

## 壁面噴流中に置かれた円柱からの渦放出

大坂 英雄\*・藤井 英樹\*\*・影山 芳郎\*

Vortex Shedding from a Circular Cylinder  
Placed in a Turbulent Wall Jet

Hideo OSAKA, Hideki FUJII  
and Yoshiro KAGEYAMA

### Abstract

Vortex shedding from a circular cylinder placed in a plane wall jet was estimated by measuring the fluctuating velocity component with hot-wire anemometer which was positioned in a wake behind the cylinder. Spectral analysis of hot-wire signals demonstrated that regular vortex shedding from the cylinder was appeared when the location of the cylinder axis was greater than 0.75 cylinder diameters, but that it became decayed gradually when the distance between the cylinder axis and the wall was greater than 80 mm. The Strouhal number was decreased by effect of the velocity gradient and exhibited lower value compared with the result of which the cylinder was placed in uniform flow. Approaching velocity of the lower side of the cylinder was adopted as the characteristic velocity in the formula of the Strouhal number and these results showed agreement with that of the cylinder in uniform flow. Spanwise scales of the shedding vortices were estimated from the integral length scale and these were almost close to the cylinder diameter.

### 1. ま え が き

本研究は乱流壁面噴流中に置かれた二次元円柱からの渦放出に関するものである。物体からの渦放出に関する研究は、flow-induced vibration<sup>1)</sup>に関連して大きな関心を持たれているが、そのほとんどが一様流中に物体が存在する問題に関するもので、非一様な流れ場や近接壁の影響を調べたものは比較的少ない。本研究で取り扱っている乱流壁面噴流は、他の剪断流に比べ局所位置によって速度勾配及び乱れ強さが大きく異なり、かつ壁面の影響も考慮すべき複雑な流れ場である。この中に置かれた円柱からの渦放出について調べる事は、これらの影響を評価するうえで有意義であると考えられる。

既報<sup>2)</sup>では、壁面噴流中に置かれた円柱に働く流体力及び円柱近傍の壁面圧力分布について報告した。こ

の結果、円柱前方よどみ点での圧力が最大となるような位置に円柱を設置した場合に抗力係数は最大、揚力係数は最小値をとる事が明らかとなった。また、速度勾配は揚力係数に、乱れ強さは抗力係数に影響を与え、事が確認された。

本報告では、既報<sup>2)</sup>で現われていた挙動と渦放出との関連や、速度勾配、乱れ強さ及び壁面の円柱からの渦放出への影響を調べる事を目的としている。実験は、既報<sup>2)</sup>と同一の3種類の直径の円柱を用い、これらを壁面噴流中に設置した場合について、円柱の後流中に熱線をそう入して変動速度成分の測定を行なった。得られた信号から変動速度のパワースペクトル密度、自己相関及び相互相関を算出し、放出渦の周波数や強さ及び形状などについて評価した。

### 主要記号

$x, y, z$ : 円柱設置位置の壁面上中央を原点とする直交座標系  
 $b_m$ : 内層厚さ ( $x$ の一定断面において  $U=U_m$  となる  $y$ の値)

\* 機械工学科

\*\* 大学院機械工学専攻

- $b_2$  : 半値幅 ( $x$  の一定断面において  $U=U_m/2$  と  
なる  $y$  の値)
- $d$  : 円柱の直径
- $E$  : パワースペクトル密度
- $f$  : 変動速度の周波数
- $K$  : シアパラメータ
- $L_x$  :  $x$  方向積分特性距離
- $L_z$  :  $z$  方向積分特性距離, 式 (2)
- $R_{11}$  :  $u$  変動速度の相関係数
- $S_i$  : ストローク数, 式 (1)
- $S_{i,c}$  : 修正ストローク数, 式 (3)
- $T_a$  : テイラー数
- $U$  : 平均速度の  $x$  方向成分
- $u$  : 変動速度の  $x$  方向成分
- $U_m$  :  $x$  の一定断面における  $U$  の最大値
- $U_s$  : 円柱軸上の近寄り速度
- $U_{s1}$  : 円柱の低速側端における近寄り速度
- $U_0$  : ノズル出口流速
- $y_c$  : 円柱設置高さ (壁面から円柱軸までの距離)

