

開水路乱流に対する画像計測 精度の比較検討

ON THE ACCURACY OF IMAGE ANALYSIS METHODS FOR OPEN-CHANNEL TURBULENCE

藤田一郎
Ichiro FUJITA

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)

Image analysis methods have become a powerful tool for measuring turbulent flows in recent years. However, the accuracy of the methods in measuring turbulence quantities, e.g. turbulent intensities or Reynolds stress distributions, has not been examined in detail so far. In this research turbulence of a uniform open-channel flow was measured by using a PIV (Particle Image Velocimetry) technique and some PTV (Particle Tracking Velocimetry) techniques. In the case of PTV, the binary cross-correlation method and the recently proposed vector-gradient-tensor method were compared by combining them with the particle masking technique or the conventional technique using a threshold value as the methods for image binarization. Images captured by a high-speed video camera with 200 fps were used and the mean and the turbulent properties were compared. It was made clear that the PTV techniques are superior to the PIV especially where velocity gradients are large and there are no significant differences between the PTV techniques.

Key Words : *turbulence measurement, image analysis, particle image velocimetry, particle tracking velocimetry, open-channel flow*

1. はじめに

近年, 流れの計測方法として可視化画像を利用した方法が PIV(Particle Image Velocimetry)¹⁾あるいは PTV(Particle Tracking Velocimetry)として注目され, 空間計測としての特徴を活かして点計測では困難な特性量の計測例も示されるようになってきた²⁾。しかしながらその計測精度, 特に乱流特性量の計測精度に関して言えば, PIVにしてもPTVにしても十分な検討が行われないまま利用されていることが多い。特に, PIVによる乱流統計量の計測には注意を要するものと思われる。

一方, 高い計測精度が期待されるPTVにおいても従来型の二値化相関法 (BICC, Binary Image Cross Correlation method)に加えてバネモデル³⁾や速度勾配テンソル法 (VGT, Velocity Gradient Tensor method)⁴⁾, あるいは二値化画像の生成方法として画像濃度のしきい値に依存しない粒子マスク相関法⁵⁾などの新手法が提案されてきている。しかしながら, これらの研究では模擬粒子画像を用いた瞬間流速分布の比較が主体的であり, 実際の流れ場を対象として乱流統計諸量を計測した例はあまりない。すなわち, 二次元計測においてレーザ光などで生成した光膜面へのトレーサ粒子の出入りが頻繁に生じる実際の乱流場を対象とした比較検討はあまり行われていない

のが現状と思われる。

そこで本研究では詳細な乱流特性が十分検討されている⁶⁾開水路等流を対象としてPIVおよび4通りのPTVによる計測を行い, 計測精度あるいは解析効率等に関する比較検討を行った。

2. 実験装置ならびに画像計測システム

実験には長さ 6 m, 幅B=0.15m, 水路勾配I=1/590の全断面アクリル樹脂製の循環式開水路を用いた。実験条件を表—1に示す。計測は上流端から約4mの地点で行った。実験装置および計測システムの概略を図—1に示す。流れの可視化には平均粒径が約60 μm , 比重1.02のナイロン破碎粒子をトレーサとして用い, ビームイクスパンダーで光膜化したアルゴンイオンレーザ光(空冷式200mW)を中央鉛直断面に照射して実験を行った。レーザ光は光ファイバケーブルを介してビームイクスパンダーに導かれる。画像の撮影には200fps(frame per second)の高速ビデオカメラ(HAS-200R, DETECT製)を用いた。このビデオカメラでは, 最高1536枚(7.68秒)の連続画像をパーソナルコンピュータに搭載したフレームメモリ(DETECT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め, そのまま画像解析ブ

