染料注入法による乱れ構造の可視化

愛媛大学工学部 鮎川恭三[○], 越智順治, 高島伸
稲垣泰夫, 塩田浩志

Visualization Study of Turbulent Structure in a Pipe
using Dye Injection Method

Kyozo Ayukawa, Junji Ochi, Shin Takabatake
Yasuo Inagaki and Hiroshi Shiota

Typical structures of large scale turbulence in a pipe flow was investigated by a visualization of behaviour on a surface of dye layer on a whole bottom of a pipe with squared crosssection. The dye layer was generated by continuous injection of fluorescent dye into a viscous sublayer. 16mm-cinematography of the behaviour on a surface viewed through a transparent upper wall show the longitudinal streaks which join or separate again and again. In these behaviour, some typical patterns are found. The relations between ejection and high-speed flow are made clear from the correspondence of these typical patterns to instantaneous velocity fluctuations, measured simultaneously by Laser-Doppler velocimeter.

1. まえがき 管内乱流の大きなスケールの乱れ構造について、著者らは、その構造の中にある組織的な運動を把握する目的で、クラスリット法を用いた三次元可視化により、壁面近くから管中央へ低速度の流体塊がとび出すエジェクション、管中央部から壁面へ高速度の流体塊がとび込む高速度流体と縦渦が顕著な現象として存在することを認めた¹⁾。さらに、トレーサの追跡によりラグラングジュ速度を計測することで、これらの各現象の特徴を明らかにした²⁾。たゞ、この手法ではこれらの現象のつながりを十分把握することができず、また、壁近傍の流れのパターンの詳細を知ることができなかった。これを補うために、本研究では、管底面に敷きつめた染料の薄い層の表面の挙動を16ミリ4-ヴァイで撮影するとともに、この可視化各々の速度変動をレーザドップラ流連計を用いて測定し、これらに対応させることで、流れのパターンの中の特長的な現象のつながりを、縁和層内で明らかにすることができたので、ここに報告する。

2. 実験装置と実験方法 実験流路は前報と同様、管断面が一辺100mmの正方形の透明流路で長さ10mである。可視化実験およびレーザドップラ流連計

* Faculty of Engineering, Ehime University, Bunkyocho 3, Matsuyama

による流速測定は、流水が十分発達した領域である管入口から5m以上下流で行った。可視化写真の撮影範囲は、管軸方向約600mm程度である。流路の概略図と図1に示す。染料は、撮影部の最上端から約300mm上流の管底面に、管軸と直交方向に一列に穿孔された10個の孔から注入された。用いた染料は蛍光染料を水に溶かした比重1.04の溶液である。染料が水より重いため、注入速度を調整して、ほぼ粘性層の厚み(約2mm)程度に管底面に敷きつめることができた。この染料の層の表面の挙動は、管側面に設けられた10mm巾のスリットを通して、1.5kWのハ

図1 実験装置

ロゲンランプの投光器で照明することにより、さかめではつきりと観察できる。場所の都合で管路上からの撮影が不可能なため、斜め方向から16ミリムービーカメラで層表面の挙動を撮影した。管軸方向の距離の目安をつけるため、図7以下の写真にあるように、一方の管側壁上部に20mmおきに切れ目を入れスリットを設けた。フィルムはKodak ビデオニュースフィルム(タンクステン光用, ASA 125)を使用した。カメラはBOLEX H16 SBM でf14, 18fpsで撮影した。流速測定は、管断面横方向中心部で、壁からの無次元距離 $y^+ = \frac{U_* y}{\nu} = 26, 50, 78$ の3点で行い、管軸方向成分 u と y 方向成分 v を求めた。測定した瞬間流速と16ミリフィルムの映像を対応させるため、カメラの同期用接点からのフィルム送りの信号を流速測定結果と同時にデータレコーダに記録した。なお、初期のフィルム画面を確定するために、撮影を開始した直後にカメラに光を入れ、その光が切れたときの信号をフィルム送りの信号に重ねて入れる方法をとった。

