

PIV 計測による河川流の表面流速特性

CHARACTERISTICS OF A SURFACE VELOCITY AND ITS TURBULENCE DURING A FLOOD IN THE RIVER BY PIV

油谷利明¹・露口 肇²・綾 史郎³・藤田一郎⁴

Toshiaki ABURAYA, Hajime TSUYUGUCHI, Shirou AYA and Ichiro FUJITA

¹株式会社ニュージェック 土木第5部 土地開発室 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

²学生会員 大阪工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

³正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

⁴正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市東灘区六甲台町 1-1)

The continuous measurement method of surface velocity distributions during a flood flow in the river was developed by using Particle Image Velocimetry and it was successfully examined in the Yodo River Study. The 2-D distributions of the temporally averaged-velocity vectors and the turbulent intensity were obtained. The characteristics of the surface velocity distributions were disclosed in view of the relation with the depth, channel geometry, hydraulic structures and channel alignment, and the basic characteristics of turbulence of the flood flow were discussed in view of the channel geometry. The obtained velocity distributions were also applied to the discharge estimation of the flood in the river and its validity was successfully examined.

Key Word: Particle image velocimetry, velocity distribution, turbulence, compound channel, meandering

1. はじめに

高所から撮影した斜めビデオ画像を用いた PIV 計測法は著者らによって洪水時の実河川の表面流速分布の測定や流量の計測法に適用され、成果を上げてきた^{1),2)}。われわれの用いてきた PIV 法の利点は簡便さと価格の安さにあるが、PIV 法の大きな利点の一つに同時に多点測定を、しかも連続的に行える点がある。

従来アナログ撮影されたビデオ画像の PC 内への取り込みは、ビデオデッキを通じて出力されるアナログ信号を用いて PC 上に装着されたビデオキャプチャーボードにより任意の時間間隔 Δt で所要枚数だけデジタル化して行った。一度に処理しうる画像の枚数はビデオ信号を PC にデジタル画像として取り込む際に用いられるメモリーの容量により制限されるが、メモリーが高価なため、現実的には数 10 枚 (5~10 秒) 程度の画像しか処理できず、十分な平均化時間が取れず、乱れの計測に用いることができなかった。

しかし、近年ビデオ画像のデジタル化が進み、デジタ

ルビデオカメラやデジタル画像編集機の価格が下がり、その利用が容易になったので、大量の画像のデータ処理により、多点における乱れやもう少し長い時間スケールの時間的な変動などの諸量についての計測、検討を行うことが可能となりつつある。また、実河川における平均流速の水表面分布や発散、回転を求めることも出来る。

本研究は PIV 法を用いて数分間程度の実河川のビデオ画像のデータ処理を行い、低精度のデータを除去した後、時間的な平均化処理を施すことにより、時間平均流速や乱れを得る方法を行ったものであり、データ処理の方法について述べるとともに、淀川下流部の距離標 12.8km, 13.2km 付近における洪水流のビデオ画像を用いて、PIV 解析を行い、平均流速分布、乱れ強さを計測した結果について述べる。

2. 洪水流のビデオ観測と画像処理方法

本論文で用いたビデオ画像を用いた PIV 計測法は基本的に著者らが従来から開発、使用してきたビデオ画像

処理法³⁾と同じであり、その詳細は参考文献を参照することとし、ここでは留意点のみを記述する⁴⁾。

(1) 画像の取り込み

デジタル機器（デジタルビデオカメラ SONY 製 CDR-VXC1000, ノンリニア編集システム EPSON 製 CREASANCE）を用いることにより、多数の画像の取り込みを可能とした⁴⁾。

