

デジタル画像処理による剪断乱流の三次元計測

笠木 伸 英* 西 野 耕 一**

Three-Dimensional Measurement of Turbulent Shear Flows Using Digital Image Processing

by

Nobuhide KASAGI
The University of Tokyo
 Koichi NISHINO
Yokohama National University

ABSTRACT

A three-dimensional particle tracking velocimeter (3-D PTV) for the measurement of turbulent shear flows is described with emphasis on its instrumentation, experimental procedure and data processing algorithm. Motions of neutrally buoyant tracer particles (Nylon 12, specific density of 1.02, typical diameter of 200 μm) suspended in a water flow are tracked with a highly automated digital image processing system. Local fluid velocities are determined from 3-D displacement of each particle and the time interval over which particles are tracked. This technique is advantageous over existing one-point measuring techniques such as hot-wire/film probes and a laser Doppler velocimeter in that it can provide not only one-point turbulence statistics but also spatial information on the turbulence structures. Such feature is particularly desirable for the study of coherent turbulence structures which are considered to play a dominant roll in turbulence mechanism. Typical results obtained by the 3-D PTV in fundamental turbulent flows are presented to demonstrate practical capability of the technique. Some author's perspectives on future research direction of the 3-D PTV are also presented.

1. はじめに

工学的に重要性の高い種々の乱流場の物理機構を明らかにするために、乱流場の広い領域にわたる速度3成分の瞬時分布を測定すること、即ち速度場の3次元計測が望まれる。特に、乱流輸送機構の中心的役割を果たすと考えられている準秩序構造に関する理解を深めるためには、速度変動の2点相関を初めとする乱流場の空間情報が有効な助けとなる。

一方、近年の計算機の高高速化・大容量化に伴い、乱流場の数値シミュレーションが著しい進展をみせ、膨大な情報が提供されつつあるが、現状では、その計算結果の実験的検証が不可欠であり、そのような新たな観点からも速度場の3次元計測が望まれている。

本稿では、3次元計測を目的として開発が進められている3次元画像処理流速計 (Three-Dimensional Particle Tracking Velocimeter : 3-D PTV) を紹介する。この流速計は、多数のトレーサ粒子の3次元運動から局所の流体速度を測定する手法である。その開発の歴史は比較的古く、

* 東京大学

** 横浜国立大学

表 1 3-D PTV の開発状況

開発者	機関	撮影方法	撮影速度	流体	適用流速	トレーサ粒子	測定領域	最大ベクトル数
Changら ¹⁻³⁾	Texas A & M Univ.	高速16mmカメラ (ステレオレンズ)	4000 π /s	水	32~320cm/s	400~600 μ m 比重1.02	20x20x20cm ³	~100
山川ら ^{4,5)}	日立製作所 東京大学生産研	テレビカメラ (2台)	60fps	水	~10cm/s	ポリスチレン 1000 μ m 比重1.04	180x169x10cm ³	~50
笠木ら ⁷⁻¹²⁾	東京大学工学部	テレビカメラ (3台)	60fps	水	~15cm/s	ナイロン12 200 μ m 比重1.02	8x8x8cm ³	~440
渡邊ら ¹³⁾ 加賀ら ¹⁴⁾	松下電産 大阪大学工学部	テレビカメラ (2台)	60fps	水 空気	-	発泡スチロール メタルアルデヒド	10x11x10cm ³ 20x80x80cm ³	~35 ~55
Economikosら ¹⁵⁾	Ohio State Univ.	高速16mmカメラ (ステレオレンズ)	-	水	-	ブライオライト 38~44 μ m 比重1.024	-	-
Racca & Dewey ¹⁶⁾	Univ. of Victoria	高速16mmカメラ (ステレオレンズ)	5000 π /s	水	~120cm/s	アンバーライト	7x7x7cm ³	~10
Adamczyk & Rimai ¹⁷⁾	Ford Motor Comp.	SITカメラ (2台)	30fps	空気	~700cm/s	マイクロバルーン 30 μ m	3x3x3cm ³	~16
小林・関本 ¹⁸⁾	東京大学生産研	テレビカメラ (2台)	60fps	水	~30cm/s	1200 μ m 比重0.98	10x10x10cm ³	~30
Dracosら ¹⁹⁻²¹⁾	ETH Zürich	テレビカメラ (2~3台)	60fps	水	~10cm/s	ブライオライト 50 μ m	10x10x1.5cm ³	~700

