

一定な加速・減速度を持つ円管内非定常流の速度分布と乱れ

加藤榮二*, 吹田 年*, 川又正昭*

(昭和58年9月10日受理)

Velocity distributions and intensity of turbulence of the unsteady pipe flows of constant acceleration and deceleration

EIJI KATO*, MINORU SUITA*, and MASAOKI KAWAMATA*

Abstract — The object of this work has been to determine the velocity profiles of the accelerated and decelerated flow by use of a hot-film anemometer and the flow visualization using hydrogen bubble technique, which velocity variations have been linear with time in the circular pipe of 50mm diameter.

Measurements of the accelerated and decelerated flow have been in the maximum Reynolds number ranges 0 to 3×10^4 and 3×10^4 to 0. The acceleration and deceleration of the flow have been in the range of 3.3 to 17.5cm/s² and -0.9 to -18.7cm/s² respectively.

The velocity distribution of the unsteady flow tended to remain the initial state of the flow. The durability of the initial state increased with an increase in the acceleration. In the decelerated flow, however, increasing the deceleration resulted in an increase in back flow region and Reynolds number at which the reverse flow took place near the pipe wall. Turbulence intensities in the direction of the pipe axis and pipe radius appeared to have affected the velocity distribution.

1. 緒 言

管内流は、実際の応用面からも重要であり、流体力学上の基本問題の一つとなっている。そのため、管内流の速度・乱れ分布や流体摩擦などの諸特性に関して、極めて多くの研究がなされてきた⁽³⁾。しかし、それらの大部分は定常流についてのもので、非定常流に関する研究は少ない状態である。^(1, 2, 4, 5, 7, 8)

工業プラントなどの重要な構成要素となっている管路系において、ポンプの起動、停止や弁の開閉などにより非定常流が発生するように、実用上は非定常のものが数多く存在する。最も単純化された非定常流として、速度が時間に対して直線的に変化するもの（すなわち、加速・

減速度が一定）が考えられる。しかし、著者の知る限りでは、この種の非定常流に関する実験的研究は見あたらない。

本研究では、層流および乱流からの加速・減速度が一定な非定常流について、水素気泡法を用いた可視化と熱フィルムによる流れの諸量の測定とによって、流れの速度分布や乱れ強さを調べ、流速の点から非定常流を解明する。

2. 記 号

D : 円管の内径 (50mm)
dU/dt : 流れの加速・減速度
Re : レイノルズ数 (UD/ν)

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

- r : 管軸を原点とする半径方向の座標 動径上の最大速度
- T : 静止状態の流体を瞬間的に加速し始めた $u', u_c, \sqrt{u'^2}/u_c$: 管軸上における管軸方向の変動 速度, 速度, 乱れ強さ
 時からの時間
- t : 時間 ν : 水の動粘性係数
- U : 管断面平均速度 — : 時間平均
- u, u_{max} : 任意の半径における速度, u を測定した

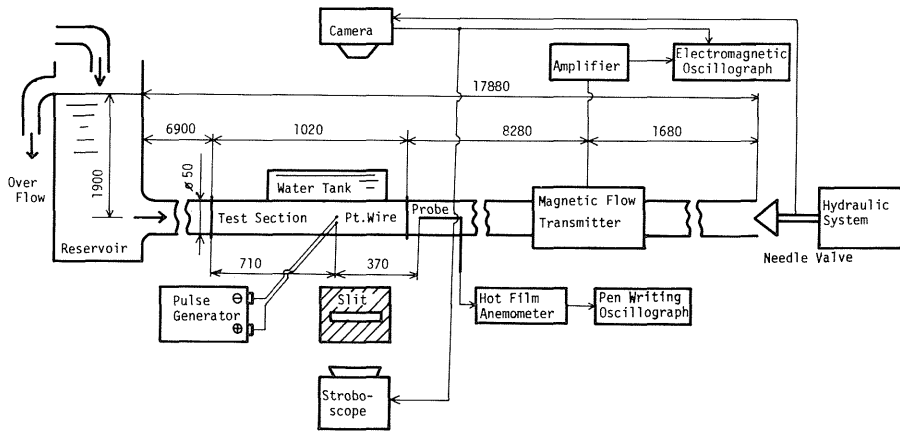


Fig. 1 Experimental apparatus

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

装置の概略はFig.1のとおりである。管路は、滑らかな内面を持つ塩化ビニール管、透明アクリル管によって構成されており、全長および内径はそれぞれ17880, 50mmであり、ヘッドタンクによって1900mmの水頭がかけられている。管路入口から6900mm下流にある、長さ1020mm、内径50mm、肉厚5mmの透明アクリル管を測定部とした。

