

画像解析による開水路乱流場の空間計測

Measurements of Open-channel Turbulent Flow by Image Analysis Method

藤田 一郎 *・遠松 篤 **

Ichiro FUJITA and Atsushi TOHMATSU

*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)

**非会員 工修 (株) 協和設計

Image analysis method has come to be an efficient tool to measure turbulent flows and several commercial systems are available at present. Most of the systems utilize a particle image velocimetry (PIV) technique based on a pattern matching technique. However, the accuracy of this technique becomes not sufficient under a flow with highly shearing deformation. Thus, in this study, the particle tracking velocimetry (PTV), which has a higher spatial resolution and accuracy than PIV, is used instead for measuring mean and turbulent quantities of open-channel flows. The experiments were performed using a transparent open-channel flume having a width of 0.15m and a high-speed video camera (HAS 200R) with 200fps was used for imaging. As a preliminary experiment, velocity distribution at a longitudinal vertical section of a uniform flow was measured by two PTV techniques and their accuracy and efficiency were verified. Three-dimensional measurement was performed for the flow around a rectangular obstacle placed on one side of the channel wall. Here the three-dimensional information was obtained by combining 2-D PTV results for the laser light sheets (LLS) separately placed in seven horizontal and fourteen vertical planes. It was made clear that two and three dimensional mean and turbulent velocity fields can be obtained with a reasonable accuracy by the presented PTV procedure.

Keywords : image analysis, particle tracking velocimetry, 3-D measurement, open-channel turbulence, flow around an obstacle, local flow

1. 緒言

流れの乱流計測の手法として従来型の点計測に代わって、二次元あるいは三次元の空間計測を可能とする画像計測が注目され、最近では市販のシステムも入手可能となってきた。大半のこれらのシステムではPIV(Particle Image Velocimetry)¹⁾が利用されているが、その基本原理は有限サイズのテンプレート同士のパターンマッチングに基づいているため、空間解像度に限界があるという本質的な欠点を有している。そのため、PIVは壁面近傍の計測には不向きである。また、例えば大規模な渦運動を伴うようなせん断変形の大きな流れ場に対しては、十分な精度を確保することが容易でないことも指摘されている²⁻⁴⁾。

そこで、本研究では高精度な乱流計測を行うために個々の粒子の追跡に基づく画像計測手法であるPTV(Particle Tracking Velocimetry)に着目し、この手法を用いていくつかの開水路乱流場の計測を試みた。ただ、確かに PTV を利用すれば検出された粒子近傍

での流れ場に関する空間解像度は高まるが、一方で PTV の欠点として次のような点が指摘されている。すなわち、PTV ではある瞬間における流速ベクトルの個数が画像処理で検出されるトレーサ粒子個数に依存し、またそれらがランダムに分布するため、点計測的な取り扱いにおいては PIV に劣るという指摘である。そこで、ここでは画像計測の後処理の段階で空間データのサンプリング方法に若干の工夫を加え、大量の画像データを利用して時間平均乱流場の高精度な計測を試みた。

本研究では、まず定常等流の鉛直二次元場を対象とした PTV 計測を行い、計測精度の検証を行う。次に、開水路の側壁に障害物(直方体のブロック)を設置したときに生じる複雑な三次元場を対象とした計測を行う。この場合は、縦横の多断面における大量の二次元計測結果を合成して三次元平均流場を求める。この流れ場は河川工学的な観点からは仮締め切り工事中の河川の流れとみなせ、その流れ構造の把握は工学的に重要な課題である。

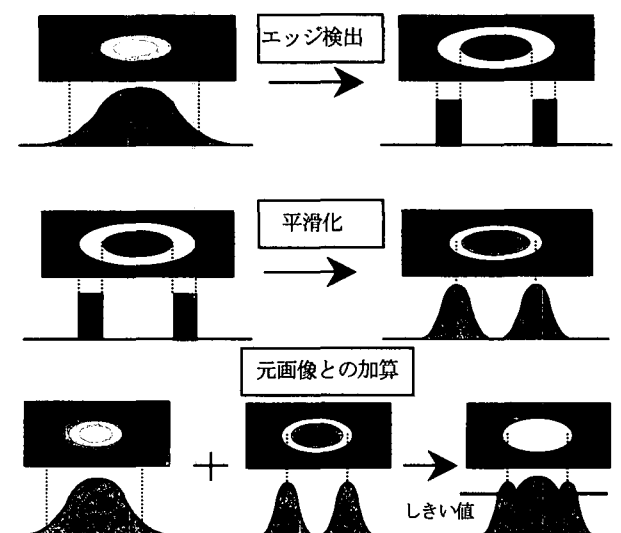


図 - 1 エッジ検出を利用した二値化手法 (しきい値法)

2. PTV の概要

2.1 二値化手法

PTV では二値化画像を用いるため、粒子画像から如何にして粒子のみを強調するかが重要な要素の一つとなる。ここでは、2 種類の方法について検討する。

(1) しきい値法

得られた粒子画像の濃度分布をあるしきい値で単純に二値化するのではなく、エッジ検出処理を加えることによって効率的に粒子を強調するために考案された処理法⁶⁾である。図-1にその概念図を示す。粒子の輪郭が明瞭になるのでしきい値を容易に設定できる。ここでは、さらにレーザ光膜の厚さの変化などに起因する背景画像のムラをできる限り除去するために、以下の手順で背景画像を生成した。すなわち、利用するすべての画像の全画素を予めスキャンし、各画素位置で最も濃度の低い (背景が暗いと仮定して) 値を求め、それらの値で構成される画像を背景画像とした。PTV 解析では、各画像からこの背景画像を差し引いた画像を用いた。

(2) 粒子マスク相関法⁶⁾

従来法のようなしきい値の設定を不要とする新手法で、この方法ではまず予め設定した二次元ガウス分布をマスクパターンとして使い、元画像との相互相関係数分布を求める。次に、相互相関係数に対するしきい値を定めて二値化画像を生成する。重要なのは、この場合のしきい値は元画像の濃度分布に依存しないため、ある程度普遍的な値を設定することができる点である。

