の最小値（MIN）を求める。多重合成法は以下の 2 通りの目的で利用した。

3.1 流跡線の可視化

対象とするすべての画像を連続多重合成することによって、カメラの長時間露光撮影に類した画像を得ることができる。すなわち、トレーサ画像をすべて重ねあわせることによって非常に明瞭に流跡線を可視化できる。今回対象とした流れはほぼ定常とみなせたので、水表面の流線を可視化したものとも言える。

3.2 解析の効率化

一般的に PIV は PTV に比べて計算量が多い。これ

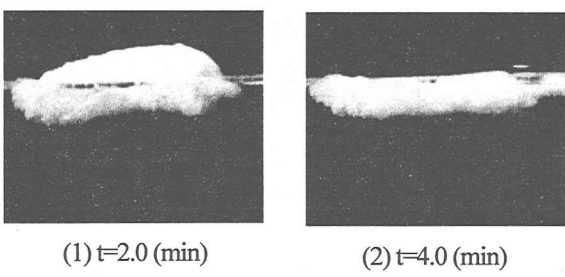


図-1 トレーサの変形過程

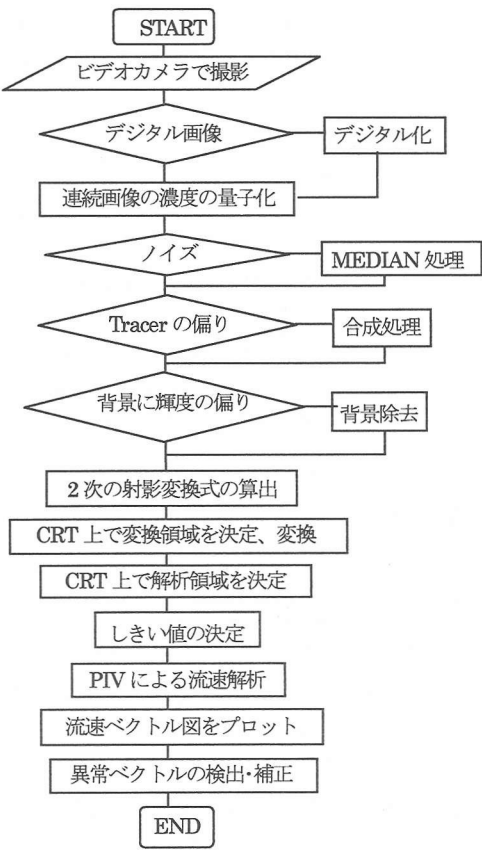


図-2 PIV 解析のフローチャート

は探索領域内で相互相関係数を繰り返し計算しなければならないためである。したがって、今回のように大量の画像（各ケース 100~1000 枚のオーダー）を解析するためには何らかの効率化が望まれる。ここでは前述のように、トレーサが部分的にしか分布していないことを逆に利用し、トレーサ群が互いに重複しない m 個の画像群を多重合成することによってかなりの効率化が実現できた。具体的には、図-3 に示すように画像サンプリングを  $\Delta t$  間隔で行ったとき、 $N \Delta t$  間隔で m 枚の画像を互いに  $\Delta t$  だけずらしながら多重合成を行った。PIV 解析はこのように多重合成された連続画像に対して適用した。ただし、 $N$  および  $m$  の値は合成画像のトレーサ群が互いに決して重畳しないように慎重に決めた。

