

淀川下流部における PIV を 用いた洪水時の流速観測

FIELD MEASUREMENT OF A SURFACE VELOCITY AND ITS TURBULENCE DURING A FLOOD IN THE YODO RIVER BY USING PIV

綾 史郎¹・露口 肇²・柿木 理史³・室田 有紀³・藤田一郎⁴

Shirou AYA, Hajime TSUYUGUCHI, Satoshi KAKINOKI, Yuki MUROTA and Ichiro FUJITA

¹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)

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非会員 大阪工業大学工学部 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 (PIV), in which video images of the oblique angle recorded at the high-building facing at the river were transformed into non-distorted ones. The development of the digital-video processing makes it possible by the reasonable cost. It was successfully examined in the Yodo River Study. The 2-D distributions of the velocity vectors, the vorticity, the turbulent intensity, and the Reynolds stress at the water surface were obtained. The characteristics of their distributions were disclosed in view of the relationship between the depth, channel geometry, hydraulic structures and channel alignment and the basic characteristics of turbulence of the flood flow were also discussed in view of the channel geometry.

Key Word: particle image velocimetry, velocity distribution, vorticity, turbulence measurement, compound cross-section channel, flows in a meandering channel

1. はじめに

河岸の建築物や堤防などの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などの現場計測に適用され、成果を上げてきた^{1), 2)}。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ことをあげることができ、既に、乱れの同時多点計測等にも使用されている³⁾。しかし、アナログ撮影されたビデオ画像を PC 内へ取り込む際に、一度に処理し得る画像の枚数は取り込み時に用いられるメモリの容量により制限され、メモリが高価なため、安価なシステムでは現実的には数 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、河川の乱れ計測へ

の応用には困難があった。

しかし、近時、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。先に、著者らは 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について述べた⁴⁾。

本論文では、淀川下流部の距離標 13.0km~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、平均流速分布や渦度の水表面分布を求めるとともに、乱れ強さやレイノルズ応力などの乱れ特性量の平面分布等について検討した。

2. 洪水流のビデオ観測と画像処理方法

本論文で使用し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⁵⁾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⁶⁾。

(1) 使用器材

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 CREASENCE) 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⁶⁾。

(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よく見られる湧昇流やボイルによって生じた水表面上の凹凸や、ゴミや泡などの浮遊物に起因した表面輝度の濃淡分布等により水表面に生じた紋様を自然のトレーサーとして利用する。河岸の高所からのビデオ画像を鉛直上方からの無歪画像に変換した後、 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 秒間に Δx だけ移動したものとすると、

$$v = \Delta x / \Delta t \tag{1}$$

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。

解析の分解能 dv は紋様の移動量が pixel 単位で求められるので、形式的には

$$dv = dx / \Delta t \tag{2}$$

で求まる。ここに、 dx : 1 pixel の長さベクトルである。さらに、相関係数の 2 次元関数分布を仮定することにより、 dv を(2)で得られる値の 0.2 倍程度まで小さくすることが出来る。

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

$$\text{div } v = Cd \tag{3}$$

を計算し、発散が基準値以上($Cd > 0.2$ 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、

$$R_{ij} < CU \quad (= 0.1) \tag{4}$$

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、 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

乱れ速度ベクトル v' は

$$v' = v - V \tag{5}$$

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 (カメラ高さ OP.+68.53m) より 13.0~13.2km 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。この付近で淀川は大きく蛇行し、13.0km 付近は 2 番目の湾曲頂部に位置している。対象水域の詳細な地形を示した図-1、2 に見られるように河道の断面形状は何回かの改修工事の結果、複雑断面形状となっている。水域は下流 10.0km に位置する淀川大堰により平水時には水位が OP.+3.0 m 付近に維持される低水路幅が 200~250 m の湛水域であり、ほとんど流速はなく、1 段目のテラ