(2) 瞬間流速ベクトルの算出

大河川を対象とした PIV 解析では人工的なトレーサーを利用することは困難であり、ビデオ画像に写っている河川流に特有なボイルや波紋によって生じた水表面上の凹凸による、光の反射角の変化に起因した表面輝度の濃淡分布や水表面の空気泡、ゴミ、流木等と水表面の輝度の濃淡の違いをトレーサーとして利用する。Δt 秒間隔の 2 枚の画像間で画像濃淡相関法によって相関係数の 2 次元分布を求め、濃淡が最大の相関係数値を与えるところへ Δt(=1.0)秒間に Δx だけ移動したものとすると、

$$v = \Delta x / \Delta t \quad (1)$$

により瞬間流速ベクトル（実際には Δt 秒間の平均流速）が算出される。このような処理を行うと、異常ベクトルが検出される場合があり、流速ベクトルの発散

$$\text{div } v = Cd \quad (2)$$

を計算し、発散が基準値以上 ($Cd > 1.0 \text{ 1/s}$) であれば、異常ベクトルを棄却し、周囲の流速ベクトル値より内挿補間する。さらに、自然のトレーサーは常に解析領域に存在するとは限らず、また、2 枚の画像の時間間隔が大きいと濃淡分布がせん断変形するので、相関係数値 R_{ij} に閾値 CR を設ける。 $R_{ij} < CR (= 0.5)$ の時は、(1)により求めた流速ベクトル値を棄却し、周囲の流速ベクトル値を用いて距離の 2 乗に反比例する重み付けにより内挿補間する。

(3) 平均流速ベクトルの算出

平均流速ベクトルの算出に当たってはデータ処理量が多くなるので、 $NX \times NY \times NT$ 個の流速ベクトル値からなる一連の時系列データをまず、 $NX \times NY \times NV (= NT / NS)$ 個からなる、いくつか (NS 個) のサブ時系列に分解し、サブ時系列毎に処理を進めることとした。各サブ時系列で相関係数値に下限 CU を設け、相関係数値が低く、

$$R_{ij} < CU (= 0.1) \quad (3)$$

となったものについては、計測された流速ベクトルは棄

却し、後の解析には使わないものとし、 $R_{ij} > CU (= 0.1)$ を満足するものについてのみ平均化の対象とした。従って、サブ時系列を用いて得られた平均流速分布は各格子点毎に平均化の標本数が異なっている。

各サブ時系列毎に得られた合計 NS 組の平均流速ベクトル分布は、最終的に NS 組で平均し、最終的な $NX \times NY$ 個の平均流速ベクトル V が一組求まる。

(4) 乱れの算出

乱れ速度 v' は

$$v' = v - V \quad (4)$$

で定義される。従って、(3)で求めた瞬間流速ベクトル v から平均流速ベクトル V を差し引けば、乱れ速度ベクトル v' が求まる。乱れ速度ベクトルの計算にあたっては、(2)で棄却した瞬間流速ベクトル、内挿補間した流速ベクトルは用いないこととし、 $R_{ij} > CU$ のもののみを対象とし、乱れ強さの計算に用いた。

3. 淀川洪水流の表面流速分布特性

(1) 対象出水と解析条件

今回の解析では淀川左岸 13km 付近の大阪工業大学屋上より 12.8km 付近、13.2km 付近の洪水時の淀川水表面をビデオ撮影した画像を処理した。図-1 に示したように、この付近で淀川は大きく蛇行している。断面形状は何回かの河川改修工事の結果、複雑断面形状となっており、通常は 1 段目のテラスまでが冠水している。1 段目のテラスには低水路維持のために建設された水制工が残っている区間もある。このようなことからこの区間は洪水時、かなり複雑な流況が観測されるところである。

