

円管乱流の瞬時流速特性

CHARACTERISTICS OF INSTANTANEOUS VELOCITY FIELD IN TURBULENT PIPE FLOW

佐賀孝徳¹・大成博文²・渡辺勝利³・前田邦男⁴

Takanori SAGA, Hirofumi OHNARI, Katsutoshi WATANABE and Kunio MAEDA

¹正会員 工博 徳山高専助教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

²正会員 工博 徳山高専教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

³正会員 工博 徳山高専助手 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

⁴正会員 中電技術コンサルタント 土木第一本部 (〒734 広島県南区出汐2丁目3-30)

The characteristics of instantaneous flow fields of longitudinal cross-section in turbulent pipe flow are investigated by using Particle Tracking Velocimetry. High speed region ($u > 0.9U_{max}$) of u velocity have original shape and oscillates to the both wall alternately with large length scale. Specially, in the nearest high speed region to the wall the “sweep” mode velocity fields of normal to the wall are formed. The mean u velocity distribution is calculated from PTV data, is fit to the original velocity distribution of turbulent pipe flow measured by Laser Doppler Velocimetry et al and calculated by DNS. It is considered that the oscillation of high speed region makes mean velocity to increase as compared with the turbulent boundary layer.

Key Words : PTV, coherent structure, turbulent pipe flow, sweep

1. 緒論

円管乱流の組織構造に関する先駆的な研究は, Corino, Brodkey¹⁾に始まる. 彼らは, 円管の水流を対象に, 縦断面可視化を行い, 壁近傍のejection構造について検討した. その当時, 平板境界層におけるKlineらの²⁾可視化研究など壁近くの組織構造に関する研究が飛躍的に多く行われた. ところが, 流れの本来持つ3次元性と非定常性に加え, 組織構造の定義や認識の相違から, 多くの不明な点が指摘され, 数多くの議論がなされた. その中で, 境界条件をより「素過程」にした平板境界層を対象とした研究が中心となり, 複雑な境界条件の円管乱流については, あまり行われなくなった.

一方, 円管の遷移流の研究においては, 乱流パフという特有の構造が注目され, それに関する考察³⁻⁵⁾が進められてきた. その中で, Bandyopadhyay⁴⁾は, 縦断面可視化の結果をもとに, その中にはWakeタイプの渦の存在と, 再層流化には, 縦渦が顕著となり, 従来から指摘されていた円錐形の渦の存在を

否定した.

巨瀬⁵⁾は, 核磁気共鳴NMRを使う高速NMR映像法により, 間欠的に発生するパフの可視化の横断面像を観察し, 渦輪のような構造と, 縦渦の存在を示した. 種田⁶⁾は, 十分に発達した円管乱流にアルミ粉を用いた縦断面可視化を行い, streak構造の存在とその間隔が境界層の65%程度であることを指摘した. さらに, Eggelsら⁷⁾は, DNSと数種類の流速計測結果をもとに, 円管中央部において平均流の高速領域が形成されること, 高次の統計量とレイノルズ応力のエネルギー収支において壁面近傍で壁方向の速度変動が, 境界層と異なることを指摘した.

著者ら⁸⁻¹⁰⁾は, これまで, 円管乱流の縦断面, 横断面可視化により, 円管内に形成される壁縦渦の存在とその特性について, 検討を行ってきた. また, 横断面視において, 微細粒子の瞬時の流跡より流速ベクトルを求めるParticle Tracking Velocimetry (以下PTV)を適用し, せん断構造について一部考察を行った.