写真や16mmフィルムを手作業で解析した例が幾つか報告されているが、実用的計測法として認められるようになったのは画像処理機器の高性能化とシステムの自動化が達成された最近のことである。表1は、近年の3-D PTVの開発状況をまとめたもので、いずれのシステムも、高速化・低廉化の著しいデジタル画像処理機構の導入により、処理の高速化と測定精度の向上を図っている。表2はこの手法の特徴をまとめたものである。速度3成分の瞬時分布の測定が可能であること、流速に対する校正が不必要な絶対測定手法であること、非接触測定手法で流れを乱さないこと、逆流を伴う流れにも適用可能であること等は、特に優れた点と言えよう。

著者らが開発してきたシステム⁷⁻¹²⁾は、3台のテレビカメラの使用と高精度のカメラ校正法が特徴で、測定精度の改善と、計測される瞬時速度ベクトル数の大幅な増加が実現されている。表3は本手法による測定例をまとめたもので、種々の流れに対していずれも良好な結果が得られている。以下では、本手法の計測方法ならびに計測システム、具体的測定例、今後の課題について述べる。

表 2 3-D PTV の特徴

長 所
(1) 3次元空間の瞬時的な速度分布測定が可能 (2) 速度の3成分の同時測定が可能 (3) 流速に対する校正が不必要(絶対測定) (4) 逆流を含む流れ場にも適用可能 (5) 非接触測定(流れ場を乱さない) (6) 温度場、濃度場が計測に与える影響は小さい
短 所
(1) 流体やトレーサの選択に制限がある (2) 比較的低流速に限られる (3) 測定点が予め定められない (4) 速度データは時間的に離散的である

表 3 3-D PTV による測定例

同心2重円筒間非定常層流クエット流	笠木ら(1987) ⁷⁾
一様等方性乱流	西野ら(1988) ⁸⁾ , 佐田ら(1989) ^{11,12)}
2次元チャネル乱流	西野・笠木(1989) ⁹⁾ , 1990 ¹⁰⁾
軸対称自由乱流噴流	笠木・二宮(1988) ^{6,11)} , 1990 ¹²⁾
2次元後向きステップ剝離再付着乱流	伊藤・笠木(1989) ¹¹⁾ , 河原(1990) ¹³⁾
自由液面下の乱流	佐田(1990) ¹⁴⁾

2. 計測方法

2.1 計測原理

本手法では、流れに投入した多数の微小トレーサ粒子の運動を、3台のテレビカメラを用いて異なる任意の方向から撮影する。次に、記録された画像から各時刻における個々のトレーサ粒子の3次元位置を求め、それらの移動量からトレーサ粒子の速度3成分を求め、それを局所の流体速度とする。作動流体には水、トレーサ粒子にはナイロン12の微小粒子(比重1.02, 外径 $200\mu\text{m}$ 程度)を使用する。トレーサ粒子が非定常な流体運動に対して十分な追従性を有することは、数値解析によって確認されている^{9,10)}。

2.2 計測システム

図1に示した計測システム^{9,10,31)}は、3台のCCDカメラ、画像処理プロセッサ、アナログ式追記型光ディスクレコーダ、タイムベースコレクタ、ストロボスコープ、パーソナルコンピュータ、MOディスク装置等で構成されている。トレーサ粒子の撮影は、同期された3台のCCDカメラで行う。CCDカメラから出力されるテレビ信号は、画像処理プロセッサで同時にA/D変換され、デジタル画像としてフレームメモリに一時的に記憶される。それらの画像はD/A変換されて再びテレビ信号として出力され、光ディスクに記録・保存され

る。光ディスクへの入力システムの切り替えは、画像処理プロセッサに同期した電子スイッチで行われ、3枚のテレビ画像の記録が $1/10\text{s}$ で完了する。この間、フレームメモリ上の画像データは保持されており、光ディスクへの記録が完了すると次時刻の新しい画像を取り込み、同様の手順で光ディスクへの記録を繰り返す。1枚の光ディスク盤は24,000画像の記録容量があり、 $1/10\text{s}$ 間隔で800sの連続記録が可能である。