測定部入口から下流710mmの位置に、水を電気分解する電極として、直径0.1mmの白金線を2本互いに平行に10mmの間隔で、管軸と垂直になるように取り付け、管軸と交わるものを陰極これの鉛直下方のものを陽極とする。これらの電極に、パルス電圧発生器(パルス幅・発生周期: $1 \sim 10^3$ ms, $10 \sim 10^3$ ms, 発生様式: 直流およびパルス)によりパルス電圧をかけ、陰極白金線から断続的に発生する水素気泡列をトレーサーとして用いた。直線状電極から一斉に発生した気泡は流れとともに移動し、各点におけるトレーサーの先端の画く曲線(タイムライン)は、流れの瞬間的な速度分布を表わす。

3.2 実験方法

まず、流れを定常な状態とし、次に管路の下流端に設備された流量制御用のニードル弁を、油圧駆動装置を用いて管軸方向に移動させることによって、加速・減速度 dU/dt が一定な非定常流を発生させた。 dU/dt は加速・減速流でそれぞれ $3.3 \sim 17.5 \text{ cm/s}^2$, $-0.9 \sim -18.7 \text{ cm/s}^2$ の範囲で変える。加速流の加速終了時におけるレイノルズ数 Re と減速流の減速開始時の Re の最大値は、ともに 3.0×10^4 とした。

断面平均速度の瞬時値 U は、測定部出口より8280mm下流に常設した改良された電磁流量計(内径: 50mm, 時定数: 0.3s)の出力を増幅し、電磁オシログラフ(タイミング精度 $\pm 2\%$ 以内, 直線性: $\pm 1\%$ FS, 応答周波数: 350Hz)に記録して求める。この流量計は一次遅れ要素を持っているので、加速・減速度一定なる流れの信号を計測すると、一次遅れ要素のランプ応答における過渡特性を示す。したがって、測定ではこの誤差を考えてある。

管軸上の瞬間速度 u_c , 瞬間的な乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/u_c$

は, 電極の後流による影響が無いと考えられる白金線下流370mmの管軸上に位置する熱フィルムプローブ(直径: 0.15mm, 長さ: 3.0mm, 応答周波数: 200Hz)によって測定し, 熱フィルム流速計(精度: $\pm 0.5\% \pm 1$ デジット, 応答周波数: 200kHz)の出力をペン書きオシログラフ(精度: $\pm 0.3\%$ FS, 応答周波数: 50Hz)に導いて決定した。一般に, 乱れ強さには低周波数の u' が支配的なので, 50Hz程度の応答性のもので, 乱れ強さの性質を定性的につかむことが出来ると考えられる。

半径方向の瞬時の速度分布は, タイムラインとする水素気泡列に, 測定部の側方に設置した幅5mmのスリットおよび測定部外壁面上の軸方向に設けられた幅5mmのスリットを通過するストロボ光を当て, 管軸から350mm上方に位置するモータードライブ式のカメラ(口径: 50mm, F1.4)で撮影して観察する。また, 撮影時の屈折光による像の歪みを防ぐため, 測定部の上に水槽を置いた。レンズ軸とストロボ光軸との角度は 90° とし, シャッター速度は $\frac{1}{80}$ s, フィルム感度はASA400である。シャッターはストロボおよびニードル弁の動作と連動し, シャッターの信号は電磁オシログラフに記録される。

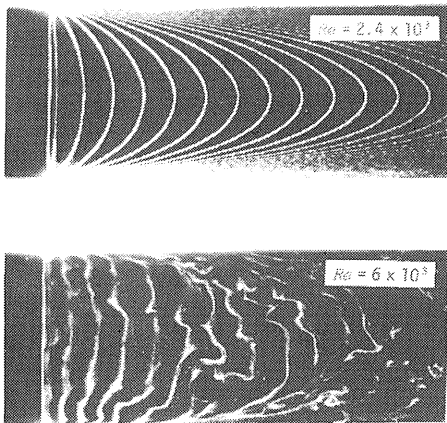


Fig. 2 Steady flow

4. 実験結果および検討

定常流の速度分布をFig. 2に示す。レイノルズ数 $Re=2.4 \times 10^3$, 6×10^3 はそれぞれ層流, 乱流を表わす。以下の非定常流の議論において, 層流状とは $Re =$