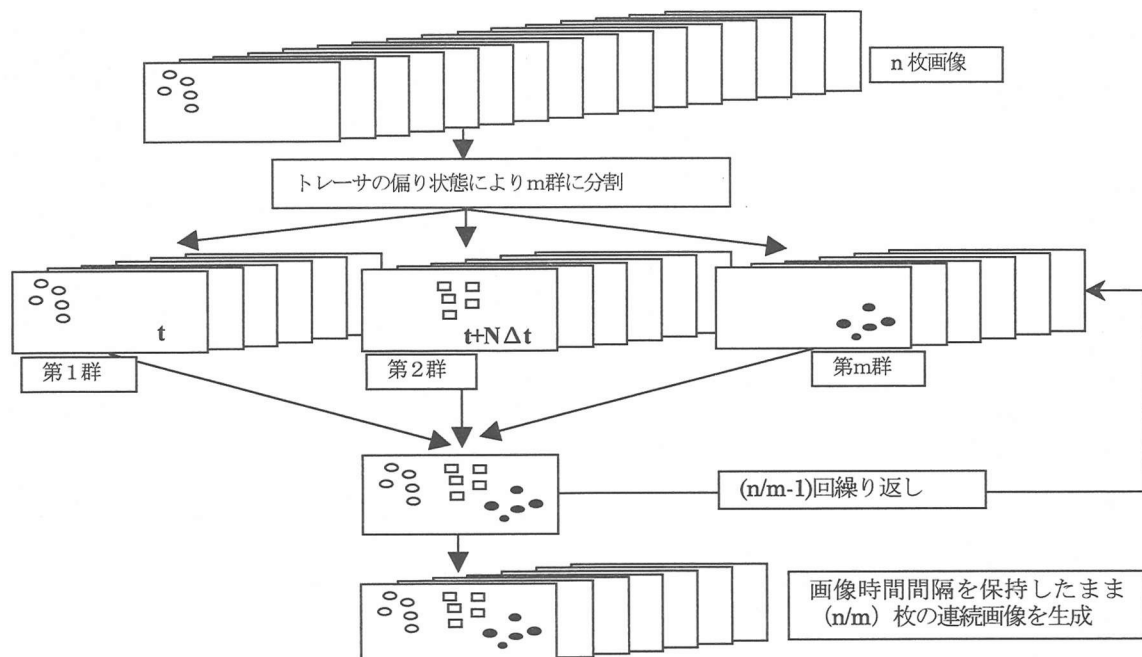


図-3 多重合成法の概念図

#### 4. 洪水表面流への適用

ここまで説明してきた手法を K 川の洪水流に適用した例を以下に示す。対象地点は水制が設置された河川湾曲部であり、水制上流側の橋のたもとから下流に向かってビデオ撮影した。撮影は別々の日に行ったが、ここでは case 1 を水制が水没しているケース、case 2 を水制が水面上に現れているケースとした。

##### 4.1 画像解析システム

撮影には家庭用の 8 ミリビデオカメラを用いたので、アナログ画像信号 (NTSC) をフレームメモリボード (DITECT 製、最大枚数 192 枚) を通してサンプリング間隔 0.5 秒でパソコン (PC9801BX3) に取り込んだ。得られた画像は 512x512 画素、256 階調のモノクロ画像である。画質は必ずしも良好なものではなく、ノイズも発生したので median filter 処理が必要であった。

##### 4.2 画像変換

画像の変換には、左右の河川堤防に沿って計 7 箇所に設置された標定点 (1m 四方程度のパネル) の測量データと、それらの CRT 座標から求めた二次射影変換式を用いた。画像は見かけの空間分解能を 0.3m として生成し、case 1 では 403x378 画素、case 2 では 358x462 画素のサイズの各連続画像を得た。

##### 4.3 表面流線の可視化



(1) 原画像 (斜め画像)



(2) 無歪み画像

図-4 多重合成法による表面流跡線の可視化 (case 1)



図-5 多重合成法による表面流線の可視化 (case 2)

図-4(1)に case 1 で2分間の画像 120 枚を多重合成して得た表面流線の可視化画像を示す。トレーサは橋の上の2箇所から別々の時間に投入されたので、各場面の2分間の画像が多重合成されている。左下にわずかに見えているのは橋の手すりである。トレーサの利用により、河川湾曲部の表面流の状況が明瞭に可視化されていることがわかる。図の白枠内を変換領域として画像変換した結果が図-4(2)である。この図は 121x113m の空間に対応する。橋からかなり離れたところまで湾曲流に沿った流向の変化が見て取れる。