2. 実験装置及び方法

実験装置及び条件は既報<sup>2)</sup> と同一であるので省略する。本報では、円柱の壁面からの設置高さ  $y_c/d$  を、直径  $d=5\text{ mm}$  の円柱で  $0.5\sim 28.0$ ,  $10\text{ mm}$  の円柱で  $0.5\sim 14.0$ ,  $20\text{ mm}$  の円柱で  $0.5\sim 7.0$  の範囲内で10箇所程度変化させた場合について、円柱下流で変動速度成分を測定した。 $y_c/d$  の詳細な値については既報<sup>2)</sup> を参照されたい。なお、円柱設置断面での流れ場の特性は、円柱を設置していない状態で、内層厚さ  $b_m=15\text{ mm}$ , 半値幅  $b_2=105\text{ mm}$ , 最大速度とノズル出口流速との比  $U_m/U_0=0.423$  である。

測定には、直径  $5\text{ }\mu\text{m}$ , 長さ  $1\text{ mm}$  のタングステン線を受感部を持つ I 型熱線プローブと定温度型熱線流速計を使用した。これから得られた信号は線形化した後、一旦データレコーダに記録し、再生して周波数分析器によりパワースペクトル及び相関などの演算をするとともに、X-Y レコーダでこれらの結果の描出を行った。Fig. 1 に本実験の測定系ブロック線図を示す。

本実験では、円柱上下端両側からの渦放出の状態を比較するため、1条件について円柱上側及び下側の下流2点で変動速度の測定を行なった。熱線のその入位置は、前もって円柱下流の数点で測定を行ない、パワースペクトル密度分布のピークが最も明白に現われる位置を捜し出し、以後各条件について熱線と円柱との相対位置を固定した。円柱が壁面に接地している場

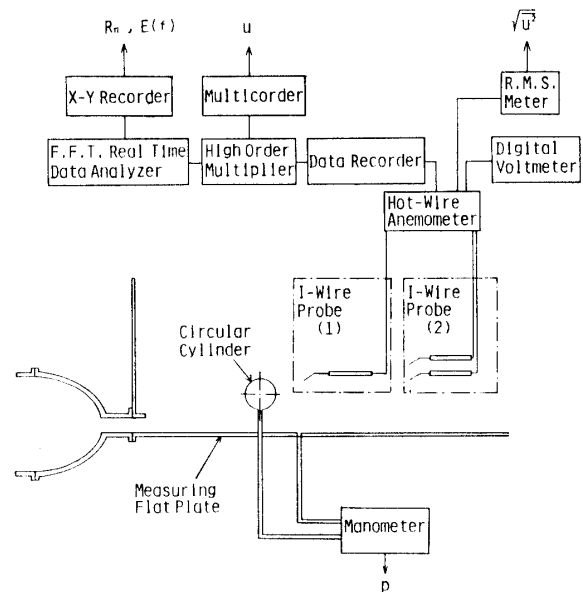


Fig. 1 Block diagram of measuring system.

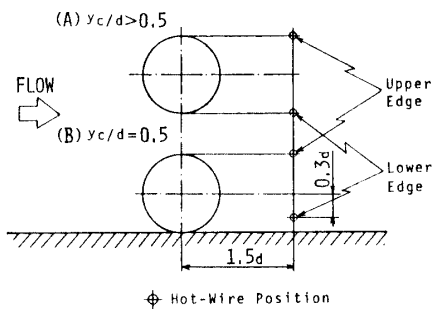


Fig. 2 Coordinate for hot-wire position.

