

# 弾性管内流れの乱流遷移に関する研究

福原 稔・野崎 勉・松山 義和・  
村田 浩一・石原田秀一・大山 謙二  
(受理 平成8年5月31日)

## Study on Turbulent Transition of Flow in Flexible Tube

Minoru FUKUHARA, Tsutomu NOZAKI, Yoshikazu MATSUYAMA  
Hirokazu MURATA, Shuichi ISHIHARADA and Kenji OYAMA

In order to clarify the effects of a tensile force on the turbulent transition of the flow in a flexible tube, the fluctuating velocity in the center of a flexible tube and the fluctuating displacement on its outer-wall surface were measured. As a result, the transition Reynolds number becomes about  $6 \times 10^3$  when the length of flexible tube extends its natural length by 0.5% and about  $8 \times 10^3$  when it extends by 1.2%. Therefore, it is concluded that a tensile force of a flexible tube influences turbulent transition. Furthermore, the fluctuating velocity is closely related to the fluctuating displacement. From the results of frequency characteristics, both values are generally classified as those in laminar, transition and turbulent zones. Especially, the band of the low frequency contributes in the transition zone.

### 1. まえがき

摩擦抵抗を軽減することは工学的に重要な問題の一つである<sup>1)~3)</sup>。著者らは弾性管(しなやかな壁)に着目し、これまで供試管に流入する流れが定常流の場合、弾性管内流れの摩擦抵抗が剛体管内流れのそれに比べて小さくなることを示すとともに、その要因について圧力<sup>4)</sup>、変位<sup>5)</sup>および速度<sup>6)</sup>の変動特性から抵抗軽減現象のメカニズムの解明を行ってきた。また、供試管に流入する流れが脈動流の場合<sup>7)</sup>、管摩擦係数に及ぼす脈動周波数および振幅の影響についても明らかにした。

流れの不安定性、特に乱流遷移については、遷移レイノルズ数が増加すれば乱流化が抑制でき、摩擦抵抗を大幅に軽減できることから興味深い問題である。弾性管内流れの乱流遷移の遅延問題として、Landahl<sup>8)</sup>およびCarpenter<sup>9)</sup>などが理論的に解析しているが、乱流遷移の有無についてその結果はまちまちである。

一方、荒川ら<sup>10), 11)</sup>は実験的に解析し、肉厚および管長の影響により乱流遷移が遅れると報告している。このように乱流遷移に影響を与える因子が種々ある反面、報告された例が少ないことから、これまで明確な結論は得られていない。現時点では、種々の条件についてデータの収集を行うことが必要であろう。

そこで本報では、弾性管の管軸方向へ張力を加えた場合について乱流遷移の遅延の有無について実験的に調査した。前報で述べた乱流領域において抵抗軽減した弾性管を用いることにより、層流領域から乱流領域へ遷移する過程について管中心における速度変動特性を計測し、間欠率から遷移領域を求めた。また、管外壁の変位変動特性を同時計測し、速度変動特性との関係についてFFTアナライザーを用いた周波数特性の解析結果から検討を行った。

### 2. 記号

$D_i$  : 弾性管の管内径(静止流体時) mm

- $d$  : 変動変位  $\mu\text{m}$   
 $E_d$  : 変動変位の全帯域エネルギー  $\mu\text{m}$   
 $E_v$  : 変動速度の全帯域エネルギー  $\text{m/s}$   
 $f$  : 周波数  $\text{Hz}$   
 $L$  : 弾性管の自然長  $\text{m}$   
 $\Delta L$  : 弾性管の管軸方向に張力を加えた場合の伸び量  $\text{m}$   
 $Re$  : レイノルズ数  
 $S_d$  : 変動変位のパワースペクトル  $\mu\text{m}$   
 $S_v$  : 変動速度のパワースペクトル  $\text{m/s}$   
 $t$  : 時間  $\text{sec}$   
 $V_{\text{mean}}$  : 平均速度  $\text{m/s}$   
 $v$  : 変動速度  $\text{m/s}$   
 $\gamma$  : 間欠率