図-5には case 2 の結果を示す。107x139m 範囲の流線が得られた。右上の黒い突起部分が水面上に現れた水制である。斜め画像をもとに無歪画像を生成しているので、水制の形は実際よりもかなり変形して見える。流量規模の大きい case 1 と比較すると流線は整然とならんでおり、水表面での乱流拡散効果が減衰している状況がよくわかる。水制背後の流れは観測地点から遠すぎるためによくわからないが、水制先端付近のトレーサが河川中央寄りへ流向を変えており、いわゆる水制の“水はね”効果が捉えられている。

#### 4.4 平均流速分布

図-6に case 1 の PIV 解析で得られた平均流速分布を示す。解析におけるテンプレートを 35x35 画素としたので、得られた流速は 10.5m 四方の正方形内の局所平均値を表わしている。なお、前処理として背景除去処理を行い、多重合成法は  $N\Delta t=10s, m=6$  として

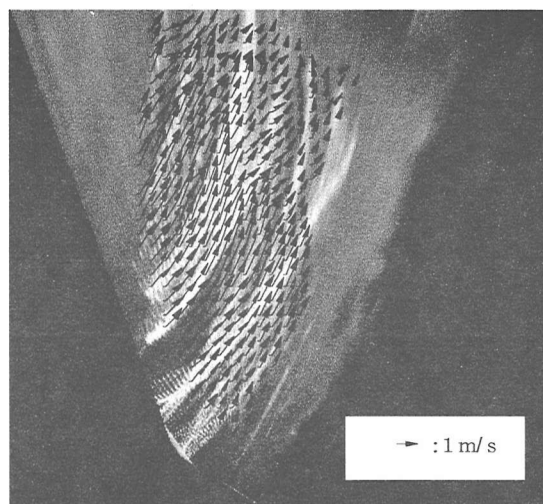


図-6 平均流速分布 (case 1)

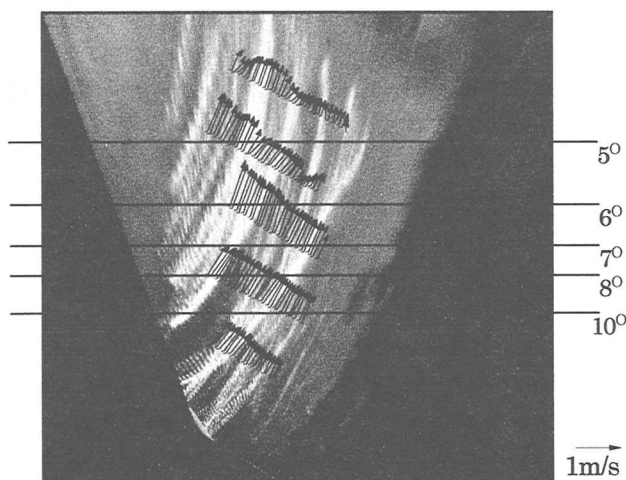


図-7 測線上平均流速分布 (case 1)

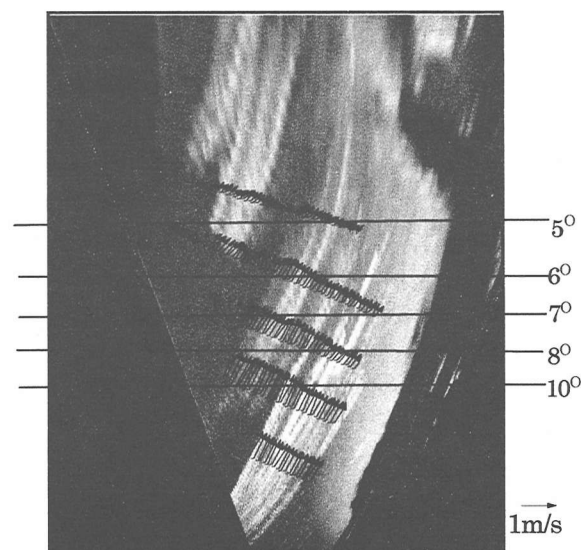


図-8 測線上平均流速分布 (case 2)



