

壁面噴流中に置かれた円柱の周りの流れ

大坂 英雄*・藤井 英樹**・影山 芳郎*

Flow around a Circular Cylinder Placed in a Turbulent Wall Jet

Hideo OSAKA, Hideki FUJII and Yoshiro KAGEYAMA

Abstract

The flow around a circular cylinder placed in a plane wall jet was investigated experimentally. The effect on the cylinder of the velocity gradient, the turbulent intensity and the ratio of thickness of the wall jet to the cylinder diameter was estimated by changing distance between the cylinder and the flat plate and the cylinder diameter. The results show that the front stagnation point on the cylinder is shifted towards under side of the cylinder. The lift acting on the cylinder due to the shift of the front stagnation point increases as shear parameter increases. The drag acting on the cylinder decreases as turbulent intensity increases. Pressure distributions along the flat plate appear similar configurations with changing diameter of the circular cylinder.

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の周りの流れを取り扱っている。設置する円柱の直径及び壁面からの距離を変化させることにより、壁面噴流の厚さと円柱径の比による影響、及び乱れ強さ、速度勾配が円柱に及ぼす効果について調べることを目的としている。

剪断流中の円柱周りの流れに関する研究は、境界層流¹⁾ や一様剪断流^{2)~4)} について多く行なわれており、壁面噴流については影山ら⁵⁾ が報告している。壁面噴流中の円柱周りの流れ場は、物体に働く抗力あるいは熱伝達率の向上などの工学的応用が考えられるほか、乱れ強さや速度勾配の影響を評価することにより乱流構造の解明に寄与するという点でも重要である。

本報告では、直径の異なる3種類の円柱を用い、これを流れと直角に配置し、壁面からの距離を変化させた場合について、円柱表面圧力分布、円柱設置断面近傍の壁面圧力分布の測定を行ない、これから円柱に働く流体力などについて評価した。

主要記号

- x, y, z : 円柱設置断面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)
 b_2 : 半値幅 (x の一定断面において $U=(1/2)U_m$ となる y の値)
 C_D : 抗力係数, 式(3)
 C_L : 揚力係数, 式(3)
 C_p : 圧力係数
 d : 円柱の直径
 K : シアパラメータ, 式(1)
 S : ノズル高さ
 T_0 : テイラー数, 式(2)
 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_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)
 α : 円柱前方よどみ点の変位角
 β : 抗力と揚力の合成ベクトル角
 θ : 円柱軸を通り壁面に平行な面を基準とし上流側から上向きに測った角度

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

2. 実験装置及び方法

実験に用いた風洞は、幅 400 mm, 高さ 1100 mm の集合胴を持ち、これより幅を一定として二次元的に二段に絞られたノズル部（絞り比56.4）を持つ。ノズルは高さ $S=19.5$ mm, 幅 400 mm（アスペクト比20.5）で、長さ 55 mm の平行部を有する。測定平面はノズルから連続した全長 2430 mm, 幅 400 mm のアルミ板製で、壁面圧力測定用の圧力孔（直径0.5あるいは0.8 mm）が円柱設置断面近傍の37箇所に設けられている。

供試円柱は直径 $d=5, 10, 20$ mm の3種の真鍮管であり、円柱表面圧力測定用の圧力孔（直径0.3あるいは0.5 mm）を有している。この円柱はノズル出口から下流 1440 mm の位置に流れと直交し、測定平面と平行になるように設置された。

流れ場のモデル図、座標系を Fig. 1 に、また主に測定を行なった円柱設置高さ y_c における円柱設置以前の流れ場の特性値を Table 1 に示す。

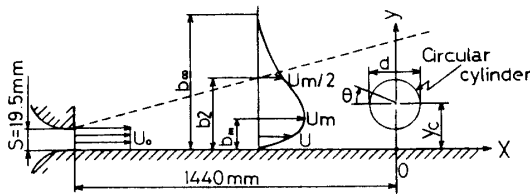


Fig. 1 Configuration of the flow field, nomenclature and coordinate system.