### 3. 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略を示す。作動流体の水は、流量コントロールバルブ①を通り、サージタンク②内で乱れが減衰され、再びベルマウス③で加速整流された後、水平に設置された弾性管④に流入する。そして、下流出口端の影響を受けないように設けたオーバーフロータンク⑨を通り、体積流量計⑩へ流出する。本実験では弾性管の管軸方向に対する張力の影響を調べるため、弾性管の下流端にアクリル管⑧を接続し、下流方

向に移動させた後、弾性管を固定支持することにより伸び量を調節することとした。ただし、張力については実測を行わず、ここでは伸び量によって表すことにした。つまり、弾性管の自然長  $L=5.91\text{ m}$  に対して伸び量  $\Delta L=3\text{ cm}$  および  $\Delta L=7\text{ cm}$  の2種類について変化させた。

弾性管は前報<sup>5)</sup>で用いた4種類のうち、乱流領域において抵抗減少量が最も大きい肉厚  $1.5\text{ mm}$  のシリコン管 (内径  $Di: 10\text{ mm}$ , ポアソン比:  $0.45$ , ヤング率:  $2.5 \times 10^6\text{ N/m}^2$ ) のみを用いた。弾性管の場合には、管内に水を流すことによって管内径が大きくなるが、前報と同様に静止流体中における管内径  $Di$  を代表寸法として用いることにする。ここで、管内の平均流速は体積流量計で流量を計測して求め、レイノルズ数は上述の値を用いて算出した。

実験では、流量を徐々に増加させ、層流領域から乱流領域に遷移する過程において速度および変位の変動特性を調べる。その速度はベルマウスから下流  $2\text{ m}$  の位置⑤で、サブミニチュアの1型熱膜プローブを用いて計測された。その測定断面概略を図2に示す。このセンサ (直径  $25\mu\text{m}$ , 長さ  $0.25\text{ mm}$  の白金フィルム) は管中心に設置されており、応答周波数は  $10\text{ kHz}$  である。センサーの出力信号は熱膜流速計を介してFFTアナライザーに入力される。また、変位は速度

