

平面壁上に存在する直立円柱の流体力学的特性*

(円柱の直径と高さとが等しい場合)

谷口清一**

(昭和55年9月10日受理)

Aerodynamic Characteristics of a Right Circular Cylinder Mounted on a Plane Wall

by Seiichi TANIGUCHI

The present study describes an experimental investigation of the flow around a circular cylinder of finite height vertically mounted on a plane wall along which a turbulent boundary layer was fully developed. For the purpose of reducing the number geometrical parameters, height and diameter of the cylinder were taken to be equal in the present case. Measurements of pressure distributions and drag forces acting on the circular cylinder were carried out.

The pressure forces of the circular cylinders were experimentally correlated with the mean dynamic pressure of the turbulent boundary layer at the location of the circular cylinder, which is defined by $\bar{q} = \int_0^1 \left(\frac{u}{U_0}\right)^2 d\left(\frac{y}{h}\right)$. Drag force coefficients were found to be expressed as a linear function of the mean dynamic pressure of the turbulent boundary layer described above.

1. 緒 論

近年、構造物の軽量化・大型化にともなう流体力の評価、陸上交通車輛の高速化にともなう走行性能、騒音などの問題に関連して、乱流境界層の中に存在する物体周辺の流れに多くの関心が向けられ、これらに関する実験的報告も増加している^{1)~3)}。しかし、これらの研究はいずれも物体の形状を二次元として取り扱ったものが大部分であって、われわれが実際に遭遇する問題はいずれも三次元的形状を有しているために、これまでの測定結果からこれら三次元的形状を有する物体の流体力学的特性を正しく評価することは困難である。乱流境界層内に存在する三次元物体周辺の流れを明らかにすることは、たとえば粗さ要素による抵抗の問題、ボルトックスジェネレーターの性能の評価などに関連して、流体工学的見地からも重要な意義があ

* 日本機械学会北海道支部第20回講演会(昭和52年8月)にて発表

** 応用機械工学科

る。さらに、大気乱流境界層内に設置される高層建造物、工場の大型煙突および原子力発電所のターリングタワーなどは、強風下における流力特性としての局所的圧力、抗力、モーメントおよび複数物体間の相互干渉などが設計資料として必要である。また、三次元的形状を有する物体周辺の流れの機構を明らかにすることは、ビル風の防止、汚染された大気移動ならびに物質の拡散状態を把握する上でも重要である。

Halitsky⁴⁾は構造物周辺のガス拡散状態を予測するために、角柱およびドーム周辺の流れを可視化によって明らかにしており、Castro and Robins⁵⁾は平面壁上に付着した立方体の表面上に作用する圧力および後流の流速測定を行って、三次元物体周辺の流れに関する基礎的な実験結果を報告している。また、岡本ら⁶⁾は平板上に垂直に設置した円すいの抗力および後流の測定を行っている。このように、最近三次元物体を取り扱った研究が増加しているものの、物体の流力特性と、これをよぎる乱流境界層の特性との関係を系統的に明らかにした報告はあまりないのが現状である。

本研究は、三次元的形状を有する物体として、最も代表的かつ基本的なものと考えられる直立円柱を取り扱い、円柱が滑らかな平面壁に沿って発達する乱流境界層内に直立した状態で設置された場合に、当該円柱に作用する時間平均的圧力、抗力およびその周辺の流れの様子の測定を行い、これらの諸量と乱流境界層の特性量との関連性を明らかにしようとするものである。本報告は、まず物理変数を少なくするために、直径と高さが等しい円柱を採用し、当該円柱に作用する平均的流体力と、乱流境界層内において流れが保有する平均動圧との関係を明らかにしたものである。

2. 主な使用記号

$$c_p : \text{圧力係数} = (p - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 \right)$$

$$c_{pf} : \text{前方よどみ線上の圧力係数}$$

$$c_{pb} : \text{後方よどみ線上の圧力係数}$$

$$C_{Dy} : \text{局所的抗力係数}$$

$$C_D : \text{抗力係数}$$

$$C_M : \text{モーメント係数}$$

$$d : \text{円柱の直径} = h$$

$$h : \text{円柱の高さ}$$

$$p : \text{円柱の表面圧力}$$

$$p_0 : \text{主流の静圧}$$

$$q : \text{乱流境界層内の無次元動圧} = (u/U_0)^2$$

$$\bar{q} : \text{平均動圧} = \int_0^1 (u/U_0)^2 d(y/h)$$

- u : 乱流境界層内の平均流速
 - U_0 : 主流速度
 - u_r : せん断速度
 - x, y, z : 図-3 で定義される座標
 - X : 風洞測定部入口から下流方向に測られた距離
 - y_D : 抗力の作用点
 - Re_θ : 境界層レイノルズ数 $= U_0\theta/\nu$
 - δ : 境界層厚さ ($u/U_0=0.99$)
 - δ^* : 排除厚さ $= \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) dy$
 - θ : 運動量厚さ $= \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) \frac{u}{U_0} dy$
- | | | |
|----|----------|----------|
| 04 | ν : | 流体の動粘性係数 |
| 15 | ρ : | 流体の密度 |
| | ϕ : | 円周角 |