流れ場の照明を行うストロボスコープの発光時間は $20\mu\text{s}$ と極めて短いため、運動するトレーサ粒子をほぼ完全に静止した画像として撮影することができる。ストロボスコープの発光は、1枚のテレビ画像($1/30\text{s}$)を構成する2枚の偶数/奇数フィールド($1/60\text{s}$)の走査開始時に行われる。このような発光により、 $1/60\text{s}$ で連続したトレーサ粒子画像の組がフレーム上に得られ、そのような組が $1/10\text{s}$ 間隔で光ディスクに記録されることになる。高速電子シャッターを内蔵したCCDカメラを使用する場合には、ストロボスコープに代えて連続光源によって同様の撮影を行うことができる。

2.3 計測手順

図2に示したように、計測はカメラ校正とトレーサ追跡とに分けられる。カメラ校正では、テレビカメラの位置と視野方向を記述するパラメータ(標定要素³⁰⁾)を決定する。トレーサ追跡では、

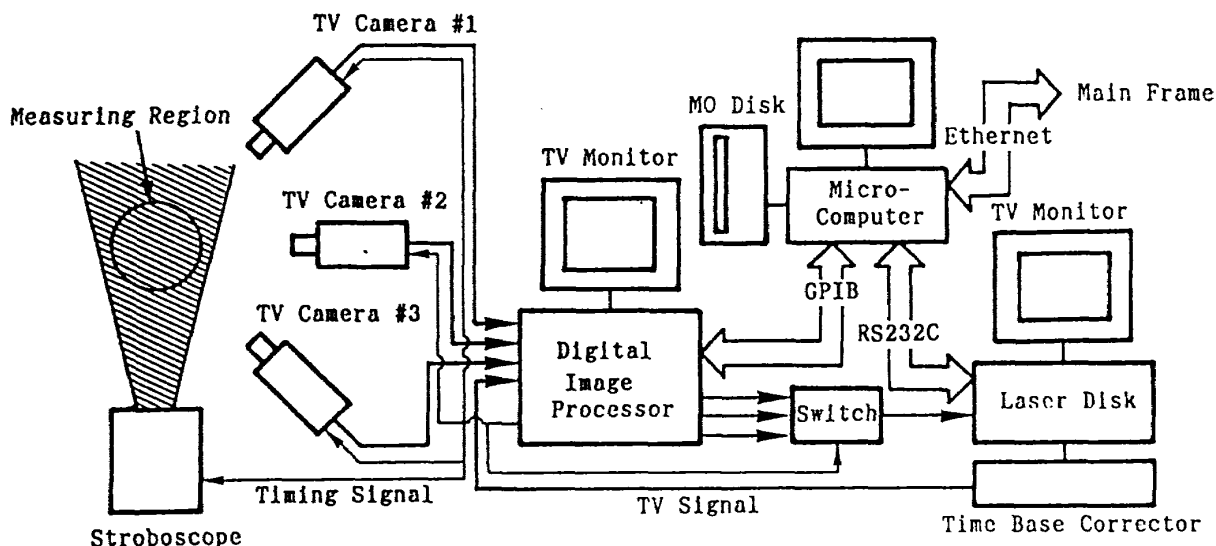


図1 3-D PTV のシステム構成図

トレーサ粒子画像からその3次元絶対座標を求め、連続する2つの時刻間の追跡を行ってトレーサ粒子の速度3成分を得る。

標定要素の決定は、カメラを設定後、絶対座標が既知の多数の基準点の画像を撮影し、そのデータを用いて共線条件式³⁰⁾を解くことにより行う。ここで得られる標定要素を用いてトレーサ絶対座標の計算を行うので、高精度の校正が必要である。図3は、後述する2次元チャンネル乱流の測定^{22,23)}に用いた校正装置である。この装置はチャンネル側壁に固定されており、円筒ヘッドが微動トラバース装置により壁垂直方向に移動する構造になっている。ヘッド先端には、外径約1mmのインスタントレタリングの基準点が格子状に貼付されており、これらが測定領域全域をカバーするよう、円筒ヘッドをトラバースさせて撮影を行う。基準点のヘッド面内での2次元位置はあらかじめ顕微鏡測定により求められており、壁垂直方向位置はトラバース量より与えられるので、校正に必要な基準点の絶対座標が決定される。