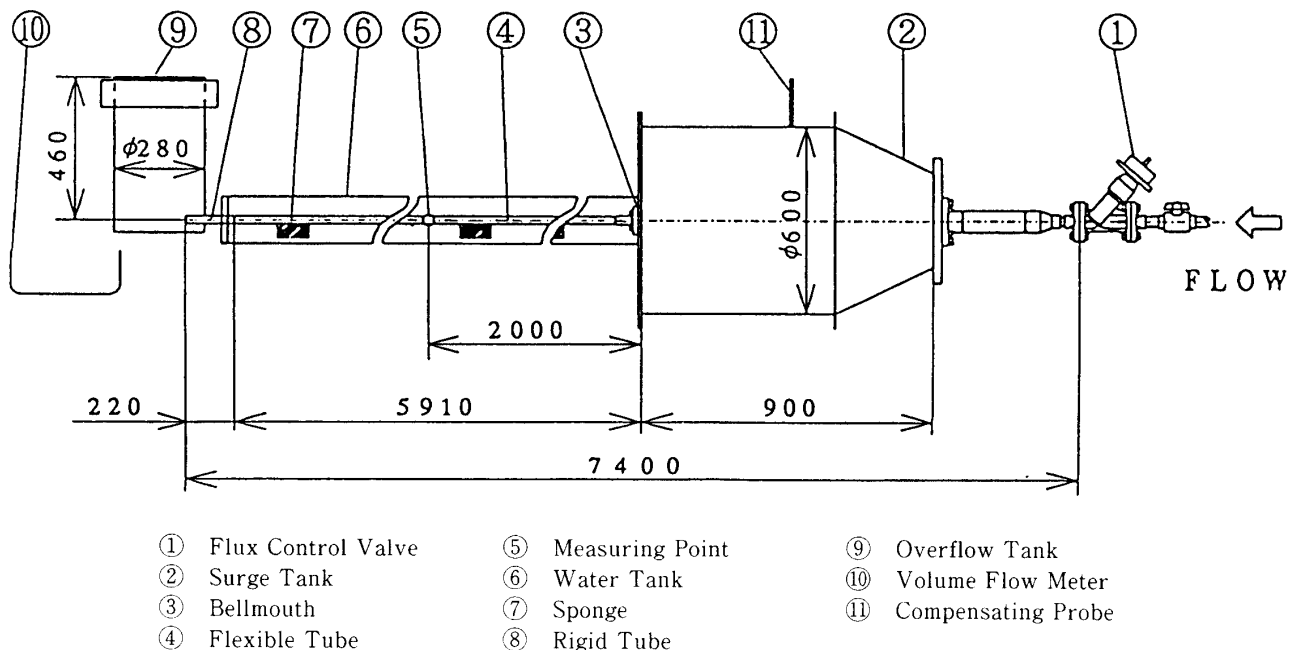
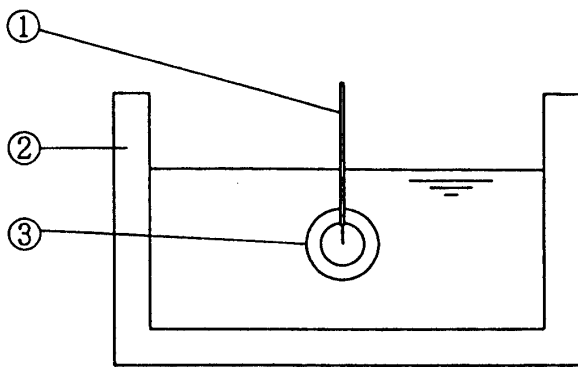


図1 実験装置概略図



- ① Probe
- ② Water Tank
- ③ Flexible Tube

図2 変動速度測定部の流路断面図

と同時刻に測定する必要があり、前述した熱膜プローブの挿入位置から上流 0.02 m の位置で光ファイバプローブを用いて計測された。供試管が水中にあり、しかも不導体である弾性管管外壁の変位を超精密で非接触式に計測しなければならないので、光ファイバ変位計を用いた。この装置の詳細については前報<sup>12)</sup>を参照いただきたい。このセンサーの応答周波数は 20 kHz である。センサーの出力信号は変位計を介して FFT アナライザーに入力される。時間軸波形のサンプリング時間は 256 sec とした。

変動速度および変動変位の周波数特性は FFT アナライザーを用いて解析され、ここではサンプリング回数を 128 とした。また、離散周波数成分の周波数領域に含まれる変動エネルギーに等価な量として、変動スペクトル分布中の全帯域に含まれる出力レベルを計測した。この量を本文中では全帯域エネルギーと呼ぶことにする。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 変動波形

まず、レイノルズ数  $Re$  を  $1.01 \times 10^4$  と一定にした場合を例にとり、乱流遷移の速度および変位の変動波形に及ぼす弾性管の軸方向に対する張力の影響を調べた。図 3 (a) および (b) は、それぞれ本実験条件である  $\Delta L/L = 0.5 \times 10^{-2}$  および  $\Delta L/L = 1.2 \times 10^{-2}$  における速度変動波形を示しており、横軸に時間  $t$  [sec]、縦軸に管中心における速度の瞬時値  $v$  [m/s] をとる。図 3 (a) の場合、全計測時間に対して乱れは大きくほ

ぼ一定であることから、完全に乱流の状態にあるといえる。一方、図 3 (b) の場合には乱れの小さい状態も存在し、層流の状態と乱流の状態を間欠的に繰り返しており、遷移過程にあるといえる。よって、弾性管の管長を自然長に対し 0.5 % 伸ばした場合よりも 1.2 % 伸ばした方が乱流遷移を遅らせていることになる。