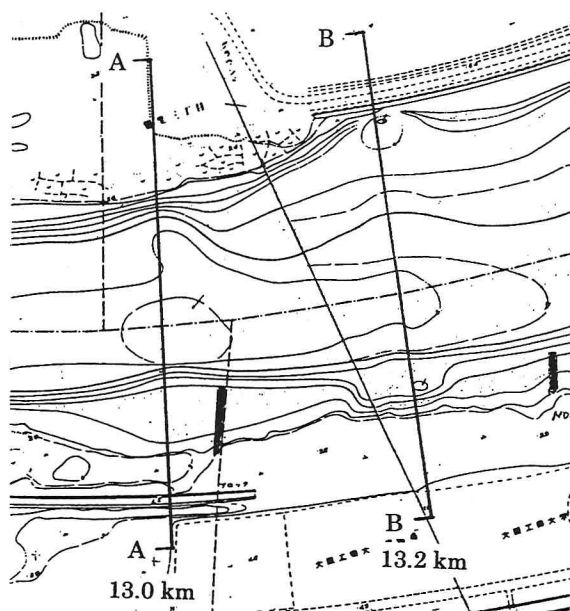
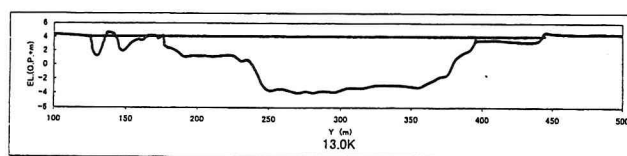
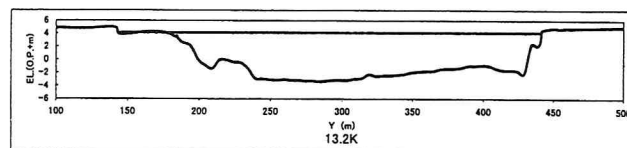


図-1 淀川 13.2km 付近の平面図.



(a) 13.0 km



(b) 13.2 km

図-2 淀川横断測量図.

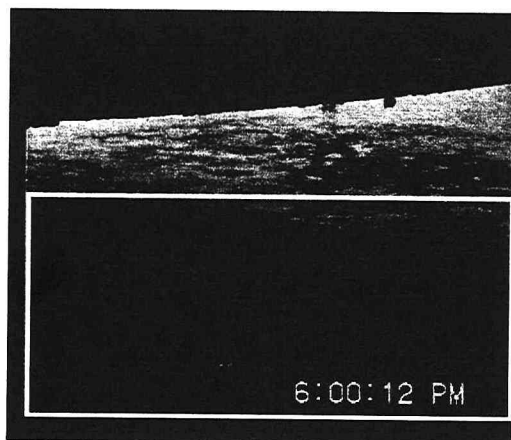


写真-1 13.2km 付近の原ビデオ画像.

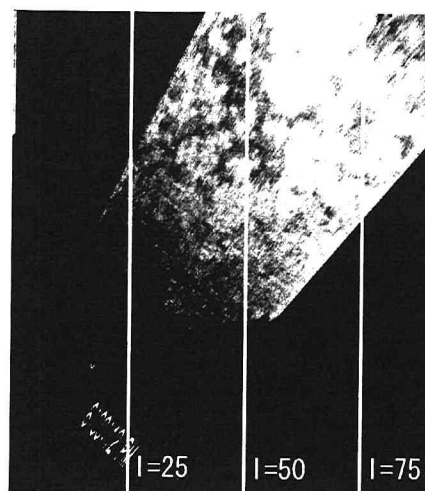


写真-2 変換後の無歪画像.

ス (OP+0~1.0m)は冠水している。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 (水制天端高さ OP+2.2~3.0m) が残っており、洪水時にはあたかも越流型水制のように機能する。

解析対象出水は 1998 年 6 月 21~23 日にかけてのピーク流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$ の小出水であり、流量ピークを過ぎた低減期の 6 月 22 日 18 時頃の流量 $1350\text{m}^3/\text{s}$ の時に、大阪工大 6 号館屋上からビデオ撮影を行った。淀川 13km 付近では、小流量時に水表面全面に紋様を観測することは珍しく、貴重なビデオ観測となった。写真-1, 2 に元の斜め画像と 2 次射影変換を用いて変換⁶⁾された無歪画像を示す。ビデオ観測では低水路の表面中央に微細で鮮明な紋様が観測され、1 段目のテラス上になる左岸側壁付近の水制域内で主流部からの紋様の侵入や上流向き流れ、渦が時折観測され、中央主流部と側岸付近水

表-1 解析条件.