実験は、出口レイノルズ数 $Re = U_0 S / \nu = 3.4 \times 10^4$ 一定のもとに行なった。平均速度はピトー管を用いて測定し、乱流成分についてはI型の熱線流速計を用いて測定した。なお、流れ場の二次元性は、円柱設置断面で確認し良好であると認められた。

本研究では、速度勾配及び乱れ強さが円柱に及ぼす効果を調べるため、次に示す二つのパラメータを採用

して検討する。速度勾配については、次式で示される無次元速度勾配、シアパラメータ K を用いた。

$$K = \frac{d}{U_s} \frac{dU}{dy} \tag{1}$$

一方、乱れ強さについては、Taylor⁶⁾ が円柱表面の層流境界層遷移に及ぼす主流乱れの効果に関して理論的に導き出したパラメータ、テイラー数 T_a を用いた。これは下式で表わされる。

$$T_a = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_s} \left(\frac{d}{L_x} \right)^{1/5} \tag{2}$$

ここで、 L_x は自己相関より求めた x 方向積分特性距離である。円柱設置以前の平均速度分布、乱れ強さ分布から求めた K, T_a の値を Fig. 2 に示す。

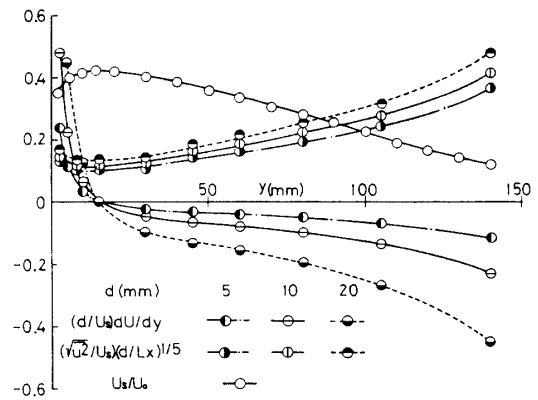


Fig. 2 Characteristics of the basic flow field.

円柱表面圧力分布の測定は、回転ステージにより円柱を 5° おきに回転させ、前述の圧力孔から値を読んだ。なお測定は $z=0$ の中心断面上についてのみ行なった。また壁面圧力分布の測定では、主に円柱設置断面から円柱径の10倍上流及び下流の範囲について計25点の位置で測定を行なった。

Table 1 Characteristics of the basic flow field at the streamwise location the cylinder being fixed

y_c (mm)	2.5	4	5	8	10	12	15	30	45	60	80	105	140	
y_c/b_2	0.024	0.038	0.048	0.076	0.095	0.014	0.143	0.286	0.429	0.571	0.762	1.000	1.333	
U/U_m	0.854	0.904	0.926	0.967	0.982	0.992	1.000	0.959	0.879	0.792	0.667	0.500	0.274	
y_c/d	$d=5$ (mm)	0.5	0.8	/	1.6	/	/	3.0	6.0	9.0	12.0	16.0	21.0	28.0
	10	/	/	0.5	0.8	/	1.2	1.5	3.0	4.5	6.0	8.0	10.5	14.0
	20	/	/	/	/	0.5	0.6	0.75	1.5	2.25	3.0	4.0	5.25	7.0

3. 実験結果

3.1 円柱表面圧力分布

Fig. 3~5 にそれぞれ $d=5, 10, 20$ mm の円柱の場合について、 y_c/d の値を変化させたときの円柱表面圧力分布を示す。ここで、圧力は円柱設置断面内の最大速度 U_m を用いて無次元化した圧力係数 $C_p=(p-p_\infty)/(\rho U_m^2/2)$ として表わしている。各円柱の場合とも同様な傾向であるので、これらをまとめて述べる。 $y_c/d=0.5$ すなわち円柱が壁面に接した場合、圧力分布は $\theta=-90^\circ$ の壁面との接点で不連続となっており、他の y_c/d の場合と異なっている。また $\theta=0^\circ\sim$