適用した。

流れはほぼ定常流と見なせたので、流跡線と流速ベクトルの方向はほぼ一致するはずであるが、図の半分より上の部分では流速ベクトルのばらつきが大きい。これは、ビデオ撮影位置（図の底境界よりも少し下側）からの距離が遠く、観測の俯角が非常に小さくなるためである。すなわち、俯角が小さく（遠方に）なるとCRT座標の1画素に相当する物理サイズが数10mにも達するようになってトレーサ群の分布パターンが識別できなくなり、パターンマッチングが破綻するためである。一方、図の半分よりも下側では流跡線と流速ベクトルの一致は非常に良好であり、この部分ではPIV解析の精度がある程度保持されていることがわかる。このような特徴は、後述の速度分解能分布によって定量的に説明することができる。

計測精度に関してさらに検討するために、いくつかの横断測線上の流速分布を撮影俯角とともに示したのが図-7および図-8である。これより、流速ベクトルのばらつきが始まるのは俯角が6~7度程度からであり、それよりも俯角が大きければ流れの特徴が良好に得られていることがわかる。すなわち、湾曲部外岸側に設置された水制の効果で、水制への接近流が多少減速傾向にあること（図-8）、流量規模の違いに対応した流速ベクトルが得られていること（case 1の値 > case 2の値）などが明らかである。

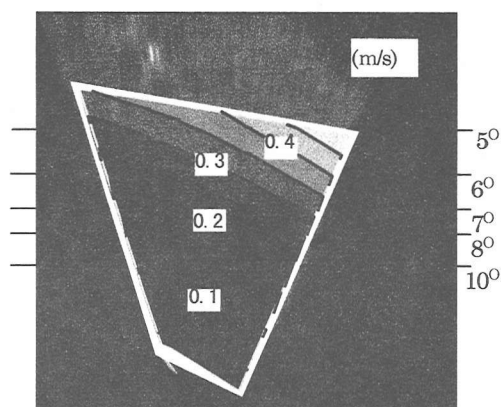
#### 4.5 計測精度

前述のように本解析の画像生成では見かけの空間解像度を0.3mとして行っているが、実際の空間解像度はどの程度と考えれば良いのであろうか。斜め撮影の画像であるから空間解像度、したがって速度分解能は場所的に分布していると考えるのが妥当であろう。そこで、ここでは原画像において $\Delta t$ 間の1画素移動量に対応する微小速度を速度分解能の基準と考える。すなわち、基準となる速度分解能 $\Delta u_0$ 、 $\Delta v_0$ は

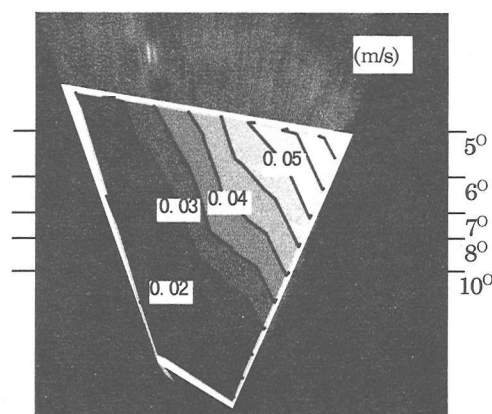
$$\Delta u_0 = \Delta x / \Delta t, \quad \Delta v_0 = \Delta y / \Delta t \quad (1, 2)$$

となる。ここに、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は無歪み画像に変換後の原画像1画素の縦横長さである。ただし、本PIV解析ではparabolic interpolationによって相関分布のピーク位置をsub-pixelレベルで推定し空間精度を高めているため、実質的な速度分解能はさらに高くなる。Fujitaら<sup>9)</sup>は模擬粒子画像に対する系統的なPIV解析から、 $\Delta t$ 間のせん断変形が大きくない場合にはparabolic interpolationによって分解性能を5倍程度改善できることを示している。今回対象とした流れは急激なせん断変形場ではないので、Fujitaらの成果を参考にすると実質的な速度分解能を

$$\Delta u = 0.2 \Delta x / \Delta t, \quad \Delta v = 0.2 \Delta y / \Delta t \quad (3, 4)$$