図 4 (a) および (b) はそれぞれ図 3 (a) および (b) と同じ条件で、しかも速度変動波形と同時計測した場合の変位変動波形を示しており、横軸に時間  $t$  [sec]、縦軸に管外壁における変位の瞬時値  $d$  [ $\mu\text{m}$ ] をとる。図 4 (a) の乱流の状態では図 3 (a) と同様、急激な時間的变化は見られない。しかし、図 4 (b) の遷移過程では、図 3 (b) 中で層流の状態から乱流の状態に瞬時に変化する時刻において、変位の瞬時値が急激に増加していることがわかる。このことから、弾性管の乱流遷移過程において管中心の変動速度は管外壁の変動変位と密接に関係している。また、本実験では一例として管の張力を変化させ乱流遷移現象を調べたが、乱流遷移に影響を与える種々の条件の中で弾性管管壁の挙動を変化させれば乱流遷移を遅らせることができることを示唆している。

### 4.2 遷移領域

前節の各条件について、速度変動波形から得られる間欠率<sup>13)</sup>を用いて遷移領域を求める。この係数  $\gamma$  は全体の時間に対して乱流が占める割合をいい、完全に層流の場合には  $\gamma = 0$ 、乱流の場合には  $\gamma = 1$  で、遷移領域では  $0 < \gamma < 1$  である。それぞれ  $\Delta L/L = 0.5 \times 10^{-2}$  および  $\Delta L/L = 1.2 \times 10^{-2}$  における速度変動波形データより求めた間欠率の結果を図 5 に示し、横軸にレイノルズ数  $Re$ 、縦軸に間欠率  $\gamma$  をとる。図 5 からわかるように、遷移領域は  $\Delta L/L = 0.5 \times 10^{-2}$  の場合近似的に  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 8 \times 10^3$  となり、 $\Delta L/L = 1.2 \times 10^{-2}$  の場合  $8 \times 10^3 \leq Re \leq 12 \times 10^3$  となる。よって、弾性管の管長を自然長に対し 0.5 % 伸ばした場合よりも 1.2 % 伸ばした方が  $2 \times 10^3$  程度乱流遷移を遅らせている。また、遷移領域自体も  $2 \times 10^3$  程度拡大していることから、 $\gamma = 1$  となる  $Re$  は  $4 \times 10^3$  も遅延している。

### 4.3 変動パワースペクトル

つぎに、4.1 節で述べた変動波形について周波数解析を行い、速度および変位の変動パワースペクトルに及ぼす弾性管の軸方向に対する張力の影響を調べた。図 6 はその周波数特性の解析結果で、 $\Delta L/L = 1.2 \times$