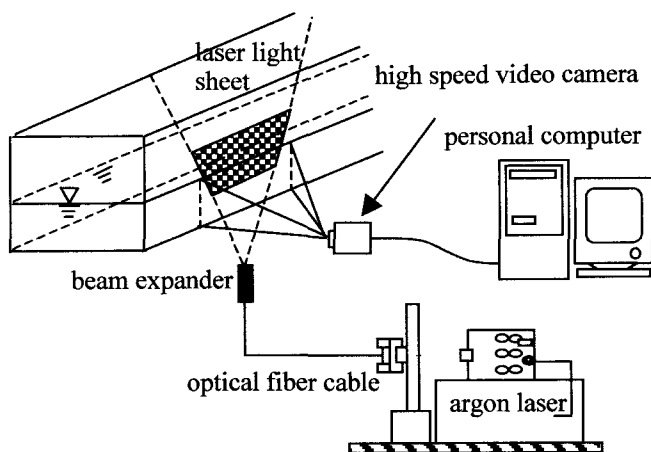


図-1 実験装置

表-1 実験条件

流量 (m^3/s)	断面平均流速 (cm/s)	水深 (cm)	U^* (cm/s)	Fr	Re
0.00081	24.5	2.2	1.68	0.528	6000

ログラムの入力データとして利用できる。また、ビデオカメラの最低照度は10Luxであり、ズームレンズ(Canon製, PH6X8-1.0-II, $F=1.0$)と組み合わせることで低出力のレーザー光からのトレーサ散乱光を十分な明るさでとらえることができた。画像の物理サイズは方眼紙をOHP用紙にコピーしたものをアクリル板に貼り付け、それを光膜位置に挿入して求めた。

3. 画像解析手法

本研究ではPIVとして濃淡画像相関法、PTVにおけるマッチング手法として二値化相関法およびVGT法、また二値化画像の生成方法としてしきい値に基づく方法および粒子マスク相関法を組み合わせた4通りの方法、すなわち全部で5通りの方法に関して検討を行った。ただし、PIVに関してはその特徴を活かすために粒子濃度を1.5倍にし、テンプレートサイズを2通りに変化させたケースを検討した。解析ケースを表-2に示す。以下では、まず各手法の特徴を簡単に説明する。

(1) しきい値法(二値化方法)

可視化された粒子画像の粒子位置および粒子サイズを検出する一般的な方法である⁷⁾。図-2に解析手順のフローチャートを示す。ここでは重心の算出に当たり、原画像の濃淡分布を重み付けの係数に用いて精度の向上を図っている。

(2) 粒子マスク相関法(二値化方法)

江藤ら⁸⁾によって開発された二値化画像生成手法で、この方法では微小な正方領域内に与えた濃淡値の二次元ガウス分布をマスクパターンとして用い、対象とする画像面との相互相関係数を計算しながら

表-2 解析ケース

CASE	二値化方法	マッチング方法	テンプレートサイズ
THBICC	しきい値法	BICC	29 x 29
MSBICC	粒子マスク相関法	BICC	29 x 29
THVGT	しきい値法	VGT	
MSVGT	粒子マスク相関法	VGT	
PIV15		濃淡画像相関法	15 x 15
PTV21		濃淡画像相関法	21 x 21

1. 濃淡画像(原画像)入力
2. 背景画像除去: BG
3. 画像平滑化
4. エッジ検出(Laplacian): LP
5. 画像強調: BG+LP
6. しきい値による二値化
7. ノイズ除去(収縮・膨張処理)
8. ラベル付け
9. 粒子重心, サイズの計算
10. 二値化相関演算
11. 流速ベクトルの算出

図-2 二値化相関法のフローチャート

全面スキャンし、相関の高い部分を粒子として判別する。粒子的な画像であれば撮影状況が劣悪でもかなり正確に粒子中心を検出できるが、全画素を対象とする相関演算が必要なため、しきい値法と比べて5倍程度の計算時間を要する。図-2のフローチャートでは3~7の処理がこの手法に置き換わる。

(3) 二値化相関法(BICC)

PTVの代表的な手法の一つであり、相互相関係数を論理演算だけで求めることができるため高速な処理が可能である。ただし、流れ場のせん断変形量が大きくなると相互相関係数が低下し、マッチングの精度が劣化する。

(4) 速度勾配テンソル法(VGT)

Ishikawaら⁴⁾によって最近提案された手法である。アルゴリズムは若干複雑だが、せん断変形が大きな場合にも効率的なマッチングが可能な手法として注目されている。この方法では、まず対象とした粒子

