

PIV 技術の実河川表面流計測への応用

Application of PIV Techniques to Measurement of River Surface Flows

藤田一郎*・原基樹**・森本貴生***・大西努****

Ichiro FUJITA, Motoki HARA, Takao MORIMOTO, Tsutomu ONISHI

1. はじめに

実河川における流れ場を空間的に把握する方法としては航空写真解析による表面流計測¹⁾²⁾がよく利用され、最近では ADCP による計測³⁾⁴⁾も注目されている。しかしながら、前者は瞬間的な二次元場は測れるものの定点観測や臨機応変の対応ができず、また後者は三次元計測を可能とする唯一の方法であるが、機器が高価なためその普及にはまだ時間を要すると思われる。そのため、著者らは簡便な表面流計測法として家庭用ビデオカメラを利用した画像計測手法 (PIV) を提案してきた⁵⁻⁹⁾。本研究ではこの PIV 技術のさらに発展的な三つの適用例を示し、その可能性、将来性について検討する。

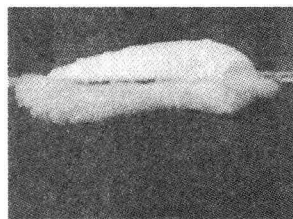
2. トレーサを利用した水制間流動の可視化解析

2. 1 トレーサの特徴

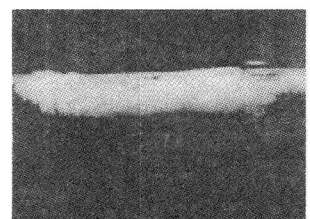
これまで開発してきた手法では、洪水時によく発生・出現する色の濃淡、水面波紋、浮遊物などをトレーサ代替物あるいは代替現象として PIV のパターンマッチングに利用してきた。これらは河川表面流を可視化するものとして有効であるが、平水時の流れや、洪水時でもトレーサ代替物が見えない場合にはパターンマッチングを利用できない。そこで、計測の汎用性を保つために積極的にトレーサを導入することとした¹⁰⁾¹¹⁾。トレーサは環境に配慮し、澱粉質で生分解性の粒子（一般には緩衝材として利用されているもの）を採用した。長さは 5 cm、直径 2 cm 程度の中空円筒型である。このトレーサは静水面に浮かべると直ちに水を吸い始め、水面下を漂うようになる。その状況を図-1 に示す。水面に置いた後、数分間で完全に水没していることがわかる。これは風の影響を受け易い現地計測の状況下では有利な特性と言える。

2. 2 計測対象領域

対象としたのは長良川 51.2km 地点の左岸に設置されている 5 基の水制群間の流況である。ビデオ撮影の状況を図-2 に示す。水制は突起長約 17m、幅約 10m、間隔約 20m でテトラポットを積み上げただけの単純な構造になっているため透過性が高い。表面流の可視化は前述のトレーサ約 0.2m³ を各水制区間の 2~3 個所から投入して行った。投入はボールの先にトレーサを詰め込んだポリ袋を



(1) 2 分経過後



(2) 4 分経過後

図-1 トレーサの変形過程

キーワード：河川表面流計測，水制，橋脚後流，画像解析，PIV

* 岐阜大学工学部土木工学科 助教授（〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1, fujita@cc.gifu-u.ac.jp）

** (株) アイ・エヌ・エー， *** (株) 若築建設， **** (株) 中日本航空

取り付け、所定の位置でその口を開いて行った。ただ、この方法では対象となる 20m のオーダーの空間に万遍なく同時にトレーサを分布させることはほとんど不可能なため、本投入に先立って表面循環流の流況をある程度見定めて投入位置を決めた。

2. 3 ビデオ撮影方法

ビデオカメラ (Sony 製デジタルビデオカメラ VX1000) は高水敷に設置したが、水制真正面からでは水制幅全体が視野に入らなかったのが多少斜めから撮影を行った。撮影に際しては、少なくとも 4 つの標定点 (図-2 の A,A',B,B'等) が画面内に入るように撮影アングルを調整した。標定点座標は光波測距器で各々の相対的な 3 次元空間座標を求めた。標定点は白色スプレーでコンクリート面に印をつけただけの単純なものとした。撮影は各区间で 5 分程度行った。