-90° の領域は圧力がほぼ一定となっており円柱前方に剝離泡が生じていることがわかる⁵⁾。円柱が壁面と接していない場合についてみると、 y_c/d が増加するに従い C_p の値の変化が減少している。また、全条件にわたって圧力分布は $\theta=0^\circ$ の点について非対称で、円柱前方のよどみ点が θ の負方向へ移動していることがわかる。この現象は影山らの研究でも認められている⁵⁾。これは、円柱が一様剪断流的である外層領域にある場合は、変位効果によりよどみ点は高速側である θ の負方向に移動し、一方、円柱が壁面に接近している場合は、円柱下面と壁面との隙間の減少により、変位効果による下向き流れはさほど強く起こらず、逆にせき止め効果が増加し、流れが円柱上面側に流れ易

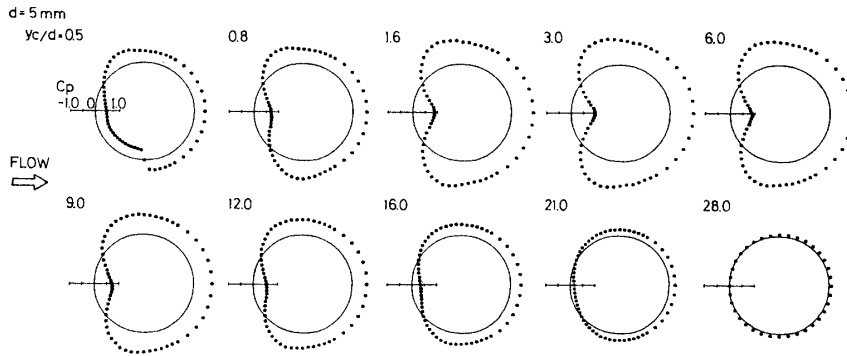


Fig. 3 Pressure distributions around the circular cylinder. ($d=5$ mm)

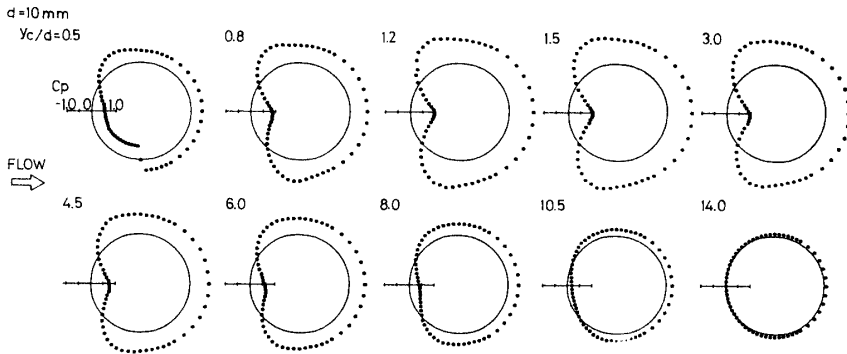


Fig. 4 Pressure distributions around the circular cylinder. ($d=10$ mm)

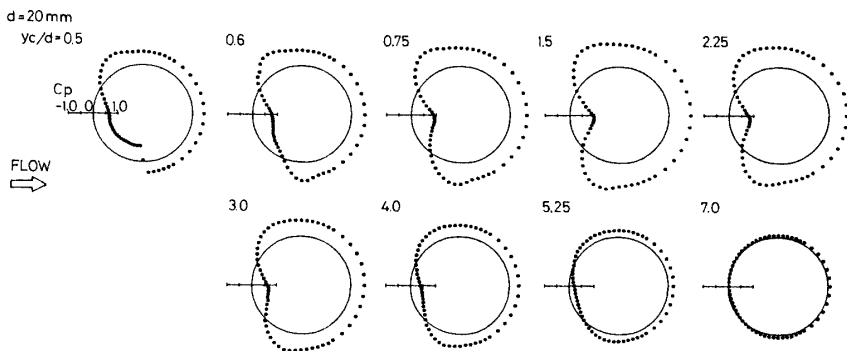


Fig. 5 Pressure distributions around the circular cylinder. ($d=20$ mm)