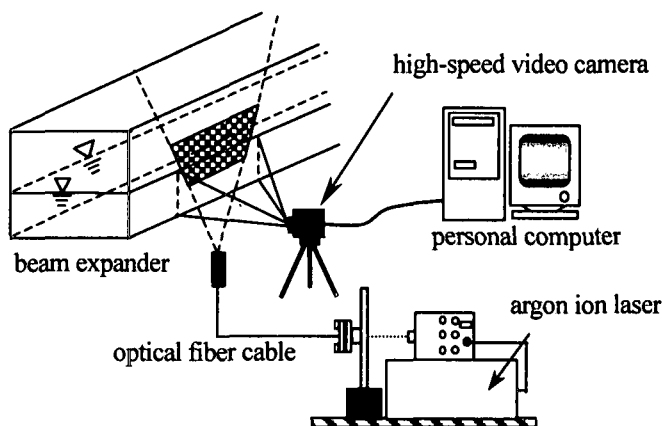


図 - 2 画像計測システム

2.2 二値化相関法 (BICC)

二値化された粒子の対応付けの方法には、様々な手法^{7,8)}が提案されてきているが、ここでは二値化相関法 (Binary Image Cross-Correlation Method, BICC) を用いる。二値化画像に対する相互相関係数は、各テンプレート内の濃度分布をそれぞれ p_{ij} , q_{ij} とすると次式で与えられる。

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij} \cap q_{ij})}{\sqrt{kl}} \quad (1)$$

ここに、 $m \times n$ はテンプレートサイズ、 kl は各画像で粒子部分としてカウントされた画素数を示す。式(1)における演算の大部分は論理和演算なので高速な解析が期待できる。

3. 実験概要

3.1 実験装置ならびに画像計測システム

実験には水路長 6m、水路幅 $B=0.15\text{m}$ の全断面アクリル樹脂製の循環式開水路を用いた。実験装置および画像計測システムの概略を図-2に示す。流れの可視化には平均粒径が約 $60\mu\text{m}$ 、比重約 1.02 のナイロン破碎粒子をトレーサとして用いた。ビームイクスパンダーで光膜化した厚さ約 3mm のアルゴンイオンレーザ光 (空冷式 200mW) は、鉛直断面を計測する場合には水路底面から上向きに照射した。水平断面を計測する場合はカメラとレーザの位置関係を反対にした。レーザ光は光ファイバーケーブルを介してビームイクスパンダーに導かれているため、任意の断面への光膜の移動は比較的容易であった。

撮影には 200fps (frame per second) の高速ビデオカメラ (DITECT 製、HAS-200R) を用いた。この高速ビデオカメラでは、一度の画像取りこみで最高 1536 枚 (7.68 秒、192MB) の連続画像を PC に搭載したフレームメモリ (DITECT 製) に格納可能であり、8 ビット、512x256 画素のモノクロバイナリデータとしてハードディスクに格納できる。ただし、実際には連続二時刻分のフィールド画像を一枚のフレーム画像に合成して保存した。保存には CD-R を用いた。解析においては、フィールド分離した後、フィールド間の画像濃度を線形補間値で埋め 512x512 画素の画像に再構成したものを用いた。ただし、縦方向の座標は相対的に一画素分だけずれるため、一画素移動量に対する速度成分を解析結果に加える補正を行っている。

3.2 等流に対する実験

ここでは、基本的な開水路等流に対する乱流画像計測をいくつかの方法で行い比較検討する。水理条件は、水深 $h=2.2\text{cm}$ 、断面平均流速 $U_m=25.7\text{cm/s}$ 、摩擦速度 $u_* = 1.68\text{cm/s}$ 、 $Re=4200$ 、 $Fr=0.57$ である。摩擦速度はエネルギー勾配より算定した。これらの水理条件は、200fps という高速ビデオカメラ側の制約条件下でできるだけ高精度な画像計測を行うための条件から逆に設定した。すなわち、画像間のトレーサ粒子の最大移動量が 10~20 画素程度となるように流量、流速を調整した。また、ビデオカメラのセッティングに伴う画像のわずかな回転に対する補正も行った。なお、解析には約 20 秒間、4608 枚の画像を用いた。

解析データの統計処理は流れ方向に一樣な等流が対象なので、流れの情報は水路床からの距離のみの関数とみなせる。したがって、水路床から 1mm までは 0.1mm 間隔、1mm 以上は 1mm 間隔の計測スペースを設定し、各隙間空間に入る流速ベクトルのサンプリングを行った。統計量はその計測スペース内では一樣分布と仮定して処理した。なお、今回の水理条件下では、水深方向の 1 画素サイズは 0.00735cm で $y^+ = u_* y / \nu = 1.1$ に対応している。この方法で収集した流速ベクトルの数は 1mm の計測空間に対し一万個以上に達した。各瞬間で得られたベクトル数は高々 500 個程度だったので、時間平均的な統計量を得るには各瞬間のベクトルデータを空間的に補間して格子点データを求めるよりも、本手法の方が簡便で高い空間解像度を保てるものと思われる。

3.3 側壁障害物周辺流れに対する実験

障害物としては、幅 0.15m の開水路に対して長さ 0.1m、幅 0.05m、高さ 0.05m のアルミ製ブロックを使

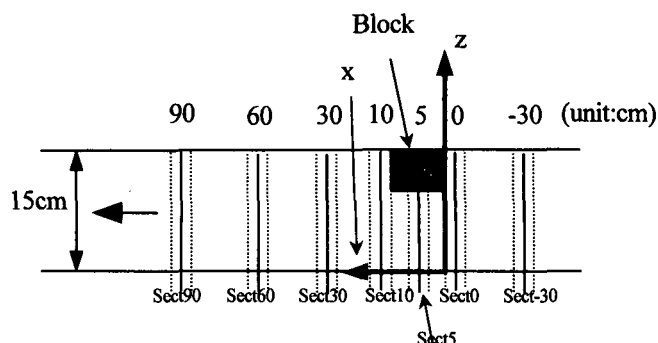


図-3 計測断面

用し、それを水路上流端より約 2m の地点に設置した。計測断面は図-3 に示すように障害物上下流の 7 断面とした。水深は下流を多少せき上げ状態にして 3.72cm とした。これは水面の変動をある程度抑えるためである。他の水理条件は、断面平均流速 $U_m=14.5\text{cm/s}$ 、 $Re=4500$ 、 $Fr=0.24$ である。