2.4×10^3 の場合のようにタイムラインが安定し整っている流れとし, 乱流状とは $Re = 6 \times 10^3$ のように乱れたタイムラインのものと定義する。

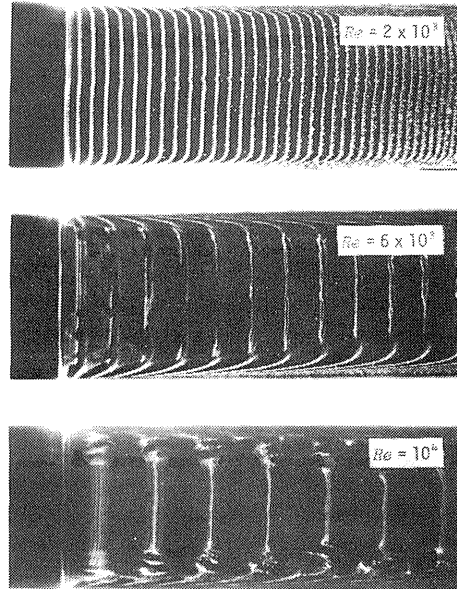


Fig. 3 Accelerated flow from at rest ($dU/dt=5.1\text{cm/s}^2$)

4.1 加速流

静止状態 ($Re=0$) から加速した場合は, Fig. 3に見られるように加速の初期段階では一様領域が広く層流状であるが, 時間 (Re の増加) とともに壁近傍の流れが乱れ, 最終的には乱流状になる。 $Re = 6 \times 10^3$ について定常流 (Fig. 2) のものと比べると, 速度分布は乱れる所が少なく広範囲の一様流が観察され, $Re = 10^4$ においても一様部が存在した。Fig. 4より加速度 dU/dt の増加に伴って一様部分が拡大する, すなわち, 初期状態の持続性が強くなる。また, $Re = 6 \times 10^3$ に対応する $\frac{1}{6}$ 乗則の速度分布と比較しても, 一様流の領域が著しい。

速度分布に及ぼす乱れ強さの影響を調べるために, Fig. 5で表わされる管軸上の $\sqrt{u'^2}/u_c$ について考える。 $\sqrt{u'^2}/u_c$ は, 加速の初めに急激な増加をして極大となり, 以後は急速に減少し加速終了時 ($Re = 3 \times 10^4$) に近づくと, dU/dt によらずほぼ一定値をとった。 dU/dt 値の小さなものでは, 加速の中期以降に第

二の極大値が現われる。最初の極大値は dU/dt の増加とともに発生時期が遅くなる, すなわち, 高い Re で発生する。このことから, $\sqrt{u'^2}/u_c$ における最初の極大値の発生時期が, 初期状態の速度分布を持続する性質に関係していると考えられる。Fig. 3における Re の高いものでは, 壁の近くに乱れた領域が見られる。これは, 加速の初期に発生した $\sqrt{u'^2}/u_c$ が, 半径方向の乱れによって壁の近傍にまで移動したためと思われる。

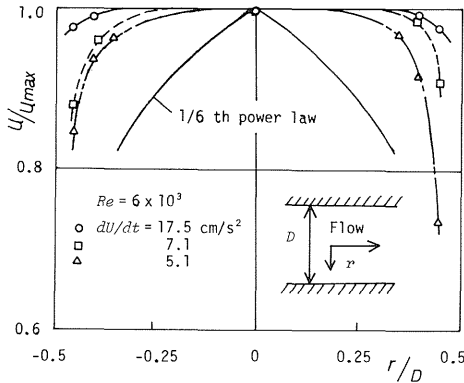


Fig. 4 Effect of acceleration on the velocity distribution of the accelerated flow from at rest

(Fig. 4)

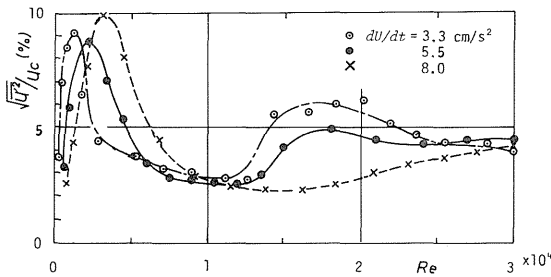


Fig. 5 Turbulence intensity in accelerated flow from at rest

ここで, 大きな dU/dt を持つものとして, 弁を瞬間的に開いたときの過渡流れを考える。流体摩擦を考慮した非圧縮粘性流において, 平均速度が0から U になる時間 T は次式で与えられる⁽⁶⁾

