

# 円管流の管回転による逆遷移現象

今 尾 茂 樹

生 産 機 械 工 学 科  
(1981年9月5日受理)

## Retransition Phenomenon of the Flow in an Axially Rotating Pipe

Shigeki IMAO

Department of Industrial Mechanical Engineering  
(Received September 5, 1981)

The study described in this paper is concerned with the flow of a fluid in an axially rotating pipe. It is revealed that rotation of the pipe can, depending on conditions, either stabilize the flow or make the flow less stable. At values of axial Reynolds number corresponding to laminar flow along a stationary pipe it is shown that laminar flow is not maintained when the pipe is rotated and pressure drop becomes greater than when the pipe is stationary. On the other hand, in the turbulent region the flow is stabilized and pressure drop decreases with an increase in the rotation of the pipe. In particular, at high rotational speeds laminarization or retransition from turbulent to laminar is observed. Flow visualization experiments have shown the effect of the rotation of the pipe vividly. For the measurement of the velocity distribution a cylindrical pitot tube, which is thinner than any one ever previously made is used and precise measurement becomes possible. An examination of the flow with a hot film anemometer revealed that tube rotation in fact reduces the turbulence.

### 1. まえがき

レイノルズの実験<sup>1)</sup>以来、静止した管路内を流れる流体に関しては数え切れないほど多くの研究がなされてきたが、軸流に回転流動が加わった管内旋回流については詳細な研究が未だ数少ない。回転二重管内の旋回流の研究<sup>2)</sup>から類推すれば、回転管内の流れは外管が回転するときの特別な場合に相当しており、流れは安定化の影響を受けることが予想される。ところが、剛体回転している回転管内の流動に関する Pedley<sup>3)</sup>, Strohl and Lavan<sup>4)</sup>の理論的研究, Nagib ら<sup>5)</sup>の実験では逆に管の回転速度の増大は流れが不安定となるところの臨界レイノルズ数を減少させることになることを報告している。一方、静止管から回転管に流入する場合の White<sup>6)</sup>, その他<sup>7)</sup>の実験では、管の回転を増すと、流入する流れが層流のときには回転管部の流動損失は増加するが、乱流では損失が減少する結果が得られた。回転によって乱流域で損失が減少するのは、乱れが回転によって抑えられ、上述の安定化の影響を受けるためで Cannon ら<sup>8)</sup>, 村上ら<sup>9)</sup>も

同様な結果を得ている。

そこで著者ら<sup>10)</sup>は先に回転管内の十分に発達した領域における流れについて、広範囲な軸レイノルズ数において速度分布および圧力損失の両面から実験を行い、管の回転の影響を定量的に明らかにした。その結果、特に乱流域で高い回転を与えた場合、乱流から層流への逆遷移現象(層流化)がはっきりと見られることがわかった。

本報告では、回転管内の流れをつかむためにまず流れの可視化観察を行い、回転の影響を視覚的にとらえた上で、速度分布の測定には用いたピトー管をこれまでよりさらに小さなものにしてより精度を高め、上述の層流化現象が起こる時の速度分布と圧力損失特性との関連について詳しく調べた。また回転による乱れの抑制についても、熱膜流速計を用いて実際に測定を行った。

### 2. 記号

$R_{\theta}$ : 軸レイノルズ数  $= V_m D / \nu$

$R_{\omega}$ : 回転レイノルズ数  $= V_o D / \nu$

$V_m$ : 平均流速

- $V_\theta$ : 回転管の周速度  $= \omega D/2$   
 $v_z$ : 軸方向の流速成分  
 $v_\theta$ : 周方向の流速成分  
 $\Omega$ : 旋回比  $= R_{ew}/R_{ez} = V_\theta/V_m$   
 $D$ : 回転管内径 (29.9mm)  
 $R$ : 回転管内半径  $= D/2$   
 $r$ : 任意半径  
 $L$ : 回転管入口からの管軸距離  
 $\lambda_0$ : 静止管の管摩擦係数  
 $\lambda$ : 回転管の管摩擦係数  
 $\nu$ : 動粘度  
 $\omega$ : 管の回転角速度  
 $u'$ : 速度の乱れ成分