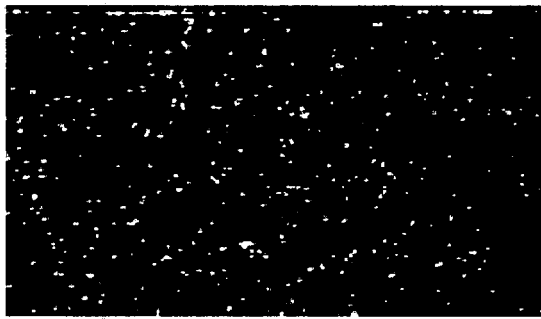
画像計測は、鉛直断面については側壁から 1cm 間隔の計 14 断面に対して行い、水平断面については底面から 0.5cm 間隔で水面近傍までの 7 断面に対して行った。ただし、水平断面の計測では計測精度を鉛直断面計測時と同程度に保つ目的で撮影可能な範囲を 6 (横) × 5 (縦) cm 程度と設定したため、水路全幅をカバーするには 5cm 程度ずつ撮影範囲をずらし 3 回に分けて撮影する必要があった。したがって、最終的な水平断面のデータはそれらを合成して求めた。各断面での計測時間および画像量は等流実験の場合と同様である。その結果、本解析では、結果的に鉛直・水平断面を合わせて総計約 90 万枚の画像を用いることとなった。

このケースでは、流れは完全に三次元的な挙動を示すので、各計測断面で流れ方向に 1cm、横方向に 1mm のメッシュを計測空間として設定し平均操作等のデータ処理を行った。本解析では各メッシュ当たり約 1000 個程度のデータが得られた。

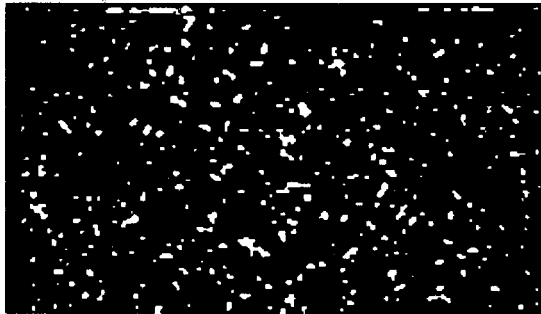
4. 解析結果ならびに考察

4.1 二値化手法

図-4 に 2.1 で説明した二値化手法による画像例を示す。しきい値法が元画像粒子の形状の特性を保持しているのに対し、粒子マスク相関法 (マスクサイズ 13x13 画素) では粒子の中心位置が鋭く捉えられているのがわかる。ただし、元画像からもわかるように水面付近ではレーザ光膜の水面反射によって筋状の明るい部分が見られる。水面では水面の揺らぎによって反射光の位置が変化するため、背景除去を行っても水面近傍の



(1) 元画像 (濃淡画像)



(2) しきい値法による二値化画像



(3) 粒子マスク相関法による二値化画像

図 - 4 二値化手法の違い

微妙な反射光の残像を完全に消すことはできなかった。ただ、この残像部分は、しきい値法ではもとのいびつな形のまま二値化されるため、PTV 解析の後処理によって粒子の対応付けのペアから排除できる可能性が高い。それに対し、粒子マスク相関法ではその筋状の残像部分も粒子的になってしまっている。これは、粒子個数を確保するために相互相関係数のしきい値を 0.5 と標準値 (0.7 程度) より少し低目にとったことでその部分を除去できなかったためでもあるが、この処理が後述のように水面近傍粒子の誤対応の誘引となった可能性が高い。

4.2 二次元等流

(1) 瞬間流速分布

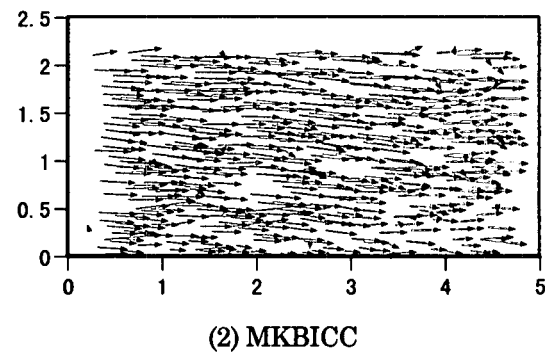
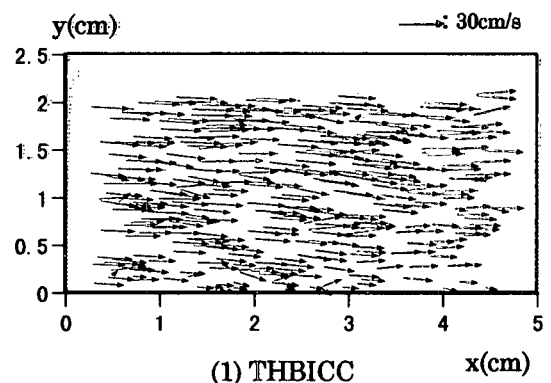


図 - 5 瞬間流速ベクトルの比較

図-5 に水路中央の鉛直断面における瞬間流速ベクトルを示す。THBICC は二値化にしきい値法を用いたケース、MKBICC は二値化に粒子マスク相関法を用いたケースを示す。どちらも図-4 の各画像に対する解析結果である。明らかに MKBICC の方が検出ベクトル数の多いことがわかる。ただし、水面近傍に注目すると MKBICC の方が誤対応のベクトルが目立っている。これは、4.1 で考察した粒子マスク相関法の特性によるものと考えられる。

(2) 平均流速分布

図-6 に平均流速分布を示す。水面付近から粘性底層内に至るまで、平均流速分布が良好に得られている。Reynolds 数が小さいため水面付近まで対数則が成立しており、平均流に関する限り手法による大きな違いは見られない。

(3) 乱れ強度分布

乱れ強度分布を図-7 に比較した。図中に示した式は、鬼束、禰津⁹⁾の提案式に基づいている。これより、水面付近を除く全体的な分布形状は提案式でうまく説明できることがわかる。ただし、水面近傍の分布には手法による若干の差が生じた。すなわち、流れ方向の乱れ強度が THBICC ではほぼ一定かあるいは減少傾向なのに対し、MKBICC では水面に近づくにつれて増加傾向を示した。また、乱れの鉛直成分に関しては、THBICC の方が水面に向かってより強い減衰傾向を示した。二