以上の研究を踏まえると, 円管乱流における組織

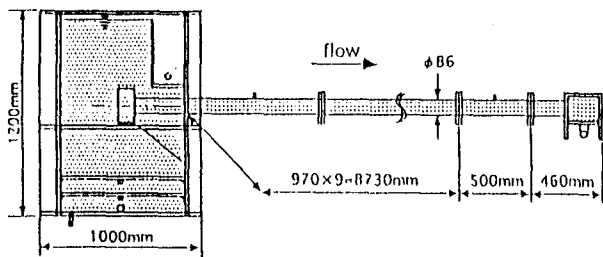


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

U_m (cm/sec)	Re	U_τ (cm/sec)	D^+
7.5	5950	0.47	372

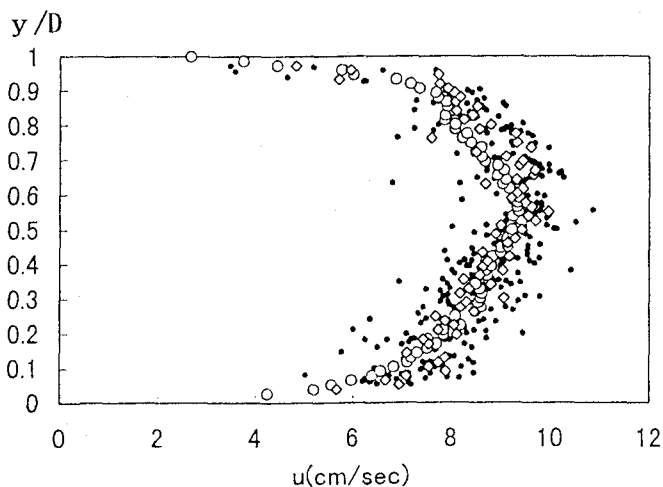


図-3 瞬時の流速分布

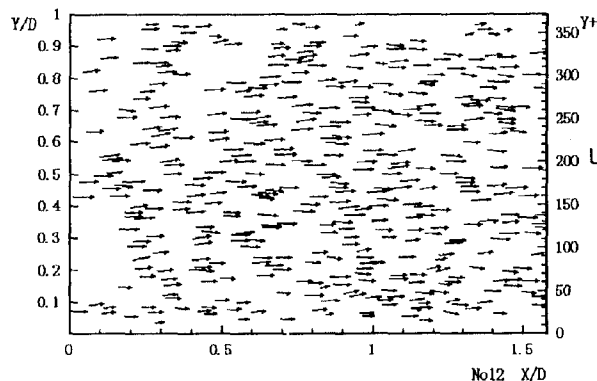


図-2 瞬時流速ベクトル

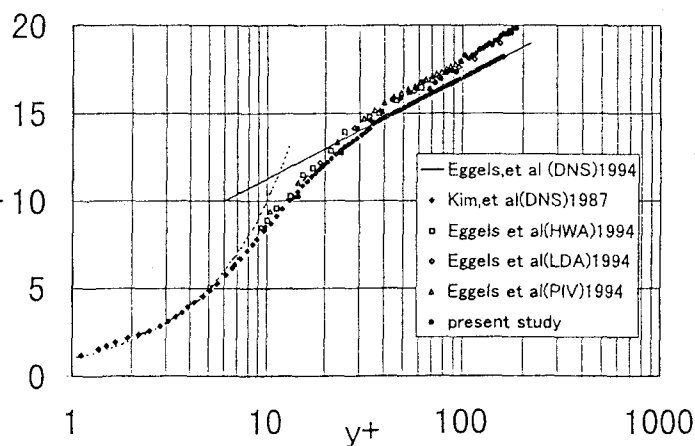


図-4 平均流速分布

構造の研究は、境界層に比較すると圧倒的に少なく、円管乱流固有の構造は何かなど、基本課題をはじめとして未だに数多くの課題が残されている。

本研究では、PTV¹⁾を縦断面視に適用し、それより、円管乱流内に形成される瞬時流速分布の時空間特性、さらにはそれをもとに組織構造についての若干の考察を行う。

2. 実験装置および実験方法

図-1に示すように実験には、長さ9850mm、内径76mmの亚克力製円管水路が用いられた。上流端には、静水槽が設置され、入り口には、ベルマウス（絞り比2.3、長さ110mm）が、設置されている。

上流端より約7m下流にて、PTVのための縦断面可視化が行われた。実験に用いられた粒子は、平均粒径 $300\mu\text{m}$ ポリエチレン系微粒子（比重1.002～1.005）が用いられた。スリット光源には、1kwのハロゲンランプが用いられ、その厚さは、約3mmであった。撮影には、デジタルビデオカメラ（総画素

数41万画素×3）が用いられた。

本実験条件を、表-1に示す。 U_m は断面平均流速、Reは断面平均流速 U_m と管径Dを用いたレイノルズ数、 U_τ は摩擦速度であり、さらに D^+ は内部パラメータを用いた管径である。