2. 4 デジタル多重合成法

PIV 解析に先立って流れ場全体の流況を定性的に把握するために、パソコンに取り込んだ連続画像の合成を行った。すなわち、連続画像全体を対象として各画素毎に輝度値の MIN 値を調べ、最も明るい輝度値のみから成る画像を生成した。ここではこの手順をデジタル多重合成法と名付ける。これはトレーサの連続的な移動軌跡すなわち流跡線を可視化する方法であり、カメラで長時間露光して得られるいわゆる流し写真のデジタル版と言える。

2. 5 PIV解析

基本的な PIV 解析方法は従来通りであるが、白色のトレーサ群のみが解析対象となるように多少の改良を行っている¹⁾。画像のサンプリングは 0.5~1.5 秒間隔で行い、各ケース約 500 枚の画像を処理した。画像変換における見かけの空間解像度を 0.05m、テンプレートサイズを 35x35 画素としたので得られる流速ベクトルは 1.75x1.75m 内の空間平均値となる。

2. 6 解析結果ならびに考察

デジタル多重合成法で得られた流跡線画像と PIV 解析による平均流速ベクトルを合成して図-3 に示し

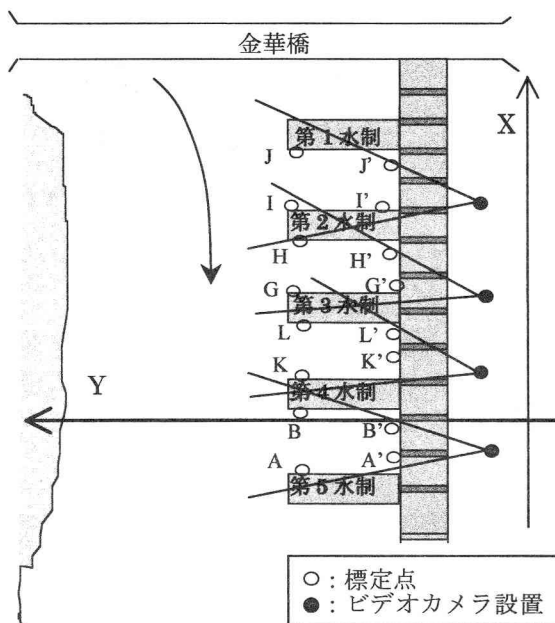


図-2 計測状況の模式図

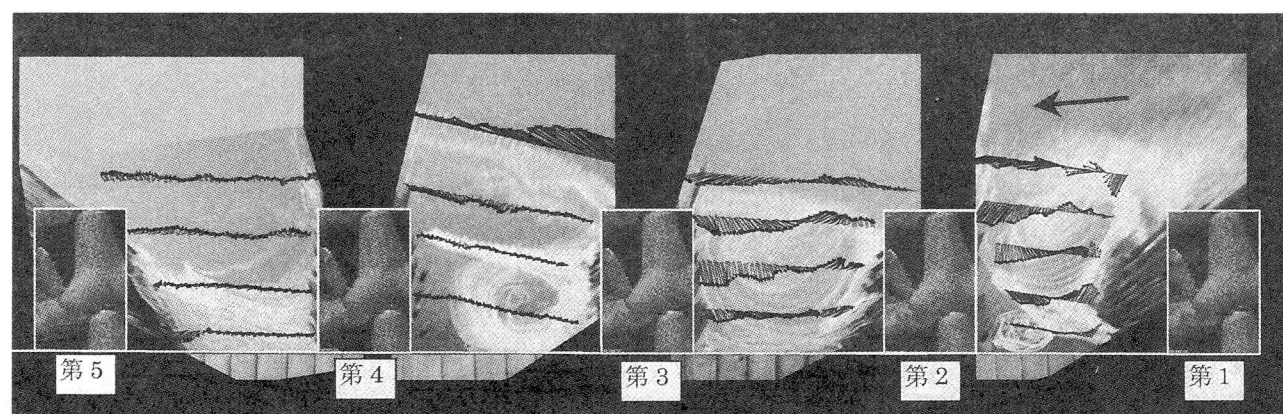


図-3 平均流速分布と流跡線 (長良川 51.2km 地点)