(1) 流下方向の速度分解能



(2) 横断方向の速度分解能

図-9 速度分解能の空間分布(case 1)

程度と見積ることができる。

式(3,4)を用い、case 1に対して求めた速度分解能分布を図-9に示す。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ の分布は二次射影変換式から求めることができる。図より流下方向と横断方向で精度に明らかに大きな違いが見られる。これは、二次射影変換後の原画像1画素がかなり縦長の矩形に変換されるためである。このため、俯角が小さい所では流下方向の精度が1オーダー近くも悪くなっている。また、俯角が比較的大きな部分でも5分の1程度の精度悪化が見られる。表面流速は1m/s程度だったので図-6,7で良好な流速ベクトルが得られた俯角7~8度以上の領域では、相対的な計測誤差は流下方向では5~20%、横断方向では1~3%となる。したがって、一つの目安として10度程度の俯角があれば良好な計測精度が期待できることがわかる。

今回の解析では見かけの空間解像度と画像時間間隔を固定しているが、計測精度はこれらにも影響を受けるはずである。例えば、サンプリング時間間隔を実質的な空間解像度に合せて適当なブロック毎に調整すれば、速度分解能の分布をある程度一様化でき、流速ベクトルのばらつきも多少抑えることができるはずである。この点に関する検討、考察は今後の課題である。

## 5. 実河川水制間流れへの適用

ここでは、水制間の流れに対象を絞って行った現地可視化画像計測の結果を示す。基本的な手法はこれまでと同様であるが、循環流を伴った複雑な流れ場が対象である点がこれまでと異なる。

### 5.1 画像解析システム

このケースではデジタルビデオカメラを用いて撮影を行い、パソコンベースのノンリニアビデオ編集装置（Epson 製、CREASENSE）を用いて画像を量子化した（詳細は文献 8 を参照）。最終的に得られるのは 720x480 画素、256 階調のモノクロ濃淡画像であり、ハードディスクの容量に相当する大量の連続画像を取得できる点が異なる。

### 5.2 対象地点

計測対象は、長良川 51.2km 地点に設置された 5 基の水制間の流動である。水制は上流側から第 1, 2 水制等と名づけた。水制の突出長さは約 17m, 水制幅は約 10m, 水制間隔は約 22m であり、テトラポットを積み上げただけの単純な構造となっている。したがって水制内の透水性はかなり高い。この水制は対岸（右岸）に発達した砂州の発達によって流れが偏流した結果、左岸堤防前面が深掘傾向になってきたのを防止するために、約 10 年前に設置されたものである。

計測の状況を模式図に示したのが図-10 である。この図のように水制区間毎に撮影位置の調整を行い、ビデオカメラの視野内に 4 つの標定点が入るようにした。標定点はテトラポットや手前の堤防上に、白色スプレーで印をつけただけの単純なものとした。各標定点の座標はレーザ測距機で測量してその 3 次元座標を

