

回転管内の乱流特性

岐阜大学工学部 今尾茂樹 (Shigeki Imao)

回転管内の乱流構造を調べ、乱流特性に及ぼす管の回転の影響を実験的に解明した。前方散乱型の 1 次元 LDV を用い、レイノルズ数 $Re=20000$ における回転管内の速度とレイノルズせん断応力を測定した。その結果、管が回転すると遠心力による流れの安定化の作用で、乱れ強さは減少するもののその割合は少ないこと、それに比べてレイノルズせん断応力は著しく減少することがわかった。そして、速度変動の歪み度、扁平度、パワースペクトルからこの流れの乱流特性を明らかにした。また、実験結果から Bradshaw の示した混合距離とリチャードソン数との間の関係を検証した。

1. まえがき

円管内乱流に管軸まわりの旋回が加えられた場合、管から流体に旋回速度成分が与えられ、管内の速度分布および乱れ特性は静止管の場合とは異なったものとなる。このような旋

回流の解明は，回転機械の流入部の流れを知る上で重要であり，また実験データは計算コードの検証にも役立つ．

回転管における圧力損失と平均速度分布については，著者を含めいくらかの研究者によって調べられている．これまでの実験によれば，管の回転はレイノルズ数に依存して安定化と不安定化の相反する作用を及ぼす．図 1 は回転管における発達流の管摩擦係数を示す(Imao 1981)．レイノルズ数が小さく流れが層流のとき，管の回転は流れを不安定化させ，らせん波動を発生せしめ，層流は維持されない(Imao et al. 1992)．一方，乱流域では，管の回転は流れを安定化させ，摩擦損失

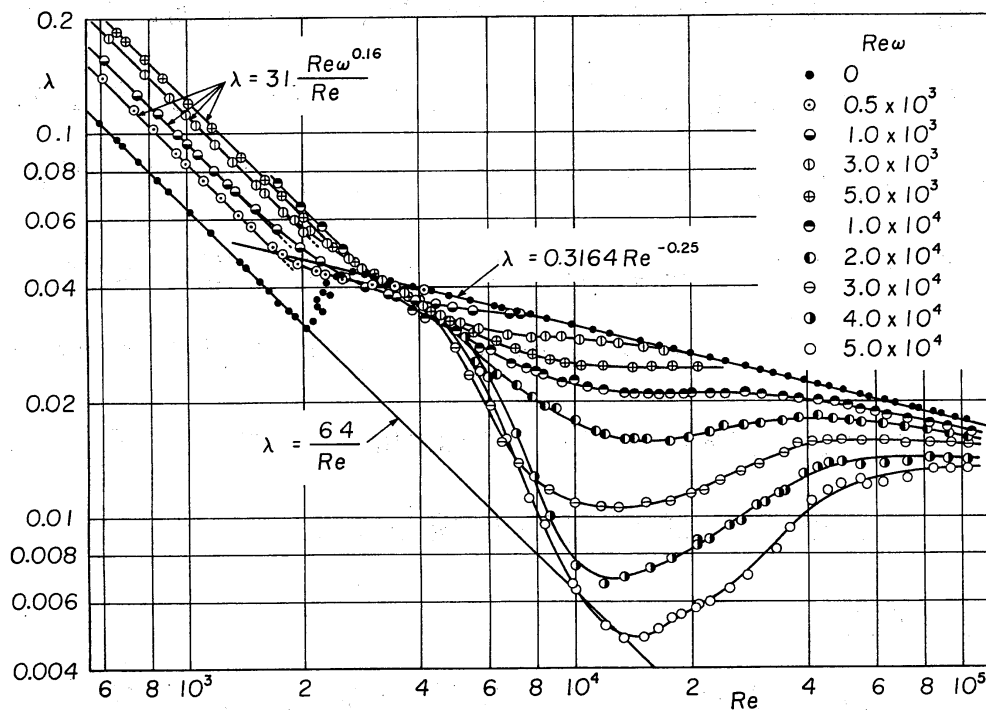


Fig. 1 Friction factor

を減らし，軸速度分布を層流の分布に近づける(White 1964, Murakami and Kikuyama 1980, Imao 1981). 本研究は後者の乱流域での安定化の影響について調べたものである.