3. 実験装置および実験方法

実験は図-1 に示すように断面 400×400 mm、長さ約 4 m の測定部を有する低速環流型風洞を用いて行った。風洞測定部前方にある収縮筒は 14:1 の縮流比を有している。測定部床面は滑らかなアクリル板製であり、流れ方向について円柱設置位置から ± 230 mm における測定部床面は、表面が機械仕上された鋼板より構成されている。天井壁は 18 個の静圧孔を有する鋼板製であって、上下約 80 mm の移動が可能であり、流れ方向の圧力こう配を任意に調節することができる。風洞測定部入口から $X=23.55$ cm 下流に設置される円柱は、図-2 に示す状態で円柱支持板に取り付けられる。実験は円柱の高さと直径とが等しい 9 種類の試験円柱を用いて行った。試験円柱はいずれも黄銅製であり、表-1 に示す複数個の圧力孔 (直径 0.4~0.5 mm) が表面に設けられている。各圧力孔はあらかじめ油粘土によって密閉し、気密試験を経

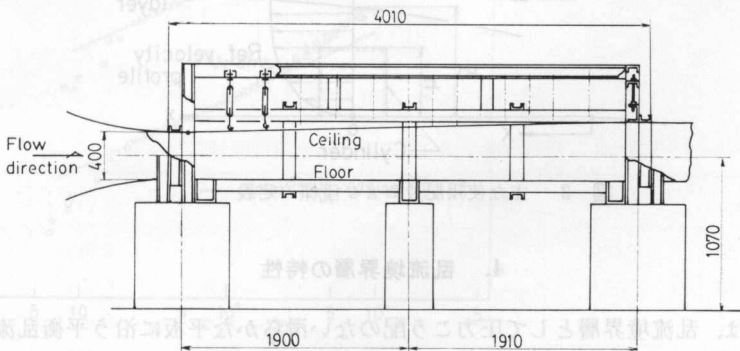


図-1 風洞測定部

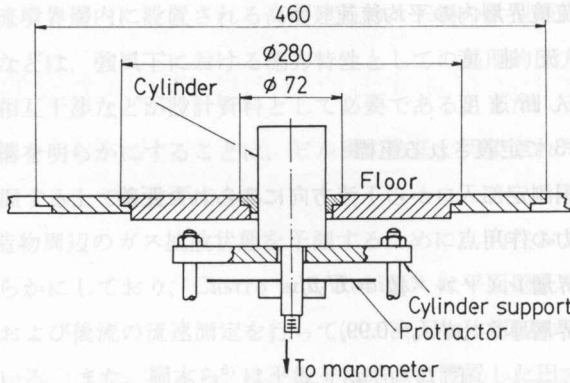


図-2 円柱設置状態

表-1 試験円柱の種類

円柱高さ h (mm)	5	7.5	10	12.5	15	20	25	30	40
圧力孔の数	8	11	12	16	15	14	18	16	21

てから1個ずつ開孔して、円柱表面の圧力測定に供した。乱流境界層内の速度分布は高さ0.44 mm、幅1.8 mmなる長方形断面の全圧管と直径1.2 mmの静圧管とを組合せたプローブによって測定した。流れの乱れ分布の測定は定温度型熱線風速計を用いた。また、スモーク・ワイヤ法による流れの可視化実験は断面180×180 mm、長さ約1.6 mの測定部を有する貫流型風胴を用いて行った。

なお、座標の定義と主な使用記号を図-3に示す。

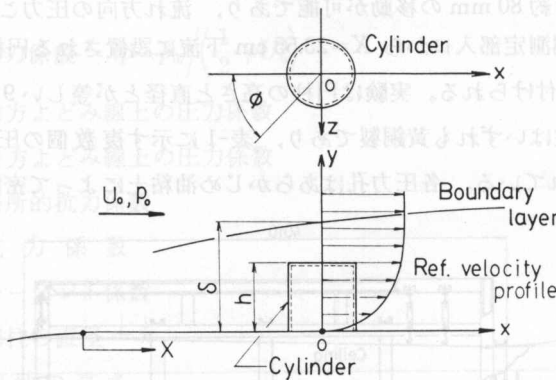


図-3 主な使用記号および座標の定義

4. 乱流境界層の特性

本研究では、乱流境界層として圧力こう配のない滑らかな平板に沿う平衡乱流境界層を用い、風胴床面に沿って発達する乱流境界層をこれに当てることとした。主流方向の圧力こう配