3. 実験結果

(1) 瞬時流速分布および平均流速分布

図-2は、縦断面撮影したデジタルビデオ画像を1/30秒間隔で3枚重ね合わせ、その粒子の軌跡より求めた流速ベクトルを示した一例である。

これは、瞬時（1/15秒）の速度場が表されており、本研究では、連続した63枚の画像データより21枚（2秒間）が解析の対象とされた。

図-3には、この流速ベクトルの流れ方向の流速成分が取り出され、それぞれの壁面からの無次元距離（ y/D ）の流れ方向流速（ u 、印）とそれをそれぞれの高さ y/D で平均した値（◇印）、さらに2秒間の流れ方向流速について同様に平均した値（○印）が

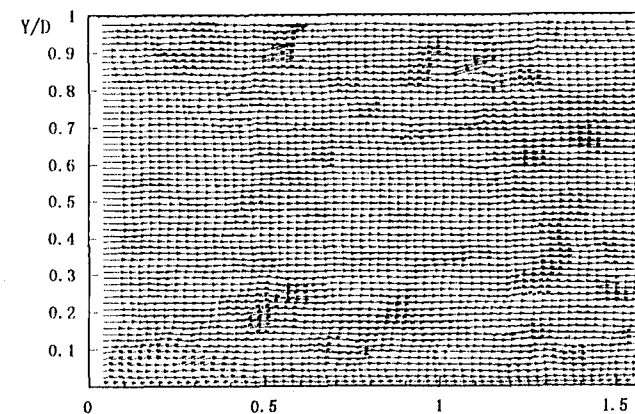
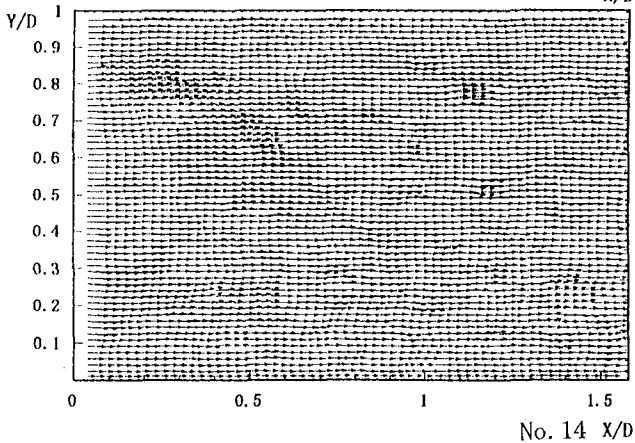
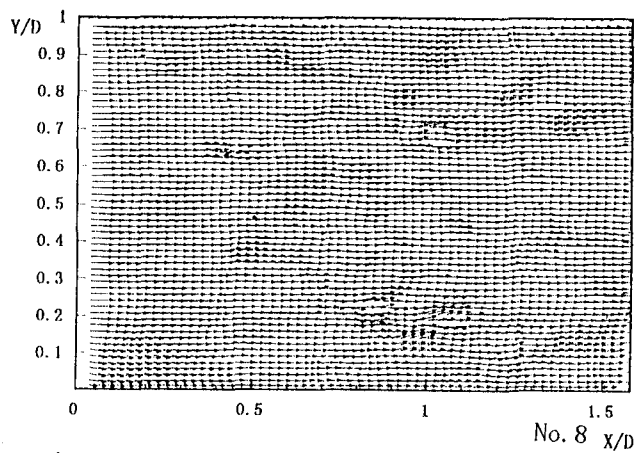