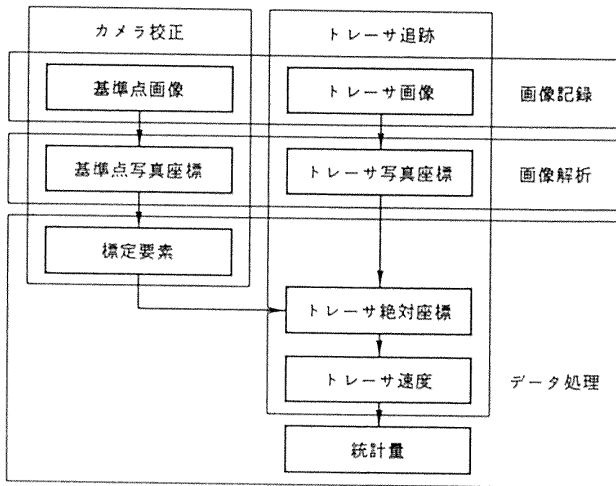


図2 計測手順

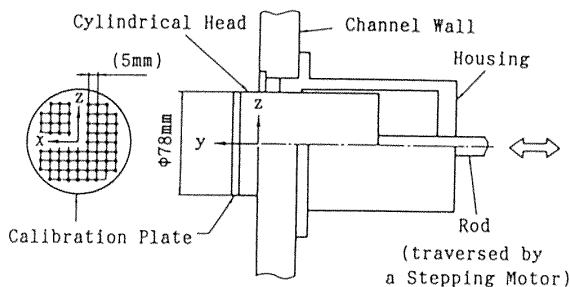


図3 カメラ校正装置の例

基準点画像の記録が完了すると、直ちにトレーサ粒子を流れ場に投入し、その撮影を行う。図4はトレーサ粒子画像の一例である。実験後、光ディスクから粒子画像を1フレームずつ再生し、図2のトレーサ追跡に示されている各処理を行う。まず、再生されたテレビ信号をA/D変換してデジタル画像とし、各トレーサ粒子画像の重心位置(写真座標)を求める。次に、カメラ校正で求め

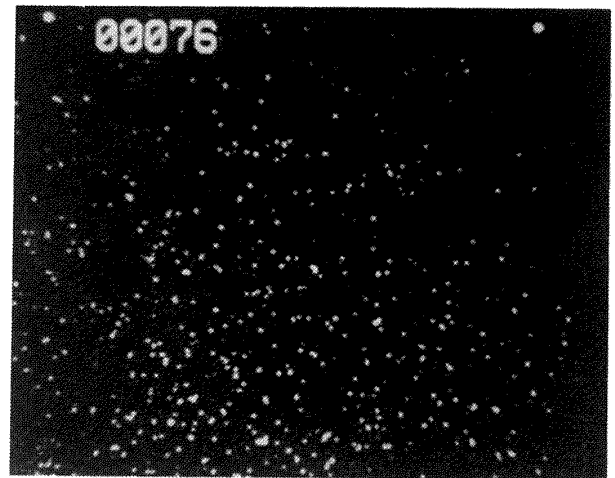
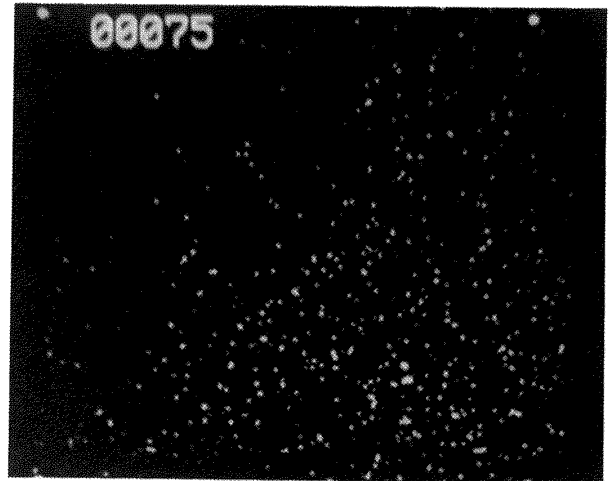