3. 測定結果と検討

流速測定結果を移動平均法を用いて順次平均しなうした瞬間流速に対して求めた流速成分 u , v の確率密度分布を図2, 3に示す。エジエクシオンは、乱れ速度について $u' < 0$, $v' > 0$, 高速度流体は、これと逆に $u' > 0$, $v' < 0$ のパターンであることが知られているので、とくに顕著なパターンをまが確認するため、 u , v それぞれについて、その大きが標準偏差以上にか

離れた場合について、エジエクシオン、高速度流体を可視化結果と対応させることを試みた。特徴的なパターンに対する流速の測定結果の例を図4, 5, 6に示す。ここで u , v は同時に計測したものでなく、これを対

図2 u の確率密度分布 図3 v の確率密度分布

応おけることはできない。なお、ここで“なぎ”と呼んでいるのは、ある程度の時間間隔にわたって、小さな変動が続いている場合のことである。対応づけの結果は、高速度流体の流入のときは、図9に見られるように染料層の表面にクレータ状のパターンができるか、

図4 エジェクション

図5 高速度流体

図6 “なぎ”

染料層をおしわけするようなパターンをみせることが知られた。後者は、高速度流体が粘性層までその性質を保ったまま流入してくるとき、前者は、粘性層に達するまでにその特性を失ったときに相当するものと考えられる。前者のパターンが高い頻度でみられた。エジェクションの場合は、図10にみられるように層表面の縞が接近し、急にこの縞自体が上昇している。このほか縞が強く合体したときにもエジェクションがみられる。なおエジェクションの近辺には、殆どの場合図にみられるような高速度流体の流入がある。

以上のような対応づけをもとにして、以下可視化写真から管内乱れの組織的構造について考察をすすめる。図7から12に可視化結果の典型的な写真を示す。図7は、“なぎ”に相当するもので、染料表面には特徴的なパターンはほとんどみられない。その後、図8にみられるように染料層表面は、典型的な管軸方向への縞構造を呈するようになる。この縞の間隔を無次元間隔 λ^+ で表わすと、 $\lambda^+ = 90 \sim 130$ であり、これは境界層流でみられている streak 構造の $\lambda^+ \approx 100$ と一致し、この縞は streak 構造に相当すると思われる。観察結果からは、縦渦の存在を示唆していると推測できる。図9は高速度流体の流入の様子を示しており、この流入によって streak 構造が乱れはじめる状況が良くみられる。なお、高速度流体の流入

図7 “なぎ”

図8 Streak 構造

図9 高速度流体の流入

図10 エジェクション

図11 組織的構造の末期

図12 エジェクションに至らない
高速度流体の流入

の痕跡であるクレータ状のパターンは、同時にいくつもみられる場合が多く、かなりこの流体塊の規模は大きいものと推測され、境界層流と異なり、管内流では管中心付近の大きな渦運動が高速度流体の流入に関係しているのとはなりかと推測される。図10は高速度流体の流入によって、隔壁が接近し隔壁自身上昇してエジェクションを生じている様子が写真の中央上部にみられる。これは、カラースリット法でみられた渦状のエジェクションに相当するものと考えられる。また、前述のように隔壁の合体によるエジェクションもみられることがあるが、これは、Blackwelder¹⁾らが指摘し、カラースリット法でも確認した隔壁の間から生じるエジェクション²⁾に相当している。図11は、このような流れの組織的構造の末期を示しており下流側ではすでになごみの状態になっていることがわかる。なお、図12は、高速度流体の流入にも拘らず、エジェクションが生じない場合を示しており、これが管内流の側壁による拘束に基因するものかどうかは未だ明らかではない。

4. あとがき

レーザドップラー流速計による流速測定結果と対応させることで、管内流れの組織的な構造の一端を緩和層のパターンの可視化からみることができた。これにより、今後、特徴的な各構造の詳細な検討をすすめることができると期待される。

本研究は、文部省科学研究費の補助により行なわれている研究の一部である。

文 献

- 1) Ayukawa, K. and M. Kuroiwa : 2nd International Symp. on Flow Visualization (1980) 699
- 2) 鮎川, 流れの可視化 2-4 (1982) 318
- 3) 鮎川ほか2名, 流れの可視化 1-2 (1981) 85