図-5 格子点流速ベクトル No. 21 X/D

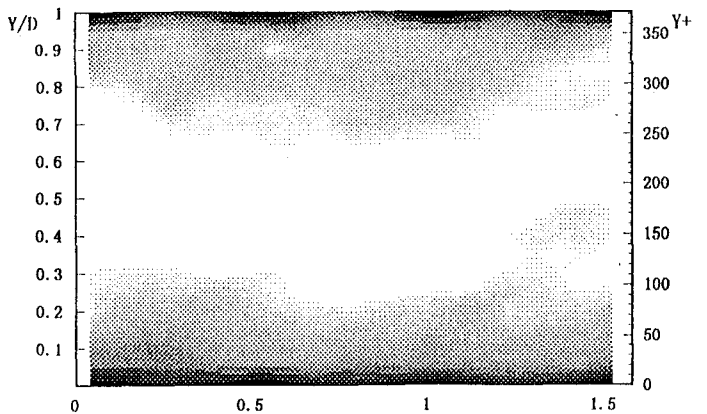
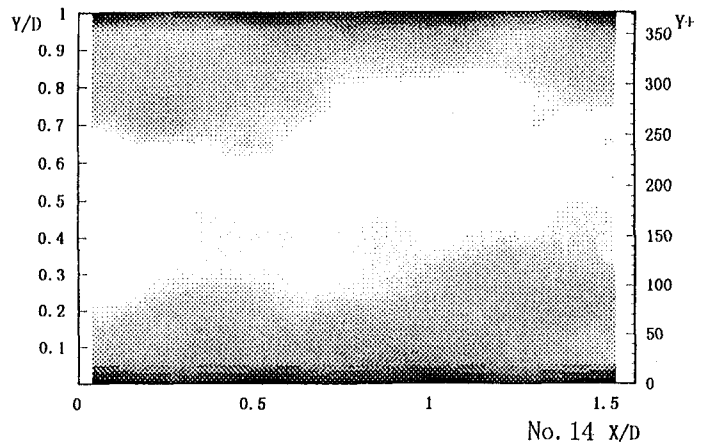
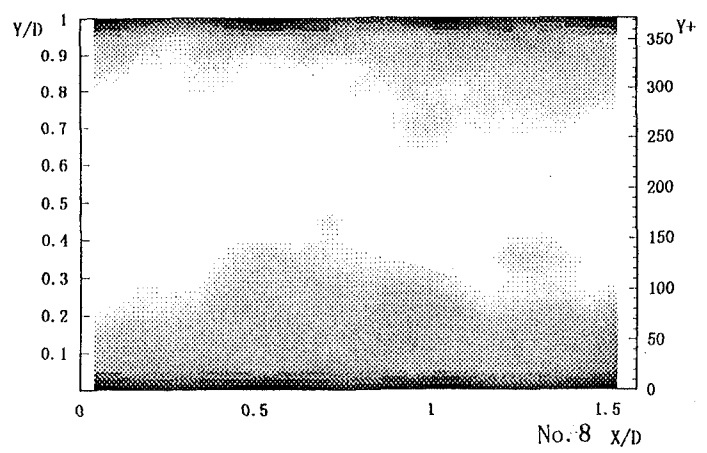


図-6 流速等値図(U成分) No. 21 X/D

半径方向に示されている。

この図は、瞬時の流れ場において、X方向の速度変動量の大きさを示し、さらに空間平均により求め流速分布が、わずか2秒間平均された流速分布とも異なることを示している。

図-4は、21組の連続データより計算された平均流速分布（両壁面からの距離の値は平均している）が、示されている。この図には、ほぼ同じRe数でのEggelsら⁷⁾の結果と、同一条件下の境界層で計算されたKimら¹²⁾のDNSの結果が示されている。これより、21枚の平均値は、Eggelsらが、DNS、熱線流速計、LDAで求めた結果と一致し、境界層とは異なる

円管乱流固有の対数則分布をやや上方へずらしたような特性を示している。円管乱流が、このような固有の速度分布を持つことを調べるために、次に瞬時の速度変動場について、考察を行う。