図4 トレーサ粒子画像

った標定要素を用いてトレーサ絶対座標を計算する。最後に、トレーサ粒子の移動を3次的に追跡してトレーサ速度を求める。これらの処理を行うためには、3枚の異なる画像間でのトレーサ粒子画像の対応付けと、異なる時刻間での同一トレーサ粒子の対応付けが必要になる。これらの対応付けのアルゴリズムについては本稿では割愛する。詳細は文献^{9,10,31)}を参照されたい。

図5は2次元チャンネル乱流の測定で得られた瞬時速度ベクトル分布の一例である。偶数/奇数フィールド間の1/60sの追跡により約440個の速度ベクトルが得られている。なお、この追跡を1/10s間にわたって行い、追跡率を向上させるとともに虚偽追跡を減らすためのアルゴリズムが開発され

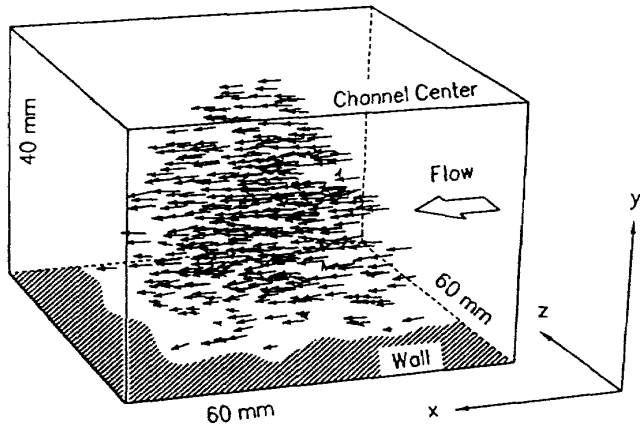


図5 2次元チャンネル乱流での瞬時速度ベクトル分布

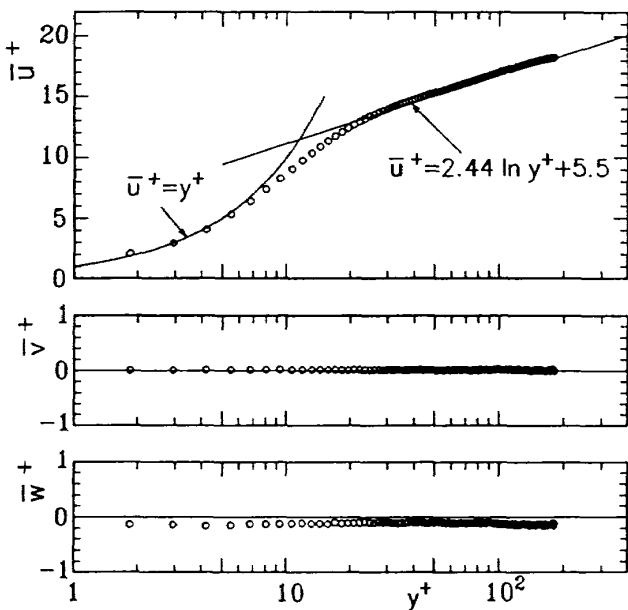


図6 2次元チャンネル乱流の平均速度分布

ている^{11,12)}。

3. 測定例

表3に示したように、本手法は既に種々の乱流計測に適用されているが、ここではそのいくつかの具体的測定結果を紹介する。

図6, 7は、十分に発達した二次元チャンネル乱流の測定^{22,23)}から得られた平均速度3成分と速度変動3成分のrms値である。ここで、 u は流れ方向、 v は壁垂直方向、 w はスパン方向の速度成分である。添字 $()^+$ は摩擦速度と動粘性係数による無次元化を表す。チャンネル中心速度(78.0mm/s)とチャンネル幅(80.0mm)に基づくレイノルズ数は、7,510である。 \bar{u} は従来から確立されている壁法則と極めてよく一致しており、データのまとまりも良好である。また、発達したチャンネル流で零となるべき \bar{v} と \bar{w} についても、トレーサ粒子の沈降速度(-0.5mm/s)の影響を \bar{w} について補正すると、その条件をよく満足する。一方、図7に示した速度変動については、3成分を壁の極く近くまで測定した例は極めて少ない。従来、熱膜プローブによる測定結果³³⁾と直接数値シミュレーション結果³⁴⁾には壁近くで大きな差異があったが、本結果は後者と良好な一致を示している。なお、乱れの高次の統計量や乱れの壁面漸近挙動などについても妥当な結果が得られている。