合と、そうでない場合について測定位置が若干異なるので、この2種類の条件についての熱線と円柱との相対位置関係を Fig. 2 に示す。

円柱からの渦放出はストローク数  $S_i$  によりまとめたが、これは下式により算出した。

$$S_i = \frac{fd}{U_s} \quad (1)$$

ここで  $U_s$  は、円柱軸上の近寄り速度で、円柱設置以前の速度分布から求めた値を用いた。また  $f$  はパワースペクトル密度分布の卓越周波数を用いた。

3. 実験結果

3.1 パワースペクトル

Fig. 3~5 にそれぞれ  $d=5, 10, 20\text{ mm}$  の円柱の場合について、円柱上端側及び下端側で測定した変動速度  $u$  のパワースペクトル密度  $E(f)$  を示す。各円柱の場合とも  $y_c/d$  の値により、渦放出によると考えられるスペクトルピークを生じたものがある。これは  $d=$

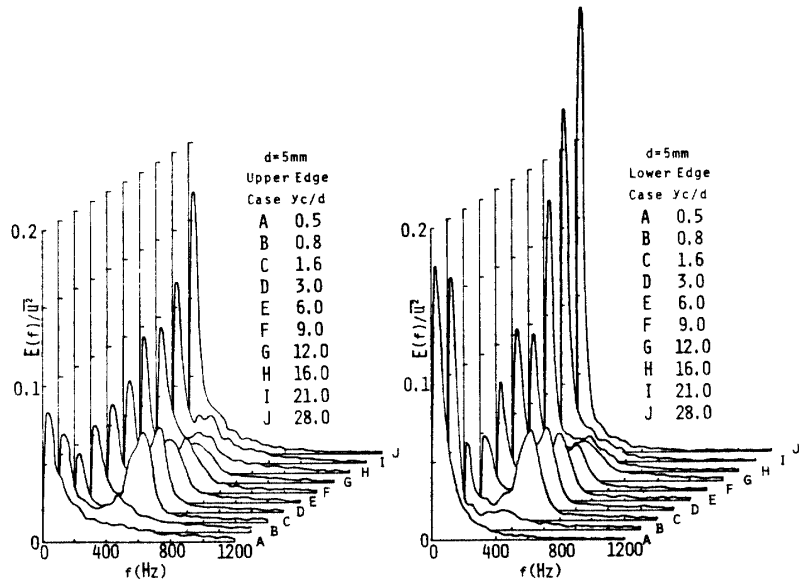


Fig. 3 Power spectra of  $u$ -fluctuating component. ( $d=5$  mm)

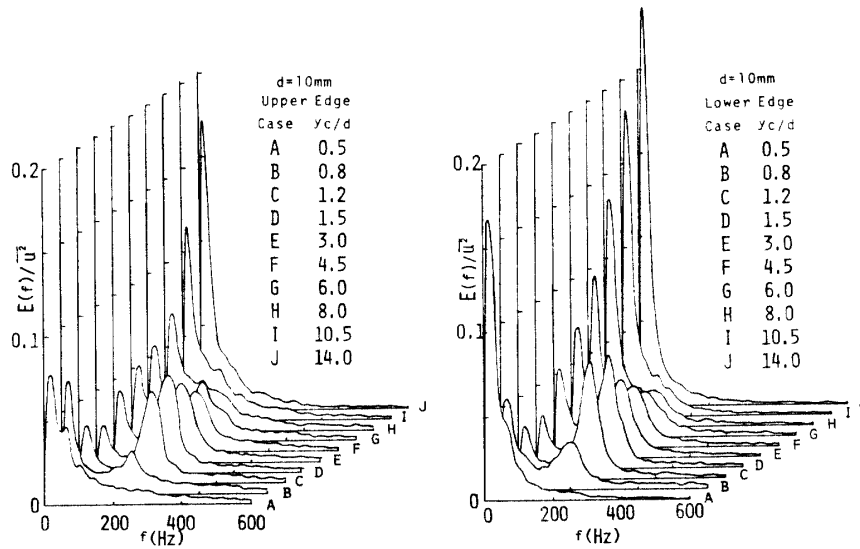


Fig. 4 Power spectra of  $u$ -fluctuating component. ( $d=10$  mm)