### 3. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に本実験装置の概略を示す。使用流体として水およびグリセリン水溶液を用いるため流体が回流できるようにした。回転管は内径 29.9mm, 全長約 10m の水力学的になめらかな引抜黄銅管で、回転による振動防止のため 1m おきに軸受で支えられている。流れの観察の際には図中の回転管の一部に同一内径の透明なアクリルパイプを設置し、回転管入口より 7m (234D) 下流の位置から染料を注入した。流れの可視化観察はピトー管や熱線プローブなどによる局所的な情報だけでなく、流れ場全体を把握できる利点がある。ここではトレーサ法（注入流脈法）を用い、そのトレーサ粒子としてはアルコールで比重調整した青インクを使用した。注入の際にはトレーサ粒子の流出速度を微調整して、流出による不安定を招かないよう注意した。管内の速度分布、速度変動および壁面静圧測定断面は回転管入口より 5m (167D) と 7m (234D) の位置にあり、ここで管は切断され、そのすきまからピトー管および熱膜プローブの挿入。圧力の取り出しを行った。なおスリット前後には、2組のタイミングプーリとタイミングベルトを介して管全体を一体か

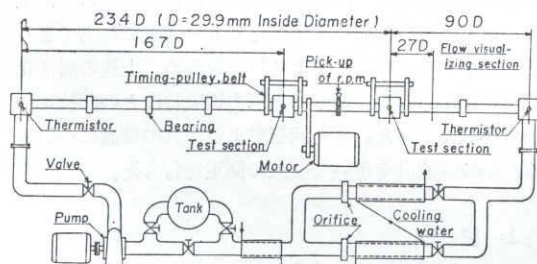


Fig. 1 Schematic arrangement of experimental apparatus

つ円滑に回転できるようにしてある。先の測定<sup>10)</sup>ではコブラ形と円筒形（外径 2mm）3 孔ピトー管を比較し、円筒形の方が優れていることを示したが、ここではさらに細い外径 1.5mm 円筒形 3 孔ピトー管と外径 1.0mm 円筒形 2 孔ピトー管を試作し、これまでのデータと比較検討した。速度変動の測定は tsi 製\*の直径 51 $\mu$ m 白金フィルムの熱膜プローブを用いた定温度形熱膜流速計によった。その出力の読み取りにはデジタル電圧計を、記録には電磁オシログラフを用いた。なお平均流速および乱れ強さは各々 10 秒間の平均値を記録した。

流体の温度測定はサーミスタにより、回転管入口と出口の 2 ヶ所で同時測定した。流体を循環させているために生ずる温度上昇は冷却水路を設置して防止した。本実験における各レイノルズ数の範囲は、50%グリセリン水溶液:  $5 \times 10^2 \leq R_{ez} \leq 2 \times 10^4$ ,  $0 \leq R_{ew} \leq 10^4$ , 水:  $2 \times 10^3 \leq R_{ez} \leq 10^5$ ,  $0 \leq R_{ew} \leq 5.1 \times 10^4$  である。

### 4. 実験結果およびその考察

#### 4.1 流れの観察

Fig 2 は  $R_{ez} = 10^3$  の層流域で回転を与えた場合の流れ脈である。なお、これらの写真において染料はいずれも管中心より注入している。静止状態ではまっすぐであっ

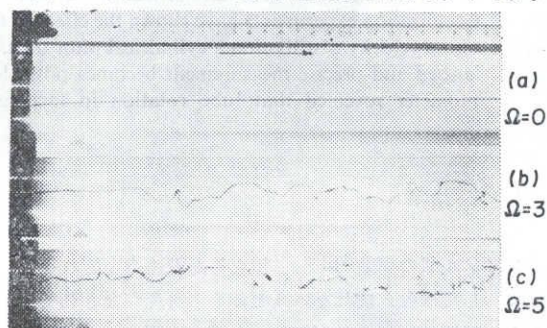


Fig. 2 Visual test section in laminar region ( $R_{ez} = 10^3$ )

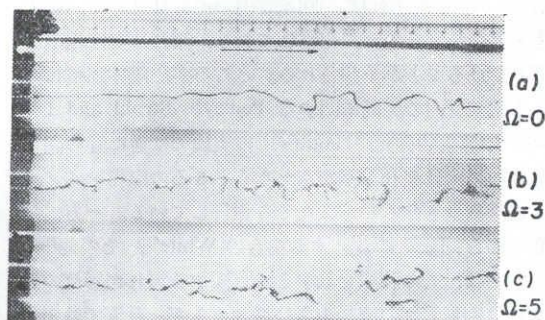


Fig. 3 Visual test section in transition region ( $R_{ez} = 2.4 \times 10^3$ )

\* Thermo Systems Inc. アメリカミネアポリスにある熱線流速計のメーカー





Fig. 4 Visual test section in turbulent region ( $Re_z = 10^4$ )