(2) 流速分布の等値線図

計算されたベクトル図より、20×20の格子点ベクトルを求め、さらに空間的に移動平均を行った結果が、図-5に示されている。

このU成分についての等値図を、図-6に示す。黒色が低速域、濃度が薄くなるにつれ、流速が増加し、白色では、0.9U_{max}以上の領域を示す。

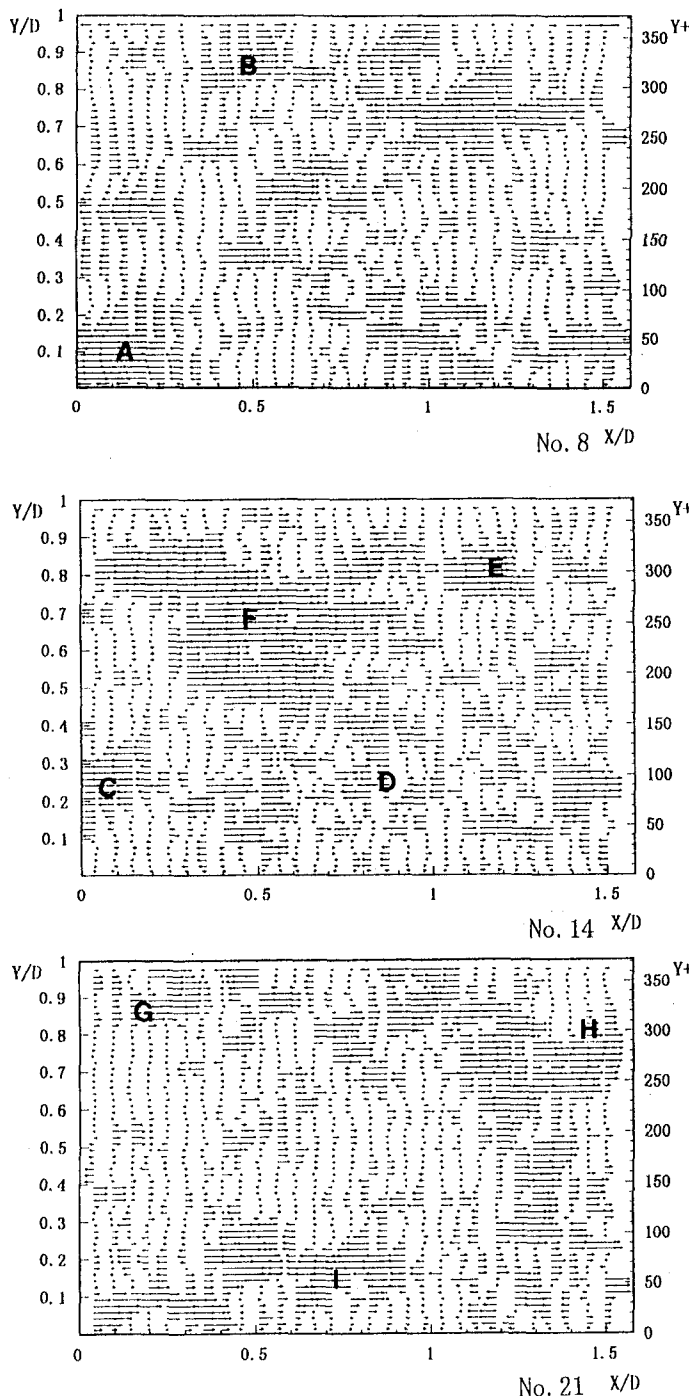


図-7 V成分流速分布

ここで、もっとも注目すべき点は、白色で示される高速領域が、壁面方向に大規模に変動する形象を示すことである。No. 8とNo. 14およびNo. 14とNo. 21の流速場は、それぞれ0.6、0.7秒の時間間隔を持つ。No. 8では、 X/D が0.4までは、 X の増加に伴い、高速領域が上部の壁面へ向かい、それから X/D が1.2程度までは、反対の下部壁面へ向かい、さらにそれより X/D が大きくなると徐々に上部へ向かう形象を示している。No. 14では、 X/D が0.4までは、その上部境界と下部境界が管中央に向かい、高速領域が減少し、その後高速領域は X/D が0.7まで下部壁面へ向かい、それから X/D が1.3まで上部方向へ向き、そこから下部方向へ向く。No. 21では、高速領域は X/D が1.2ま

で、下部壁面へ向かい、そこからかなりの角度で上部壁面へ向いている。

また、その高速領域の幅は、平均流速分布では0.47Dであるのに対し、最大で0.6D以上となっている。また、それは壁面から Y^+ で30ぐらいまで接近していることが認められる。