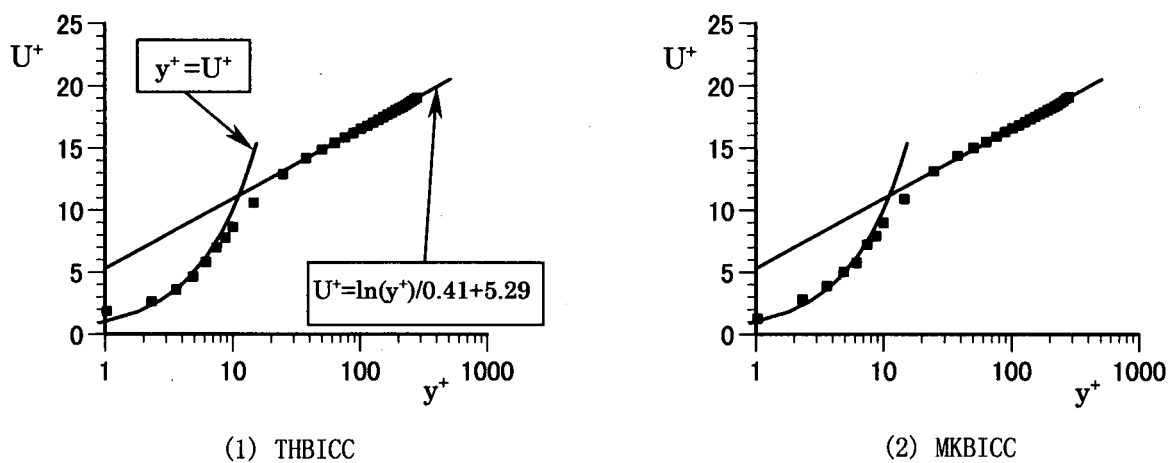


図-6 平均流速分布の比較

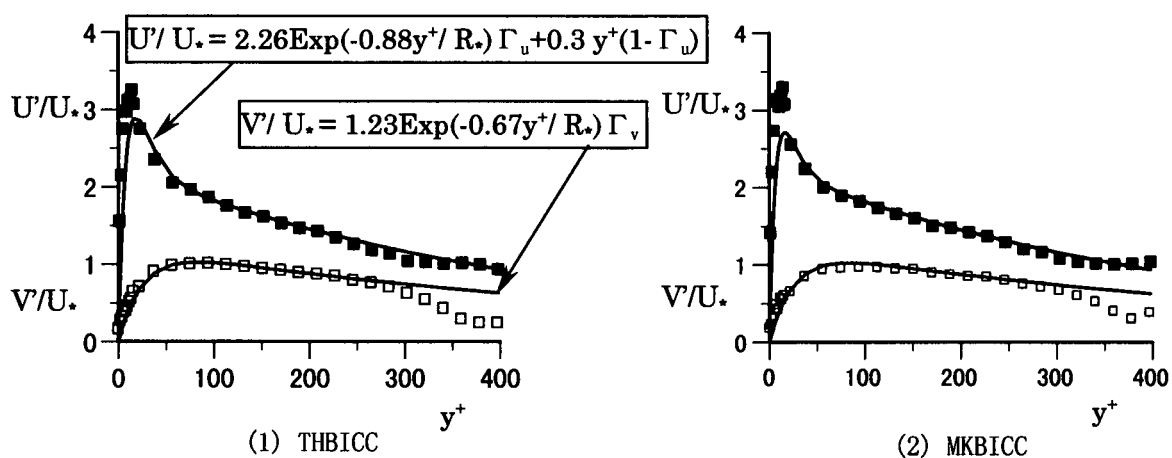


図-7 乱れ強度分布の比較

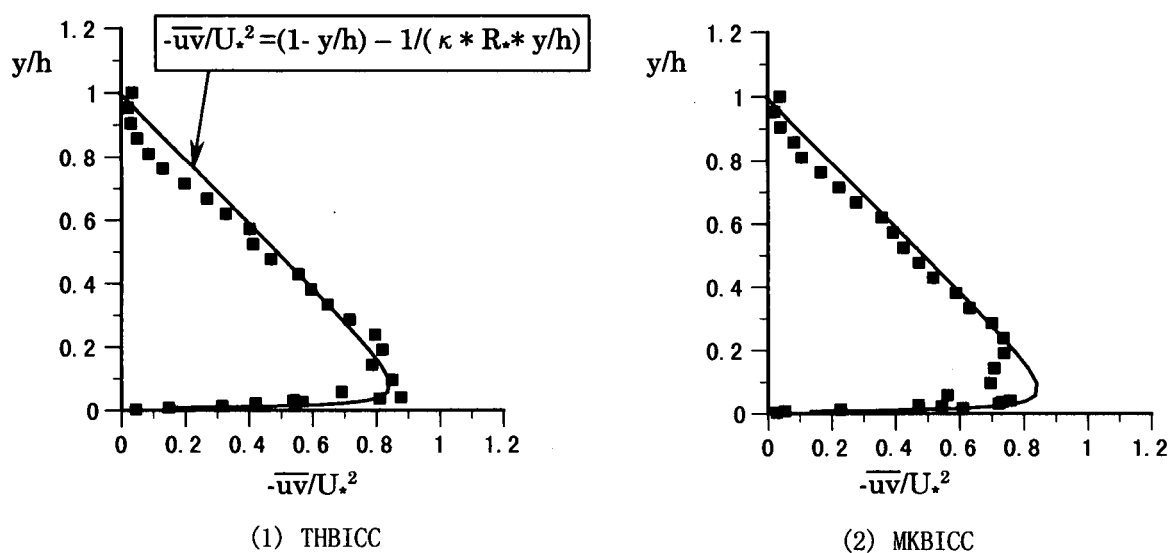


図-8 Reynold 応力分布の比較

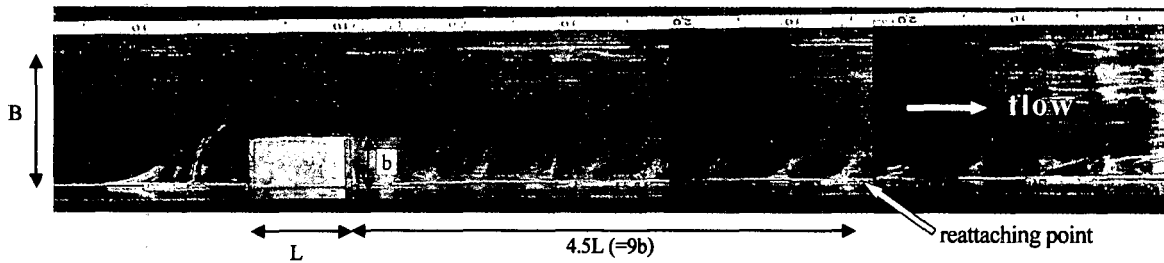


図-9 簡易油膜法による底面流線の可視化 ($B=15\text{cm}$, $L=10\text{cm}$, $b=5\text{cm}$)

値化された粒子同士の対応付けの方法は同一であるので、これらの違いは二値化手法の違いに起因していると思われる。本研究では、ここで示した以外の粒子の対応付け手法、たとえば速度勾配テンソル法 (VGT 法)^{7,10)}でも比較を行ってみたが、同様の傾向であった。