くなるため、やはりよどみ点は θ の負方向へ移動すると考えられる⁵⁾。圧力分布のよどみ点に対する対称性をみると、 y_c/d が0.8以下の場合、 $C_{p\ max}$ から $C_{p\ min}$ に至るまで、円柱下面側の圧力の方が高くなっているが、その他の場合は、ほぼ対称な分布となっている。

Fig. 6 に各円柱の場合のよどみ圧 $C_{p\ max}$ の変化を示す。直径5mmと10mmの円柱では、ほぼ円柱設置以前の速度分布に対応しており、最大速度をとる

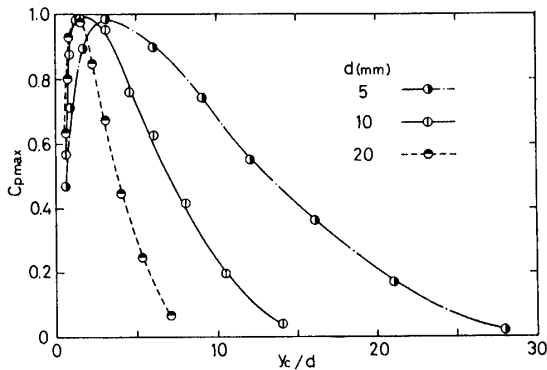


Fig. 6 Profiles of pressure at the front stagnation point of the circular cylinder.

y_c/d の時に $C_{p\ max}$ も最大となっている。しかし $d=20\text{mm}$ の円柱の場合は、 $C_{p\ max}$ が最大となるのは最大速度位置よりも y_c/d の大きい方へずれている。Fig. 7 に、 $\theta=180^\circ$ の点の圧力係数 C_{pb} の変化を示す。分布傾向は、よどみ圧とほぼ同様であることがわかる。

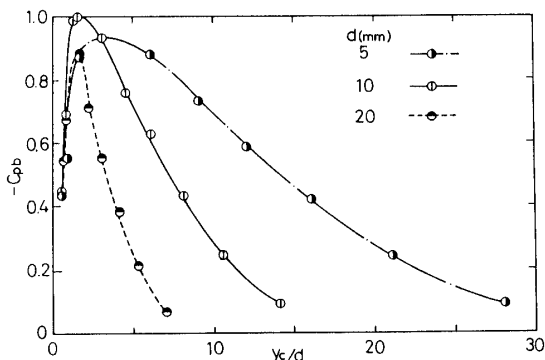


Fig. 7 Profiles of back pressure on the circular cylinder.

円柱表面上の剝離点を予測する目安として、最低圧力 $C_{p\ min}$ について評価した。Fig. 8 に $C_{p\ min}$ の値を、Fig. 9 に $C_{p\ min}$ となる点の角度を示す。円柱上面側と下面側で、 $C_{p\ min}$ の値は等しく、分布傾向も前述の $C_{p\ max}$, $C_{p\ min}$ の場合と同様である。 $C_{p\ min}$ となる

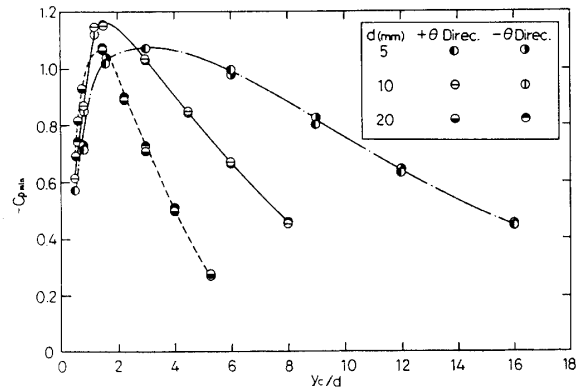


Fig. 8 Profiles of minimum pressure on the circular cylinder.