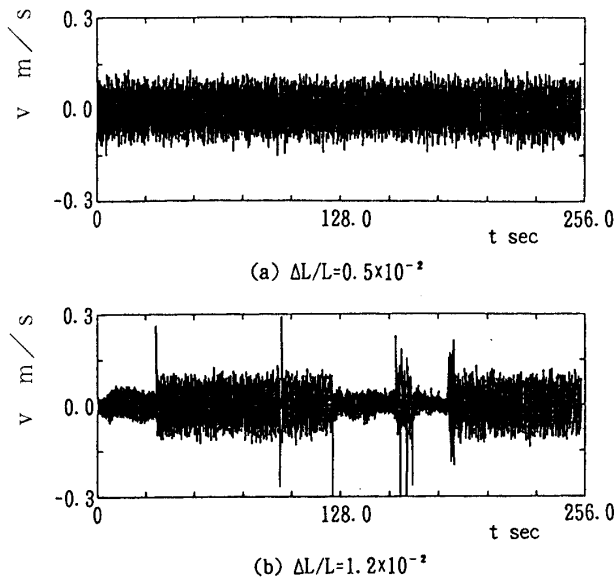


図3 速度変動波形

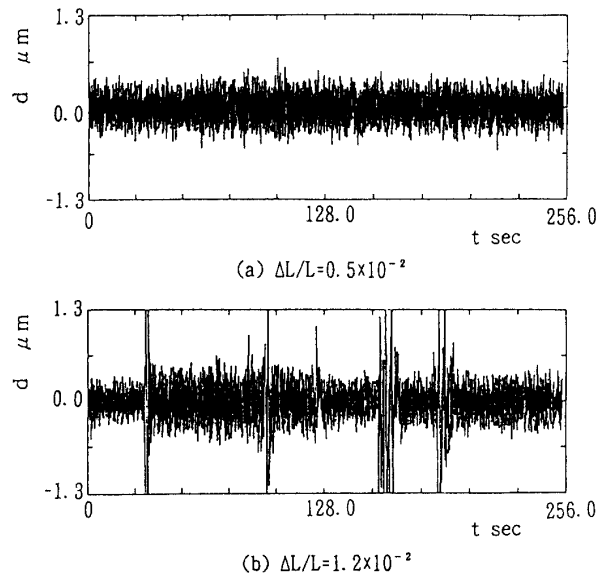


図4 変位変動波形

$10^{-2}$ における変動速度のパワースペクトル分布を示しており、横軸に周波数  $f$  [Hz]、縦軸にパワースペクトル  $S_v$  [m/s] をとる。図6に示すように、 $Re = 1.8 \times 10^3$  の層流領域ではパワースペクトルは全帯域にわたり小さい。 $Re = 6.1 \times 10^3$  では低周波成分から若干増加傾向が見られ、 $Re = 8.2 \times 10^3$  ではさらに不安定性が見られる。 $Re = 9.7 \times 10^3$  の遷移領域ではパワースペクトルの急激な増加が見られ、それから  $Re = 12.1 \times 10^3$  までは全帯域でやや減少傾向にあるが、50 Hz 以下の低周波数帯域では大きい値を示す。 $Re \geq 15.6 \times 10^3$  の乱流領域では、主流速度の増加に伴いパワースペクトルは増加するが、低周波数帯域では遷移領域とは異なりそれほど顕著な増加は見られない。

図7は、図6と同じ条件について変動変位のパワースペクトル分布を示しており、横軸に周波数  $f$  [Hz]、縦軸にパワースペクトル  $S_d$  [ $\mu\text{m}$ ] をとる。図7に示すように、 $Re \leq 6.1 \times 10^3$  の層流領域では 2 Hz 付近に卓越したピークが見られるが、その値は小さい。 $Re = 8.2 \times 10^3$  になると 20 Hz 以下では低周波数になるほどパワースペクトルは増加する。 $Re = 9.7 \times 10^3$  および  $10.9 \times 10^3$  の遷移領域ではパワースペクトルは全体的に大きくなり、特に 2 Hz 以下の低周波数帯域で高い値を示す。この現象は遷移領域の特徴であり、変動速度の低周波数帯域での増加傾向と密接な関係がある。 $Re = 12.1 \times 10^3$  ではこの低周波数帯域で減少し、

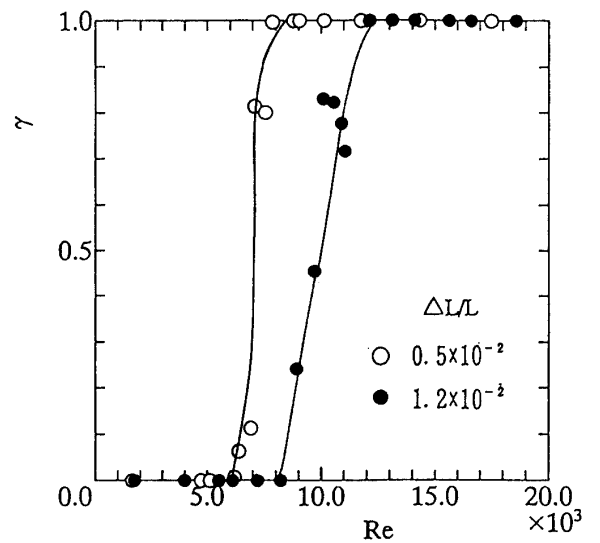


図5 間欠率

$Re \geq 15.6 \times 10^3$  の乱流領域ではパワースペクトルのピーク周波数は 6~8 Hz へ移行し、しかも広帯域で高い値を示すようになる。