回転管内の乱流境界層については，Kikuyama et al. (1983a)が熱線プローブを使って時間平均速度とレイノルズ応力成分を測定した. その結果，回転管内の乱れ強さが最終的に静止管の値よりも減少することを示した. また Kikuyama et al. (1983b)はリチャードソン数を使った混合距離モデルで層流化現象の予測を試みた. Hirai et al. (1988)は3種類の乱流モデルを使って数値計算を行い，平均速度分布を実験値と比較した. 旋回による流れの安定化の機構を説明し，乱流モデルの旋回流への適応性を調べるためには，速度分布と応力成分の一貫した測定データの提供が望まれる. しかしながら，回転管内で発達した流れの乱れ構造についてはこれまで一度も測定された例がなく，不明のままである. そこで本研究では，レーザドップラ流速計 (LDV) を用いて，回転管内の平均速度分布，レイノルズ応力5成分の分布，各成分の速度変動を測定した. これらの測定は，使用流体の屈折率を回転管の材質であるアクリルと同一にすることで初めて可能となった. ここで得られた結果は，旋回流に関する分野の研究者に有用なデータを与え，遷移および乱流構造についての一般的問題解決の助け

になると思われる。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 2 に示す。循環方式を採用し、ホーニング加工された内径 30.0mm のステンレス管を回転管に用いた。ポンプから出た流体は 180° ベンドを通過して整流部へ入る。金網によって旋回速度成分を除去し、面積比 11 : 1 のノズルを通すことによって、流体は一様な速度分布で回転管に流入する。回転管入口から測定部までの距離は、整流部を移動することで変更可能である。図 3(a) は測定部詳細を示す。