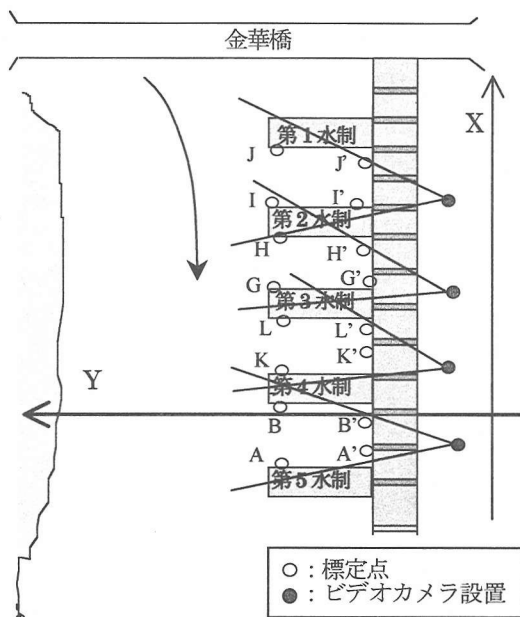


図-10 計測状況の模式図

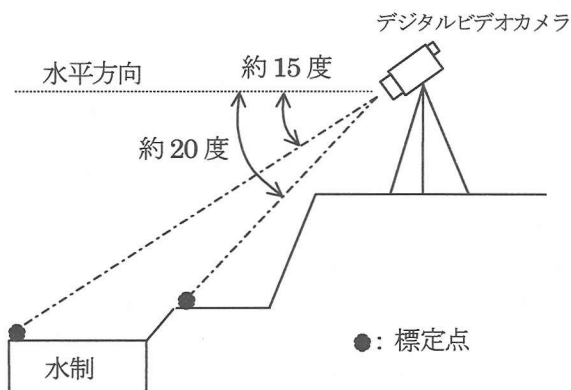


図-11 撮影俯角の状況

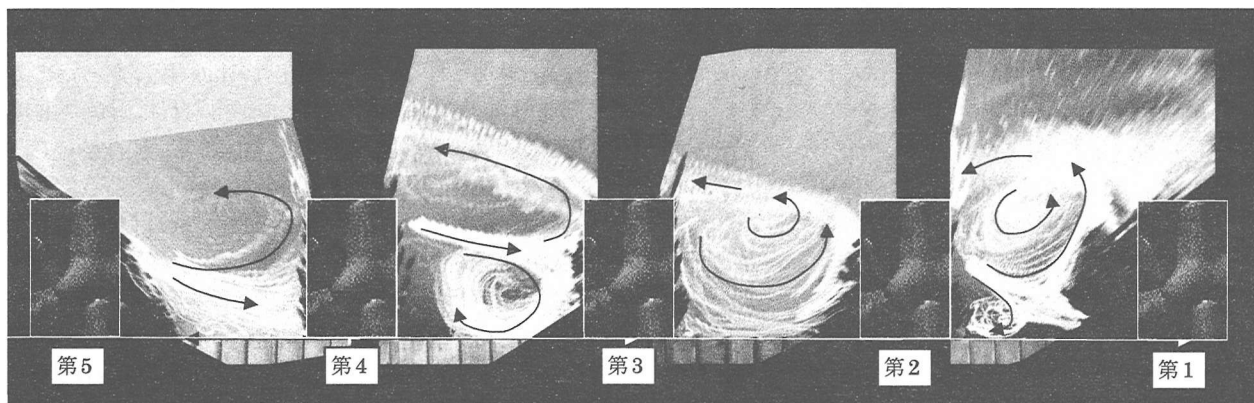


図-12 水制区間の表面流跡線の可視化画像

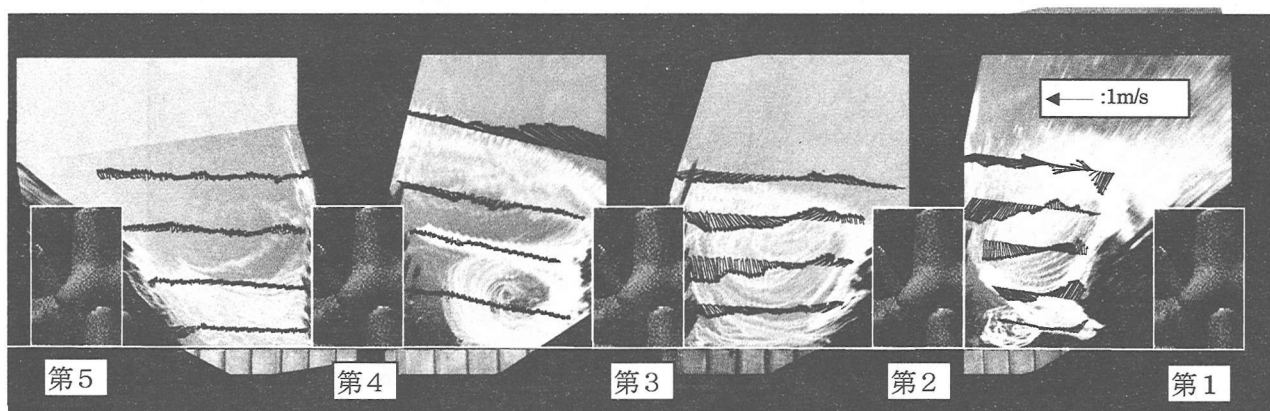


図-13 平均流速分布

求めた。撮影俯角の状況を図-11 に示す。俯角は 10 度以上あるため高精度の計測が期待できた。ただし、ビデオカメラ側からみて水制の陰になって見えない部分の計測はできなかった。トレーサは糸でゆるく口を閉じたポリ袋に入れたものをポール先端に取り付け、所定の場所の上でポリ袋の口を開けることを繰り返して数箇所から投入した。一回の投入当たり約  $0.2\text{m}^3$  の量を散布した。なお、トレーサの投入は念のために漁協の了解を得て行った。

### 5.3 表面流の可視化

各水制区間で約 500 枚の連続画像を多重合成法に用いて得られた表面流跡線の可視化画像を図-12 に示す。画像変換は見かけの空間解像度を  $0.05\text{m}$  として行った。テンプレートサイズは  $35 \times 35$  画素 ( $1.75 \times 1.75\text{m}$ )、画像時間間隔は流況に合わせて  $0.5 \sim 1.5\text{s}$  の間で変化させた。多重合成法は  $N \Delta t = 10\text{s}$ ,  $m = 20$  として適用した。図より各水制区間の流況が非常に良好に可視化されているのがわかる。特に、実河川水制間の大スケール循環渦の様子が区間毎に全く異なることを、今回の観測で初めて可視化できた点は重要と思われる。