これらの高速領域の壁面方向への大規模な揺動が、平均流速分布での高速領域の形成に関係すると思われる。

これらの領域の v 方向流速成分について次に検討を行う。

図-7は、No. 8, 14, 21に対応する V 成分の空間分布を横方向の矢印の大きさで表示している。右向きが正值すなわち Y 座標の下から上へ向かう流れを、左向きが負値、上から下への流れを示す。

この中で、特徴的なことは、No. 8のA領域では、負の値の領域、B領域では、正の値の領域が形成されており、それぞれの壁方向へ向かう流れが形成されている。この領域は、先述の U 成分の高速領域が壁面に近づく位置に対応しており、すなわち高速流体の壁面方向への進入であるスweep現象が形成されていることを示す。No. 14においても、C領域、D領域では、負の値、E領域では、正の値の領域が形成されており、同様に壁面へ向かう流れと高速領域が壁近くに形成されている。

また、F領域は、広範囲にわたって上向きの流れが形成されているが、高速領域が壁面に接近する領域だけでなく、管中央部まで含み、ほかのスweep現象とは異なるように思われる。また、この上向き流れの形成される領域の形象が、経時的に保持されているが、このことについては、今後検討を要す。

No. 21のG領域、H領域では、正の領域が、I領域では、負の領域が形成され、同様に U 成分の高速領域が壁面に接近する際に、スweep現象が引き起こされており、注目すべき点である。

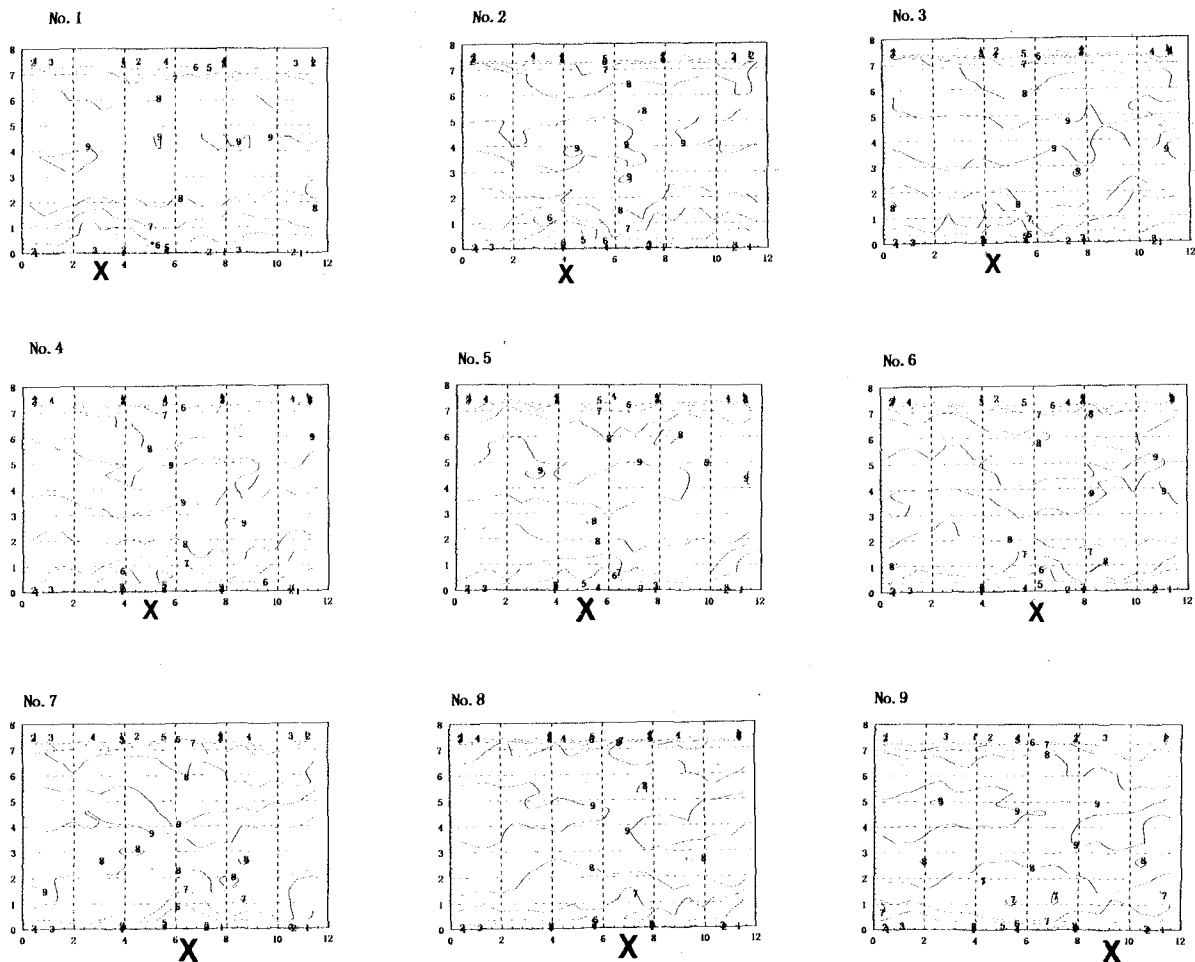
次に、図-8においては、これら流れ方向流速の等値線図の時系列変化が一部示されている。これらのコンタインは、流速の絶対値の大きさを示し、各図面間の時間間隔は、0.1秒である。