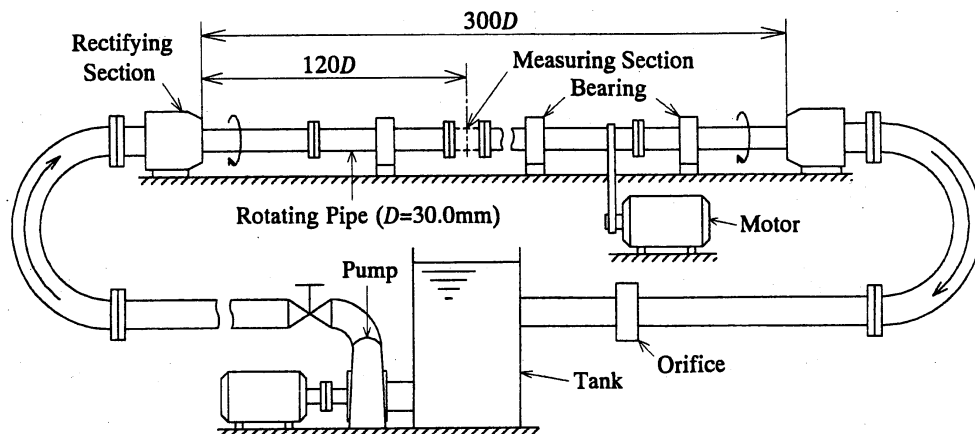


Fig. 2 Experimental apparatus

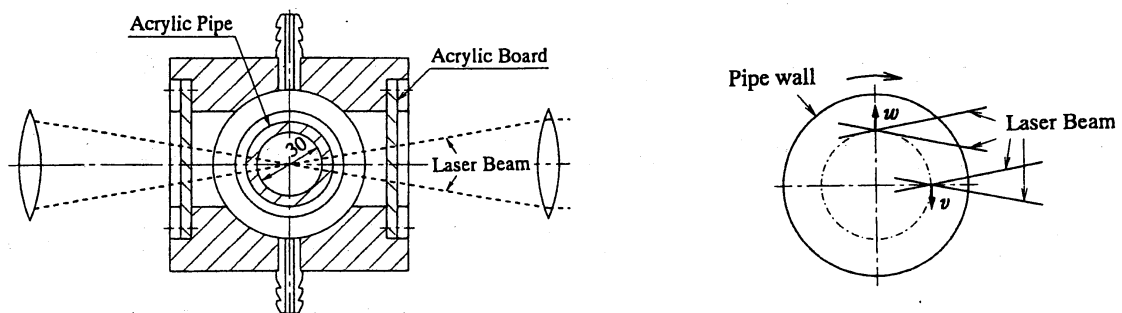


Fig. 3 (a) Details of measuring section (b) Measurement of v and w

測定部は同一内径の透明なアクリルパイプでできており、四角い容器の中に入れられている。測定部と外の容器との間は使用流体で満たされている。使用流体にはアクリルと同じ屈折率を有するヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いた。図 3 (b)は周方向および半径方向速度の測定方法を示す。流体と容器の屈折率が異なっているとこれらの速度成分の測定はできない。光学系の前後上下の移動には、マイコンとパルスモータを使用した。使用した LDV は He-Ne レーザの 1 次元前方散乱システムである。焦点距離 120mm のレンズを用い、測定体積は直径約 0.1mm、長さ約 0.5mm である。空間分解能が測定体積の向きによって多少異なるが、軸方向速度成分を水平方向と垂直方向に断面を横切ってそれぞれ測定し比較したところ、両者に違いはほとんど見られず、また管内には特に急な速度こう配が存在しないため、空間分解能に問題はない。周波数シフトには Bragg セルを用いた。1 次元の LDV で各速度成分を求めるには、レーザビーム面（測定面）を 0° , $\pm 45^\circ$, 90° 回転させて測定すればよい。こうして軸方向、周方向、半径方向の各速度成分とレイノルズ応力成分 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$, $\overline{uw}$, $\overline{uv}$ を求めた。LDV からの信号は周波数カウンタで処理し、そのデジタル出力をマイコンで処理した。一般に LDV で得られる信号は連続信号と見なせない。しかしながら、本研究

での速度変動の周波数は低い上に、測定体積を通過する粒子の数が多いため、十分連続信号として扱える。

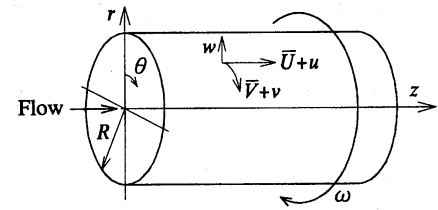


Fig. 4 Coordinate system

測定は管入口からの距離 $z/D=120$ において、軸レイノルズ数 $Re=20000$ ，回転比 $0 \leq N \leq 1$ の範囲で行った．座標系を図 4 に示す．

3. 実験結果およびその考察

3.1 平均速度分布

まず回転管内の平均速度分布を 6 断面 ($z/D=30, 60, 90, 120, 150, 180$) において測定した．その結果，本実験条件下では $z/D=120$ において流れが十分発達していることを確認した．図 5 は $Re=20000$ ， $z/D=120$ における平均速度分布を示す．図中，軸および周速度は平均軸速度と管壁の速度で無次元化し，半径位置も管半径で無次元化して表した．管が回転すると，安定化の作用で中心付近の速度は増速し壁近くの速度は減速し，分布は層流の分布に近づく．これは回転比が大きいほど顕