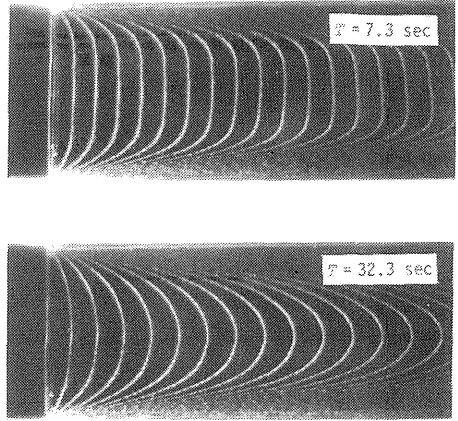


Fig. 6 Instantaneously accelerated flow from at rest ($Re=3.1 \times 10^3$)

$$T = \frac{l U_0}{g h} \tanh^{-1} \frac{U}{U_0}$$

ただし, h : 水頭, l : 管路の長さ, U_0 : 水頭 h の下における定常流の平均速度。上式は本研究で問題にしている流れに適用できると考えられるので, $U/U_0 = 0.999$ の状態になったものを定常流とみなせば, 本装置では定常になるまでの時間 $T_s = 2.2s$ となる。一方, これに対応する実験結果Fig. 6 (静止状態からの瞬間的加速流)によると, 定常流となったはずの $T = 7.3s$ 以降でも速度分布は変化を続けた。これは, 瞬間加速のため dU/dt が極めて大きくなり, $\sqrt{u'^2}/u_c$ の極大値の発生時期が遅れ, 初期状態の持続時間が長くなることによると思われる。

層流から加速した場合はFig. 7のようになった。速度分布は $Re = 5.7 \times 10^3$ でも定常流 (Fig. 2) の $Re = 6 \times 10^3$ のようには乱れず, 乱流よりもむしろ層流状である。また, $Re = 10^4$ においても速度分布は初期状態である層流の影響を残しているが, 管軸に対して非対称となり, 時間 (Re の増加) とともに乱流の分布へ近づいた。

図示していないが, $\sqrt{u'^2}/u_c$ は, $Re = 0$ から加速した場合と同様な傾向を有する。また, 乱流からの加速流では, 速度分布は加速開始時における状態と同様な乱流状を呈した。

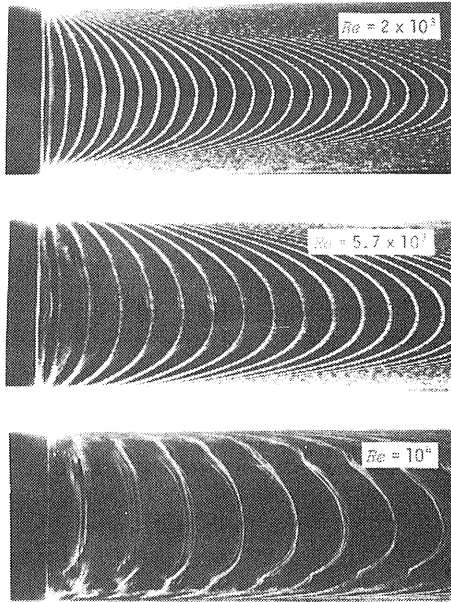


Fig. 7 Accelerated flow from a laminar ($dU/dt=14.0\text{cm/s}^2$)

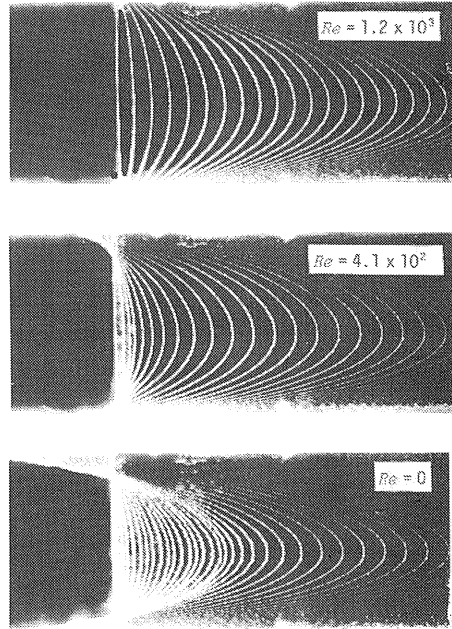


Fig. 8 Decelerated flow from a laminar ($dU/dt=-3.2\text{cm/s}^2$)