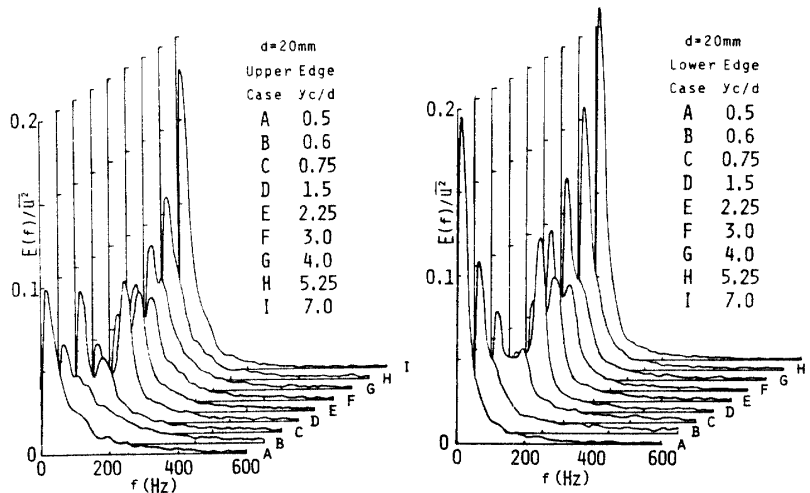


Fig. 5 Power spectra of  $u$ -fluctuating component. ( $d=20$  mm)

5mm の円柱の場合  $y_c/d=0.8\sim 16.0$ , 10mm の円柱の場合  $y_c/d=0.8\sim 10.5$  及び 20mm の円柱の場合  $y_c/d=0.75\sim 3.0$  の範囲である。これらの結果をまとめると、渦放出によると考えられるスペクトルピークは  $y_c/d=0.75$  以上の場合に現われるが、 $y_c=80\text{mm}$  付近より次第に明白なものが現われなくなる。Bearman ら<sup>3)</sup> は、境界層流中に置かれた円柱からの渦放出の測定で、 $G/d=0.3$  ( $G$  は円柱と壁面の隙間の距離) 以上の場合に規則的な渦放出が現われる事を報告しており、本実験結果と類似している。また上限値については、乱れ強さや速度勾配などの無次元量で各円柱の場合の結果を一括して表わす事ができず、単なる物理的な距離でまとめている。次にスペクトルピークの大きさに注目した。これは放出渦の強さを表わす一つの尺度と考えられる。この大きさは、各円柱の場合とも上下両測定位置でおよそ  $y_c/d=1.5$  の時に最大値をとっている。 $d=10\text{mm}$  及び  $20\text{mm}$  の円柱の場合、この位置は円柱前方よどみ点における圧力が最大となる場合に当たる。しかし  $d=5\text{mm}$  の円柱の場合にはピークが最大となる時は  $y_c/d=1.6$  であるのに対し、よどみ圧が最大となるのは  $y_c/d=3.0$  であり、他の二つの場合と異なっている。一方、同一条件での上下両測定位置におけるピーク値の差に注目すると、ほとんどの  $y_c/d$  の場合に差が生じている。しかし、この差の生じ方は  $y_c/d$  の値に対して系統的な変化を示さず、例えば近寄り速度の高い側の測定点の方がピーク値も大きいというような一貫した傾向がみられない。

また、卓越周波数に注目すると、同一条件では円柱の上及び下端の測定点での値はほぼ一致している。 $d=5\text{mm}$ ,  $y_c/d=0.8$  の場合や、 $d=10\text{mm}$ ,  $y_c/d=8.0$  の場合などに若干ズレがあるようにみえるが、これはスペクトルピークが明白でないため断言できない。したがって円柱からの渦放出周波数は上下両側で差は無いと考えられる。同一円柱の場合に注目すると、 $y_c/d$  の増加により卓越周波数は減少している。また円柱径の大きいものほど卓越周波数は全般的に低い値を示している。これらの現象はストローハル数が一定であるとすれば容易に説明できる。すなわち式 (1) より、 $y_c/d$  の増加は  $U_c$  の低下をもたらす結局  $f$  の減少と関連しており、一方円柱径の増加は周波数の減少を導く事が予想される。

### 3.2 ストローハル数

前述の定義により算出したストローハル数  $S_t$  を Fig. 6 に示す。横軸は円柱設置高さ  $y_c/d$  を示す。同一円柱径の場合の結果に注目すると、 $y_c/d$  による差

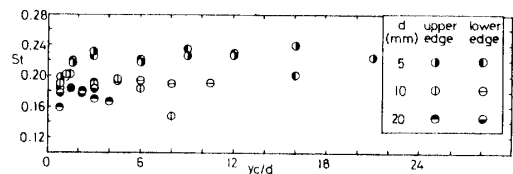


Fig. 6 Strouhal number.