画像処理流速計によれば測定領域内の瞬時速度ベクトル分布が得られることから、上述した乱流統計量だけでなく、流れ場の空間構造に関する情報、例えば乱れの2点相関テンソルの各成分を得

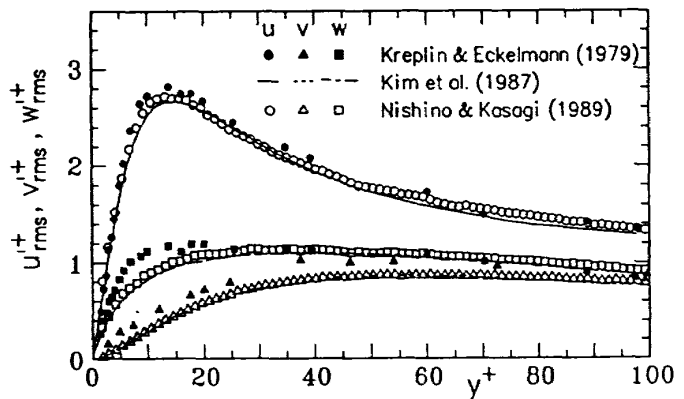


図7 2次元チャンネル乱流の速度変動のrms値分布

ることができる。例として、図 8 に、各時刻において求めた瞬時速度ベクトル分布から 4 象限解析法によって準秩序乱流構造を抽出した結果³¹⁾を示す。これは、 $y^+=15$ での強いイジェクションの発生を条件に領域平均された 3 次元的な乱流構造を、流れに垂直な 3 つの断面で示したもので、大きなスケールの縦渦構造が壁面に対してある角度を成して存在していることが分かる。このような情報は、乱流の準秩序構造を理解する上で大きな助けとなる。

4. おわりに

以上述べてきたように、著者らが開発した 3-D PTV は、乱流計測手法として実用上十分な性能を有しており、今後種々の乱流場への適用が進められるものと予想される。特に、複雑な 3 次元乱流の数値シミュレーション結果を検証しうる実験データの蓄積に関して、極めて有効な測定手法となる。

しかしながら、現時点では、トレーサ粒子の制約上作動流体が水に限定されていること、適用流速範囲が低レイノルズ数に留まっていること、高精度のカメラ校正装置を必要とすること、等の改善すべき問題点も残されており、それらの解決が今後の研究課題である。

謝 辞

本稿で紹介した 3 次元画像処理流速計の開発にあたっては、文部省科学研究費一般研究(B)(No. 61460103)、奨励研究(A)(No.62790196)、及び昭和 61 年度財団法人・三菱財団自然科学研究助成の援助を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Chang, T. P. and Tatterson, G. B., 1983, Proc. 3rd Int. Symp. on Flow Visualization, pp.266-273.
- 2) Chang, T. P., Wilcox, N. A. and Tatterson, G. B., 1984, Optical Eng., Vol.23, No.3, pp.283-287.
- 3) Chang, T. P. K., Watson A. T. and Tatter-