このように  $\Delta L/L = 1.2 \times 10^{-2}$  の場合で述べた現象は、 $\Delta L/L = 0.5 \times 10^{-2}$  の場合においても定性的に同様であると言える (図略)。

#### 4.4 全帯域エネルギー

前節のパワースペクトル分布を定量的に評価するため、変動速度および変動変位の全帯域エネルギーに及

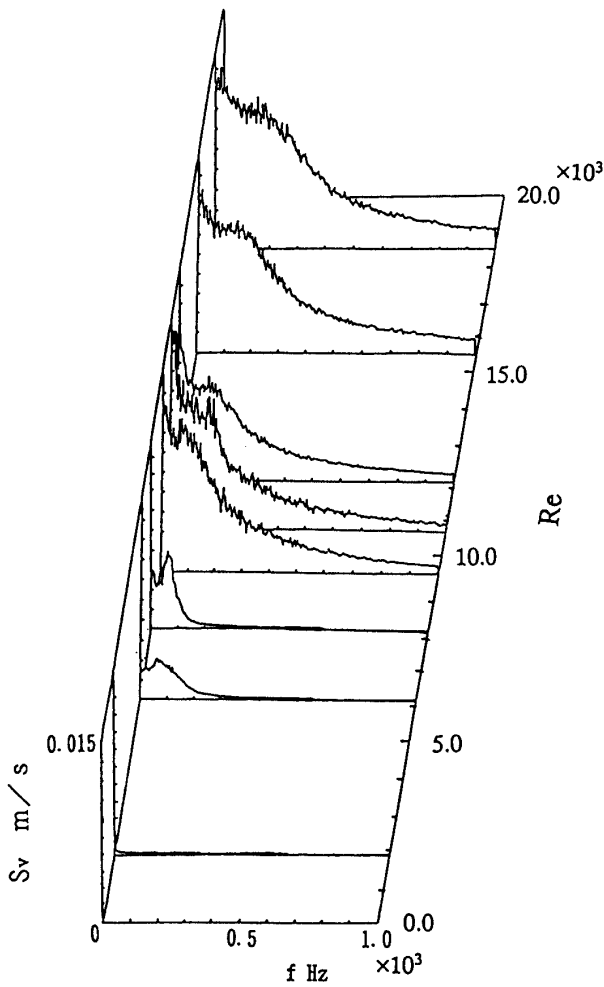


図6 変動速度のパワースペクトル分布

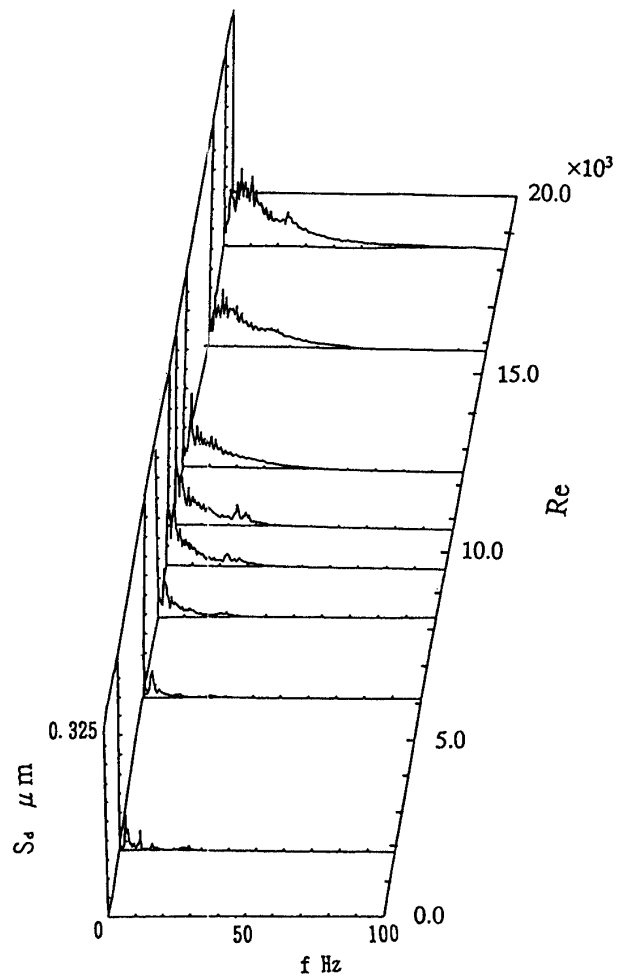


図7 変動変位のパワースペクトル分布

ばす弾性管の軸方向に対する張力の影響を調べた。図8は、それぞれ  $\Delta L/L=0.5 \times 10^{-2}$  および  $\Delta L/L=1.2 \times 10^{-2}$  における変動速度の全帯域エネルギーの解析結果であり、横軸にレイノルズ数  $Re$ 、縦軸に時間平均速度で無次元化した全帯域エネルギー  $E_v/V_{\text{mean}}$  をとる。図中に各条件において4.2節で求めた遷移領域を示している。