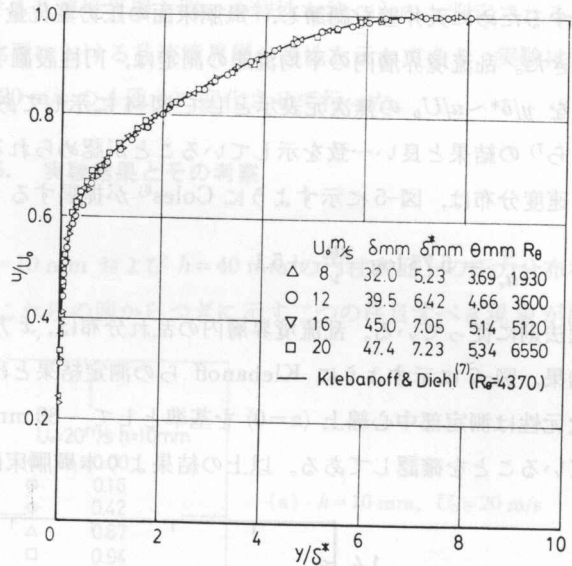


図-4 乱流境界層内の平均速度分布

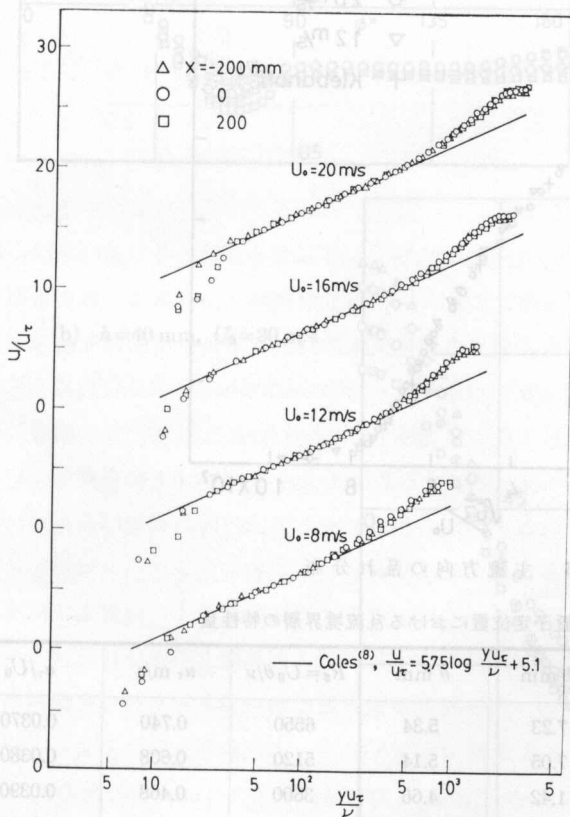


図-5 乱流境界層の対数速度分布

を除去するために天井壁を調節し、風胴床面の圧力変化量を主流動圧の ±0.3% 以内にするこ
 とができた。乱流境界層内の平均流速の測定は、円柱設置予定位置前後断面について行い、そ
 の結果を $y/\delta^* \sim u/U_0$ の無次元表示として 図-4 に示してある。明らかにこの速度分布は Kle-
 banoff ら⁷⁾ の結果と良い一致を示していることが認められる。また、乱流境界層の内層領域に
 おける速度分布は、図-5 に示すように Coles⁸⁾ が提唱する

$$\frac{u}{u_\tau} = 5.75 \log \frac{yu_\tau}{\nu} + 5.1$$

なる壁法則に従っている。乱流境界層内の乱れ分布は、 x 方向の乱れ成分 u' に関する測定を行
 った結果、図-6 に示すように Klebanoff らの測定結果とほぼ一致することが判明した。流れ
 の二次元性は測定部中心線上 ($z=0$) を基準として $-80 \text{ mm} \leq z \leq 120 \text{ mm}$ の範囲で良好に実現
 されていることを確認してある。以上の結果より本風胴床面に沿う乱流境界層は、圧力こう配