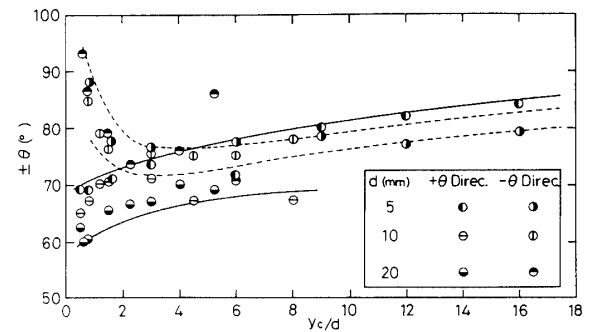


Fig. 9 Angle of the position where the pressure takes a minimum value

角度についてみると、分布にばらつきが見られるが、 y_c/d が小さい時円柱上面側のは上流側へ、円柱下面側のは下流側へ移動している傾向がうかがえる。

3.2 抗力係数及び揚力係数

Fig. 10 に円柱表面圧力分布より算出した抗力係数 C_D 及び揚力係数 C_L を示す。ここで、

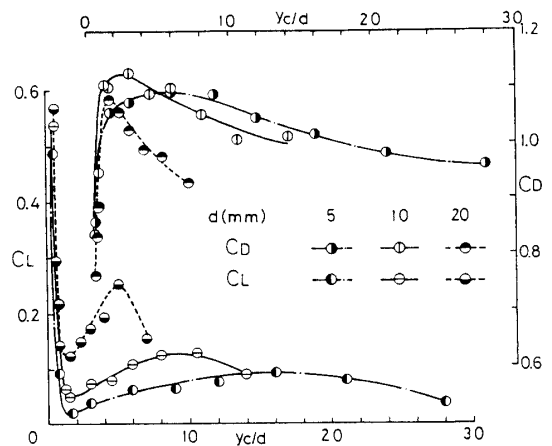


Fig. 10 Non-dimensional profiles of fluid dynamical force acting on the circular cylinder.

$$C_D = \frac{\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (p - p_\infty) \cos \theta d\theta}{\frac{1}{2} \rho U_s^2}, \quad (3)$$

$$C_L = \frac{-\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (p - p_\infty) \sin \theta d\theta}{\frac{1}{2} \rho U_s^2}$$

として求めている。\$C_D\$ は \$C_{p,max}\$ が最大となる時の \$y_c/d\$ の位置で最大となり、これより壁面に近づく場合急減少している。これは、壁面と円柱下面の間隙が減少し、この間隙からの bleed により円柱表面の剝離点が後退し、また背圧が上昇したためと考えられる。また \$C_D\$ の値は壁面から遠ざかるにつれ、緩やかに減少している。一方、\$C_L\$ は \$C_{p,max}\$ が最大となる時の \$y_c/d\$ の位置で極小値をとり、これより壁面に近づくにつれ急増加する。また、各円柱の場合とも \$y_c/d\$ の任意の値の位置で極大値をとるが、これは \$y_c = 80 \sim 105\$ mm 付近である。円柱径による差に注目すると、\$C_D\$ の値は各円柱の場合とも外層で \$0.9 \sim 1.1\$ の値をとり、大きな差は現われていないが、\$C_L\$ の値の場合には円柱径の大きいものほど値も大きくなっている。これは円柱径の大きいものほど、よどみ点の移動量が大きいためであると考えられる。

Fig. 11 は、\$C_D\$ の値を一様流中に置かれた二次元円柱の場合⁷⁾と比較したものである。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\$ である。円柱が内層に設置された場合を除くと、\$d = 5\$ mm の円柱で約 10%、10 mm の円柱で約 5% だけ一様流中の値より高くなっている。しかし 20 mm の円柱では約 10% かえって低い値をとっている。このような円柱径による \$C_D\$ の値の傾向の相違は、乱れ強さや速度勾配の影響によるものと考えられる。

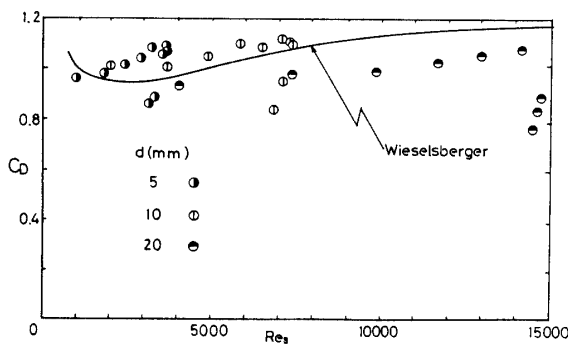


Fig. 11 Profiles of drag coefficient.