た流脈が管の回転を増加させるとともに乱れ、半径方向のかく乱が加わっていることがわかる。Fig.2(b) (c)では流れはもはや層流とは言え難く、層流域で管の回転は流れを不安定にすることにつながる。実際、後の図に示すように、管摩擦係数は層流時よりも増大している。Fig. 3は  $Re_z = 2400$  の遷移域で、管静止時には間欠的な様相が見られる。管が回転すると、静止時に比べやや変動が細かくなっているが、全体的にはかく乱が増加したとも減衰したともどちらとも言えない。言いかえれば、遷移域では回転による影響はあまりはっきりとは見られない。これは後の速度分布、圧力損失においても確認された。Fig. 4は  $Re_z = 10^4$  の乱流域である。 $\Omega = 0$  の管静止時には管壁近くまで拡散した染料が、管の回転の増加につれて管中心付近に集まっているのがわかる。 $\Omega = 5$  となれば染料は管中心に集中し、半径方向の拡散はきわめて少ない。これは回転による流れの安定化を示すもので、遠心力場において乱れが抑えられた結果といえる。そしてこのいわゆる層流化現象も、後述の速度分布、圧力損失、乱れ強さの測定結果と対応できるものである。ところで White<sup>6)</sup> も同様に乱流域を中心とした可視化観察を行っているが、彼の実験では流れが十分に発達しているのかどうかははっきりしていない。しかし、本実験のように乱流域では回転による流れの安定化の効果が現れることを述べている。

#### 4.2 速度分布

先の測定<sup>10)</sup>では外径 2mm の円筒形 3 孔ピトー管を用いほぼ満足できるデータを得たが、速度こう配が急な場合にはまだ不満が残った。そこでピトー管自体による影響を無視できるようにさらに径の細いピトー管を製作した。これまでの実験例<sup>9)</sup>をみると円筒形 3 孔ピトー管としては外径 2mm のものが最小と思われるが、本実験室では外径を 1.5mm とし、またさらに外径 1mm 円筒形 2 孔ピトー管も製作して、壁面効果やしゃへい効果を極力抑えて測定をした。ただ外径が小さくなれば当然応答性の

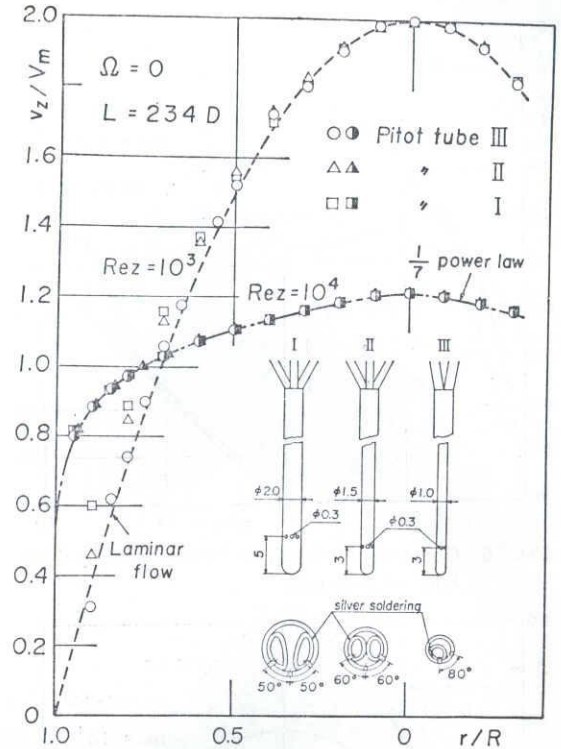


Fig. 5 Details of pitot tubes and velocity distribution in a stationary pipe

問題が生じてくるが、それには径の小さい部分ができるだけ短くなるよう工夫し、また使用する差圧変換器をより応答性の高いものにし、読み取りには積分回路を通して読むなどしてこれまでと時間的に大差のない測定を可能にした。Fig. 5 にピトー管詳細図と十分発達した静止管内速度分布測定例を示す。層流域での測定結果は 2 孔式が理論値によく一致しているが、3 孔式では中心付近を除き実際よりもやや大きな値となっている。外径 2mm のものも図中に示したが理論値との差は最も大きい。流量誤差は 1.5mm の方が 5%，2mm の方が 10% 程度となった。乱流域ではどのピトー管を用いても測定値に差はみられない。このように速度こう配が急になると径の細い方が好ましいことがはっきりした。なお以下の回転管内の速度分布の測定結果は、各速度成分については平均流速および管壁周速度によって、半径位置は管内半径でそれぞれ無次元化して表した。また図中の破線は層流理論曲線、一点鎖線は 1/7 乗則乱流速度分布である。