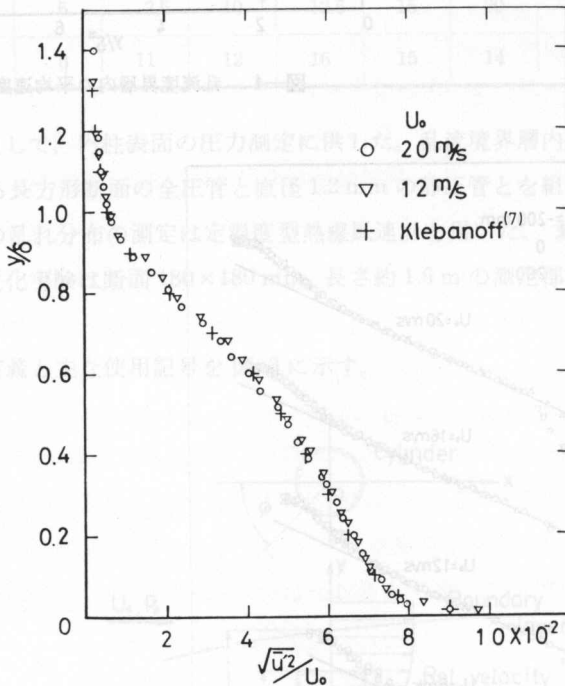


図-6 主流方向の乱れ分布

表-2 円柱設置予定位置における乱流境界層の特性量

RUN	U_0 m/s	δ mm	δ^* mm	θ mm	$R_\theta = U_0 \theta / \nu$	u_τ m/s	u_c / U_0
1	20	47.4	7.23	5.34	6550	0.740	0.0370
2	16	45.0	7.05	5.14	5120	0.608	0.0380
3	12	39.5	1.42	4.66	3600	0.468	0.0390
4	8	32.0	5.23	3.69	1930	0.334	0.0417

のない滑らかな平板に沿って発達する乱流境界層と同一の特性を持つものと判定される。

なお、表-2には円柱設置予定位置における乱流境界層の特性を示してあり、実験は表に示すように主流速度 U_0 を 8, 12, 16, 20 m/s の 4 通りに変化させて行った。

5. 実験結果とその考察

5.1 圧力分布

図-7(a), (b)は $U_0=20$ m/s, $h=10$ mm および $h=40$ mm の円柱表面上の圧力分布を圧力係数 c_p の形で示したものである。これらの図からつぎに示す二つの注目すべき現象が認めら

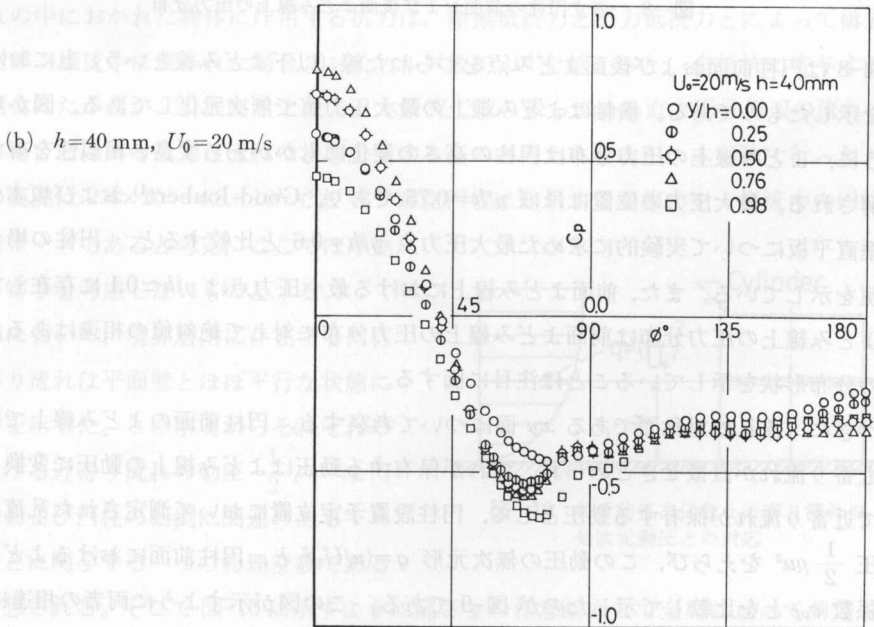
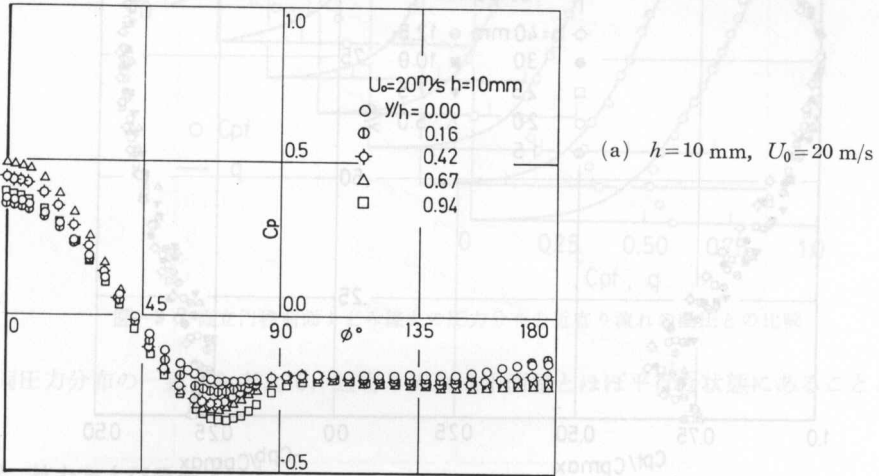