図8からわかるように、レイノルズ数に対する全帯域エネルギーの分布から層流領域、遷移領域、乱流領域に大別できることがわかる。すなわち、 $E_v/V_{\text{mean}}$  の値は層流領域では2%程度、乱流領域では5%程度といずれも一定であるのに対し、遷移領域では変化しており、 $\gamma=0.5$  付近（図中に示す遷移領域の中点付近）を中心に正にピークを持っている。

図9は、それぞれ  $\Delta L/L=0.5 \times 10^{-2}$  および  $\Delta L/L=1.2 \times 10^{-2}$  における変動変位の全帯域エネルギーの解析結果であり、横軸にレイノルズ数  $Re$ 、縦軸に管

内径で無次元化した全帯域エネルギー  $E_d/D_i$  をとる。図8と同様、図中に各条件における遷移領域を示している。図9においても、図8と同様各領域に大別できる。つまり、レイノルズ数が増加するにつれ全帯域エネルギーは層流領域および乱流領域では単調に増加するが、遷移領域においては顕著な増加が見られる。速度変動特性と同様、 $\gamma=0.5$  付近を中心に増加している。このように変動変位と変動速度とは密接な関係がある。この要因は前節で述べた変動スペクトル分布からわかるように、遷移領域では低周波数帯域が寄与していることがわかる。