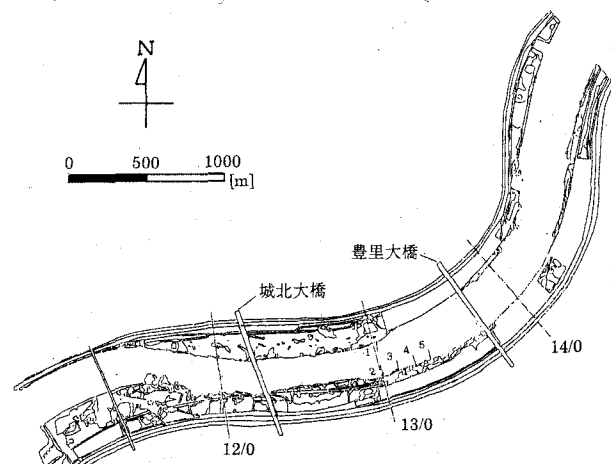


図-1 淀川下流部の概略と観測地点、領域。

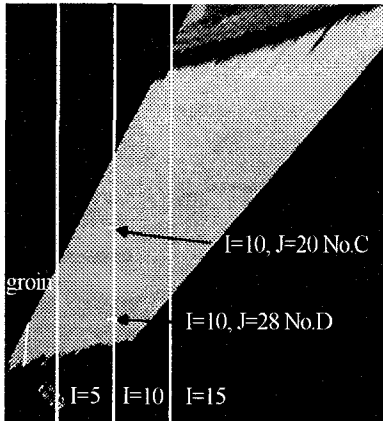


図-2 Case-1・13.2km 付近の無歪画像。

解析対象とした出水は 1998 年 6 月 22 日の 1350m³/s の出水 (13.2km 付近, Case-1) と 1993 年 7 月 5 日の 3550m³/s の出水 (12.8km 付近, Case-2) の 2 つである。図-2 に変換された無歪画像の一例(Case-1)を示す。解析条件は表-1 に示す通りである。画像時間間隔はいずれも 1 秒であり、Case-1 では 239 秒間の画像を、Case-2 では 53 秒間の画像を用いて解析した。解析の精度は相関係数の 2 次関数分布を仮定すれば、(1)式 $\times 0.2$ とできるので、Case-1 の場合は、 $u = v = 0.1$ m/s, Case-2 の場合は、 $u = v = 0.06$ m/s, 程度の値となる。

(2) 結果と考察——Case-1——

a) 瞬間流速

計測された瞬間流速の時系列とその時の相関係数値の時系列を図-3 に示した。図-3(a), (b) は河川のほぼ中心部 C 点での計測値であり、図-3(c), (d) は水深の浅い左岸に近い場所 D 点での計測値である。流速ベクトルの分解は 12.8km の横断測量線の左岸から右岸に向かう方向を $y(v)$ 方向とし、これに直角に左手方向を $x(u)$ 方向としている。従って、流下方向は u が正の値である。C 点では 2 個の、D 点では 1 個のデータを除き、極めて高い相関係数値が得られており、計測精度は高いものと思われる。C 点では $u = 1.1$ m/s, $v = -0.1$ m/s 程度の値が得られており、いずれもきれいな乱れが観測されているものと思われる。 u の乱れ強さが小さいのに対し、 v は平均値が小さいが、乱れは大きい。一方、左岸付近の D 点のデータでは相関係数値は 0.5 前後とやや低い。平均流速は $U = 0.2$ m/s 前後と小さいが乱れはやや大きい。得られた u の瞬間値の時系列 (図-3(c)) はやや特異であって、川上方向の乱れが続いた後、川下方向の乱れが続いており、今後の検討が必要であろう。 v については

表-1 解析条件。

	13.2km 付近 (Case-1)	12.8km 付近 (Case-2)
撮影時期	1998 年 6 月 22 日	1993 年 7 月 5 日
総画像枚数	240	54
画像時間間隔 (秒)	1.0	1.0
観測時間 (秒)	239	53
無歪画像時のサイズ	676 $\times$ 739	407 $\times$ 946
1 pixel の実長 (m)	0.5 $\times$ 0.5	0.3 $\times$ 0.3
ベクトルの出力数	36 $\times$ 36	22 $\times$ 45
ベクトル間隔 (m)	10	6
相関係数の基準値 CR	0.5	0.5
相関係数の下限値 CU	0.1	0.1

u ほど顕著な傾向は見られない。

b) 平均流速と乱れの分布

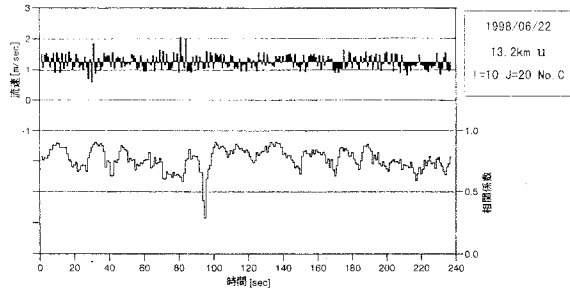
横断方向の 3 本の測線 $I=5, 10, 15$ に沿った、平均流速 U, V の分布を図-4(a), (b) に示した。図-2 の白線に示されているように計測領域は川幅全幅をカバーしていないので、計測領域の境界付近の値を除いて U は流下方向に余り変わっていないことが知れる。ただし、 $I=5$ の測線に関しては、 V は U の半分程度の大きな値を取っており、図-2 の左下に見える水制の影響を考慮することができよう。