	Case 1	Case 2
総画像枚数	240	120
画像時間間隔 (秒)	1.0	2.0
観測時間 (秒)	239	239
無歪画像時のサイズ	676×739	725×832
1 pixel の実長 (m)	0.5×0.5	0.25×0.25
ベクトルの出力数	36×36	88×101
ベクトル間隔 (m)	10	2
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

制域内での表面紋様とその動きの違いは明白であった。画像処理は表-1 に示すように、同じビデオ画像を用い、分解能の異なる 2 種の条件で行った。Case 1 はビデオ

画像全体を対象とし、全川幅の流れの状況の観測や流量計算に使用したが、流速の解析精度、ベクトル間隔はやや粗い。Case 2 は左側岸付近に注目し、解析精度を高め、流速ベクトル間隔を細かくして行った。Case 1で

は 1pixel の実長 0.5m x 0.5m とし、画像を時間間隔 1秒で PC 内に取り込み、240 枚の画像を処理・解析し、10m (20pixel)間隔で流速ベクトルを得た。解析の精度は(2)式 x 0.2 として $u=v=0.1\text{ m/s}$ 程度の値である。

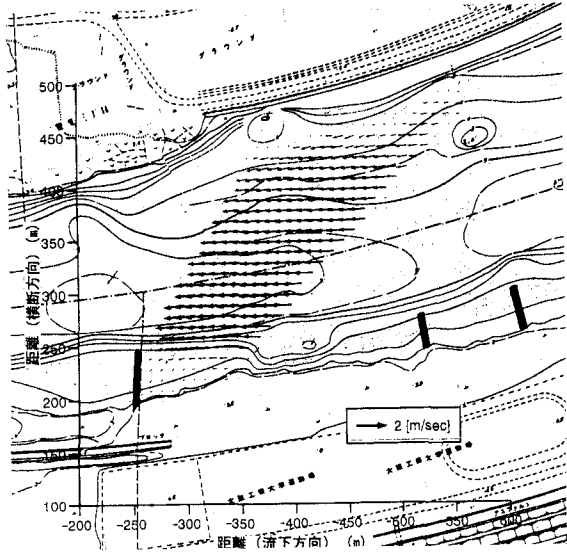


図-3 平均流速の水表面分布 (Case 1).

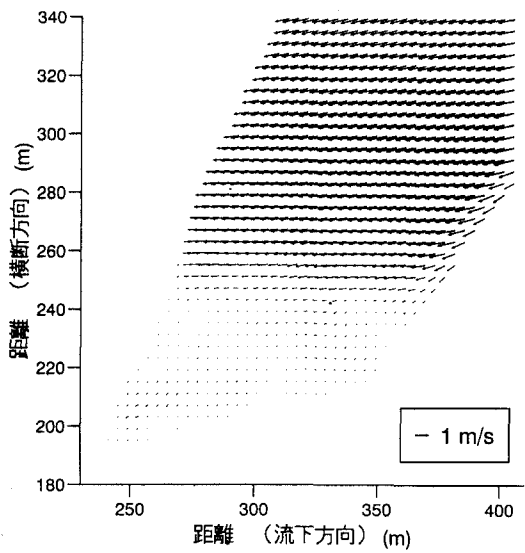


図-4 時間平均流速の水表面分布 (Case 2).