### 5. むすび

弾性管内流れの乱流遷移について、管中心の速度変動特性および管外壁の変位変動特性に及ぼす弾性管の軸方向に対する張力の影響を調べた結果、以下のよう

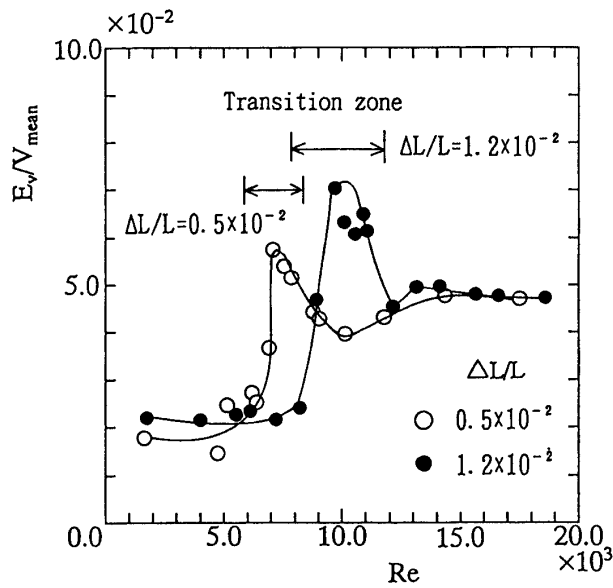


図8 変動速度の全帯域エネルギー

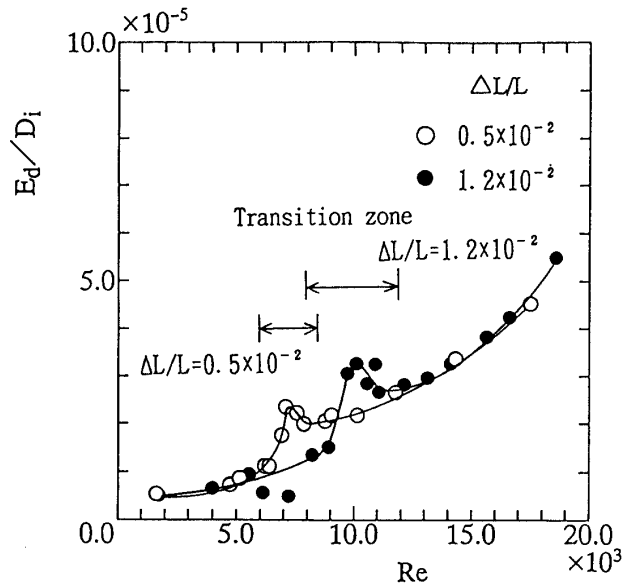


図9 変動変位の全帯域エネルギー

な結論を得た。

- (1) 遷移領域は、弾性管の管長を、自然長に対し0.5%伸ばした場合  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 8 \times 10^3$  となり、1.2%伸ばした場合  $8 \times 10^3 \leq Re \leq 12 \times 10^3$  となる。つまり、弾性管の管長を0.5%伸ばした場合よりも1.2%伸ばした方が  $2 \times 10^3$  程度乱流遷移を遅らせることができた。このことは、弾性管管壁の挙動を変化させれば乱流遷移を遅らせることができることを示唆している。
- (2) この変動速度は変動変位と密接な関係がある。それぞれの周波数特性の解析結果から、全帯域エネルギーは層流領域、遷移領域、乱流領域に大別できる。特に遷移領域では変動スペクトル分布の低周波数帯域が寄与していることがわかる。

終わりに、本研究の一部は平成8年度笹川科学研究助成金によったことを記して謝意を表す。

## 文 献

- 1) Hough, G.R., Viscous Flow Reduction, (1980), AIAA.
- 2) Bushnell, D.M. and Hefner, J.N., Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, (1990), AIAA.

- 3) Gyr, A., Structure of Turbulence and Drag Reduction, (1990), Springer-Verlag.
- 4) 福原・野崎・岩坪・有水, 機論, 59-568, B (1993), 3804.
- 5) 福原・野崎・岩坪・鈴木, 機論, 61-581, B (1995), 90.
- 6) 福原・野崎・鈴木, 機講論, No.940-30 (1994-8), 403.
- 7) 福原・野崎・河内山・小西・大山, 鹿児島大学工学部研究報告, 37 (1995), 13.
- 8) Landahl, M.T., J. Fluid Mech., 13 (1961), 609.
- 9) Carpenter, P.W., J. Fluid Mech., 218 (1980), 171.
- 10) 荒川・松信, 日本バイオレオロジー学会論文集, 5 (1982), 226.
- 11) Arakawa, M. and Matunobu, Y., Fluid Dynamics Research, 6 (1990), 107, North-Holland.
- 12) 福原・野崎・岩坪・鈴木・松山, 鹿児島大学工学部研究報告, 36 (1994), 11.
- 13) 生井・井上, 粘性流体の力学, 79, (1979), 理工学社.