図-7 直立円柱表面の圧力分布

れる。第一は、円柱前面において乱流境界層の近寄り流れが直接円柱に作用するために、円柱の高さ方向の圧力分布に大きな変化が認められるが、円柱後面においては背後にうず領域が存在するために、それ程大きな変化がないことである。第二には、 $h=40\text{ mm}$ の場合サクシオンピークの下流に圧力分布のステップが存在することである。これは円柱表面上の境界層が層流から乱流へ遷移することに起因するためと推定されるが、現段階では境界層の遷移を確かめることは行っていない。

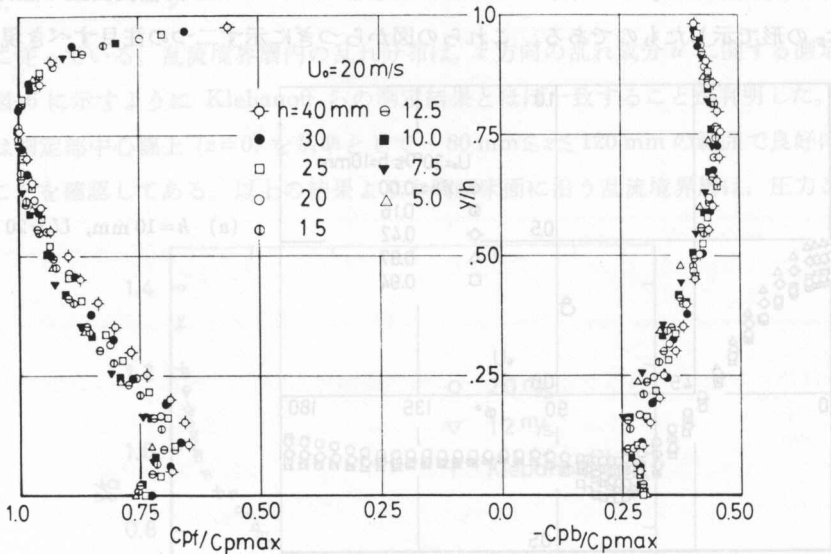


図-8 直立円柱の前面および後面よどみ線上の圧力分布

図-8 は円柱前面および後面よどみ点をつらねた線（以下よどみ線という）上における圧力分布を示したものである。横軸はよどみ線上の最大圧力値で無次元化してある。図から明らかなように、よどみ線上の圧力分布は円柱の高さの変化にもかかわらず良い相似性を有することが理解される。最大圧力の位置はほぼ $y/h=0.75$ であり、Good-Joubert¹⁾ および坂本ら²⁾ が二次元垂直平板について実験的に求めた最大圧力点 $y/h=0.6$ と比較すると、円柱の場合には異なる値を示している。また、前面よどみ線上における最小圧力点は $y/h \approx 0.1$ に存在している。後面よどみ線上の圧力分布は前面よどみ線上の圧力分布に対して絶対値の相違はあるが、ほぼ同一の分布形状を示していることは注目に値する。

つぎに、流れの対称面である xy 面について考察する。円柱前面のよどみ線上では境界層内の近寄り流れが直接せきとめられ、流れが保有する動圧はよどみ線上の動圧に変換される。そこで近寄り流れが保有する動圧として、円柱設置予定位置において測定された乱流境界層内の動圧 $\frac{1}{2} \rho u^2$ をえらび、この動圧の無次元形 $q=(u/U_0)^2$ と、円柱前面におけるよどみ線上の圧力係数 c_{pf} とを比較して示したのが図-9である。この図が示すように両者の相違に2~3%の許容範囲を見込むものとすれば、ほぼ $0.15 \leq y/h \leq 0.65$ の範囲で一致している。したがっ