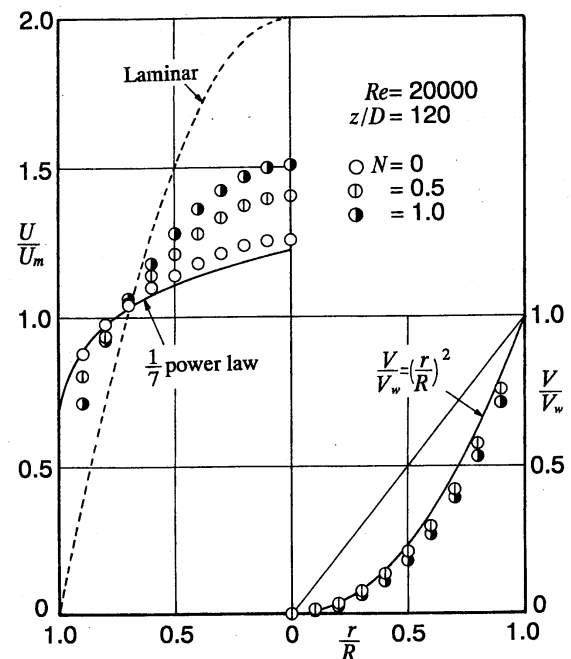


Fig. 5 Time-mean velocity profiles

著である．図 1 の管摩擦係数の測定結果では， $Re=20000$ において λ の値は静止管に比べて $N=0.5$ で 20 %， $N=1$ で 40 % 減少している．周速度分布は，流れが十分発達しても剛体回転とはならず，放物線分布 $V/V_w=(r/R)^2$ に近いものとなっている．この事実は，流れが十分発達しても周方向のせん断応力が管壁に作用していることを示している．

3.2 レイノルズ応力

レイノルズ応力成分の測定精度を確認する意味で，まず静止管内乱流の測定を行い，Laufer(1954)，Lawn(1971)の結果と図 6 に比較した．図中， U_τ は圧力損失の測定値から求めた摩擦速度である．各成分とも非常に良い一致を示し，本測定の精度および信頼性に問題のないことがわかる．図 7 は回転管内流の乱れ強さの分布を示す．管静止時に比べて，回転時には乱れ強さが減少するもののその割合は少ない．3 成分の中で最も減少率の大きいものは半径方向成分であり，これは管の回転が半径方向成分を最も抑制していることを示している．図 8 は乱れエネルギーの分布を示す．回転時の乱れエネルギーは，静止時よりもすべての半径位置で減少している．ここで次式で定義する全乱流エネルギー流束を計算してみると，その値は回転比の増大とともに単調に減少し， $N=1$ において 18 % 減少していることがわかった．

$$T_w = \int_0^R \frac{1}{2} \rho q^2 \cdot U \cdot 2\pi r dr \quad (1)$$

一方，図 1 の管摩擦係数の変化を見ると，回転比が 3 以上において層流化または逆遷移が顕著になっている．したがって，乱れ強さは回転比がより大きな状況において著しく減少することが予想される．

乱れ強さに比べ，乱流せん断応力は，図 9 に示すように管が回転すると顕著に減少する．管壁に平行な面に作用する成分 $\overline{uw}$ は回転比の増加とともに断面全域でほぼ同一の割合で減少しており， $N=1$ では静止管の場合の約 1/3 にまで減少している．さらに詳しく調べてみると， $\overline{uw}$ 成分は回転比の増加とともに直線的に減少していることがわかった．一方， $\overline{uv}$ は回転比の増大とともに符号が負となり，その絶対値が増加している． $\overline{uv}$ が負になる定性的な説明は次のように考えられる．回転管内の流れでは，図 5 に示すように，軸方向平均速度 U は管中心から壁面に向かって単調に減少し，逆に周方向平均速度 V は単調に増加する．したがって U と V の速度勾配の符号が逆であり，回転管内乱流場において流体塊の半径方向の相互移行を想定した場合，一方の流速成分が増加するとき他方は減少し，軸方向と周方向の速度変動 u と v の相互相関値 $\overline{uv}$ は負になる傾向となる．輸送方程式から考えると，せん断応力 $\overline{uw}$ の生成項は， $-\overline{w^2} \partial U / \partial r + \overline{uv} V / r$ と表され，