ピトー管のちがひによって測定値に大きな差が見られたところを Fig. 6, 7 に示す。Fig. 6 は層流域で比較的低い回転を与えた場合である。流れの観察でもわかったように回転を与えると層流は維持されないが、周速度分布

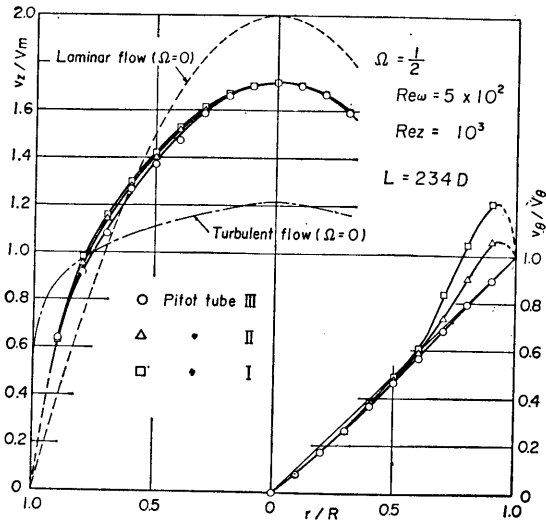


Fig. 6 Comparison of the velocity measured by three kinds of pitot tube

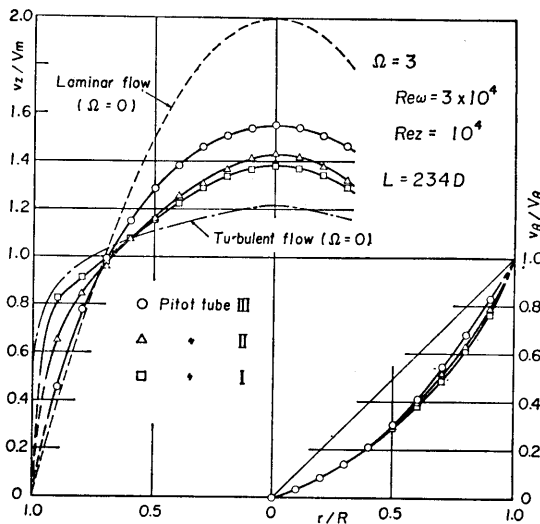
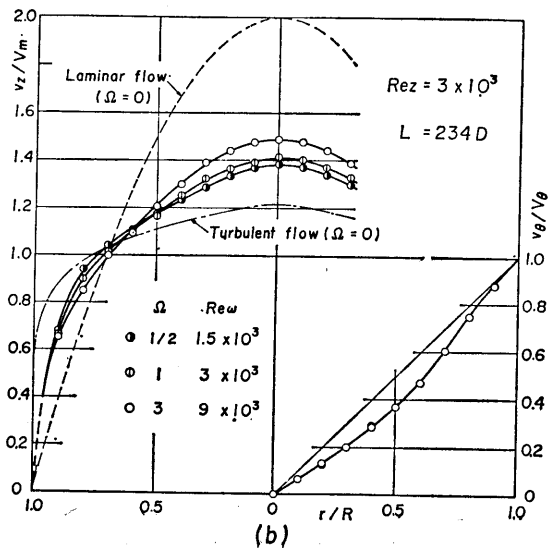
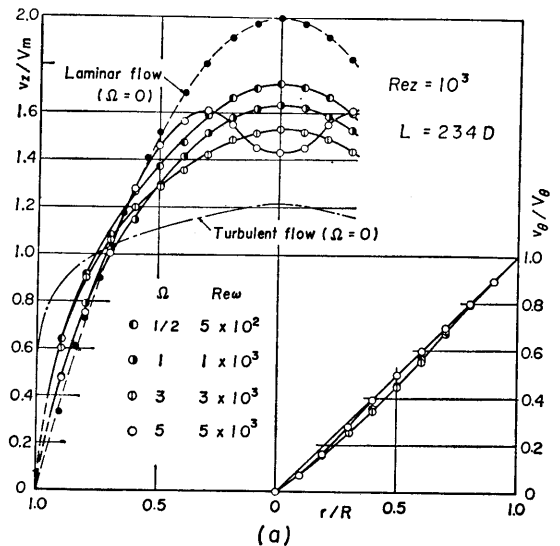