Fig. 12 に円柱前方よどみ点の変位角 \$\alpha\$ 及び抗力と揚力の合成ベクトル角 \$\beta = \tan^{-1}(C_L/C_D)\$ を示す。\$\alpha\$ は

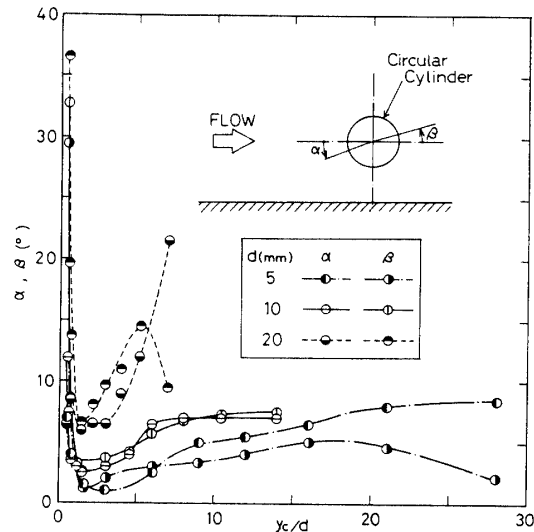


Fig. 12 Displacement angle of the front stagnation point and directional angle of the fluid dynamical force.

\$C_L\$ が極小値をとる時の \$y_c/d\$ の位置で極小値を示し、これより壁面側で急増加し、一方壁面から遠ざかる場合緩やかに増加する。\$d = 5\$ mm、10 mm の円柱の場合には \$\alpha\$ は一定値に漸近する傾向を示す。また、円柱径の大きいものほどよどみ点の変位角が大きくなる傾向がある。\$\beta\$ の値についてみると、各円柱の場合とも \$y_c/d\$ の小さい時を除き、ほぼ \$\alpha\$ と等しい値をとっている。この場合円柱に働く合成力の方向は、円柱へ近寄る平均流線の方向と等しいと考えられる。つまり、円柱に生ずる揚力は、この場合、圧力差によるものよりも、よどみ点が移動したことによる影響が大きいものと考えられる。\$y_c/d\$ が小さい場合は、\$\alpha\$ より \$\beta\$ の方が大きい値を示しているが、これは前述した円柱上下面での圧力差により揚力が増大し、その結果 \$\beta\$ が増加したと考えられる。

3.3 壁面圧力分布

Fig. 13 は、3種の円柱に対して \$y_c/d = 0.5, 1.0\$ の2条件について壁面圧力分布を比較したものである。\$y_c/d = 0.5\$ の場合、円柱の上流側で生じる逆圧力勾配の分布には \$x/d = -1\$ 付近で一旦緩やかになる領域がみられる。\$d = 5\$ mm の場合これは明白ではないが、より精密な測定を行なうことができれば確認できると思われる。この現象は、円柱前方に生じた剝離泡に関連したものと考えられる。\$x/d = 0\$ で分布は不連続となり、下流側では \$x/d = 3\$ まで圧力がほぼ一定となる領域が生じている。\$y_c/d = 1.0\$ の場合は、各円柱の場合とも \$x/d = -1.5\$ で \$C_{p,w}\$ は最大値をとり、他方 \$x/d = 0.5\$ で最小値をとる。以上示した \$C_{p,w}\$ の分布は、円

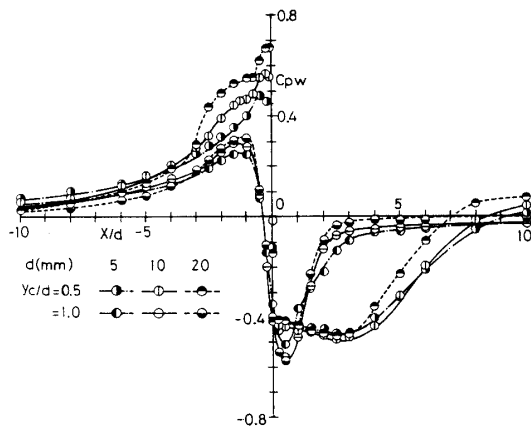


Fig. 13 Pressure coefficient along the flat plate.