乱れ強さ u', v' を同様に示したものが、図-4(c), (d) である。これらの図より平均流速 U, V の値に関わらず、乱れ強さは横断方向にほぼ一様であり、 $u' = 0.2$ m/s, $v' = 0.3$ m/s 程度の値であることが分かる。流下方向の乱れに比べて横断方向の乱れが大きい特徴がある。

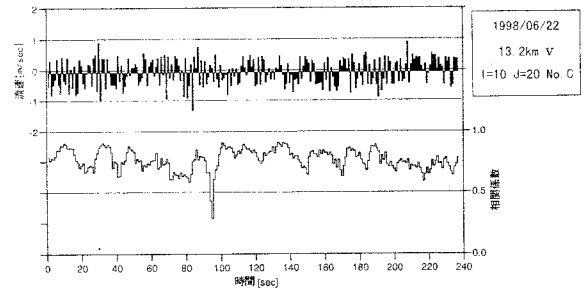
図-4(e), (f) は無次元の乱れ強さ $u'/U, v'/V$ の横断方向の分布を示したものであるが、流下方向成分では河川中央部において安定して 0.2 程度の値を取っているが、兩岸付近では大きな値を示している。これは河道中央部の乱れが底面せん断により生起しているのに対し、浅い側岸近傍では異なった機構により生起していることを示唆している。

c) 時間平均流速の平面分布

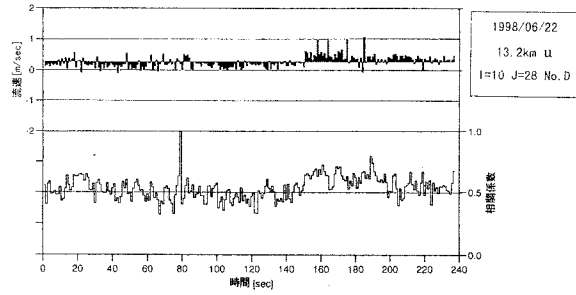
得られた時間平均流速の平面分布を河床図とともに図-5 に示した。図-1 に見られるように 12.8km から 13.2km の区間で淀川は東から西に流れており、やや川幅を狭めながら、大きく右方向に湾曲している。この区間で河川の断面形は河川中央部で深く、両側岸部で浅い複断面形状であり、流速分布はこのような水深分布に対応して、水深の深い河川中央部で速く、両側岸部で遅い流れとなっている。特に左岸側では水面下の水制の影響のため、小さい流速となっている。図-4(b) にも見られ



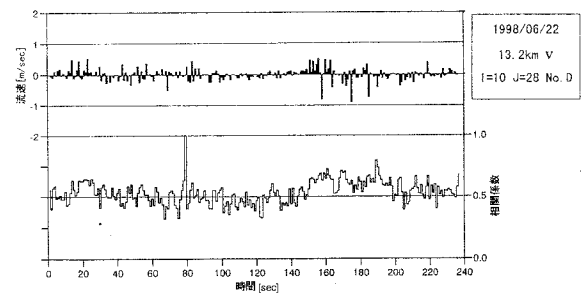
(a)



(b)

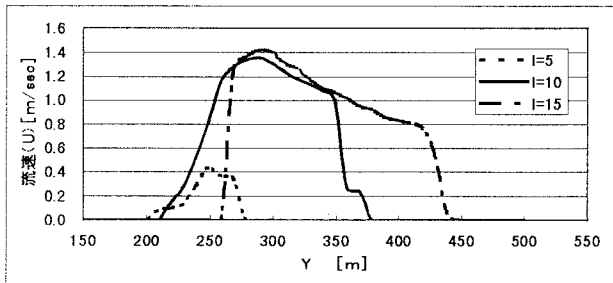


(c)