これは、図-4で示された高速領域の揺動と、壁面近傍に形成される低速領域の時系列変化を示している。ここでは、図外に X と記された下側壁面近傍に形成される低速の流体塊の挙動に注目する。

流速コンタの形状より、領域 X には、低速の流体塊が壁面より上昇し形成されていることが認められる。さらに、それは、変形しながらも時間とともに流下方向に移動する現象が時系列のコンタ図より認められる。その移動速度も断面平均流速程度である。これらの形成される領域では、中央部の U 成分の高速領域は、壁面より離れ、管中央へ押し込められるような形象を示している。

(3) せん断構造

図-9は、図-6のNo. 8に対応した流れ方向瞬時速度



図—8 流れ方向流速の等値線図の時系列変化

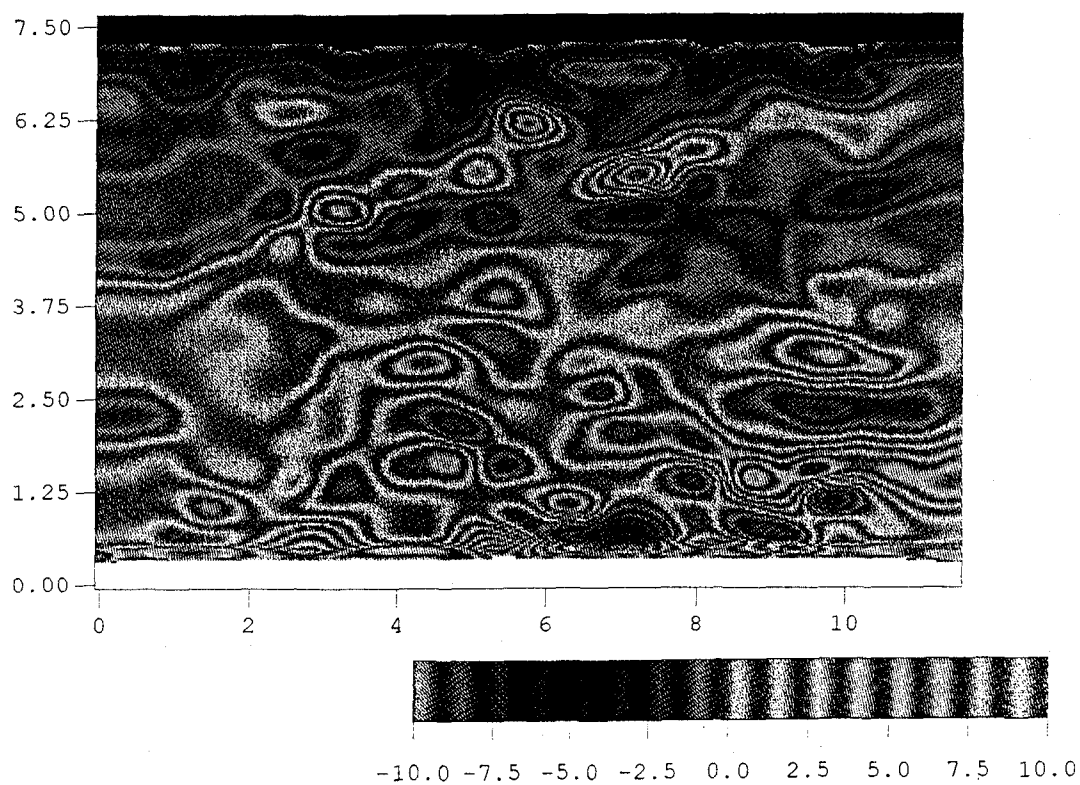


図-9 流れ方向瞬時速度せん断 (du/dy)