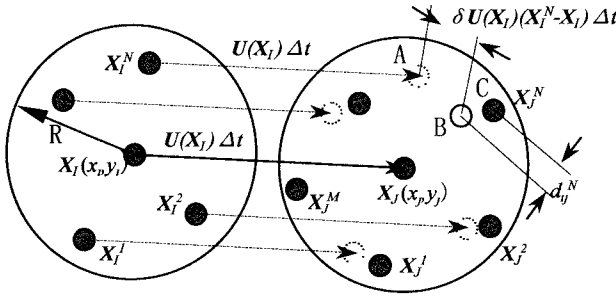


図-3 VGT法の基本概念図

X_I を中心とする半径 R の領域内で N 個の粒子 $X_I^1 \dots X_I^N$ をピックアップし、次に Δt 後の第二画像上で候補粒子 X_J と隣接する M 個の粒子 $X_J^1 \dots X_J^M$ を半径 R の探索領域内でピックアップする。ここで、例えば N 番目の粒子 X_I^N に着目し、この粒子の Δt 間の移動が X_I 近傍の流れ場に從うと考えると、粒子 X_I^N の推定移動量 ΔX^N は粒子 X_I の地点における速度勾配テンソル $\delta U(X_I)$ を用いて

$$\Delta X^N = U(X_I) \Delta t + \delta U(X_I)(X_I^N - X_I) \Delta t \quad (1)$$

と与えられる。推定移動位置(点B)を図-3に示す。実際の粒子(点C)の位置は必ずしもこの点Bとは一致しないのでずれ d_{ij}^N が生じる。このずれの二乗和、すなわち

$$E_{IJ} = \sum_{k=1}^N (d_{ij}^N)^2 \quad (2)$$

が最小となるとき、候補粒子が正しく対応付けられたものとみなせる。速度勾配テンソルは最小二乗法により次式の条件から求めることができる。

$$\frac{\partial E_{IJ}}{\partial (\delta U(X_I))} = 0 \quad (3)$$

(5) 濃淡画像相関法

PIVで最も代表的な手法であるが、PTVに比べると空間解像度が低く、解析にかなりの時間を要する欠点がある。ただし、粒子的でない画像にも適用可能な特徴を有する。

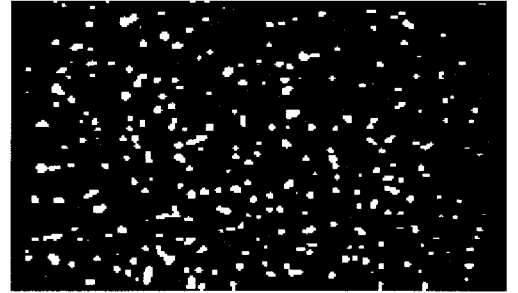
4. 画像解析結果

(1) 二値化画像の比較

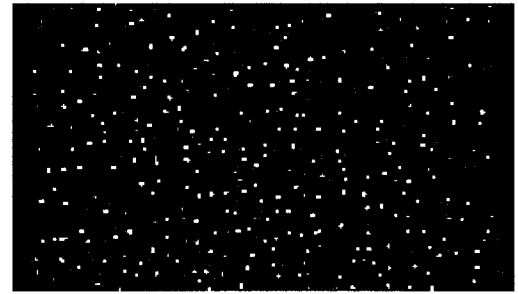
図-4に二値化画像を比較した。縦の長さが水深に相当する。しきい値法ではトレーサ粒子サイズが本来より多少大きく、隣接する粒子を分離できていない部分があるのに対し、粒子マスク法では粒子の中心を鋭くとらえている。なお、粒子マスク法ではマスクサイズを13x13画素、相関値のしきい値は粒



(a) 原画像 (濃淡画像)



(b) しきい値法



(c) 粒子マスク法

図-4 二値化処理法の比較

子個数を多少増すために0.5と設定した。

(2) 解析条件

解析では鉛直方向画素数を線形補間で2倍にした512x512画素の画像、約3500枚を用いた。データは計測空間における流れ方向(約5cm)の変化が無視できるとし、壁面からの距離に応じてサンプリングした。すなわち、底面から1mmまでは約0.2mm(2.72画素)間隔、それより上では1mm(13.6画素)間隔で行った。また、異常なベクトルを除去するために以下のような解析条件ならびに基準を設定した。

a) BICC法

粒子構成画素数の許容範囲は10~80画素、対応粒子間の相対的なサイズ変化は50%までを許容した。これは対応粒子の接触、分離による異常値を除去するためである。相互相関係数はTHBICCでは0.7、MSBMSBICCでは0.6とした。これはMSBICCでは底面付近の相関係数が急減し十分な量のトレーサをピックアップできなかったためである。