Fig. 7 Comparison of the velocity measured by three kinds of pitot tube

が強制うず形をこえて測定された3孔式ピトー管のデータはかなりの誤差が見込まれる。その点、2孔式では上述の速度こう配が急なために生じる誤差もほとんどなく、きわめて良好な結果が得られた。Fig. 7は層流化現象が顕著にみられるところで乱流から層流への逆遷移域の中にある。図を見てわかるように、軸速度分布は径の細い2孔式の方が径の太い3孔式よりも中央凸形の傾向を強く層流に近づいている。また周速度は3孔式の方が壁近くで小さく測定された。これはピトー管の径が太いほど旋回に対して抵抗となるためと考えられる。このようにピトー管の径が細いほど流れに対してより影響が少なく、特に遷移域のような流れが不安定と見られる領域におい

ては測定プローブそのものができるだけ小さい方が望ましい。以下の測定結果は外径1mm 2孔ピトー管によるものである。

Fig. 8 (a)~(d)は軸レイノルズ数一定の下で、各旋回比における速度分布を比較したものである。測定断面は $L=234D$ でいずれの場合も流れは十分に発達している。Fig. 8 (a)は $Re_z = 10^3$ の層流域である。管が回転すると、軸速度は層流の理論値より中心付近で減少し管壁付近で増加する。これは旋回比が大きいくほど顕著となり、平らな乱流の速度分布に近づく。一方周速度は流れが層流であれば強制うず形となるのであるが、いずれもわずかにそれより低い値を示す。Fig. 8 (b)は静止管内流の遷移域である。ここで特徴的なのは、軸速度、周速度のどちらも旋回比に対して大きな変化はなく、特に周速度分布は



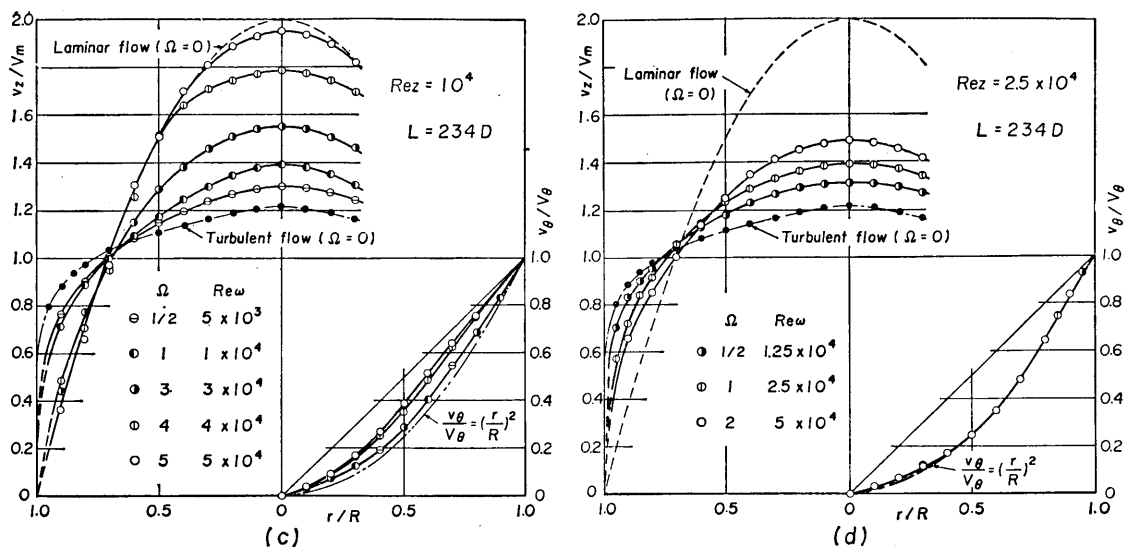


Fig. 8 Velocity distribution of the flow in a rotating pipe

ややわん曲した一本の曲線上にのることである。このわん曲は乱流域での回転管内の周速度分布にみられるものであるが、次の  $Re_w$  の大きい場合よりわん曲度は小さい。Fig. 8 (c) の乱流域になると、層流域とは逆に旋回比の増加とともに軸速度が中心付近で増大し、管壁付近

で減少する。これは回転によって乱れが抑制された結果であり、 $\Omega = 5$  では層流の理論値に極めて近い値をとる。 $Re_w$  がさらに大きな場合 [Fig. 8(d)] にも、軸速度は  $\Omega$  が大きいほど中央凸形となる。また周速度は強制うず形よりかなりわん曲した分布となり、しかも  $\Omega$  の小さい