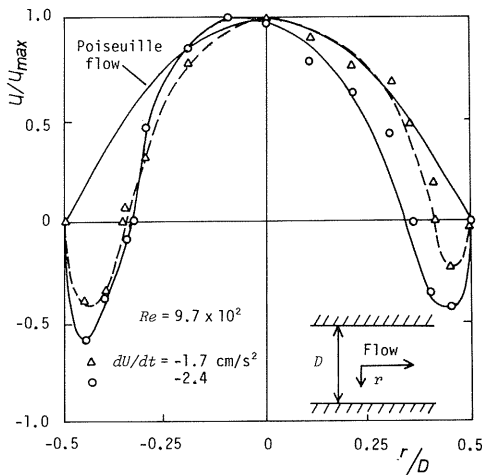


Fig. 9 Effect of deceleration on the velocity distribution of the decelerated flow from a laminar

4.2 減速流

層流から減速したところ, Fig. 8 のようになった。速度分布は減速終了時まで乱れず, 初期状態におけるような層流状を保つ。減速の途中で壁面の近くから逆流が発生し, 時間 (Re の減少) とともに成長するが, この逆流もまた層流状であった。平均速度 = 0 (Re = 0) となっても, 流れの連続性を満足するために, 正流 (下流への流れ) および逆流が, それぞれ中心部・壁の近傍に局所的に存在する。速度分布に及ぼす減速度 dU/dt の影響を Fig. 9 に示す。| dU/dt | の増加とともに, 逆流が早期 (高い Re) に発生し逆流領域・逆流の最大流速も著しくなり, 速度分布は管軸に関して非対称となった。

乱流からの減速流は Fig. 10 で表わされる。速度分布を示すタイムラインは, 減速終了時まで乱れており, 減速開始時と同様な乱流状のままであった。減速中に逆流の発生も観察されるが, 層流からのものに比較して発生時期が遅れる。また, Re = 0 でも局所的な正流・逆流は存在するが, いずれも乱流状である。

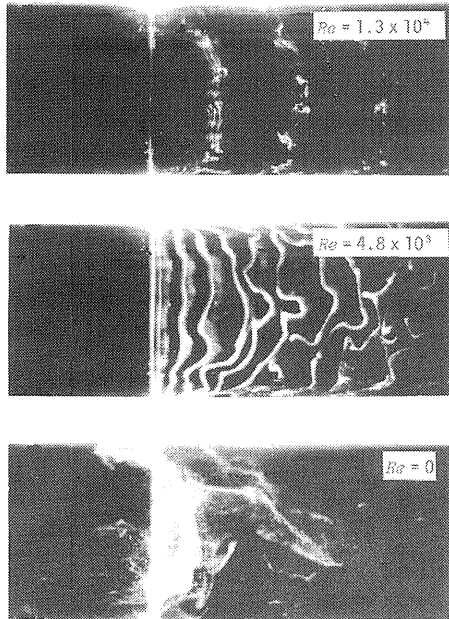


Fig. 10 Decelerated flow from a turbulent ($dU/dt = -2.8 \text{ cm/s}^2$)

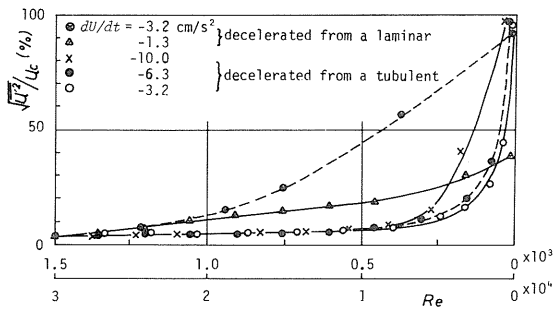


Fig. 11 Turbulence intensity in decelerated flow

乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/u_c$ は Fig. 11 に示される。層流から減速すると、 $\sqrt{u'^2}/u_c$ は減速の開始時から成長し続け、その値は $|dU/dt|$ とともに大きくなった。一方、乱流からの減速流では、 $\sqrt{u'^2}/u_c$ は減速の当初から dU/dt には関係なく一定を保ち、減速終了の間近になって急激に増大する。この急増するところは、 $|dU/dt|$ の大きなものほど早期 (大きな Re) の