た。水制はほぼ等間隔に置いてあるが、その間に生じる流況は区間によって全く異なることが明確に可視化されている。これは水制群のうち特に第 1,2 水制区間に向かって主流が斜めに衝突しているため、その部分では強い循環流が生じるが、下流側の水制ほどその影響が次第に緩和されていくためと思われる。また、第 3,4 水制区間の主流側には水制のいわゆる‘水はね効果’に伴う流跡線も明瞭に可視化されている。

上流側の循環流の大きな特徴は、水制先端を結ぶ境界線の近くに渦の中心軸が存在する点である。これはこの境界線に沿って連続的な局所洗掘が生じていることが 1 つの要因と思われる。今回の観測では全体的な河床形状は測量していないが、唯一行った第 4,5 水制区間の測量ではいわゆるマウンドからの相対的な局所洗掘量は約 2m であった。全体的な流況からこれより上流側の水制前面ではさらに大きな局所洗掘が生じていることが予測される。第 3,4 水制の堤防前面に現れている渦は時計周りの循環流で、他とは向きが異なっている点が注目される。ただし、流速ベクトルからもわかるようにこの渦の循環流速は大きくない。最下流の区間内には明確な循環流は現れず、すべてのトレーサが上流側の水制内に吸い込まれた。第 1~3 水制区間で堤防側に向かう流入量の方が大きいこととあわせて考察すると、主流が第 1,2 水制区間さらにはその上流側の流体を連行する結果として相対的に上流側が負圧となり、連行によって失われた流体が低圧側に向かう全体的な逆流となって補われているものと考えられる。すなわち、水制群全体が 1 つの流水抵抗システムとして有効に機能していることがわかる。

3. ラジコンヘリ画像の利用

2. で示した方法は河岸などからの斜め撮影を行うため、撮影地点から離れた場所での計測精度の低下を避けることができない。航空写真解析ではこのような問題は生じないが、平水時の計測は困難でありしかも瞬間的なデータしか得られない。そこで、このような両手法の欠点を解消するために、ラジコンヘリコプターに搭載したビデオカメラからの撮影画像の利用を試みた。

3. 1 撮影地点および撮影方法

対象としたのは平水時における K 川水制への接近流である。表面流は前述のトレーサを上流側の橋から投入して可視化した。撮影は熟練者の手によって行われたが、風の影響もあって水制上空でのホバリングは熟練者でもかなり困難であり、結果的には良好にトレーサ群と水制を同時に捉えたビデオ画像（このケースでは 8mm ビデオを利用）は高々数十秒程度しか得られなかった。

3. 2 画像解析方法

解析対象はホバリング状態が良好で比較的画面のブレが小さい約 20 秒間の場面とした。それでも、主に移動、回転などによる画像のずれが生じていたのでそれらの補正を行った後、通常の PIV 解析を適用した。画像は 1 秒間隔でサンプリングしたが、フレームメモリに格納した画像にはノイズ（1~10 本程度の横線）が混入していたのでメジアンフィルタによるノイズ除去を行った。得られた連続画像には撮影角度の変化がほとんど認められなかったため、アフィン変換を利用して画像の平行移動、回転、および拡大・縮小に対する補正を行うこととした。補正手順を以下に示す。

- 連続画像に共通に含まれる N 個の標定点 $h(x_i, y_i)$ を最初の画像上で定める。
- 引き続き連続画像に対し各標定点の移動ベクトルを PIV で求め、その座標を $H(x_i, y_i)$ とする。
- 第 1 画像を基準として、標定点 h と H の関係からアフィン変換

$$X_i = ax_i + by_i + c, \quad Y_i = dx_i + ey_i + f \quad (1,2)$$

の係数($a \sim f$)を求める。

- アフィン変換係数は 3 つの標定点があれば決定できるが、PIV による誤差を最小にするために N 個の標定点から 3 点を選び出すすべての組み合わせに対して変換係数を求め、その中から異常値を除いて得られた平均値を最終的なアフィン変換係数として用いる。

e) 得られたアフィン変換係数を用いてすべての画像の背景が第一画像と一致するように画像を生成する。

本研究では標定点として特別なマーキングは行わず、樹木群などで画像に明瞭な濃淡分布が生じている所にテンプレートを置きその中心を一つの標定点と見なした。したがって標定点の数は任意にとることができるが、ここでは $N=36$ として画像変換を行った。以上の手順で求めた連続画像をアニメ化したところ、背景（水制）の動きはほとんど認められず、ブレの除去が良好であったことがわかった。また、水制に接近中のトレーサ群の挙動も良好に把握できることがわかった。図-4 に画像変換前後の画像例を示す。変換前の画像は水製の根元付近の標定点が原点(左上)となるように平行移動してある。変換前の画像には反時計周りの回転が加わっているが、変換後はうまく補正されていることがわかる。各画像間の回転角は 9 度程度であった。なお、図において流れは下向きで右半分の白い斑点がトレーサ群、また、画像サイズは $43.5 \times 43.5(m)$ に相当する。