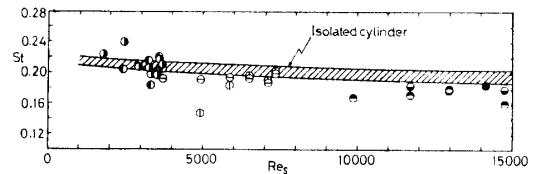


Fig. 7 Comparison of Strouhal number with the result of the cylinder in uniform flow.

はほとんどみられない。しかし円柱径の相違により差が現われており、 $d=5\text{mm}$  の円柱の場合  $S_t$  はおよそ  $0.21$  の値をとり、 $10\text{mm}$  の円柱の場合  $S_t \approx 0.19$  及び  $20\text{mm}$  の円柱の場合  $S_t \approx 0.17$  の値をとっている。

次にストローハル数を一様流中の結果<sup>4)</sup>と比較したものを Fig. 7 に示す。ここで横軸は円柱径と円柱中心への近寄り速度に基づくレイノルズ数  $Re_s = U_s d / \nu$  であり、図中の記号は Fig. 6 に同じである。この図の範囲では、レイノルズ数の増加により、一様流中の  $S_t$  の値はわずかに減少しており、前述の円柱径による  $S_t$  の差の一因とも考えられた。しかし、実際に本実験の結果を比較すると、円柱径の大きい場合ほど一様流中の結果より低い値を示している。また、同一円柱径の場合だけに注目した場合、レイノルズ数の増加により  $S_t$  もわずかながら増加する傾向があり、前述の円柱径の差異に基づくストローハル数の変化の予測は必ずしも適切な説明とはならない事がわかる。

### 3.3 自己相関及び相互相関

Fig. 8 に代表として  $d=10\text{mm}$  の円柱の場合について  $u$  の自己相関係数  $R_{11}$  を示す。測定位置、時間は共にパワースペクトル密度分布の測定の場合と一致している。パワースペクトル密度分布でピークのみられたものと同様の  $y_c/d$  の場合に  $R_{11}$  の曲線の上に周期的な変化が現われている。この周期から周波数を算出すると、パワースペクトル密度の卓越周波数に一致している。また、この振幅の減少割合を比較すると、 $y_c/d=1.5$  の場合が最小で、これもパワースペクトル密度分布のピーク値の変化と一致している。他の2円柱の場合の結果も同様で周期性の減衰が最小となるのは  $d=5\text{mm}$  の円柱の場合  $y_c/d=1.6$  で、 $20\text{mm}$  の円柱の場合  $y_c/d=1.5$  である。 $R_{11}$  分布の周期性の減衰割合が、渦の持続性に関連していると考えると、上述

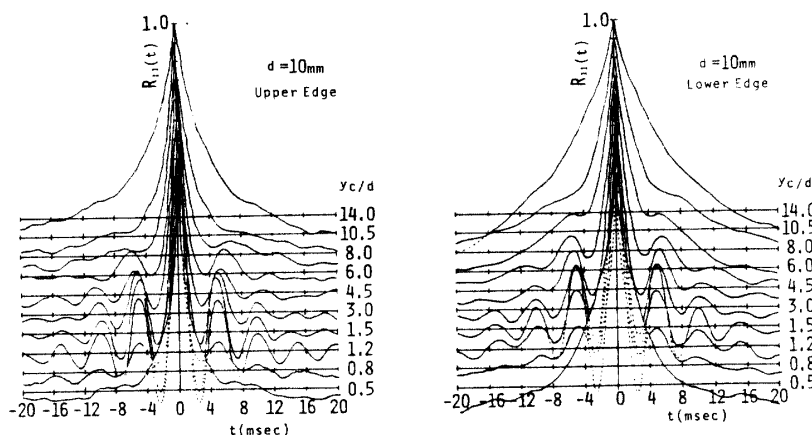


Fig. 8 Auto-correlation coefficient of  $u$ -fluctuating component.