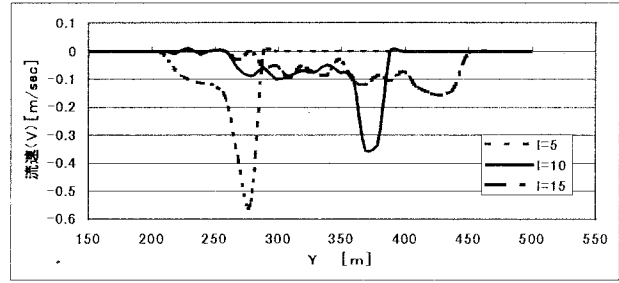


(d)

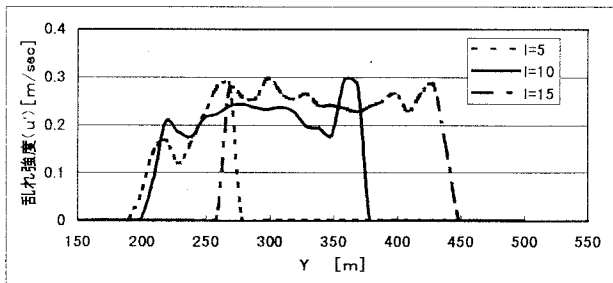
図-3 計測された瞬間流速と相関係数値 (Case-1, 淀川13.2km 付近).



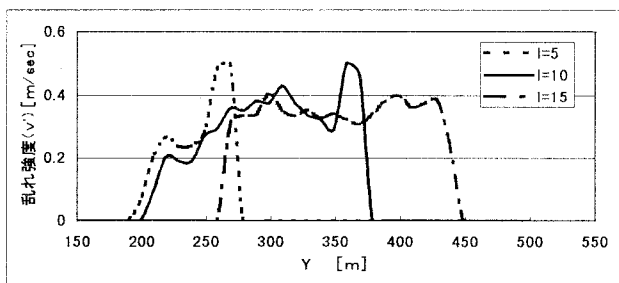
(a)



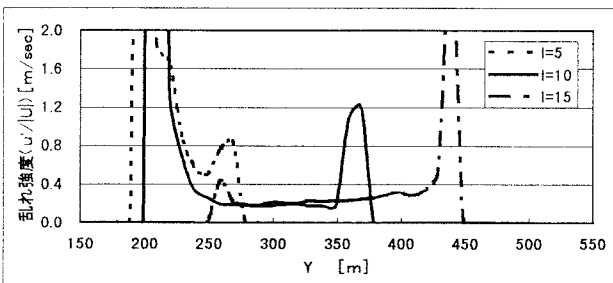
(b)



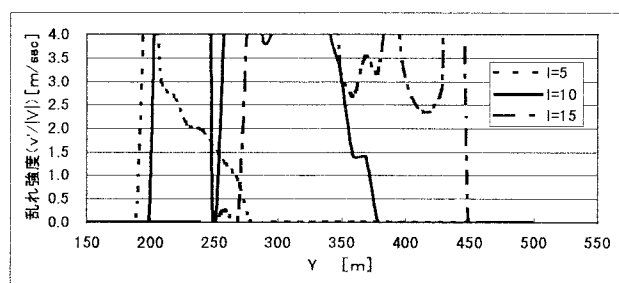
(c)



(d)



(e)



(f)

図-4 平均流速, 乱れ強さ, 無次元乱れ強さの横断方向分布 (Case-1, 淀川13.2km 付近).

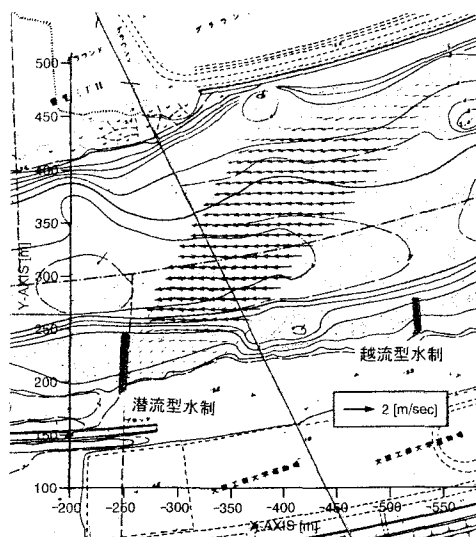


図-5 平均流速の水表面分布 (Case 1, 13.2km 付近).