3. 3 解析結果ならびに考察

テンプレートサイズを $31 \times 31(\text{pixel})$ ($2.6 \times 2.6m$) として解析した結果 (20 秒間の平均値) を図-5 に示す。堤防と平行に一様に流下してきた流れが水制によって曲げられ、水制に沿って加速している流況を良好に捉えることができた。

今回の観測ではラジコンヘリの高度を十分高く取れず (100m が限界)、また風の影響でホバリング操作が困難であったため、広範囲の長時間計測はできなかったが、ブレ補正の手法はある程度確立できた。今後はアングル補正を加味した手法の構築が必要である。

4. 洪水時橋脚後流の計測

最後の PIV 適用例は、揖斐川下流部における小洪水時の橋脚後流である。この適用例では洪水流表面に濃淡分布などが現れていたので、従来の PIV 解析手法⁹⁾ を用いた。

4. 1 対象地点および解析手法

対象は揖斐川 13.8km 地点にある油島大橋の下流域であり、この地点を見下ろすように位置する木曽三川タワーからデジタルビデオカメラで撮影を行った。タワーからの撮影俯角は 9~27 度と十分大きく斜め撮影

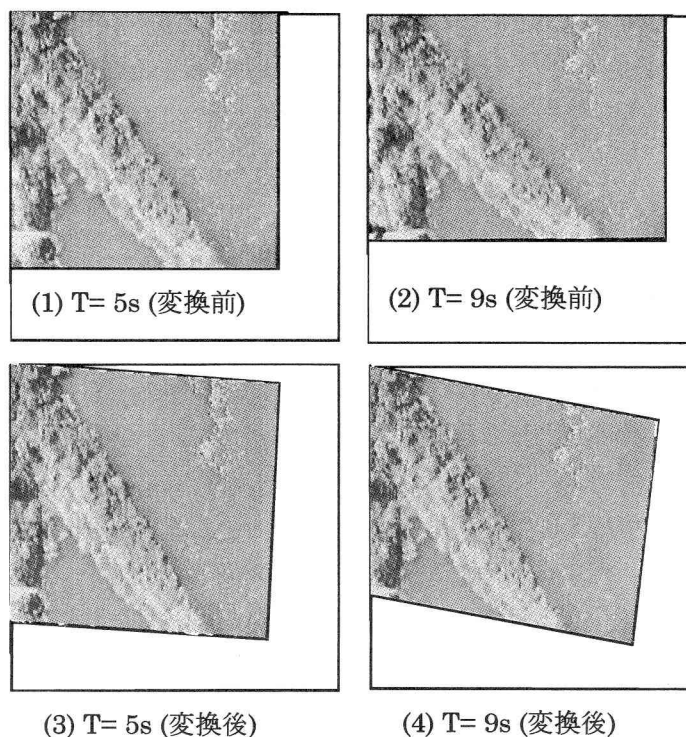


図-4 画像変換例

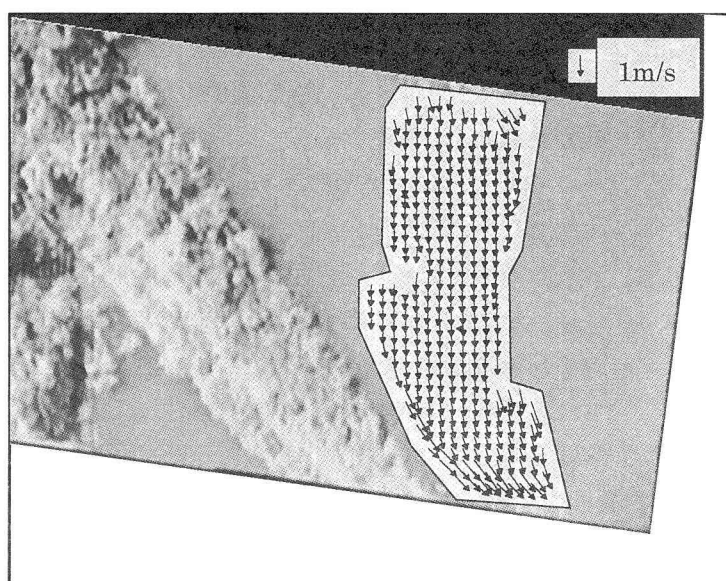


図-5 解析結果 (平均流速分布)