(3) Reynolds 応力分布

図-8 に Reynolds 応力分布を示す。水路床から水面まで比較的良好なデータが得られている。水面近傍と水路床近傍では手法による若干の差が認められるものの、PTV の適用によって十分な精度で乱流計測が可能であることがわかる。

(4) 計測誤差の要因

以上の計測において若干の違いが生じた要因を別の観点から論じると以下ようになる。すなわち、本研究では PTV 解析の後処理として、各計測空間で得られたデータに対し、データのばらつきが標準偏差の3倍以内となるように繰り返しデータ補正を行っているため、本来ならば瞬間流速分布に現れていたような一目瞭然の誤対応ベクトルは容易に棄却できたはずである。ところが、乱流計測結果に差が生じたのは、この方法で棄却できなかったデータの中に中途半端な誤対応のベクトルが含まれていたからである。そのうち水面付近での誤対応は、粒子マスク相関法による二値化画像生成時に光膜の水面反射像が粒子状のパターンと置き換えられてしまったことがその要因と考えられる。また、今回は 200fps の高速ビデオを使用しているが、水面付近の最大流速 (30cm/s 程度) に対応する連続画像間の粒子移動距離は約 17 画素 (約 1.5mm に相当) であった。この値は PTV での移動距離としては若干大き目であるため、この間で有意なパターンの変化が生じ、特に流れのせん断変形の大きな底面付近での誤対応の要因となったものと考えられる。

実際現象との比較で言えば、今回対象とした開水路流れは Reynolds 数が小さく、水面変動もわずかであったので乱れ強度の分布に関しては THBICC の結果の方が妥当と考えられる。しかしながら、水面極近傍における乱流計測は今後さらに重要性を増していくと思わ

れるので、さらに高精度の計測手法の開発が必要である。

4.3 障害物周りの三次元流れ

前節において、本画像解析システムが光膜面内の二次元流れ場の計測に有効であることを示した。このことは、光膜面を縦横に密に配置して計測を行えば、時間平均的な三次元流れ場の計測が十分可能であることを示唆している。ここでは、本システムの実用性を検証するために障害物周辺流れの計測結果を示す。

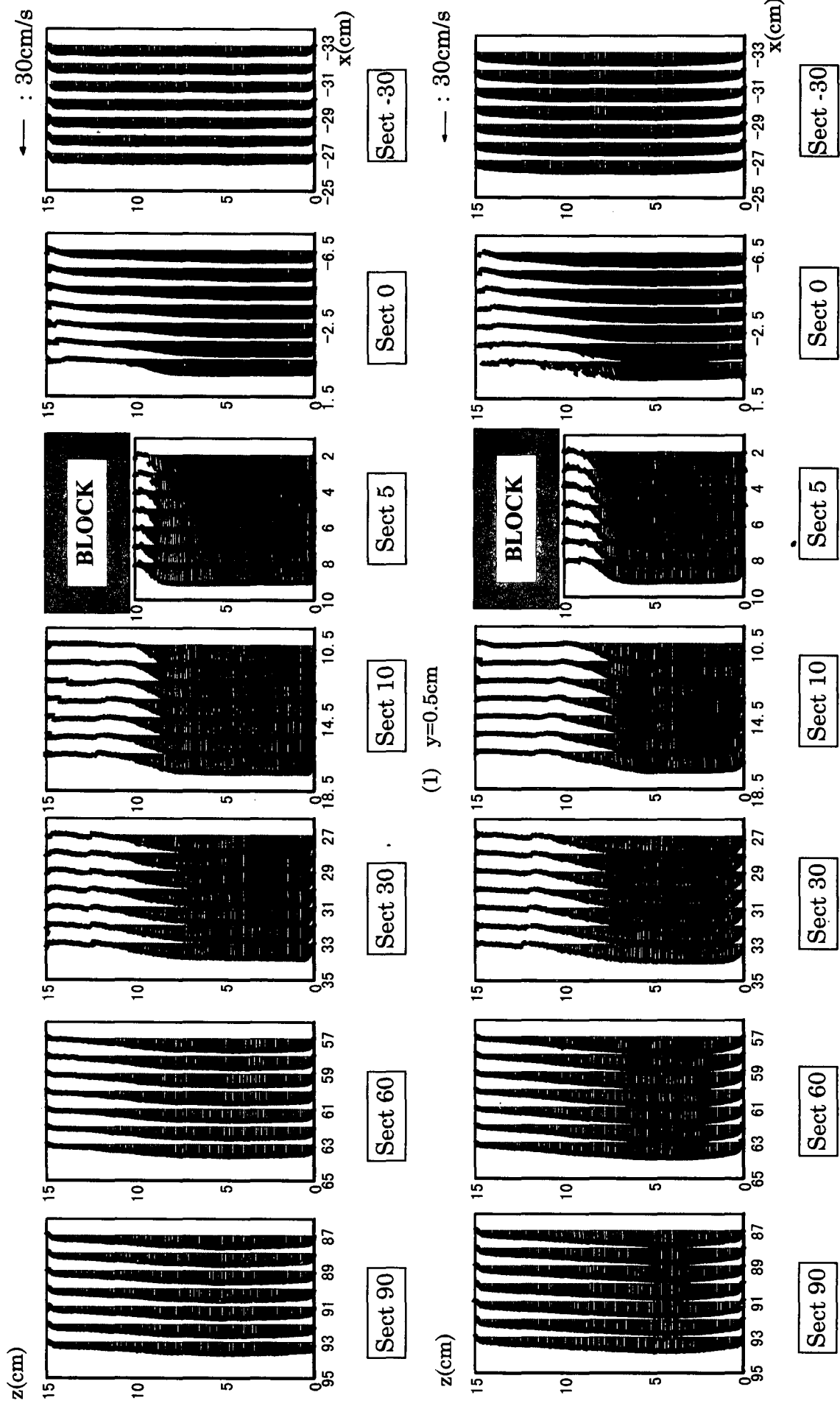
(1) 底面流線の可視化

まず、全体的な流れ場を把握するために行った簡易的な油膜法による底面流線の可視化結果を図-9 に示す。可視化は白色ペンキを注射針で底面横断方向に沿って塗布しながら行った。障害物の存在により、前面で大きく流線が湾曲していることや、ブロック下流端より 45cm 程度下流のところまで側壁に沿った逆流域が存在していることなどが明瞭に可視化されている。また、底面における再付着点はブロック幅の9倍程度下流に現れている。