の  $y_c/d$  の場合に渦の持続性は強いと考えられる。

次に放出渦のスパン方向の形状を評価するために変動速度  $u$  の  $z$  方向についての相互相関を測定した。測定は2本のプローブを用い、一方を固定し、他方を  $z$  方向に移動させて行なった。熱線のその入位置はどちらも Fig. 2 に示した点と同じである。Fig. 9 に  $d=10\text{mm}$  の円柱の場合について上端側で測定した  $z$  方向相互相関の結果を示す。  $y_c/d=0.5$  の場合を除いて相関係数の曲線にはほとんど差がみられない。しかし、円柱が壁面に接している  $y_c/d=0.5$  の場合、相関係数の  $z$  方向への減衰割合が著しく大きい。

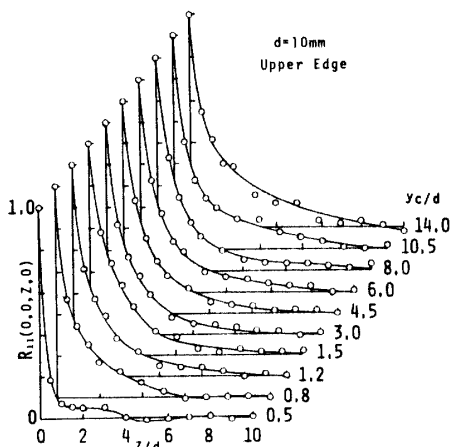


Fig. 9 Cross-correlation coefficient of  $u$ -fluctuating component.

Fig. 9 の  $z$  方向相互相関より算出した  $z$  方向積分特性距離  $L_z$  を Fig. 10 に示す。ここで

$$L_z = \int_0^{z(R_{11}=0)} R_{11}(0,0,z,0) dz \quad (2)$$

として求めている。まず円柱を設置していない場合について注目すると、  $L_z$  は  $y_c/d=0.5$  で最大値をとり、以後  $y_c/d$  の増加により急減少し、  $y_c/d=2$  以上で

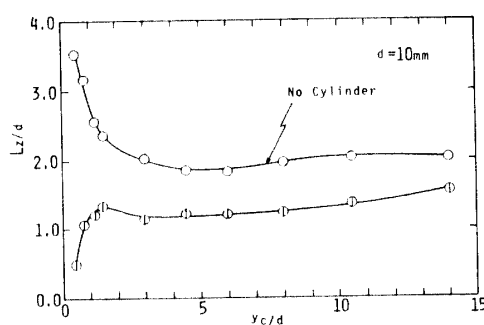


Fig. 10 Spanwise integral length scale.

$L_z/d=2.0$  のほぼ一定値をとっている。これに対して、円柱を設置した場合  $y_c/d=0.5$  で  $L_z$  は最小値をとり、  $y_c/d=1.5$  で極大値をとる。この点は円柱前方のよどみ圧が最大となる位置で、ここでは速度勾配の影響が小さく、したがって剥離剪断層の抑制も小さくなっていると考えられる。前述のスペクトルピークが最大値をとる位置や自己相関係数の周期性の減衰割合が最小となる位置が同じような  $y_c/d$  の場合に生じているのも、同様の理由によるものと考えられる。  $L_z/d$  は以後  $y_c/d$  の増加によりわずかに増加し、円柱を設置する以前の値に近づいている。円柱から渦が放出されていると考えられる  $y_c/d$  の場合に注目すると、  $L_z/d$  は  $1.0\sim 1.3$  の範囲内にあり、積分特性距離をそのまま大渦のスケールと考えると、渦のスパン方向のスケールは、ほぼ円柱径に匹敵するといえる。一様流中の円柱の場合、Bearman ら<sup>5)</sup> は、  $L_z/d=3.7$  という値を報告しており、本研究の結果はかなり小さい値であるが、これは速度勾配及び近接壁面の存在の影響が大きく効いているためと考えられる。

#### 4. 考 察

Fig. 6 に現われたストローハル数の円柱径による相違及び Fig. 7 に現われた一様流中で得られたストロー

ハル数の結果との差異の原因を考えるために、渦放出周波数に対する速度勾配及び乱れ強さの影響について考察を加えた。

Fig. 11 はストローハル数に及ぼす速度勾配の影響を示したもので横軸は無次元速度勾配、シアパラメータ  $|K| = (d/U_s) |dU/dy|$  で、内層と外層での  $dU/dy$  の符号の違いを取り除くために絶対値を用いている。この結果、渦放出の現われているものは、 $|K| = 0 \sim 0.2$  であり、この範囲では値にばらつきがあるものの、 $|K|$  の増加により  $S_t$  が減少している様子がうかがえる。