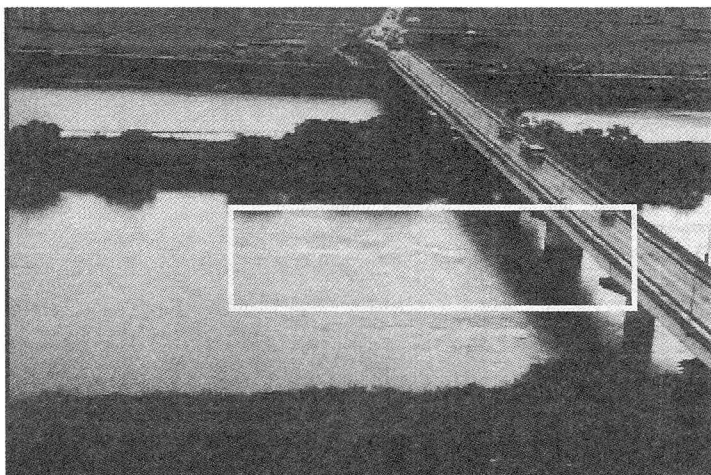


図-6 揖斐川 13.6km 地点の橋脚後流（木曾三川タワーから、撮影日:7/9/97）



図-7 無歪画像（図-6 の白線内を変換, 574x599pixel）

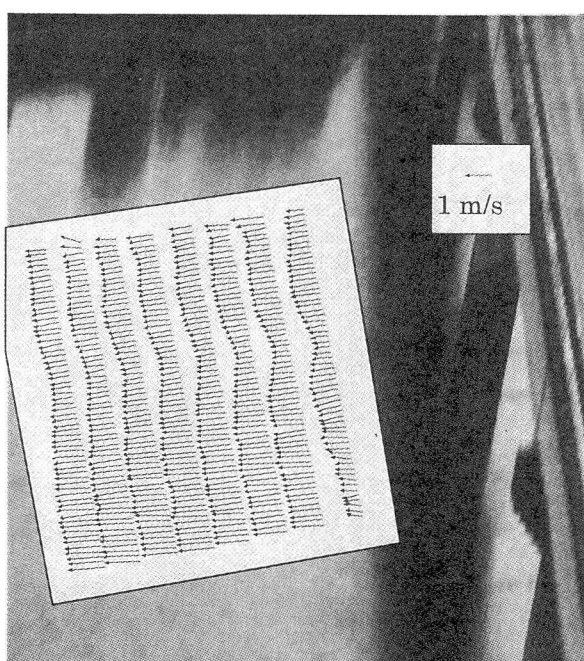


図-8 後流の横断流速分布

PIV 解析の条件（10 度以上）をほぼ満たしていた。原画像の一例を図-6 に示す。二本の橋脚から発生した後流の影響が水面の濃淡分布によく現れていることがわかる。図-6 の白線内領域を見かけの空間分解能を 0.2m として無歪化した画像を図-7 に示す。橋脚後流による濃淡分布がさらに明瞭に現れている。主流部にも斑点状の濃淡が生じている。これらの濃淡分布は局所的な流れに乗って移流しているように見えたので PIV 解析を試みた。