(2) 平均流速分布

図-10 に水路床付近 ($y=0.5\text{cm}$) と水面付近 ($y=3.0\text{cm}$) における水平断面内の流速分布を示す。これより以下のような流れの状況が理解できる。即ち、(1) ブロック側壁には逆流域が生じ、その規模は水面に近いほど大きいこと (2) 急縮部先端においてはブロック側に流速のピーク値が生じていること (3) ブロック背後の逆流域の規模が水面に向かって増大していること (4) ブロック対岸側壁では流速勾配が急増しており壁面せん断力の増大が予想されること、などが容易にわかる。また、ブロック背後の剥離泡における逆流の流速は、水面近くの水平断面においてもそれほど大きな値は示さず、バックステップにおける特性とは異なっている。これは、流れの三次元性が卓越しているためと考えられる。

図-11 および図-12 にそれぞれ横断面における主流平均流速分布および二次流ベクトルを示す。障害物上



図一10 水平断面における流速分布

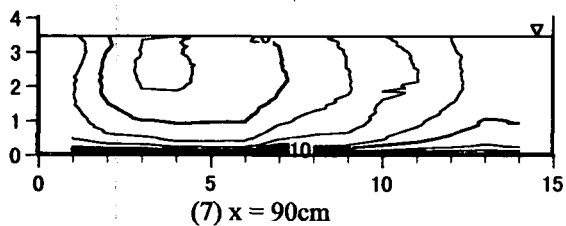
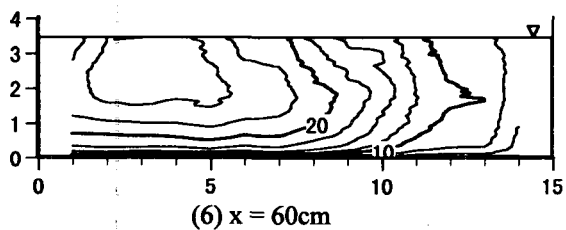
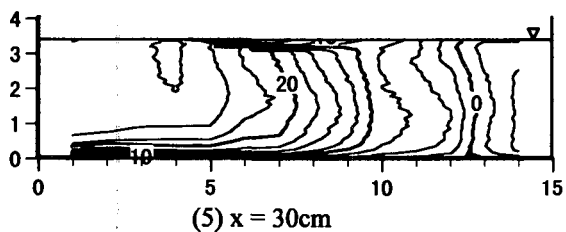
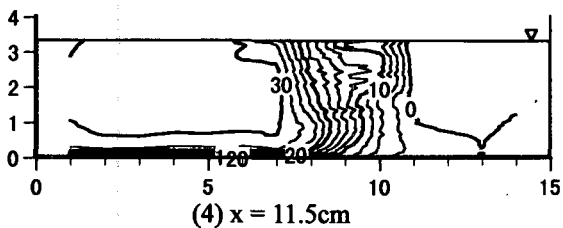
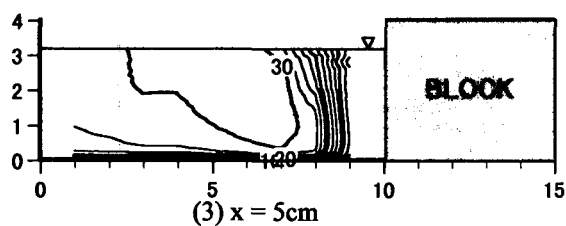
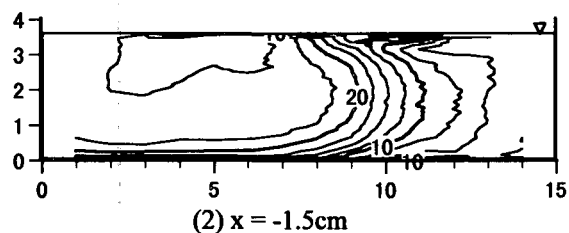
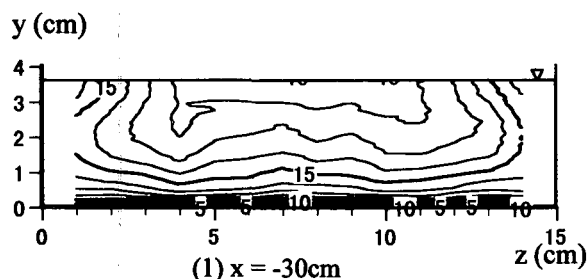


図-11 平均流速分布

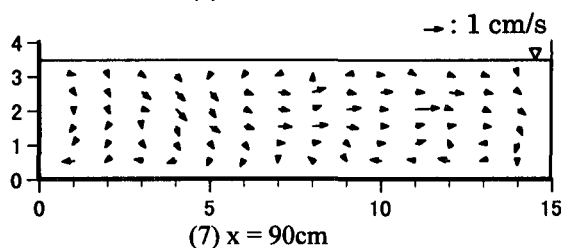
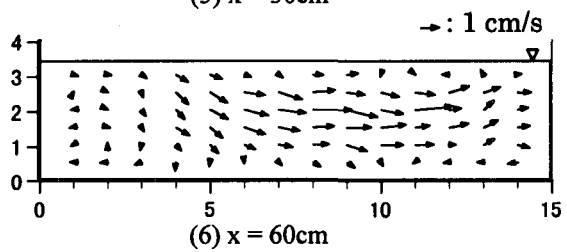
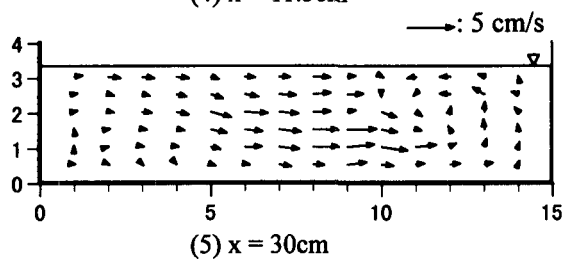
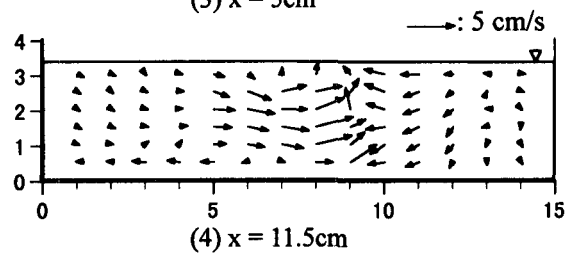
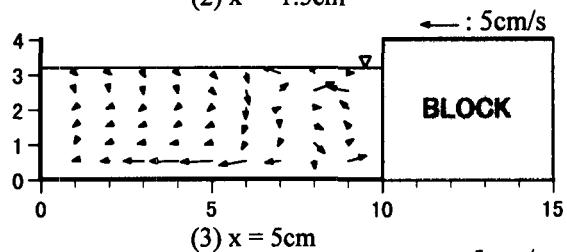
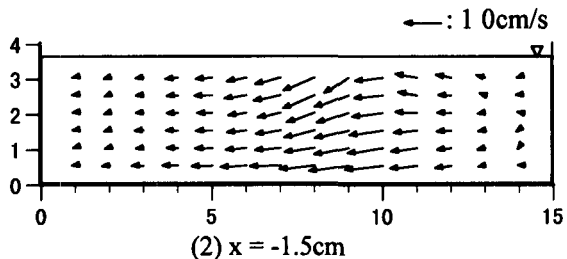
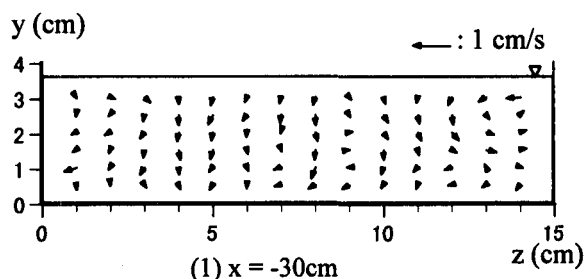