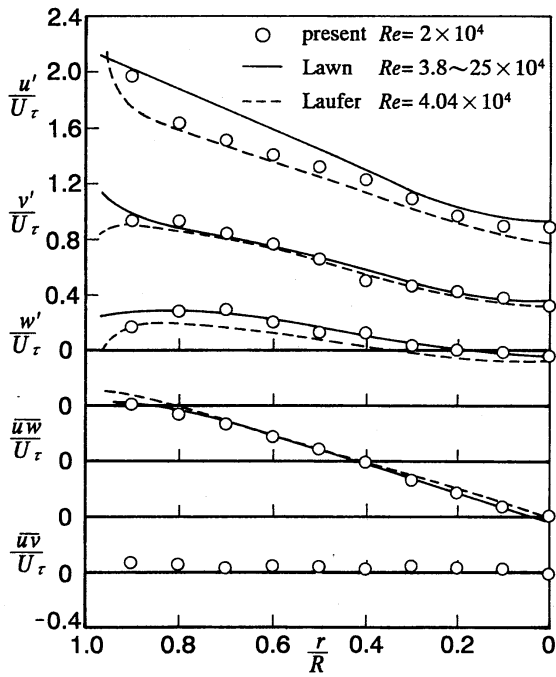


Fig. 6 Reynolds stress profile in a stationary pipe

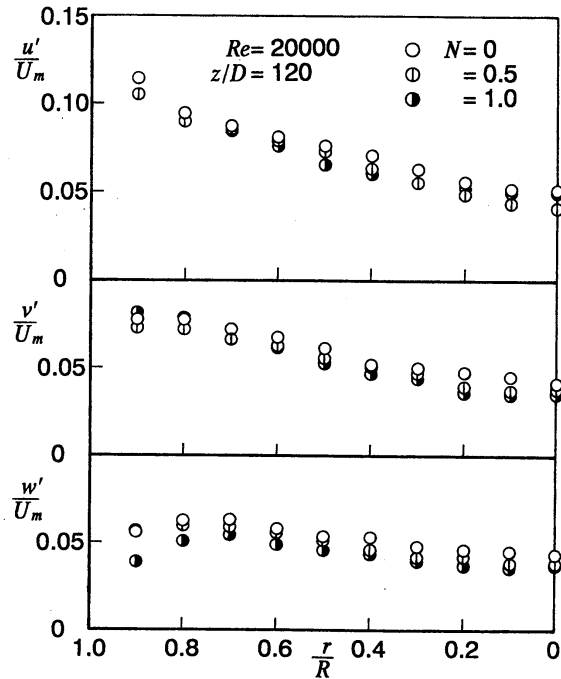


Fig. 7 Turbulence intensity

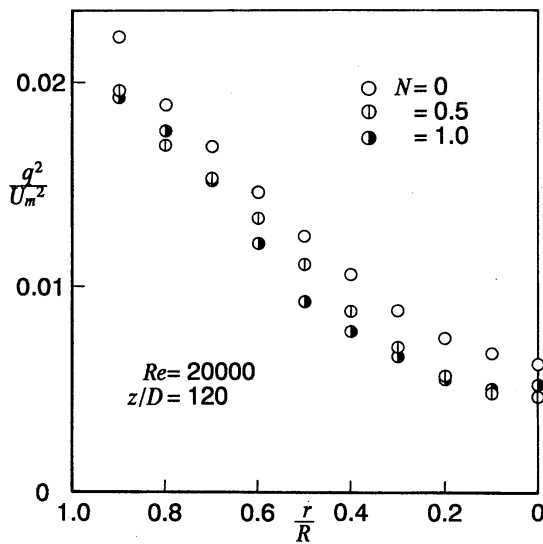


Fig. 8 Turbulent energy

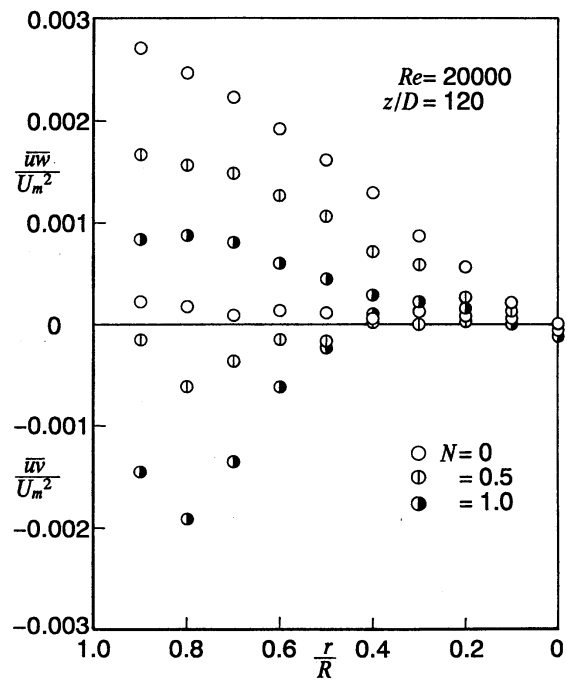


Fig. 9 Turbulent shear stress

第2項が負となるため $\overline{uw}$ が減少することになる。

図10は、壁面に平行なせん断応力と乱れエネルギーの2倍の値との比、いわゆる構造パラメータを示す。ここでは流れが十分発達しているので $\overline{vw}$ 成分は0とした。 $0.5 \leq r/R \leq 0.8$ の領域ではほぼ一定となる $\overline{uw}/q^2$ の値が、回転比の増加とともに著しく減少しており、乱れエネルギーよりもせん断応力が抑制されていることがわかる。