せん断 (du/dy) を示す。

両壁面近傍では、異符号の高せん断層が形成されている。ここで、注目する点は、上述した流れ方向流速成分の高速領域は、低せん断領域に対応し、壁面近傍では、高せん断層が形成されていることである。すなわち、そのせん断の強弱を領域わけすると、せん断の小さい領域の形象が上述の高速領域の形象に対応する。

紙面の都合上、高せん断領域内の詳細の構造については、あらためて開水路乱流の縦断面せん断構造の結果^{1,3)}と比較しながら、議論を行うこととする。

4. 結論

円管乱流の縦断面にPTVを適用し、その瞬時流速について、詳細に考察を行い、以下の結論を得た。

(1) 2秒間の解析結果の平均から、境界層とは異なる円管固有の平均流速分布が得られた。

(2) 瞬時の流れ方向流速分布より、円管内には、固有の高速領域が形成され、その領域が壁面方向に大規模なスケールで揺動する。また、このことが、平均流速の高速領域の形成に関係すると考えられる。

(3) 高速領域が壁面近傍に近づく領域では、スリップ現象を示す u , v の流速特性が得られた。

(4) 高速領域でない壁面近傍では、低速の流体塊の時系列変化が認められた。

(5) 高速領域では、流れ方向速度せん断が低く、壁近くの低速領域は高せん断領域に対応する。

謝辞：本論文の作成にあたり、実験、解析協力していただいた徳山高専高瀬和宏君、杉本博幸君に謝意を表します。

参考文献

1) Corino, E.R. and Brodkey, R.S.: A Visual investigation of the wall region in turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 37, part 1, pp. 1-30, 1969.

2) Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A., Runstadler, P.W.: The structure of turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 741-773, 1967.
3) Wygnanski, I., M. Sokolov and D. Friedman: On transition in a pipe. part 2. The equilibrium puff, *J. Fluid Mech.*, vol. 69, part 2, pp. 283-304, 1975.
4) Bandyopadhyay, P.R.: Aspects of the equilibrium puff in transitional pipe flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 163, pp. 439-458, 1986.
5) 巨瀬勝美: 超高速NMR映像法による乱流の可視化技術, 日本物理学会誌, vol. 46, No. 1, pp. 29-36, 1991.
6) Sadatoshi Taneda: A Visual study of the structure in turbulent pipe flow, *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 58, No. 3, pp. 771-774, 1989.
7) Eggels, J.G., Unger, F., Weiss, M.H., Westerweel, J., Adrian, R.J., Friedrich, R. and Nieuwstadt, F.T.M.: Fully developed turbulent pipe flow: comparison between direct numerical simulation and experiment, *J. Fluid Mech.*, vol. 268, pp. 175-209, 1994.
8) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 斎藤 隆: 円管乱流の組織構造に関する研究, 第49回年次学術講演会概要集 II, pp. 602-603, 1994.
9) 佐賀孝徳, 渡辺勝利, 斎藤 隆, 前田邦男: 円管乱流に形成される縦渦構造に関する研究, 第50回年次学術講演会概要集 II, pp. 558-559, 1995.
10) 柳井 竜, 大成博文, 佐賀孝徳, 渡辺勝利: 円管乱流の横断面せん断構造, 第49回中国支部研究発表集, pp. 245-246, 1997.
11) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤 隆: 壁乱流における流脈パターンと瞬時流速の同時抽出, 水工学論文集, 第37巻, pp. 829-832, 1993.
12) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.: Turbulent statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, vol. 177, pp. 133-166, 1987.
13) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 斎藤 隆, 波多野 慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集 II (掲載予定) .

(1997. 9. 30受付)