図-12 二次流ベクトル

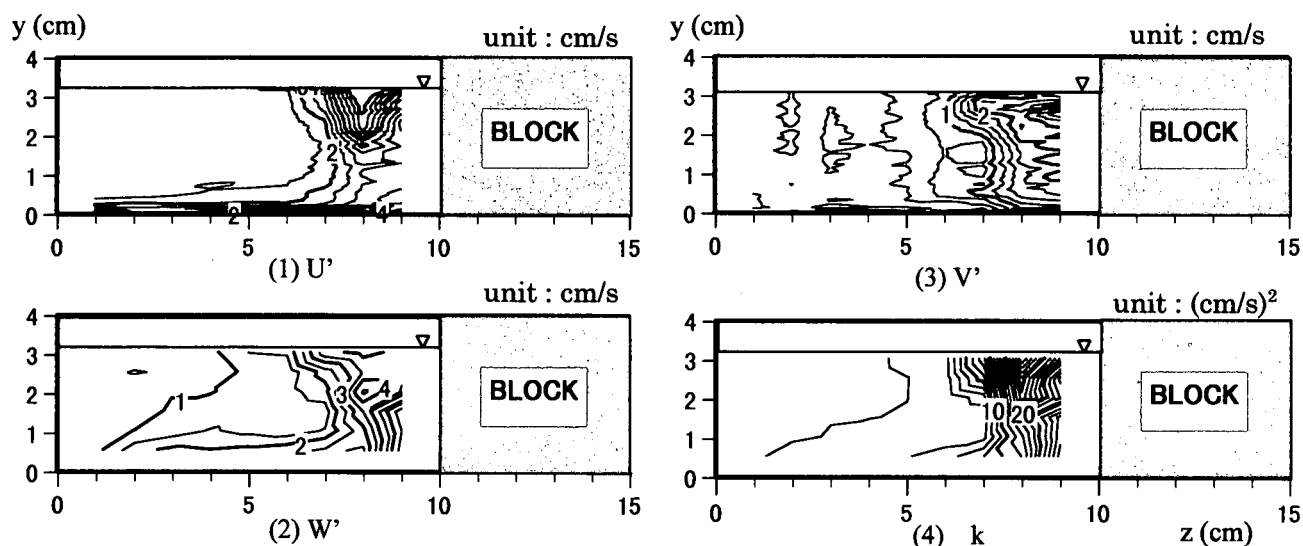


図 - 13 断面 $x=5\text{cm}$ ($x/L=0.5$) における乱流諸量

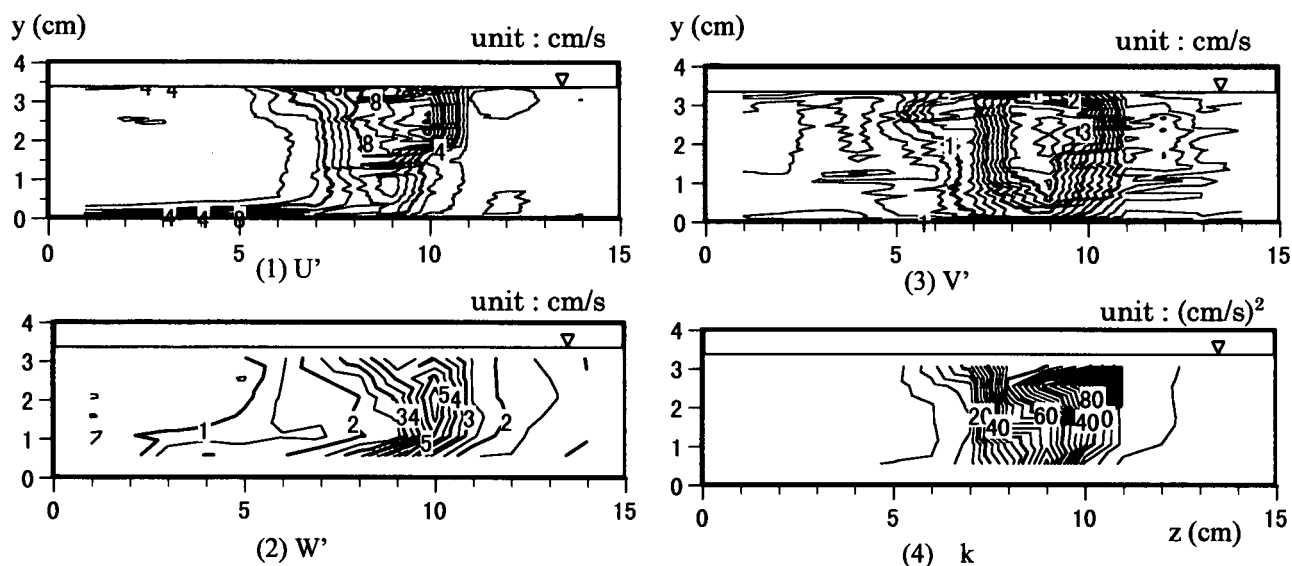


図 - 14 断面 $x=11.5\text{cm}$ ($x/L=1.15$) における乱流諸量

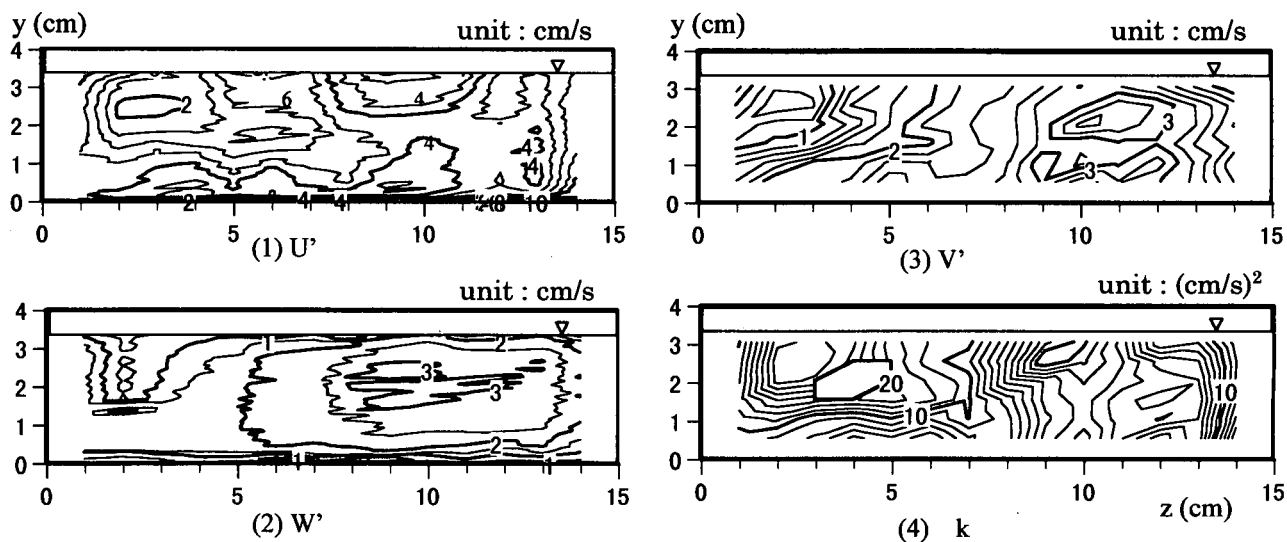


図 - 15 断面 $x=60.0\text{cm}$ ($x/L=6.0$) における乱流諸量

流側では下降流が生じると同時に平均流速が歪んでいること、障害物背後の剥離せん断層においてはその中心で上昇流が生じていることなどがわかる。また、 $x=30\text{cm}$ の断面では剥離域の底面に向かって強い横断方向の二次流が発生し、その流れが剥離泡内で反時計方向の弱い流れを引き起こしている。再付着点よりも下流側の $x=60\text{cm}$ においては横断方向二次流の最大値は半水深付近に現れているが、その強さは $x=30\text{cm}$ における値の4分の1程度まで減衰している。平均流速分布はこのような二次流による運動量輸送に良好に対応して分布していることがわかる。ただし、図-12 においては単位ベクトルの大きさが各々異なっていることに注意されたい。

(3) 乱流特性

図-13 から図-15 に3つの横断面における乱れ強度の3成分の分布および乱れエネルギー分布を示す。三次元計測の場合は、各点におけるデータ個数があまり多くなかった(1000個程度)ためデータにばらつきが見られるが、乱流場の状況のある程度把握することができる。図-13 より剥離直後の断面 $x=5\text{cm}$ では水面付近で流れ方向の乱れ(U')が局所的に増大していることがわかる。これは剥離に伴う水面変動が要因と考えられるがその影響は底面までは達しておらず、底面付近では逆に乱れの水平成分(W')が他成分の二倍程度となっている。図-14 に示したブロックより少し下流側の剥離域($x=11.5\text{cm}$)の分布にはかなりのばらつきが見られるが、剥離せん断層の部分では水深方向全般において際立った乱れの増大、特に主流方向成分の増大が顕著に見られる。一方、図-15 より再付着点下流側の断面($x=60.0\text{cm}$)では剥離せん断層の影響も弱まり、横断面内の乱れ強度成分が同程度になってきていることが確認できる。

5. 結言

本研究では、二次元 PTV 手法を用いて開水路等流を対象とした二次元計測および縦横に密に配置した光膜を利用した三次元計測を行った結果、本手法が流れ場の空間計測手法として有効であることを示した。このような詳細な乱流計測は従来型の点計測では膨大な時間を要するはずであるが、画像計測の導入によって相対的に短時間の内に行うことができた。この種のデータは、二次元あるいは三次元の数値シミュレーション