3.3 混合距離

図11は実測のレイノルズ応力 $\overline{uw}$ と速度勾配 dU/dr から求めた混合距離の分布を示す。回転比の増大とともに混合距離は著しく減少する。このことから、回転管では乱れによる

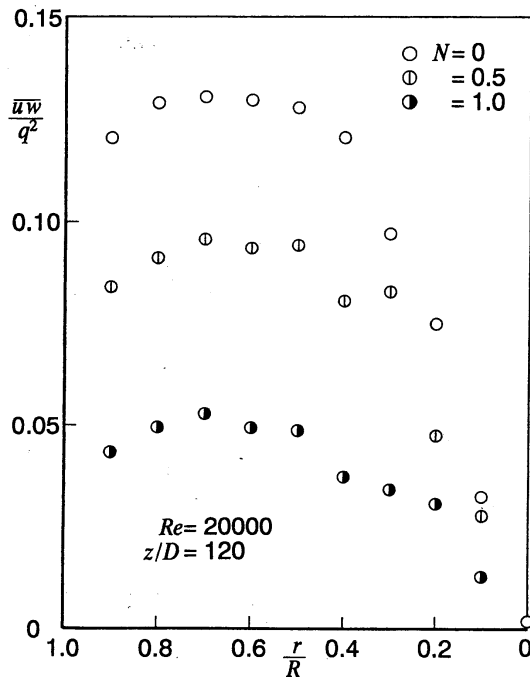


Fig. 10 Structure parameter

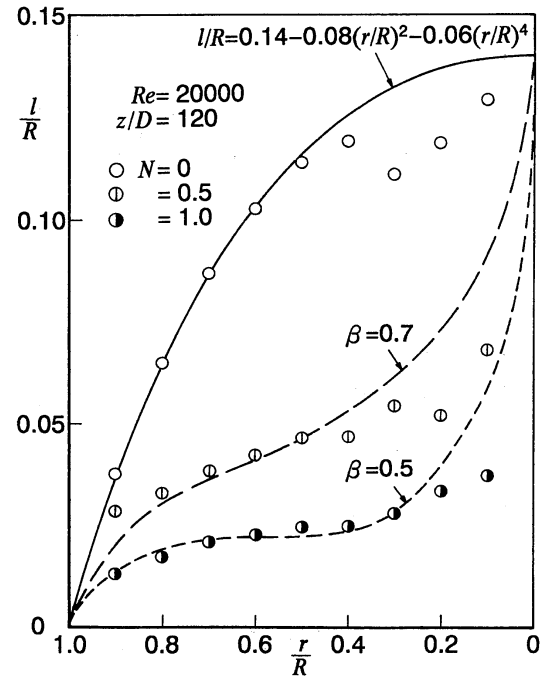


Fig. 11 Mixing length

運動量輸送が抑えられ、流れが安定化していることがわかる。Bradshaw は、浮力と遠心力の影響の類推から、旋回流における混合距離を次式で表した。

$$l = l_0 (1 - \beta Ri) \quad (2)$$

ここで β は定数、 l_0 は静止管における混合距離、 Ri は次式で定義される勾配リチャードソン数である。

$$Ri = (2V/r^2)(rV)/r / [(\partial U / \partial r)^2 + \{r \partial (V/r) / \partial r\}^2] \quad (3)$$