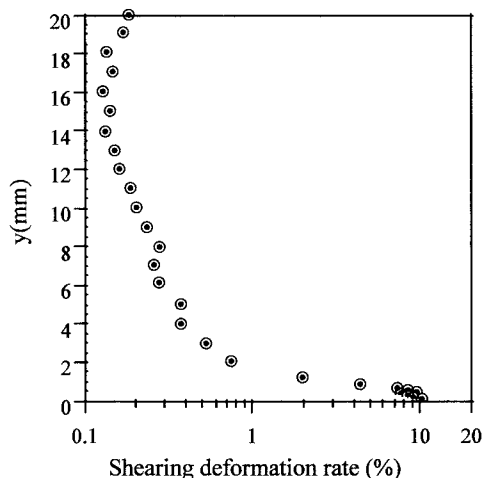


図-5 せん断変形量の分布

b) VGT法

ここでは二次元場を対象とし、まず、第一画像で着目粒子の隣接粒子数が $N=4$ となるまで半径 R を変化させ、第二画像では候補粒子に対する隣接粒子数が $M=6$ となるように半径 R を調整した。この6個の粒子から4個を選択するすべての組み合わせに対して式(2)の E_{ij} を計算してその最小値を求め、最小値が10以下となる粒子ペアを解析に用いた。なお、候補粒子は着目粒子を中心とする最大半径50画素の範囲内からピックアップした。

c) 濃淡画像相関法 (PIV)

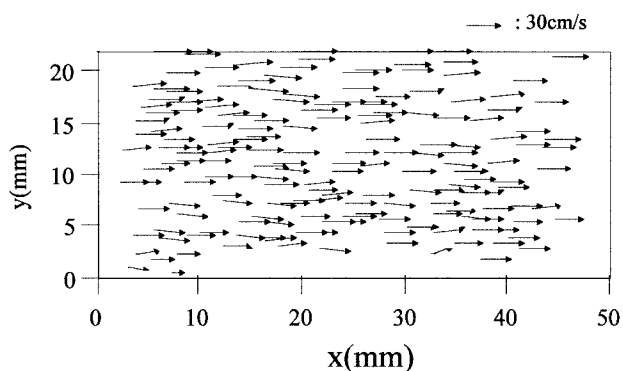
検出ベクトル数がPTVと同程度となるようにテンプレートの配置を考慮し、相互相関係数が0.8以上のベクトルをピックアップした。なお、今回の計算ではテンプレート間隔が密ではなかったため、異常ベクトル補正アルゴリズム⁸⁾の適用は行わなかった。

(3) 計測精度

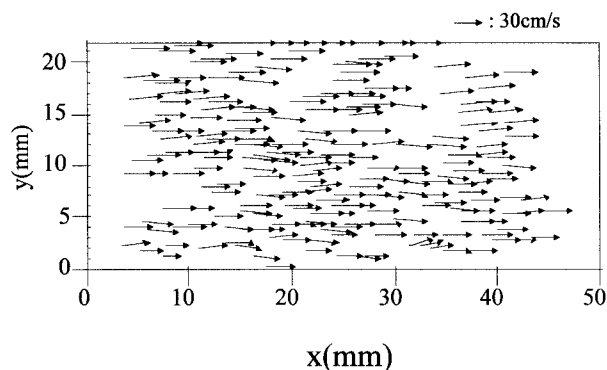
今回の計測では1画素移動量に相当する流速 ΔU は約1.5cm/sである。PTVの場合、粒子重心の計測誤差は0.1~0.3画素程度と思われるので、速度解像度は0.15~0.45cm/s程度と推定できる。PIVの場合の計測精度は流れのせん断変形量に大きく依存する。図-5に Δt 間の平均流速のせん断変形量を示す。底面近傍では最大10%程度の変形があることがわかる。CowenらはPIVでは3%以上、BICCでは7%以上の変形があるとrms値の精度が低下すると指摘している²⁾。これによるとPIVでは底面から2mm($y^+=36.6$)以下、PTV (BICC) では0.5mm($y^+=9.1$)以下の部分での精度低下が予測される。