検証用のデータベースとしても価値があり、この種の実験データの蓄積は今後さらにその重要性を増すものと考えられる。今後は、本研究で課題となった誤対応ベクトルの除去方法についてさらに検討するとともに、水位の高精度な画像計測手法および水面近傍流れの計測手法を開発する必要がある。さらに、本システムの実用性を向上させるためには、大容量の画像データを効率的に保存可能な画像圧縮法の導入も必要と考えられる。

参考文献

- 1) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J.: *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- 2) Cowen, E. A. and Monismith, S. G.: A hybrid digital particle tracking velocimetry technique, *Experiments in Fluids*, Vol.22, pp.199-211, 1997.
- 3) Fujita, I. and Komura, S.: On the accuracy of the correlation method, *Proceedings of the 6th International Symposium on Flow Visualization*, pp.858-862, 1992.
- 4) 藤田・河村・神田：相関法の精度と洪水流航空写真への適用，水工学論文集，第 35 巻，pp. 293-298，1991.
- 5) Muste, M., Fujita, I. and Kruger, A.: Experimental comparison of two laser-based velocimeters for flows with alluvial sand, *Experiments in Fluids*, Vol.24, pp.273-284, 1998.
- 6) 江藤・竹原・道奥・久野：PTV のための粒子画像抽出法に関する検討—粒子マスク相関法について—，水工学論文集，第 40 巻，pp. 1051-1058，1996.
- 7) Ishikawa, M., Yamamoto, F., Murai, Y., Iguchi, M. and Wada, A.: A novel PIV algorithm using velocity gradient tensor, *Proceedings of the 2nd International Workshop on PIV'97-Fukui*, pp.51-56, 1997.
- 8) Okamoto, K., Hassan, Y. A. and Schmidl, W. D.: New tracking algorithm for particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol.19, No.5, p.342, 1995.
- 9) 鬼束・瀬津：開水路等流の粘性底層およびバップファ一層における水理特性，水工学論文集，第 42 巻，pp. 847-852，1998.
- 10) 藤田：開水路乱流に対する画像計測精度の比較検討，水工学論文集，第 43 巻，pp. 359-364，1999.

(1999年4月23日受付)