回転管内では、角運動量 rV の値は r とともに増加するため Ri は正となる。 Ri が正ということは流れが安定であることを示している。式(3)で求めた Ri の値を用い、 $N=0.5$ と 1.0 の場合の混合距離を計算し、実験結果と比較した。ここで、Monin-Oboukhov の関係式中の定数 β はそれぞれ 0.7 と 0.5 とした。この値は他の回転流路において報告された値 ($\beta = 2 \sim 7$) に比べて非常に小さい。計算値は実験値とよく一致している。

3.4 速度変動

図 12 は軸方向、周方向、半径方向それぞれの速度変動波形を示す。前に述べたように乱れ強さの減少は $N=1$ においてもそれほど顕著ではなかったが、変動波形には明らかな違いが見られる。管が回転すると、軸速度変動 u は、管中心部で高周波成分が減少し低周波成分が増加しているが、管壁近くでは逆に高周波成分が増加し低周波成分が減少している。

これはパワースペクトルからも容易に確認できた．周方向速度変動 v は，管の回転により，どの半径位置においても高周波成分が減少するが，特に壁近くでかなり周期的で振幅の大きな低周波の変動を含んでいる．その周期は管の回転周期よりもかなり長い．周方向の速度成分だけにこのような変動が現れる理由は今のところ明らかではないが，層流域で回転を加えたときに見られたらせん波動のような大きなスケールを持った構造が，流れの安定化の過程において生じたのではな