(4) 瞬間流速分布

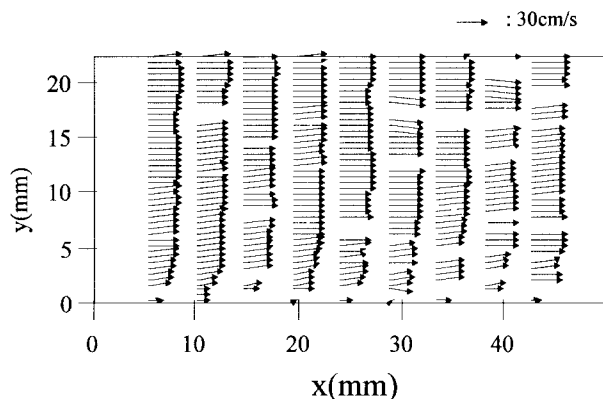
図-6に代表的な瞬間流速分布を示す。PTVの結果は同一画像ペアを用いて求めたものである。二値化画像からも示唆されるように、粒子マスク相関法が使われたケース(MSVG T)の方が検出ベクトル数が多い。PIVでは鉛直断面内の分布がよくわかるが、粒子が欠如する部分や底面付近では相互相関係数が条



(a) THBICC



(b) MSVGT



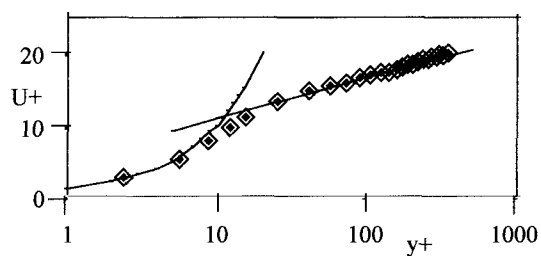
(c) PIV21

図-6 瞬間流速分布の比較

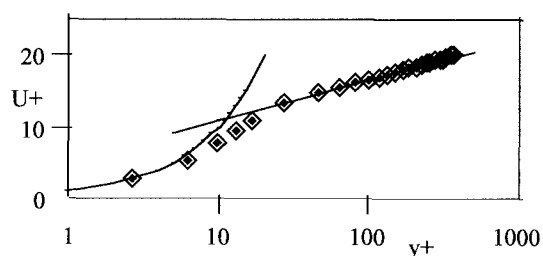
件(0.8以上)を満たさない場合が多い。

(5) 検出データ個数

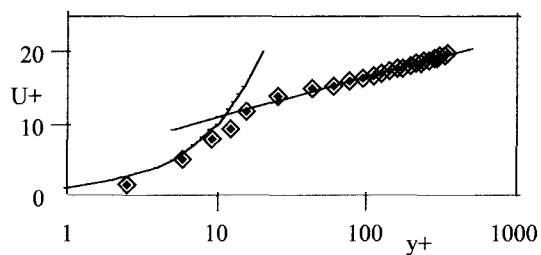
解析に用いた流速ベクトル数は底面付近では相対的に少なかったが、どの方法でも1mm間隔の計測空間当たり約1万個程度のデータが得られた。PIVではテンプレートの配置を密にすることで1桁以上多くのベクトルを得ることができる。以下の乱流統計量の計算では標準偏差を σ として平均値 $\pm 3\sigma$ の範囲内のデータのみを抽出するように数回の繰り返し計算を行った。