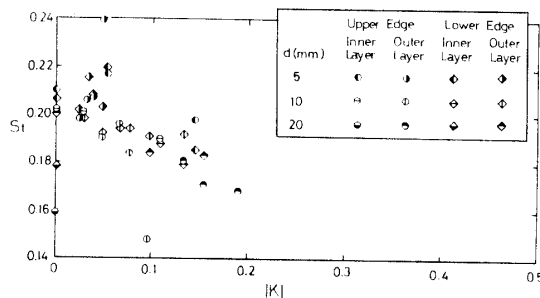


Fig. 11 Variation of Strouhal number against to the velocity gradient.

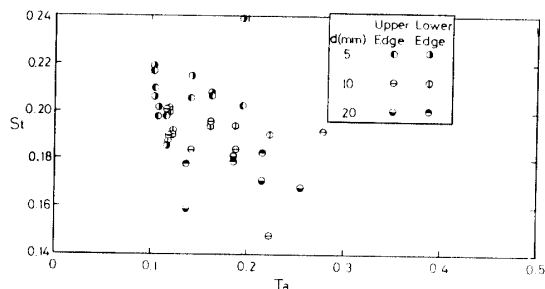


Fig. 12 Variation of Strouhal number against to the turbulent intensity.

Fig. 12 はストローハル数に及ぼす乱れ強さの影響を示したもので、横軸は Taylor が提案した円柱表面の層流境界層遷移に及ぼす主流乱れの効果を表わすパラメータ、テイラー数  $T_a = \sqrt{u^2}/U_s (d/L_x)^{1/5}$  である<sup>6)</sup>。この結果からは分布に一貫した傾向がみられない。同一円柱径の結果に注目すると  $T_a$  の増加により  $S_t$  は減少しているようでもある。ただし、同一円柱に限れば  $T_a$  の増加は  $|K|$  の増加と同時に生じており、2枚の図を比較した場合、 $S_t$  に大きく影響しているのは  $|K|$  であると考えた方が妥当であると思われる。

また、Fig. 11 を Fig. 7 に対照させると一様流中の結果に比べて  $S_t$  が低い値を示すものは、 $|K|$  が大きい場合である事がわかる。

一様剪断流中に置かれた円柱の結果では、加藤ら<sup>7)</sup>

は、 $K = 0 \sim 0.04$  の範囲の実験で、 $K$  の増加により  $S_t$  がわずかに減少すると報告している。また、田村ら<sup>8)</sup> はレイノルズ数が1500以下の範囲で水槽実験を行ない、 $K$  の増加により  $S_t$  は一旦減少し、再び増加する傾向にあると述べている。一方乱れ強さの影響についての有江ら<sup>9)</sup> の研究では、 $S_t$  に及ぼす乱れ強さの効果は無視しようと述べている。

ここで、速度勾配が円柱からの渦放出に及ぼす影響について考察する。まず円柱下流にカルマン渦が形成される場合の機構を考えると、円柱の上端から放出される渦は、下端から巻き込まれた流体塊を渦核として、これを上端から巻き込まれた流体塊が取り囲むようにして形成される<sup>10)</sup>。下端から放出される渦は、これと逆の事が生じており、結局カルマン渦の形成には円柱上下両端からの巻き込み流量が等しくなる事が必要条件と考えられる。したがって流れに速度勾配がある場合、高速側からの巻き込み流量と低速側からの巻き込み流量には差が生じ、カルマン渦の形成は抑制されると予想される。しかし実際には、速度勾配のある場合にも渦放出は生じている。ただし、田村ら<sup>8)</sup> はシアパラメータがある臨界値を越えると渦放出は消滅し、円柱後方に互いに大きさの異なる双子渦が形成される事を報告している。これは高速側からの巻き込み流量と低速側からの巻き込み流量の差はある程度は許容されるものの、差が大きくなり過ぎると高速側からの流体塊と低速側からの流体塊は混合が不可能となり、それぞれが独立した渦を形成するものと考えられる。このように、流れに速度勾配がある場合でもカルマン渦の形成が円柱の上下両側から巻き込まれた流体の混合によるという考えは、両側で測定された卓越周波数が等しいという結果にも一致し、この場合カルマン渦の形成は、低速側からの巻き込み流量に依存すると考えられる。