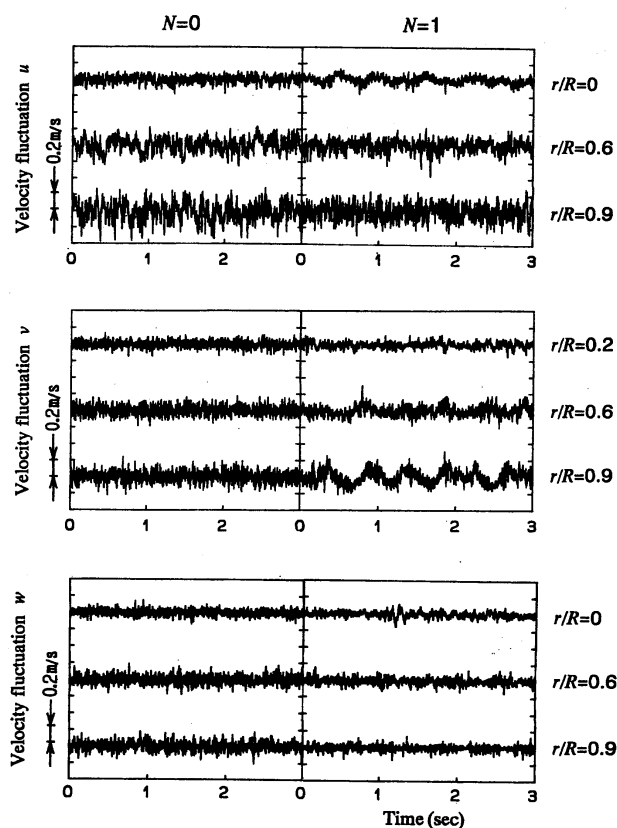


Fig. 12 Time records of velocity fluctuation

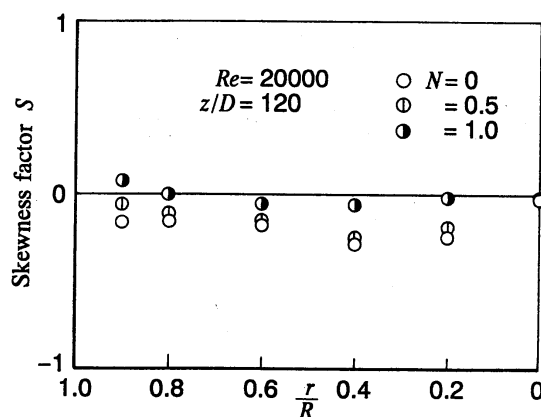


Fig. 13 Skewness factor

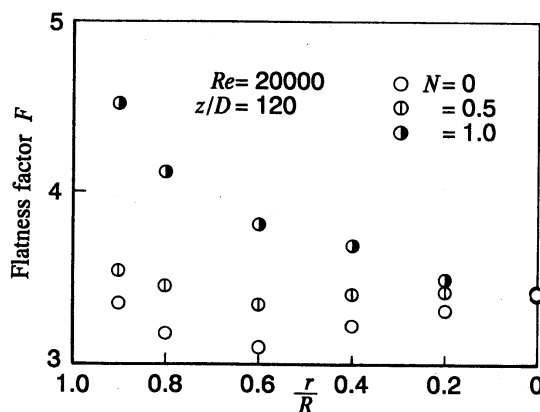


Fig. 14 Flatness factor

いかと考えられる．半径方向速度変動 w は，3成分の中で最も抑制される．変動波形はこの事実をよく示している．この乱れの抑制過程を半径方向速度変動について，歪み度 S と扁平度 F により明らかにした．図 13, 14 は歪み度と扁平度の変化を示す．回転比の増大とともに歪み度 S はすべての半径位置で 0 に近づく．これは ejection や sweep のような突発的な運動が抑えられていることを示している．また扁平度 F は回転比の増大とともに管内の外側ほど増加している．これは安定化の作用で変動が間欠的になっていることを物語っている．

4. 結 論

軸まわりに回転する円管内で十分に発達した乱流の乱れ構造を実験的に明らかにし，以下の結論を得た．

- (1) 回転比の増大とともに，いずれの方向の乱れ成分も減少するが，その変化はそれほど顕著ではない．乱れの3成分の中では，半径方向成分が最も抑制される．
- (2) 乱流せん断応力は管の回転により著しく抑制され，乱流運動による運動量輸送は抑えられる．
- (3) 著しく減少する混合距離は，1より小さい係数 β とリチャードソン数を用いて表される．
- (4) 回転管内では，壁近くで低周波の変動が抑えられるが，

周方向速度にはやや規則的な低周波の変動が加わる。

- (5) 乱れの抑制過程を速度変動の歪み度と偏平度から明らかにした。

記 号

D : 管内径, 30 mm	l : 混合距離
N : 回転比, V_w/U_m	r : 半径位置
R : 管半径, $D/2$	Re : レイノルズ数, DU_m/ν
Ri : リチャードソン数, 式(3)	
U, V : 軸方向, 周方向平均速度	
u, v, w : 軸方向, 周方向, 半径方向変動速度	
U_m : 平均軸速度	V_w : 管壁周速度
z : 管入口からの距離	λ : 管摩擦係数

文 献

- Bradshaw, P., 1969, *J. Fluid Mech.*, **36**-1, 177.
- Hirai, S., Takagi, T., and Matsumoto, M., 1988, *J. Fluids Eng.*, **110**, 424.
- Imao, S., 1981, *Bull. Nagoya Inst. Tech.*, **33**, 153.
- Imao, S., Zhang, Q., and Yamada, Y., 1989, *JSME Int. J. Ser. II* **32**-3, 317.
- Imao, S., Itoh, H., Yamada, Y., and Zhang, Q., 1992, *Exper. Fluids*, **12**, 277.
- Kikuyama, K., Murakami, M., and Nishibori, K., 1983a, *J. Fluids Eng.*, **105**, 154.
- Kikuyama, K., Murakami, M., Nishibori, K., and Maeda, K., 1983b, *Bull. Japan Soc. Mech. Eng.*, **26**, 506.
- Laufer, J., 1954, *NACA Tech. Rep.* 1174.
- Lawn, C. J., 1971, *J. Fluid Mech.*, **48**, 477.
- Murakami, M. and Kikuyama, K., 1980, *J. Fluids Eng.*, **102**, 97.
- White, A., 1964, *J. Mech. Eng. Sci.*, **6**, 47.