循環渦は第 1,2 と第 2,3 の水制区間では反時計回りで、中心軸が水制先端を結ぶ線上に存在する特徴を有している。第 3,4 の区間では反時計回りの循環渦は主流側へさらに移動し、その副流として時計回りの循環渦が発生している。ただしこの渦の強さは上流側のものと比較するとかなり弱い。また、第 3 水制先端から投入したトレーサは主流の方に向かって斜めに移流しており、水制群による水はね効果が明瞭に可視化されていることがわかる。一方、第 4,5 区間では投入された大部分のトレーサが上流側の第 4 水制に吸い寄せられ、明確な循環流は認められなかった。これは循環渦の中心がさらに主流側にシフトしたためと思われる。

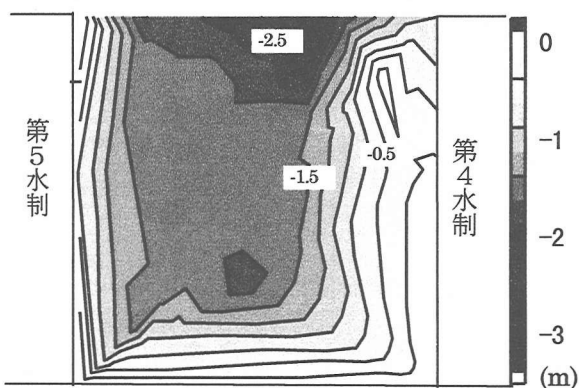


図-14 河床形状

### 5.4 平均流速分布

堤防にほぼ平行な測線上の平均流速分布を図-13 に示す。この図より流跡線画像で考察された流況をさらに詳しく調べることができる。すなわち、上流側の 2 区間に比べて下流側の 2 区間は流速が非常に低下していることがわかる。また、上流側の循環流では水制への流入流量の方がかなり多い。これは主流が堤防に対して斜めに衝突していること、また水制が透過性であるために、第 1 水制のさらに上流側の流体が主流に連行されて失われる水量が水制本体あるいは堤防前面に沿って低圧側に向かう逆流となって補われ、全体的な平衡状態が保たれていることが原因と思われる。