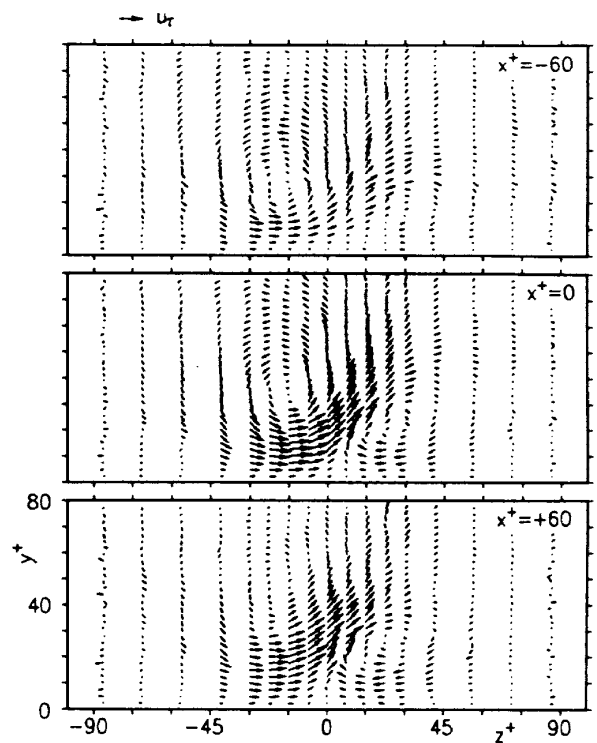


図 8 準秩序乱流構造の条件付き抽出の結果

- son, G. B., 1985, Chem. Eng. Sci., Vol.40, No.2, pp.269-275.
- 4) Chang, T. P. K., Watson A. T. and Tatterson, G. B., 1985, Chem. Eng. Sci., Vol.40, No.2, pp.277-285.
- 5) 山川・岩重, 1986, 流れの可視化, Vol.6, No.20, pp.50-58.
- 6) 山川・岩重・小林, 1986, 流れの可視化, Vol.6, No.22, pp.273-278.
- 7) 笠木・平田・西野・二宮・小泉, 1987, 流れの可視化, Vol.7, No.26, pp.283-288.
- 8) 西野・笠木・平田・佐田, 1988, 流れの可視化, Vol.8, No.30, pp.277-282.
- 9) 西野・笠木・平田・佐田, 1989, 日本機械学会論文集(B編), 55巻, 510号, pp.404-412.
- 10) Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M., 1989, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 111, No.4, pp.384-391.
- 11) 佐田・西野・笠木, 1989, 流れの可視化, Vol.9, No.34, pp.237-240.
- 12) Sata, Y., Nishino, K. and Kasagi, N., 1990, Flow Visualization V, R. Reznicek, Ed., Hemisphere, Washington, D. C., pp.248-253.

- 13) 渡邊・加賀・井上・山口・吉川, 1987, 流れの可視化, Vol.7, No.26, pp.305-310.
- 14) 加賀・井上・山口・吉川, 1989, 流れの可視化, Vol.9, Suppl., pp.55-60.
- 15) Economikos, L., Shoemaker, C., Russ, K., Brodkey, R. S. and Jones, D., 1988, Proc. Exp. Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodyn., R. K. Shar, E. N. Ganic, and K. T. Yang, Eds., Elsevier, pp.72-83.
- 16) Racca, R. G. and Dewey, J. M., 1988, Experiments in Fluids, Vol.6, pp.25-32.
- 17) Adamczyk, A. A. and Rimai, L., 1988, Experiments in Fluids, Vol.6, pp.380-386.
- 18) 関本, 1988, 東京大学修士論文.
- 19) Papantoniou, D. and Dracos, T., 1989, Advances in Turbulence 2, H. -H. Fernholz and H. E. Fiedler, Eds., Springer-Verlag, Berlin, pp.278-285.
- 20) Papantoniou, D. and Maas H. -G., 1990, Proc. 5th Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, pp.18.4.1-18.4.5.
- 21) Papantoniou, D. and Dracos, Th., Proc. Int. Symp. Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Dubrovnik.
- 22) Nishino, K. and Kasagi, N., 1989, Proc. 7th Symp. on Turbulent Shear Flows, Stanford, pp.22.1.1-22.1.6.
- 23) 西野・笠木, 1990, 日本機械学会論文集(B編), 56巻, 525号, pp.1338-1347.
- 24) 笠木・二宮・平田, 1988, 流れの可視化, Vol.8, No.30, pp.283-288.
- 25) Kasagi, N., Ninomiya, N. and Hirata, M., 1988, Exp. Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodyn., Shar, R. K., Ganic, E. N. and Yang, K. T., Eds., Elsevier, pp.1502-1509.
- 26) 二宮・笠木, 1990, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集(B), No.900-14, pp.52-54.
- 27) 伊藤・笠木, 1989, 流れの可視化, Vol.9, No.34, pp.245-248.
- 28) 河原, 1990, 東京大学修士論文.
- 29) 佐田, 1990, 東京大学修士論文.
- 30) 村井・奥田・中村, 1981, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.29, No.6, pp.1-15.
- 31) 西野, 1989, 東京大学博士論文.
- 32) 笠木・西野, 1990, 流れの計測, Vol.8, No.11, pp.2-11.
- 33) Kreplin, H. P. and Eckelmann, H., 1979, Phys. Fluids, Vol.22, No.7, pp.1233-1239.
- 34) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, J. Fluid Mech., Vol.177, pp.133-166.