で、逆流の発生に関係があると考えられる。増大後の $\sqrt{u'^2}/u_c$ は、 $|dU/dt|$ の大きさに伴って著しくなった。注目に価するのは、層流から減速する場合でも、 $\sqrt{u'^2}/u_c$ がかなり大きいことである。大きな $\sqrt{u'^2}/u_c$ にもかかわらず速度分布が乱れていないのは、加速のときは異なり半径方向の乱れが小さいため、中央部から壁近くの流体に伝達されるエネルギーが小さいことによると思われる。そのため、エネルギーの小さな壁近傍から、逆流が早期に発生する。これに対して乱流からの減速流では、半径方向の乱れが大きいので、中央部と壁近くの流体間のエネルギー交換が活発に行われて、壁近傍の流体がエネルギーを与えられ、逆流の発生が遅れると考えられる。

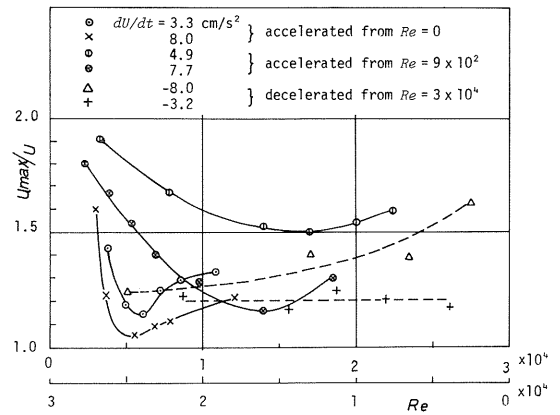


Fig. 12 Maximum velocity on a diameter

4.3 動径上の最大速度と速度分布

動径上の最大速度 u_{max}/U は Fig. 12 のようであった。層流 ($Re = 0, 9 \times 10^2$) からの加速流では、 u_{max}/U は加速の初期に減少し、やがて増加して極小値を有する。極小値の存在は、加速の初めでは速度分布が一様化し、後に一様部分が減少してゆくことを示す。加速度 dU/dt の大きなものほど、極小値は早期 (低い Re) に発生した。また、 u_{max}/U は小さくなり速度分布の一様領域の増加を意味し、Fig. 4 を裏づけている。この極小値の発生は、 $\sqrt{u'^2}/u_c$ の極大値発生とは逆の傾向にある。

乱流から減速した場合、 u_{max}/U は $|dU/dt|$ の大きな方が大であり、時間 (Re の減少) とともに成長

するかもしくは一定のままであった。この現象は、大きな $|dU/dt|$ では早期に逆流が発生することに対応する。

Table 1 Decelerated flow from a laminar
($dU/dt = -1.3 \text{ cm/s}^2$)

Re	u_{max}/U
7.2 $\times 10^2$	2.85
6.4	2.50
5.9	2.20
4.8	2.05
3.8	2.70
3.2	3.10
2.0	4.50
1.6	5.10

層流からの減速流は Table 1 に表わされている。 u_{max}/U は、加速流と同様に極小値を持つが、減速の後期では初期における値より大きくなった。

5. 結 言

加速・減速度が一定な円管内非定常流について、測定の範囲内で以下のことが明らかにされた。

1) 加速流では、加速度の大きなものほど初期状態における性質を長期にわたって持続する。とくに、静止状態から瞬間的に加速すると、流れが安定となった後も速度分布は変化を続けた。

2) 減速流では、減速終了時まで初期状態の流れの性質を保持する。減速度の大きさの増加とともに、逆流の発生時期が早まり、逆流領域も著しくなり、層流から減速する場合は、速度分布が管軸に対して非対称となった。

3) 軸方向および半径方向の乱れ強さも、速度分布に影響を及ぼしていると考えられる。

終わりに、本実験に尽力された当時の卒研究生の諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) Kato, E. ほか 2 名: Flow Visualization II, McGraw-Hill (1982), 209.
- (2) Zielke, W.: Trans. ASME. Ser. D, 90-1 (1968), 109.
- (3) 例えば、伊藤: 日本機械学会論文集, 18-66 (1952), 101.
- (4) 加藤ほか 2 名: 日本機械学会日立地方講演会論文集 (1980), 67.
- (5) 喜多ほか 2 名: 日本機械学会論文集, 45-397 (1979), 1243.
- (6) 草間: 水力学および水力機械, 日刊工業新聞社 (1960), 73.
- (7) 武藤, 中根: 日本機械学会論文集, 46-404 (1980), 610.
- (8) 近江, 井口: 日本機械学会論文集, 47-414 (1981), 268.