4. 2 解析結果ならびに考察

PIV 解析はテンプレートサイズを 17x17pixel(3.4x3.4m)と

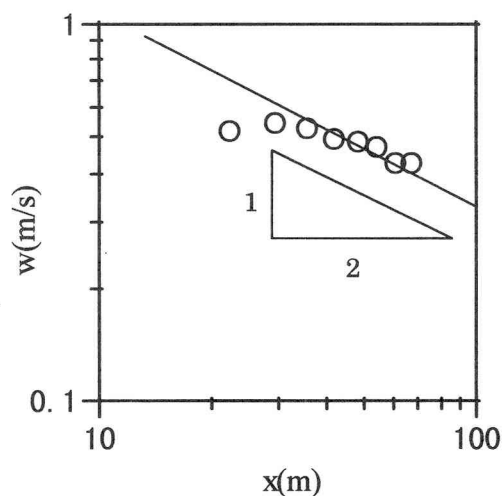


図-9 流速欠損の流下方向への変化

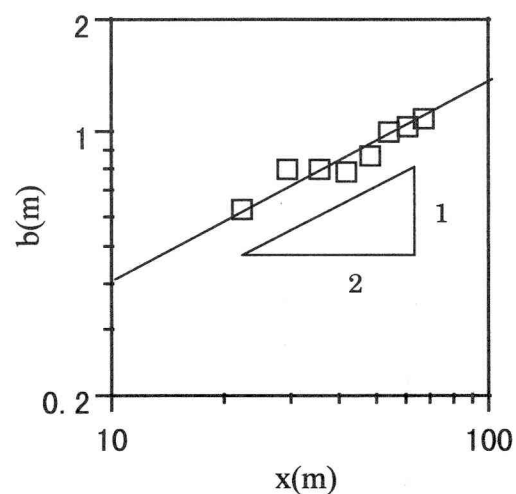


図-10 半値幅の流下方向への変化

し、1秒間隔で300枚の画像を用いて行った。橋に平行ないくつかの横断測線上（流れ方向に8m、横断方向に2mピッチ）の平均流速ベクトルを図-8に示す。橋に最も近い測線を除けば、橋脚の影響と思われる流速欠損が流下方向につながっており、しかも流下とともに一様分布へ回復する傾向が見られる。この地点では流速分布が非対称性を伴っていたため、後流分布形状も非対称となっている。そこで、各々の後流の中心軸を基準として左右それぞれの分布から半値幅および欠損流速を算出し、その平均値 b , w を求めた。 b , w の流下方向への変化の様子を図-9および図-10にそれぞれプロットした。流速欠損は全体的に $x^{-1/2}$ に比例し、半値幅は $x^{1/2}$ に比例していることがわかる。この傾向はいわゆる **plane wake** の傾向^{1,2)}と一致しており興味深い。すなわち、実験室レベルで確認されている **plane wake** の自己相似性の特徴をスケールの全く異なる橋脚後流 ($Re=10^6$ のオーダー) にも見出せたことになる。橋脚にかなり近い地点からこの傾向が現れているのは、橋脚に衝突する主流がすでにかかなりの乱流状態になっているためと思われる。ただし、実際の橋脚後流は内部的にはかなりの三次元性を有する流れであるため、流れの自己相似性等に関しては他の観測データや水理実験との比較によって詳細に検討する必要がある。

5. おわりに

本研究ではPIVに基づく画像計測手法を、1) 平水時の水制群間の解析、2) ラジコンヘリ画像の利用による平水時の水制接近流の解析、および、3) 洪水時の橋脚後流の解析、にそれぞれ適用し、様々な表面流速分布を良好に計測できることを示した。今後は、さらに多様な水理条件下での現地計測を行ってPIV解析の適用性を確認するとともに、適用限界についても検討したいと考える。さらに解析手順をシステム化し、ユーザインターフェイスを考慮した画像解析システムの開発を進める予定である。

謝辞： 日本建設コンサルタント(株)の小原一哉、浅野要両氏からはラジコンヘリ画像を提供して頂くとともに生分解トレーサを紹介して頂いた。ここに、記して謝意を表します。

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—, Vol.36, pp.181-186, 1992.
- 3) 崇田徳彦・渡邊康玄・清水康行:水制周辺の流速分布について, 水工学論文集, Vol.39, pp.577-582, 1995.
- 4) 大森隆裕・清水康行・崇田徳彦:ADCPを用いた河川湾曲部の密度流の計測, 水工学論文集, Vol.41, pp.1035-1040, 1997.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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, Environmental and Coastal hydraulics, pp.227-232, 1997.
- 10) 藤田一郎・小原一哉・藤田和博:洪水流ビデオ画像解析におけるトレーサの利用, 52 回年講, II-285, 1997.
- 11) 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.
- 12) 日野幹雄:流体力学, pp.336-341, 朝倉, 1992.