柱径によらず、ほぼ相似形状を示すようである。

Fig. 14 は代表として $d=10\text{mm}$ の円柱について、 y_c/d を変化させた場合の壁面圧力分布の変化を示したものである。上流側では $x/d=-15$ 付近より円柱の影響が現われ始めており、また下流側では $x/d=15$ 付近で圧力は回復し、円柱が設置される以前の状態に回復している。しかし、 $y_c/d=0.5$ の場合は $x/d=20$

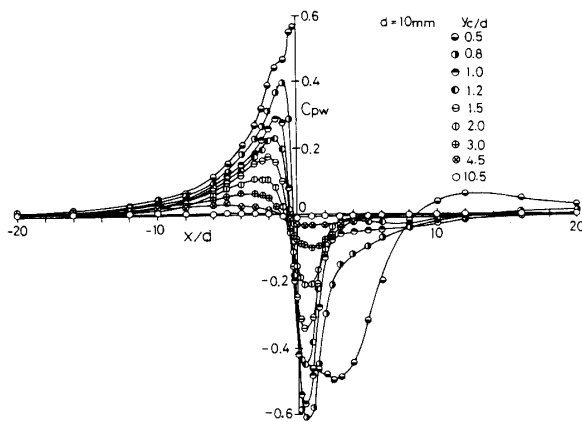


Fig. 14 Pressure coefficient along the flat plate.

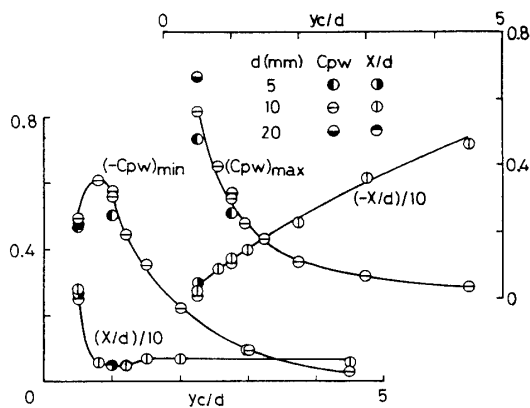


Fig. 15 Values and positions of both maximum and minimum pressure coefficient on the flat plate.

の位置においてさえ円柱の影響が現われている。Fig. 15は、 $C_{p,w}$ の最大値、最小値及びそれらが生じる位置を示したものである。 $C_{p,w}$ の最大値は y_c/d の増加により減少していき、その位置は上流側へ移動している。一方 $C_{p,w}$ の最小値は、 y_c/d の増加により増加しているが、その位置は $y_c/d=0.5$ の場合を除き $x/d=0.5 \sim 0.7$ のほぼ一定値となっている。これは Bearman ら¹⁾の境界層流での実験結果とほぼ一致している。

4. 考 察

ここでは、抗力係数及び揚力係数に及ぼす速度勾配と乱れ強さの影響について考察を加える。Fig. 16は C_D, C_L をシアパラメータ K でまとめたものである。

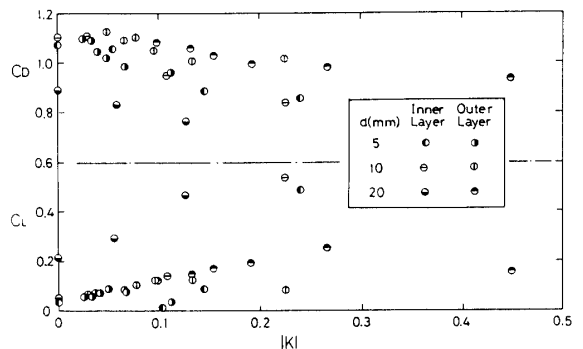


Fig. 16 Variation of fluid dynamical force acting on the circular cylinder against to the velocity gradient.