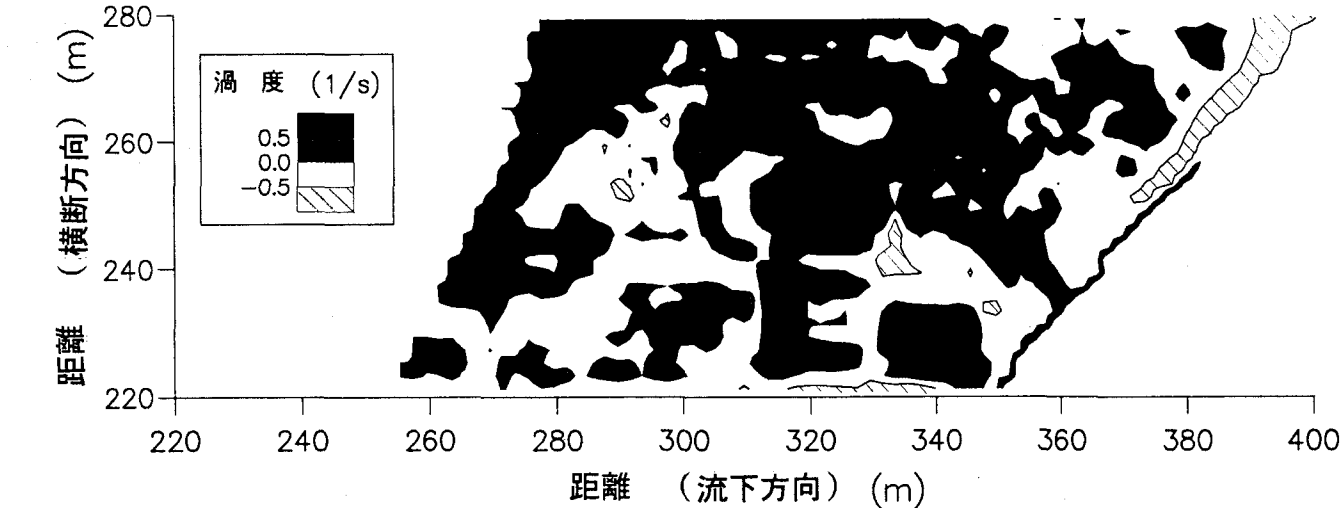


図-5 渦度の水表面分布 (Case 2).

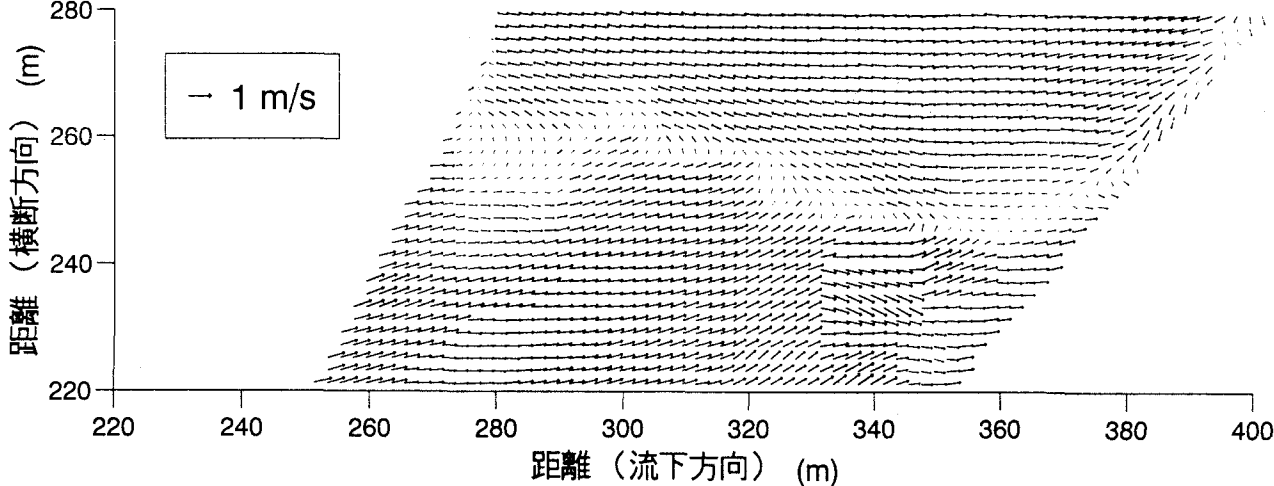


図-6 移動座標系による流速の水表面分布 (Case 2).

一方、Case 2 はより細かな流れの様子を見ようとしたものであって 1 pixel の実長を 0.25m x 0.25m とし、画像の取り込み時間間隔を 2 秒とし、120 枚の画像を処理・解析し、2.5m (10 pixel) 間隔で流速ベクトルを得た。解析精度の目安は(2)式 $\times 0.2$ として、 $u = v = 0.025$ m/s 程度の値である。

(2) 結果と考察 —Case 1—

a) 時間平均流速の平面分布と流量計測

得られた時間平均流速の平面分布を河床図とともに図-3 に示した。淀川は川幅を狭めながら大きく右方向に湾曲し、最深部 (水深 7m 程度) は左岸側によっている。河川中央部で深く、両側岸部で浅い (水深 4m 程度) 水深分布に対応して、流速分布は河川中央部左岸よりで最大流速 1.4m/s 程度が見られ、両側岸部でほとんど流速の見られない遅い流れとなっている。左側岸部付近 ($y < 250$ m) では特に流速が小さく、止水域状の流れとなっているが、これは水面下の水制の影響である。また、流向はほぼ、13.0km の横断測量線に直交している。

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、13.2km 断面の横断測量成果を用いて流量を算出すると、1100 m³/s である。観測地点より上流の枚方 (26km) 地点の水位—流量曲線から算出された流量は 1350 m³/s であり、PIV 法により算出された流量は H—Q 量曲線から推定された流量に対して、-16.5% の違いがあった。