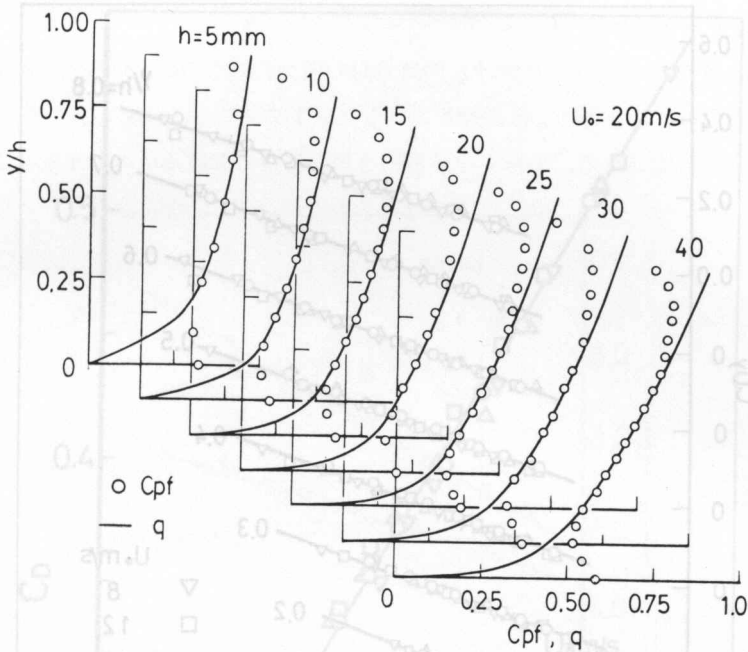


図-9 直立円柱前面よみ線上の圧力分布と近寄り流れの動圧との比較

て、両圧力分布の一致から考えて、近寄り流れは平面壁とほぼ平行な状態にあることと推察される。

5.2 抗力およびモーメント

流れの中におかれた物体に作用する抗力は、摩擦抵抗力と圧力抵抗力とによって構成される。円柱が一樣流中に置かれた場合、レイノルズ数が 10^4 を越えると、全抵抗に寄与する摩擦抵抗力の割合はたかだか2%程度¹⁰⁾となる。本研究で取り扱っている直立円柱周辺の流れは、一樣流中の場合とは異なる複雑な流れの状態を呈するものと考えられるが、本実験で行ったレイノルズ数の範囲は $2.4 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^4$ であり、直立円柱に作用する摩擦力を一樣流中の円柱の場合と同じオーダーであると考え、ここでは摩擦力による寄与を考慮しないものとする。

前節において、境界層内に存在する円柱への近寄り流れは平面壁とほぼ平行な状態にあることを示した。この事実からそれぞれの高さにおける近寄り流れの動圧 $\frac{1}{2} \rho u^2$ は円柱の抗力および円柱の転倒に関連のあるモーメントなどに関与する一つの物理変数である