K は内層と外層で符号が異なるが、単に速度勾配の影響だけを見るため横軸は K の絶対値をとっている。これによると、 $|K|$ の増加により C_D は減少し、一方 C_L は増加する傾向がみられる。特に C_L の場合、外層の結果だけに注目すると一本の曲線で表わすことができるようである。Fig. 17は C_D, C_L をテイラー数

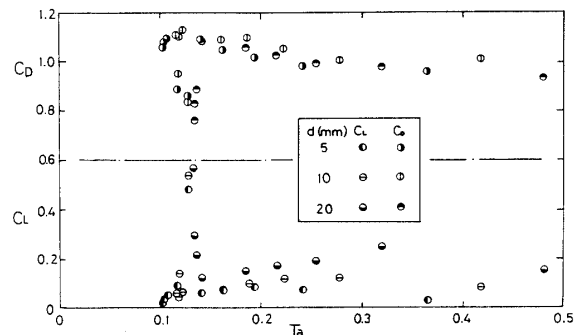


Fig. 17 Variation of fluid dynamical force acting on the circular cylinder against to the turbulent intensity.

T_a でまとめたものである。この場合、 T_a の増加により C_D は減少し、一方 C_L は増加する傾向にある。また C_D は外層の結果だけに注目すると、ほぼ一本の曲線で表わされるようである。以上2つの図より C_L は $|K|$ の影響が大きく現われており、 C_D には T_a の影響が大きく現われていると考えられる。これは $|K|$ が大きくなるほど、よどみ点の変位角も大きくなり、そのために C_L は増加すると考えられる。一方、 T_a の増加は円柱表面上の剝離点を後退させ、その結果、 C_D は減少すると考えられる。安達ら²⁾ も、 C_D に主として影響を及ぼすものは、シアパラメータよりも乱れ強さであると報告している。

5. 結 論

十分発達した乱流壁面噴流中に設置された一本の二次元円柱の周りの流れについて、円柱径及び設置高さを変えた場合の圧力分布を測定した結果、以下の事が明らかとなった。

1. 本実験条件のもとでは、よどみ点は各円柱の場合とも全ての y_c/d の値で円柱下面側へ移動する。その変位角は y_c/d の増加につれ増加し、その後一定値に漸近する傾向にある。また円柱径の大きいものほどよどみ点の変位角も大きい。
2. 円柱の揚力係数は常に正の値をとり、揚力は円柱

を壁面から引き離す方向に働く。外層領域では $|K|$ の増加により C_L も増加し、また円柱径の大きいものほど C_L も大きい値を示す。抗力係数はよどみ圧が最大となる y_c/d の位置で最大値をとる。外層領域では T_a の増加により C_D は減少する傾向がある。

3. 壁面圧力分布は円柱径の差によらず一致した傾向を示す。 $y_c/d=0.5$ の時、円柱下流 $x/d=3$ まで負の一定圧力を示す領域が生じている。
4. C_{pw} の最大値は y_c/d の増加により減少し、その位置も上流側へ移動しているが、 C_{pw} の最小値は y_c/d の増加により増加するものの、その位置は $x/d=0.5\sim 0.7$ で一定である。

参 考 文 献

- 1) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., J. Fluid Mech., **89**, 33 (1978)
- 2) 安達, 加藤, 日本航空宇宙学会誌, **23**, 311 (1975)
- 3) 加藤, 安達, 日本航空宇宙学会誌, **24**, 333 (1976)
- 4) 田村他3名, 機論, **47-B**, 245 (1981)
- 5) 影山他3名, 山口大学工学部研究報告, **32**, 293 (1982)
- 6) 例えば, 有江他4名, 機論, **46-B**, 1427 (1980)
- 7) 例えば, Schlichting, H., Boundary Layer Theory, 6th ed., McGraw-Hill (1968)

(昭和58年4月15日 受理)