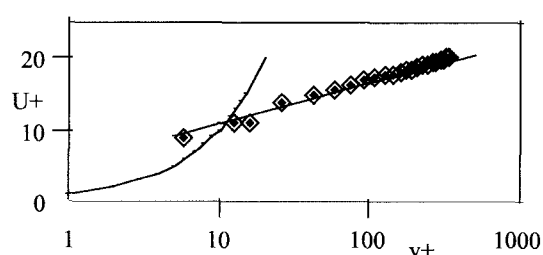
(a) THBICC



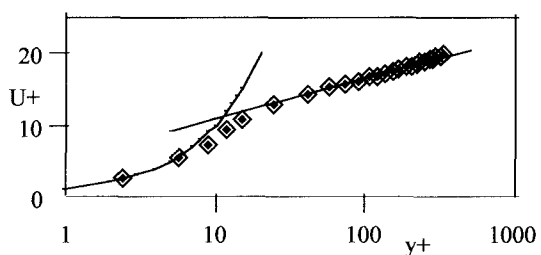
(d) MSVGT



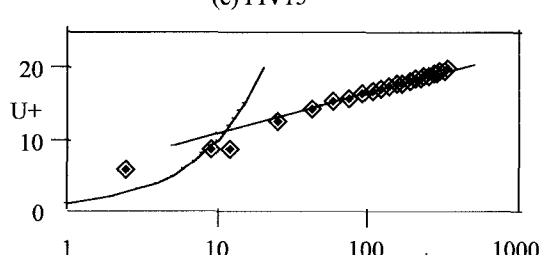
(b) MSBICC



(e) PIV15

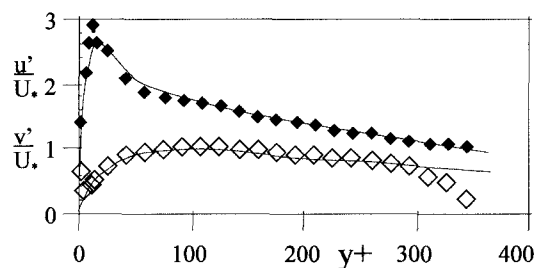


(c) THVGT

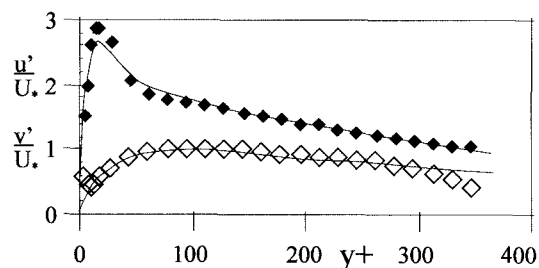


(f) PIV21

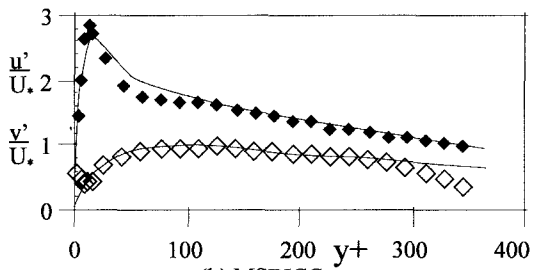
図-7 平均流速分布の比較



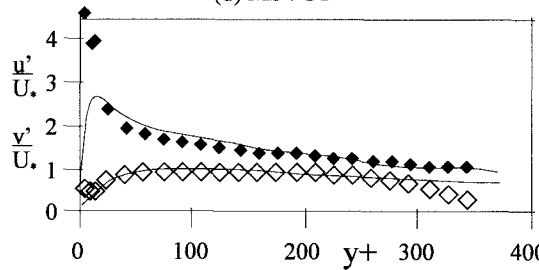
(a) THBICC



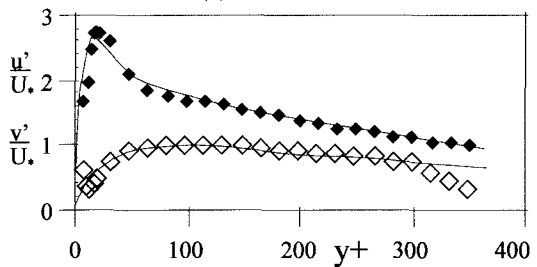
(d) MSVGT



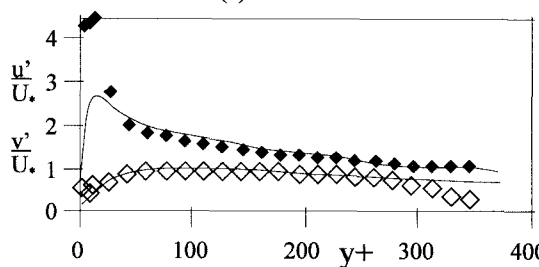
(b) MSBICC



(e) PIV15

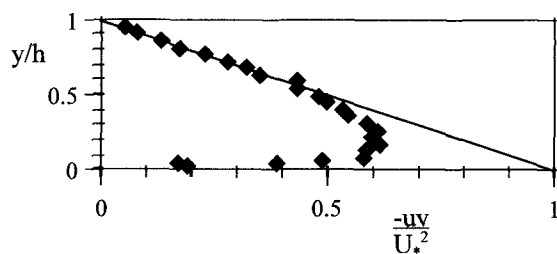


(c) THVGT

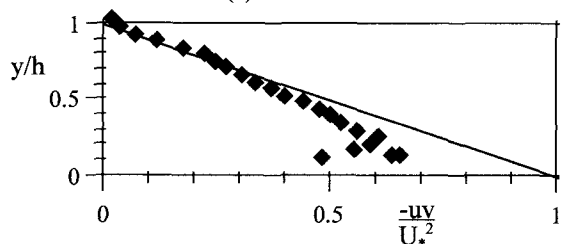


(f) PIV21

図-8 乱れ強度分布の比較



(a) MSVGT



(b) PIV15

図-9 Reynolds応力分布

(6) 平均流速分布

平均流速分布を図-7に比較した。PTVの場合はこのケースにおいても底面近傍まで比較的良好な結果が得られている。PIVの場合は対数域での計測は良好だが、 $y^+ < 20$ の部分でデータにばらつきが生じている。

(7) 乱れ強度分布

図-8に乱れ強度分布の比較図を示す。図中の実線は鬼塚、瀬津⁹⁾によって示された半経験式、

$$\frac{u'}{U_*} = 2.26 \exp\left(-0.88 \frac{y}{h}\right) \Gamma_u + 0.3 y^+ (1 - \Gamma_u) \quad (4)$$

$$\frac{v'}{U_*} = 1.23 \exp\left(-\lambda_v \frac{y}{h}\right) \Gamma_v \quad (5)$$

ここに、

$$\Gamma_u = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{10}\right) \quad (6) \quad \Gamma_v = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B_v}\right) \quad (7)$$

である。ただし、 B_v は31とした。PTVではどの方法でもほぼ同等の結果が得られている。ただしデータのばらつきが最も少ないのは粒子マスク相関法とVGT法を組み合わせたMSVGTのケースであった。PIVではおよそ $y^+ < 30$ の領域で過大な値が得られた。これは、4(3)における予測に一致している。

(8) Reynolds応力分布