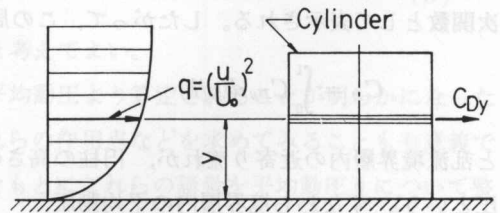


図-10 局所的抗力係数と近寄り流れの無次元動圧との対応

ものと予想される。そこで図-10に示すように高さ y の任意断面上で全周に亘って測定された圧力分布を積分することによって得られる局所的抗力係数

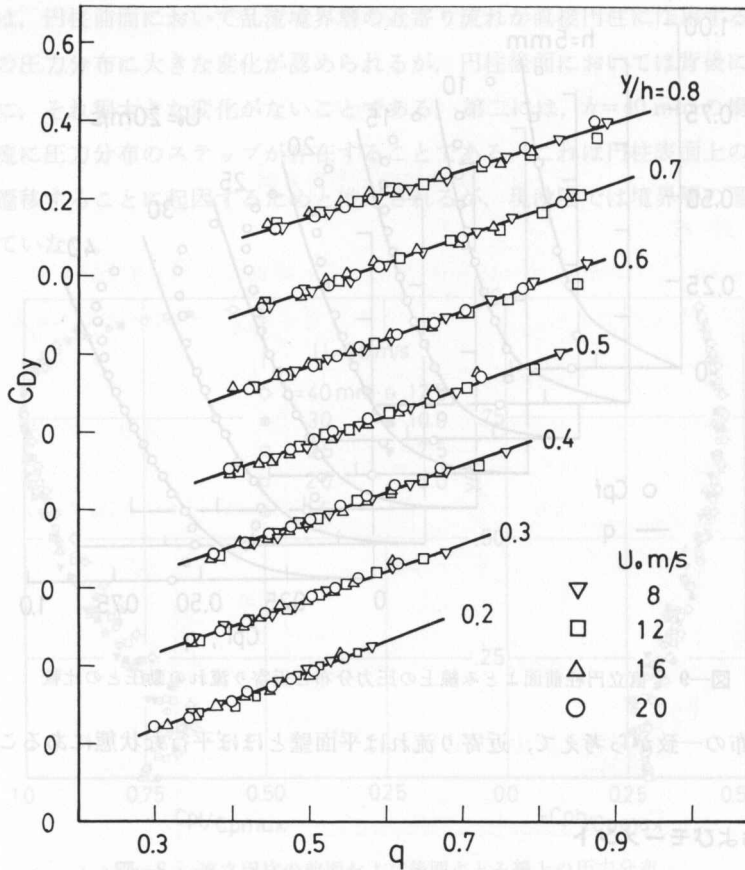


図-11 局所的抗力係数 C_{Dy} と近寄り流れの無次元動圧 \bar{q} との関係

$$C_{Dy} = \int_0^\pi c_p \cos \phi d\phi \tag{2}$$

を同じ高さにおける近寄り流れの無次元動圧 q と比較対応させてみる。この結果を図-11に示してあるが、本実験で採用した $h=5\sim 40$ mm の円柱の各高さについて、 C_{Dy} は q の良好な一次関数として表示される。したがって、この局所的抗力係数 C_D を用いて求められる抗力係数

$$C_D = \int_0^1 C_{Dy} d(y/h) \tag{3}$$

と乱流境界層内の近寄り流れが、円柱の高さの範囲で保有している動圧の平均値（以下平均動圧という）、すなわち境界層内の平均動圧

$$\bar{q} = \int_0^1 \left(\frac{u}{U_0}\right)^2 d\left(\frac{y}{h}\right) \tag{4}$$

との間にも、同様な一次関数の関係が存在するものと予想される。以上のような考察に基づいて C_D と \bar{q} との関係を示したのが図-12である。明らかに C_D と \bar{q} との間には