(3) 結果と考察 —Case 2—

a) 流速分布

左岸側の水深急変部を中心として、その周辺の流速分布の詳細を示したものが、図-4 である。図-3 と本質的に変わるものではないが、240m~260m 付近の水深急変部を挟んで、速度分布も急変していること、左岸側の水制域内部では微弱ではあるが、複雑な流向の流れが存在していることが分かる。図-5 は 10 秒間の平均流速ベクトルの分布より渦度を計算し、その分布を示したものであるが、河川の中央部で渦度は正、水制域内部では負になっている。さらに、図-6 は $y = 250$ m の流速により移動座標系より見た流速分布を示したものであるが、水制域と主流域との境界付近に 2 つ程度の大きな渦を認めることが出来る。

a) 乱れ特性量の分布

乱れ特性量として、主流方向および水路幅方向の乱れ強さ u' 、 v' 及び Reynolds 応力 $\overline{u'v'}$ の平面分布を図-7、-8、-9 に示した。これらの図では、水制域内部での流速測定結果の時系列を見ると相関係数値が低いことによる流速の棄却事例が多く、流速測定の信頼性は低いものと判断されたため、水制域を除外し、流速急変部を含めた河川中央部付近における分布のみを示した。いずれの特性量においても、 $y = 250$ m を中心とした流速急変

部で大きな値を示しているが、主流域では u' は 0.2m/s 程度であり、平均流速で無次元化すると、 $u'/U = 0.1 \sim 0.2$ の値となり、従来から言われている程度の値となった。一方、 v' はこれよりやや大きいものであった。

図-10 (a)、(b)には、主流方向流速と Reynolds 応力の横断方向分布を河床高さの横断方向分布とともに示した。主流方向の流速分布はどの測線においても、河床高さの分布と極めてよく対応しており、水深の浅い水制域でも $y < 240$ m の領域で小さく、水深が深くなる $y > 260$ m の主領域では 1.2~1.4m/s の値をとっていることが、これらの図にも明瞭に示されている。前述のように水制域内部での乱れ測定の信頼度は低いので、Reynolds 応力の分布は限られた範囲でしか表示されていないが、流速分布が比較的一様な主流域では小さな値を示し、 $y < 260$ m の流速急変部で大きな値を取る傾向を見ることが出来る。