以上のような考察から、速度勾配がある場合のストローハル数を算出する際には、代表速度としては、円柱の低速側端における近寄り速度  $U_{s1}$  を用いた方が自然であると考えられる。この考えに従ってストローハル数  $S_{t,c}$  を次式の形で再度計算を行なった。

$$S_{t,c} = \frac{fd}{U_{s1}} \quad (3)$$

ここで  $U_{s1}$  は円柱設置以前の速度分布において、円柱の低速側端と同位置の値を採用した。この結果を Fig. 13 に示す。Fig. 6 で現われていたような円柱径による差は、この図でははっきりとしなくなっており、およそ  $S_{t,c} = 0.2$  を中心に分布している。Fig. 14 は一様流中の結果と比較したものである。依然として一様

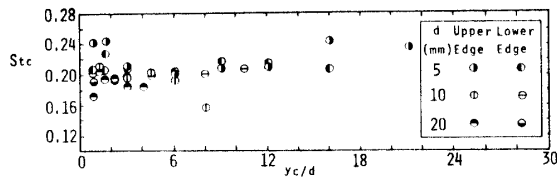


Fig. 13 Corrected Strouhal number.

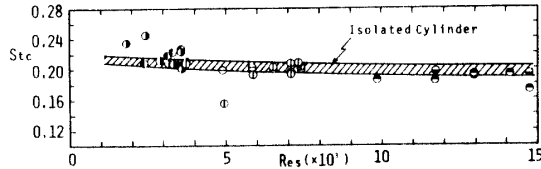


Fig. 14 Comparison of corrected Strouhal number with the result of the cylinder in uniform flow.

流中の値からはずれたものもあるが、Fig. 7 と比較しても、ほとんどが一樣流中の結果内に入っている。これらの結果によれば、上で述べた考え方は妥当であると考えられる。

### 5. 結 論

乱流壁面噴流中に設置された円柱について、円柱後流中で変動速度を測定する事により、円柱からの渦放出を評価した結果、以下の事が明らかとなった。

1. 本実験では、渦放出による考えられるパワースペクトルのピークは  $y_c/d=0.75$  以上で認められたが、 $y_c=80\text{mm}$  以上より次第にこのピークは明白でなくなる。

2. ストローハル数は、シアパラメータの絶対値の増加により減少し、円柱径により差を生じる。しかしテイラー数は、ストローハル数に影響を与えていないようにみえる。
3. 式 (1) のストローハル数の定義では、シアパラメータの絶対値が大きい場合に一樣流中の同レイノルズ数の結果よりもストローハル数は低めに現われる。しかし、4章での考察に基づき再整理したストローハル数は一樣流中の結果にほぼ一致する。
4. 円柱のスパン方向の渦の大きさは、およそ円柱径と同程度であり、一樣流中の結果に比べて小さく、渦放出の三次元性が強い。

### 参 考 文 献

- 1) R.D. Blevins, Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold Company (1977)
  - 2) 大坂他 2 名, 山口大学工学部研究報告, **33**, 17 (1983)
  - 3) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., J. Fluid Mech., **89**, 33 (1978)
  - 4) Morkovin, M.V., 例えば文献 1)
  - 5) Bearman, P. W. and Wadcock, A. J. J. Fluid Mech., **61**, 499 (1973)
  - 6) 例えば文献 9) 参照
  - 7) 加藤, 安達, 日本航空宇宙学会誌, **24**, 333 (1976)
  - 8) 田村他 3 名, 機論, **47-B**, 245 (1981)
  - 9) 有江他 4 名, 機論, **46-B**, 1427 (1980)
  - 10) Zdravkovich, M.M., J. Fluid Mech., **37**, 491 (1969)
- (昭和 58 年 9 月 29 日 受理)