Reynolds応力分布を図-9に示した。等流における線形的な分布を捉えているが、PTVの方が良好な結果を示している。

(9) 解析効率

画像解析に要する時間を表-3に比較した。THBICCの処理効率が最も高い。PIVの処理時間は探査領域の取り方次第で大きく変化するので、表中の値は参考値である。

表-3 解析効率の比較 (THBICCを1.0とした概算値、THBICCで1画像の処理に要した時間はPentium 200MHzパソコンで約5秒)

THBICC	MSBICC	THVGT	MSVGT	PIV15	PIV21
1.0	5.2	2.5	7.3	12	20

5. 結論

開水路等流の乱流計測を種々の画像解析法で行い比較検討した。結論をまとめると以下の通りである。

- 1) PTVではどの方法も底面極近傍まで高精度の計測を行うことができる。
- 2) PTVの中では粒子マスク相関法とVGT法の組み合わせ(MSVGT)が最もよい結果を与えた。
- 3) 長時間の(多量の)画像を解析するにはしきい値法と二値化相関法の組み合わせ(THBICC)が有効である。
- 4) PIV法では流れのせん断変形量が大きくなると(3%程度以上)計測誤差が増大する。よって、PIVによる乱流統計量の計測は、二画像間のせん断変形量に特に注意して行う必要がある。

謝辞：水路の製作、実験にあたり大学院生の遠松篤君ら、研究室諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

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) Okamoto, K., Hassan, Y.A. and Schmidl, W.D.: New tracking algorithm for particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol.19, pp.,1995.
- 4) 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.
- 5) 江藤・竹原・道典・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, Vol.40, pp.1051-1058, 1996.
- 6) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in open-channel flows, A. A. Balkema, Rotterdam, 1993.
- 7) 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.
- 8) Fujita, I. and Kaizu, T.: Correction method of erroneous vectors in PIV, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol.2, pp.173-185, 1995.
- 9) 鬼塚・瀬津：開水路等流の粘性底層およびバップアー層における水理特性, 水工学論文集, Vol.42, pp.847-852, 1998.

(1998. 9. 30受付)