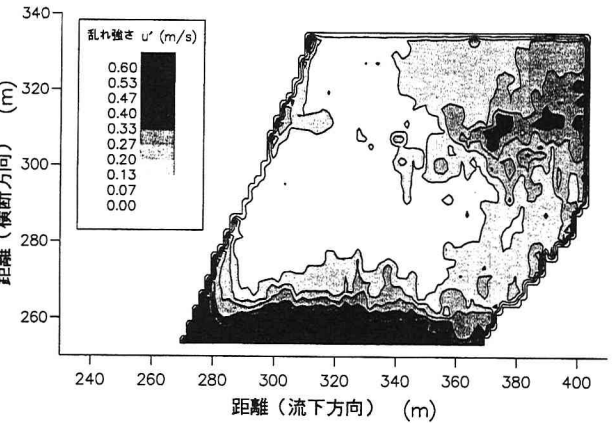


図-7 u' の水表面分布 (Case 2)。

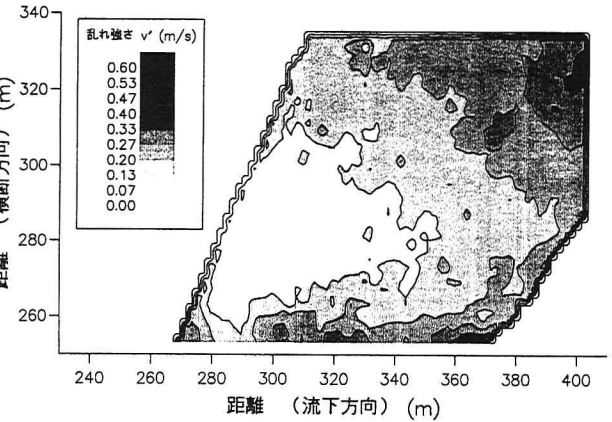


図-8 v' の水表面分布 (Case 2)。

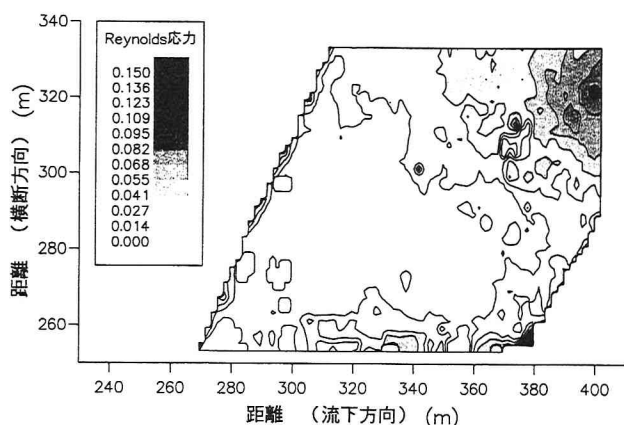


図-9 $\overline{u'v'}$ の水表面分布 (Case 2).

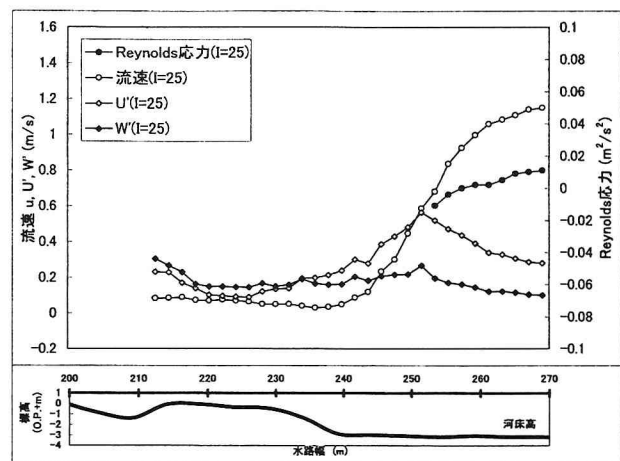


図-10(a) 平均流速と Reynolds 応力の横断方向分布 (Case 2).

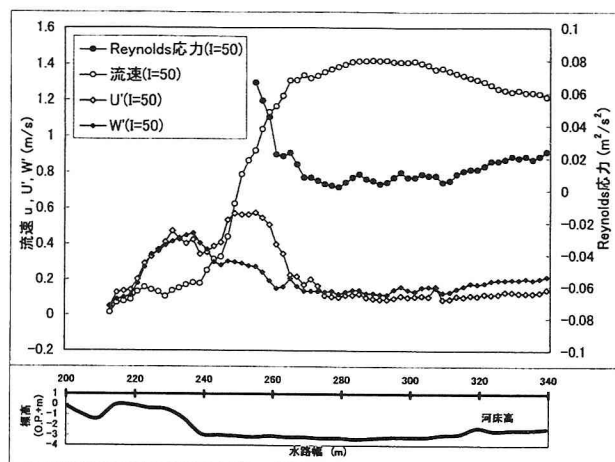


図-10(b) 平均流速と Reynolds 応力の横断方向分布 (Case 2).

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、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 (水深、複断面構造、水制等) 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、Reynolds 応力の空間分布と河道形状特性との関係を検討し、従来、実験水路で得られている知見とほぼ同様の結果を確認することができた。

洪水時の河川流の平均流速と乱れを PIV 法を用いて計測したが、水深の大きい主流域ではともかく、水深の浅い水制域では必ずしも満足行く観測結果を得られなかった。水域が複雑すぎて、このような試験的観測法の実証には適切ではなかったかもしれない。また、トレーサーとしては水表面に自然に生じる紋様を用いたが、水制域では存在時間と量の点で十分でなかった点も上げられよう。観測例を増やすとともに、観測法、データ処理法に工夫を加えていきたい。

謝辞：本研究を行うに際し、科学研究費補助金基盤研究 A(1) (代表 池田駿介東京工大教授) および (社) 近畿建設協会の補助を受けた。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, pp570-571, 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, pp41-46, 1998.
- 3) 棚津家久, 鬼東幸樹, 定免英樹, 相良幸輝: PIV 計測による植生開水路流れの乱流構造に関する研究, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.409 - 414, 1998.
- 4) 油谷利明, 露口肇, 綾 史郎, 藤田一郎: PIV 計測による河川流の表面流速特性, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, pp.41-46, 1999.
- 5) 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, pp447-452, 1995.
- 6) 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, pp505-510, 1998.

(1999. 9. 30 受付)