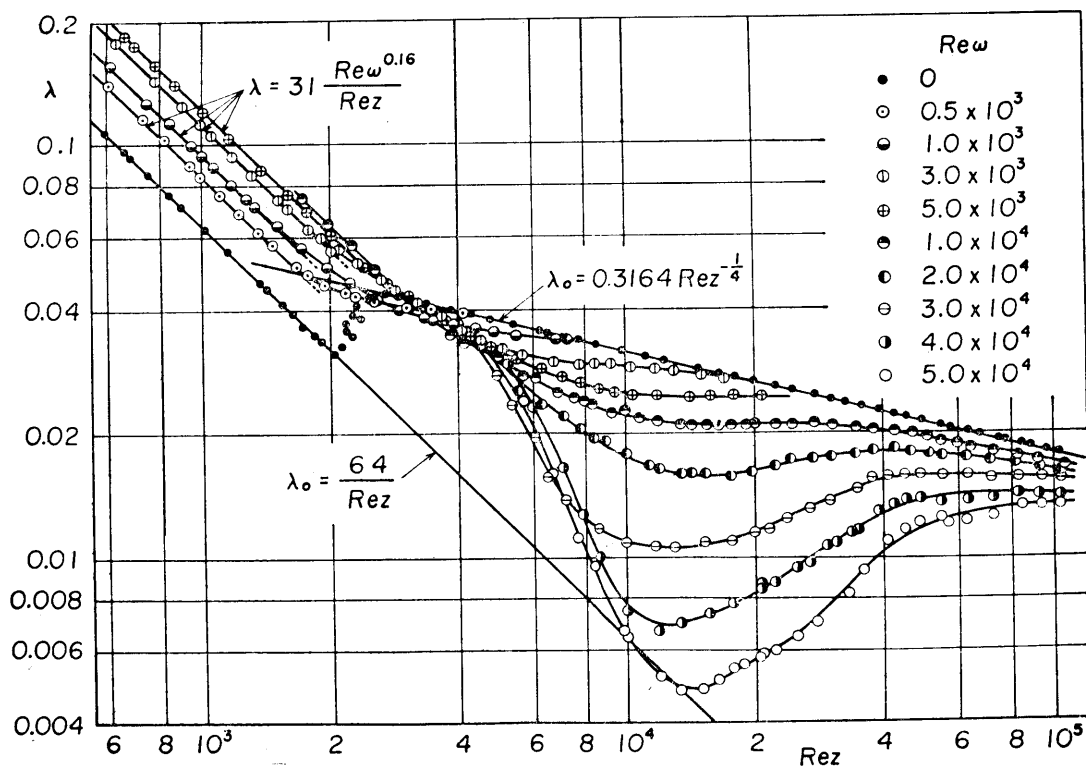


Fig. 9 Friction factor for rotating pipe

場合には相似性をもっている。 $R_{ez}$  がかなり大きな場合には、その分布は  $v_0/V_0=(r/R)^2$  の曲線によく一致している。このように回転管内の周速度分布は軸レイノルズ数が遷移域から乱流域へと変化するにつれて、しだいにそのわん曲度を強めてくることが明らかとなった。

### 4.3 管摩擦係数

Fig. 9 に管摩擦係数  $\lambda$  と  $R_{ez}$  との関係を  $R_{ew}$  をパラメータにして示す。測定区間の距離  $l$  の間の損失水頭を  $h_f$  とすると  $h_f=\lambda(l/D)(V_m^2/2g)$  で表され、Fig. 9 より静止管 ( $R_{ew}=0$ ) の層流の場合の  $\lambda_0$  の値は理論値  $\lambda_0=64/R_{ez}$ 、乱流の場合は Blasius の式  $\lambda_0=0.3164R_{ez}^{-0.25}$  とそれぞれ極めてよく一致している。回転管の  $\lambda$  は、 $R_{ez}$  の小さい場合は静止管の層流の値より常に大きく、 $R_{ew}$  が増すにつれますますます大きくなる。これは Strohl, Pedley の理論<sup>3),4)</sup> が示すように  $R_{ez}$  がある値以上では、管の高速回転は層流状態を維持させないためと考えられる。ただ  $R_{ew}$  一定でみれば、 $\lambda$  と  $R_{ez}$  との関係は  $\lambda_0$  と平行な直線関係にあり、図中に書き入れた実験式  $\lambda=31R_{ew}^{0.16}/R_{ez}$  によってうまく整理される。次に  $R_{ez}=3 \times 10^3$  付近の遷移域では  $R_{ew}$  がどの場合にも  $\lambda$  にほとんど差はなくほぼ一定で無回転時に近い値となる。これは前に述べた速度分布に対応するものである。 $R_{ez}$  が大きな乱流域での  $\lambda$  は管静止時の  $\lambda_0$  よりも減少し、特に  $R_{ew}=5 \times 10^4$  においては  $R_{ez}=10^4$  付近で層流の  $\lambda_0$  の理論値の延長線上に一致するまでに至っている。これは管回転による流れの安定化で乱れの抑制が飽和した結果とみられる。つまり、前項の速度分布形状の層流化とも合わせて、ここで乱流から層流への逆遷移が起こったとみてよい。