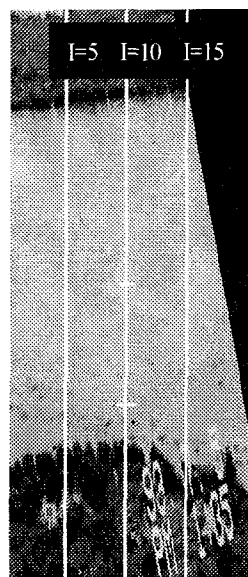
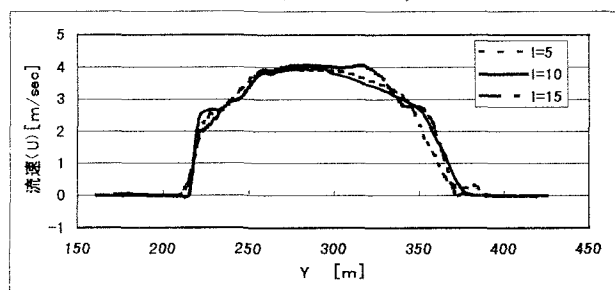
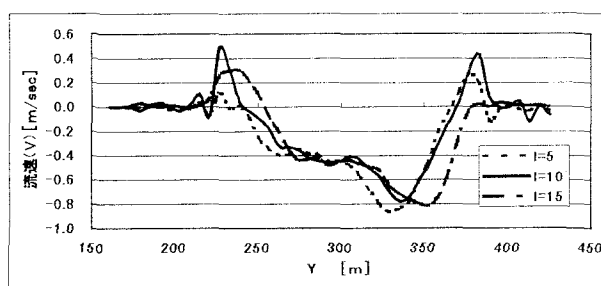


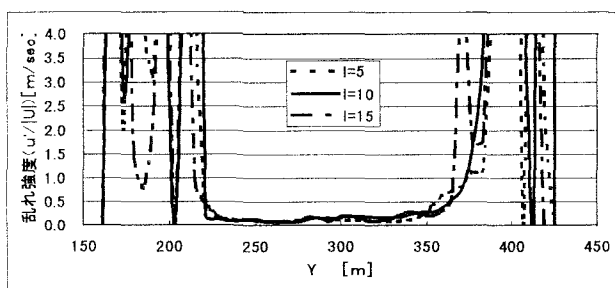
図-6 Case-2・12.8km 付近の無歪み画像.



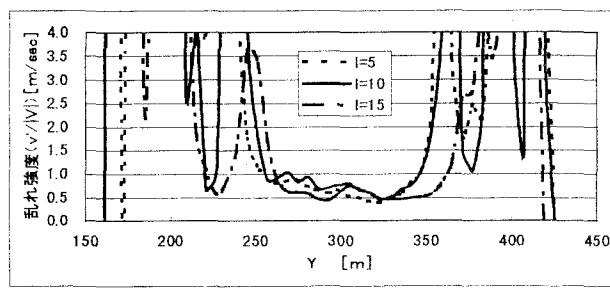
(a)



(b)



(c)



(d)

図-7 平均流速と無次元乱れ強さの横断方向分布 (Case-2, 淀川 12.8km 付近).

るように、流向は流下方向とやや異なり、全体的に左岸側に向いているが、これは右への湾曲の入り口であるためである。

(3) 結果と考察——Case-2——

a) 平均流速と乱れ強さの分布

図-6 に Case-2 の淀川 12.8km 付近の無歪み画像を示した。図-7(a), (b)はそれぞれ U と V の横断方向の3本の測線 I=5, 10, 15 に沿った分布を示したものである。図-1 に見られるように、河道はこの区間ではほぼ一様であり、 U , V の分布は流下方向に一様である。 U の横断方向分布は側岸部で小さく、中央部で大きく、水深分布に対応している。一方、 V の分布は中央部で負、両側岸部で正の値を取っており、 $-0.8\text{m/s} \sim +0.4\text{m/s}$ と U の 20% 程度のかかなり大きい値を取っている。