観点を変えてこの水制群の流れに対する一つの大きな抵抗システムと見なすと、その役割は主として第 1 水制から第 3 水制までの 2 区間でほぼ果たされており、それよりも下流側の水制は死水域としての緩やかな流動が支配的となっている。したがって、対象とした水制群は非常に有効に機能していると言える。

### 5.5 河床形状

図-14 に第 4、第 5 水制間の河床形状を示す。水制

間の底面はほぼ平坦であることがわかる。対象区間では緩やかな逆流があるので、それに伴って運搬された微細砂が逆勾配となって堆砂している。これ以外の区間では詳細な測量を行っていないが、上流側ほど区間中央での水深は深くなっていた（最上流区間で水深約2.5m）。また、水制区間はいわゆるマウンド状となっているのに対し、水制前面からは急激な深掘れが進行していた。例えば、第4、第5水制の前面の水深は最大4m程度であったことから、局所的に2m程度の洗掘が生じていることがわかった。

## 5.6 計測精度

式(3,4)で与えられる  $x, y$  方向の速度分解能  $\Delta u, \Delta v$  の合成値  $(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}$  の分布を第1,2水制区間を対象としてプロットしたのが図-15である。前述のように俯角がある程度大きかったために、水制区間全面にわたって速度分解能は数 cm/s のオーダーであり、計測精度は十分であったといえる。

## 6. 結 論

本研究で得られた結論をまとめると以下のようである。

- (1) 環境にやさしいトレーサの導入で実河川レベルでも河川表面流を可視化できることを示した。
- (2) 多重合成法により河川表面の流跡線を明瞭に可視化できることを示した。
- (3) 多重合成法を部分的に利用することにより解析の効率化を図ることができた。
- (4) 十分な計測精度を保つにはビデオ撮影における俯角が10度程度以上あることが望ましい。
- (5) 長良川の透過性水制群に関してその表面流計測から循環流は非常に複雑な流況を呈することを明らかにし、また流速分布結果の考察からこの水制群が有効に機能していることを示した。
- (6) 長良川水制に関しては三次元河床形状を詳細に計測し、流況との関係をさらに詳しく調べる必要がある。また、異なる水位・流量における画像計測から水制群のさらに総合的な特性を明らかにする必要がある。

## 謝辞

本研究で使用したトレーサは日本建設コンサルタンツ(株)の小原一哉、浅野要両氏に紹介して頂き、また K 川の撮影には小原氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

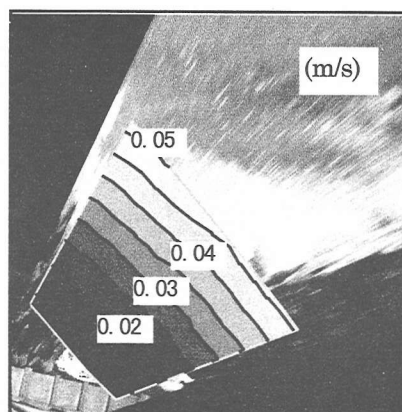


図-15 第1,2水制間の合成速度分解能

## 参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6, No. 1, pp. 1-17, 1967.
- 2) 木下良作，宇民正，上野鉄男：画像処理による洪水流解析—阿賀野川における並列らせん流について—，水工学論文集，Vol. 36, pp. 181-186, 1992.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Fujita, I., Aya, S., and Deguchi, T.: Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle, Proceeding of the 27th Congress of IAHR, Theme B, Vol. 1, pp. 227-232, 1997.
- 8) 藤田一郎：トレーサを利用した実河川水制周辺流れの画像解析，水工学論文集，Vol. 42, pp. 505-510, 1998.
- 9) Fujita, I. and Komura, S.: On the Accuracy of the Correlation Method, Proc. of the 6th Int. Symposium on Flow Visualization, pp. 858-862, 1992.

(1998年4月24日受付)