次に、旋回比に対する断面中心軸速度と管摩擦係数の変化およびそのつながりを  $R_{ez}$  を絞って詳細に調べてみた。Fig. 10 は断面中心軸速度の無次元値  $v_z/V_m$  を、

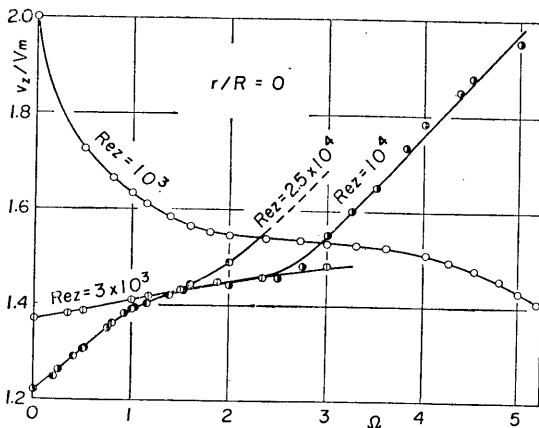


Fig. 10 Variations of the velocity of the center

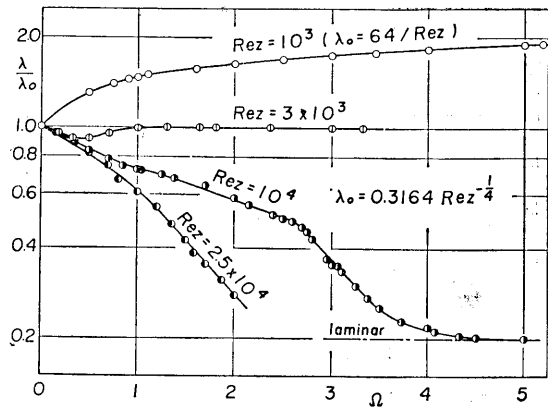


Fig. 11 Variations of the ratio  $\lambda/\lambda_0$

Fig. 11 は無回転時の管摩擦係数  $\lambda_0$  に対する  $\lambda$  の比率  $\lambda/\lambda_0$  の変化を示す。なお  $R_{ez}=10^3$  場合の  $\lambda_0$  は層流の理論値を他は Blasius の式を使用した。まず  $R_{ez}=10^3$  では  $\Omega$  の小さなところで中心速度が急減し、そのとき  $\lambda/\lambda_0$  は急増する。その後はどちらもゆるやかな変化となる。すなわち、わずかな回転によって層流はくずれるが、その後の回転数増加に対してはそれほど急激な変化はない。 $R_{ez}=3 \times 10^3$  では両者ともに大きな変化はしない。ここでの測定範囲では10%以内の変化におさまっている。 $R_{ez}=10^4$  の場合、 $\Omega$  が大きくなるほど中心速度は増加し、 $\lambda/\lambda_0$  は減少する。この変化をよくみると、 $\Omega$  が0から1まではやや急で、そこから  $\Omega$  が3近くまではいったんゆるやかになったのち再び急な変化をしている。特に、後半の中心速度の変化は直線的で  $\Omega=5$  付近で実質的に層流の値となる。また途中でゆるやかな変化をするときのようなすは、 $R_{ez}=3 \times 10^3$  の遷移域における変化とちょうど重なっており、まさに乱流から層流への逆遷移過程の中にあることを示している。 $R_{ez}=2.5 \times 10^4$  でも  $10^4$  の場合とよく似た変化が見られ、 $v_z/V_m$  の増加割合および  $\lambda/\lambda_0$  の減少割合がほぼ同じ勾配をもつことから、これら乱流域での管回転の影響に相似性がうかがえる。