図-7(c), (d)に無次元乱れ強さ u'/U , v'/V の横断方向分布を示したが、Case-1 と同様に、流下方向成分では 0.2 程度の値を取り、両岸付近では大きな値を示し、 v'/V も中央部で小さく、側岸近傍で大きな値を取っている。

b) 時間平均流速の平面分布

時間平均流速の平面分布を河床図とともに図-8 に示した。図-1 に見られるように 12.8km 付近で淀川は右方向に湾曲しており、河川の断面形は河川中央部で深く、両側岸部で浅い複断面形状となっている。湾曲の頂点付近である図-8 では図-7(b)に見られたように、横断方向流速は右岸側で右(北)向き、中央部で左(南)向き、そして左岸側で右(北)向きとなっている。これは水深が浅く、流速の大きい水路中央に湾曲部の遠心力により形成された下流に向かって反時計回りの2次流が生成

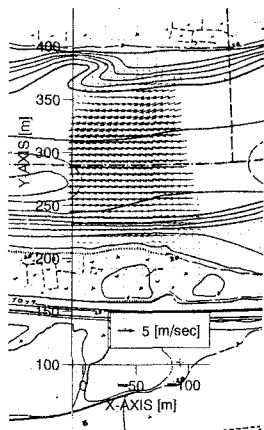


図-8 平均流速の水面分布 (Case 2, 12.8km 付近).

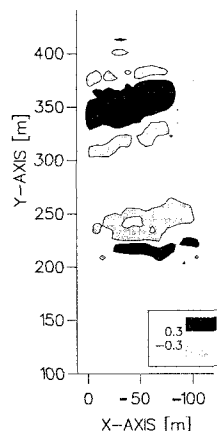


図-9 発散 (dV/dy) の分布 (Case 2, 12.8km 付近).

され、両側岸部にはそれに付随する2つの時計回りの2次流ができたためと思われる。これは横断方向成分ベクトルによる発散を求めた図-9にも顕著に表れている。

(4) 流量観測法への適用

得られた表面平均流速から「水深方向流速分布に関する1/7乗則」を仮定して、水深平均流速の横断方向分布を求め、横断面測量成果を併用して流量を算出し、表-2に示した。同表には算出流量とともに比較のため、撮影地点より上流側にある枚方(26km)地点の水位-流量曲線から算出された流量を併記した。PIV法により算出された流量は水位-流量曲線から推定された流量に対して、Case-1で-16.5%、Case-2で-11.3%とやや大きな違いがあった。水位-流量曲線から算出された流量の計算精度、流量計算地点と観測場所の地点の相違を考慮すれば、今後の改善の余地はあるものの、将来的には実用可能な範囲に入り得るものと考えられる。

4. 結論

数分程度の多量のビデオ画像のPIV解析により得られた観測値に平均化操作を行うことにより、以下のような洪水時における河川流れの特性を把握することができた。

- 1) 河川の表面流速について空間的分布とその時間的変動を観測することができた。
- 2) 湾曲河川水表面の平均流速分布と河道形状の空間特性、すなわち水深、複断面構造、水制、湾曲等の関係を明らかにした。
- 3) 水表面の乱れの2成分を計測し、乱れ強さの空間分布と河道形状特性との関係を検討した。
- 4) 時間的、空間的に異なったいくつかの流れについて、

表-2 流量観測結果の比較.

	13.2km 付近 (Case-1)	12.8km 付近 (Case-2)
算出流量 (m^3/s)	1125	3150
流量 (H~Q) (m^3/s)	1347	3550
誤差 (%)	-16.5	-11.3

流速分布を用いて流量計算することによりPIVを用いた流量観測システムの精度の把握がなされた。

実河川の洪水時の乱れをPIV法を用いて計測したが、従来のEuler的な直接計測とは若干異なった、データ処理法となった。今後、解析例を増やすとともに、データ処理法に工夫を加えていきたい。

謝辞： 本研究を進めるに当たって、文部省科学研究費補助金基盤研究A(1)(代表 池田俊介東京工大教授)の補助を受けた。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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, 第52回年次学術講演会講演概要集, 第II編, pp.570-571, 1997.
- 2) 藤田一郎, 原 基樹, 森本貴夫, 大西 努: PIV技術の実河川表面計測への応用, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.41-46, 1998.
- 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, 第39巻, pp.447-452, 1995.
- 4) 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, 第42巻, pp.505-510, 1998.

(1999. 4. 26 受付)