### 4.4 速度変動

逆遷移現象がみられる  $R_{ez}=10^3$  において、熱膜プローブにより速度変動の波形を調べたのが Fig. 12 である。測定位置は管中心である。旋回比の増加とともに周期の短い乱れはおきまり、また乱れの振幅も小さくなっているのがわかる。Fig. 13 には乱れ強さを表したが、 $\Omega$  が3以上で乱れ強さは減少している。これは Fig. 10 と比較して管中心の軸速度が後半の直線的な変化をするところに相当している。したがって、回転による乱れの抑制効果は特に旋回比が3以上において顕著となることがわかった。

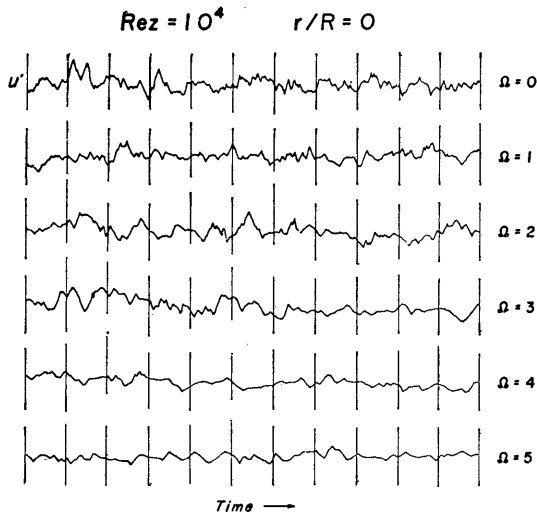


Fig. 12 Representative oscillograph traces

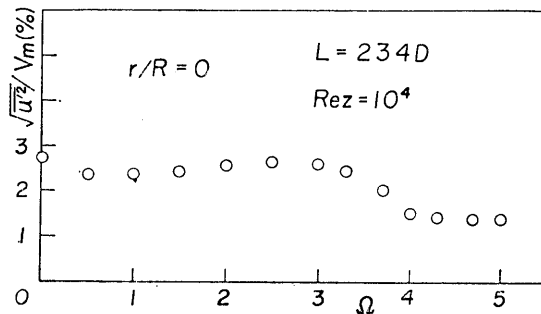


Fig. 13 Root-mean-square turbulence-velocity component

## 5. あとがき

自軸まわりに回転している円管内の流れを、可視化観察、速度分布、圧損特性そして速度変動の各々について実験的に調べ、それらの関連について考察した。得られた結果は以下のように要約することができる。

(1) 流れの可視化観察により、層流域で流れの不安

定化、乱流域で安定化の作用を及ぼす管回転の影響をはっきりと確認できた。

(2) 外径1mm円筒ビート管を使用して、速度こう配の急な場合や層流化現象時の流速分布の変化を正確にとらえることができた。特に逆遷移現象時の変化は圧損特性とよく対応した。

(3) 回転管内の周速度分布は、軸レイノルズ数が大きいくほど凹形のわん曲を強めある放物分布へと近づく。

(4) 回転による乱れの抑制が熱膜流速計による測定で実証された。

最後に、終始適切な御指導ならびに御助言をいただいた山田豊教授(生産機械工学科)に感謝の意を表します。また、実験に協力してもらった木下敬介君(現松下電器産業㈱)、酒井誠君(現川崎重工㈱)の両君に感謝します。

## 文 献

- 1) Reynolds, O., *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 174 (1883), 935.
- 2) 山田・渡辺, 日本機械学会論文集, 38-311(昭47-7), 1773.
- 3) Pedley, T.J., *J. Fluid Mech.*, 35-1 (1969), 97.
- 4) Strohl, J. and Lavan, Z., *ARL Rep.*, 69-0174 (1969-10).
- 5) Nagib, H.M., ほか3名, *ARL Rep.*, 69-9176 (1969).
- 6) White, A., *J. Mech. Engng. Sci.*, 6-1 (1964), 47.
- 7) Shchukin, V. K., *J. Engng. Phys.*, 12-6 (1967), 782. (in Russian)
- 8) Cannon, J. N. and Kays, W.M., *Trans. ASME, Ser. C*, 91-1 (1969-2), 135.
- 9) 村上・ほか4名, 日本機械学会論文集, 42-358 (昭51-6), 1784.
- 10) 山田・今尾, 日本機械学会論文集, 46-409B(昭55-9), 1662.