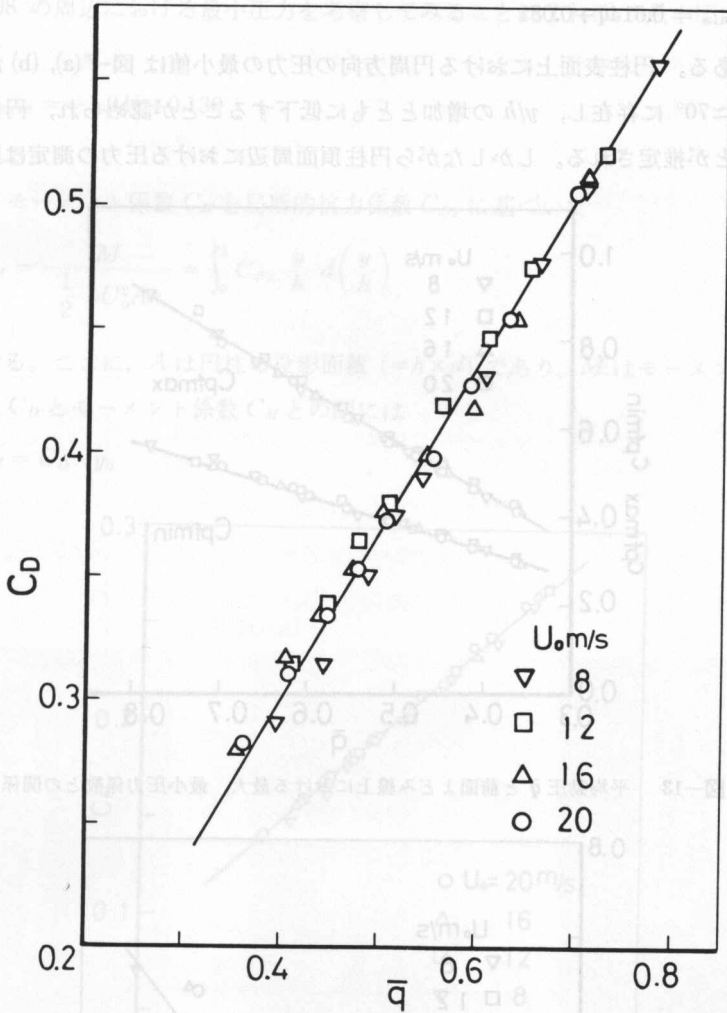


図-12 平均動圧 \bar{q} と抗力係数 C_D との関係

$$C_D = 0.686\bar{q} + 0.025 \tag{5}$$

によって表示される一次関数の関係があるものと考えてよい。

以上のように、円柱に作用する抗力係数が平均動圧より算定されることが明らかになったが、最大圧力、最小圧力、モーメントおよびこれらの作用点などを求めてみることも有意義である。そこで、測定された円柱表面の圧力分布をもとにこれらの諸量を平均動圧 \bar{q} について整理してみる。まず、円柱前面よどみ線上に最大圧力係数は 図-8 においてすでに説明したように $y/h \approx 0.75$ に存在し、 図-13 に示すように

$$c_{pf\max} = 1.17\bar{q} - 0.019 \tag{6}$$

として表される。また、 $y/h \approx 0.1$ に存在する最小圧力係数についても

$$c_{pf \min} = 0.614\bar{q} + 0.081 \tag{7}$$

なる関係式がある。円柱表面上における円周方向の圧力の最小値は 図-7 (a), (b) から判定されるように $\phi \approx 70^\circ$ に存在し、 y/h の増加とともに低下することが認められ、円柱頂面で最小値を有することが推定される。しかしながら円柱頂面周辺における圧力の測定は困難であるか

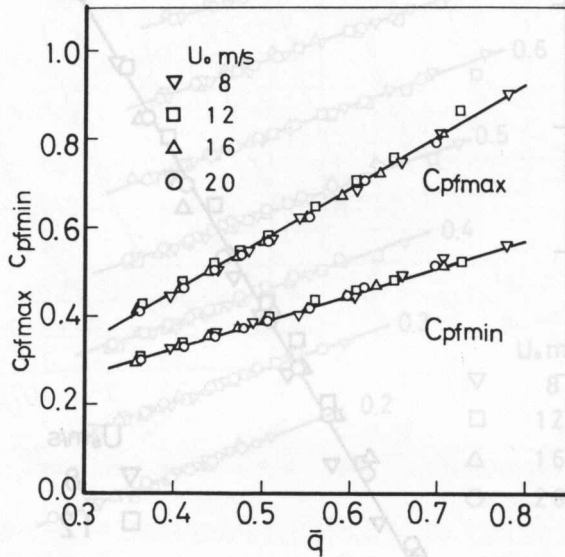


図-13 平均動圧 \bar{q} と前面よみ線上的における最大、最小圧力係数との関係

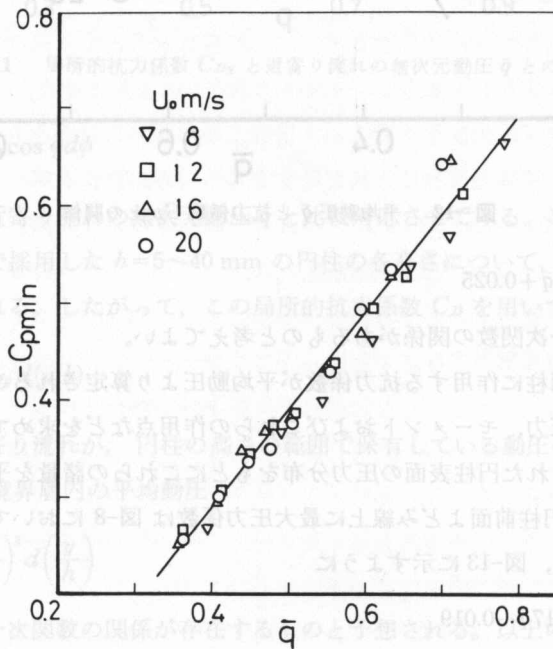


図-14 平均動圧 \bar{q} と最小圧力係数 $c_{p \min}$ との関係

ら、 $y/h=0.98$ の周辺における最小圧力を考察してみることにすれば、最小圧力係数は図-14に示すように

$$C_{p \min} = -1.04\bar{q} + 0.130 \quad (8)$$

として表される。

つぎに、モーメント係数 C_M を局所的抗力係数 C_{Dy} に基づいて

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A h} = \int_0^1 C_{Dy} \frac{y}{h} d\left(\frac{y}{h}\right) \quad (9)$$

として定義する。ここに、 A は円柱の投影面積 ($=h \times d$) であり、 M はモーメントである。また、抗力係数 C_D とモーメント係数 C_M との間には

$$C_M = C_D \times y_0 \quad (10)$$

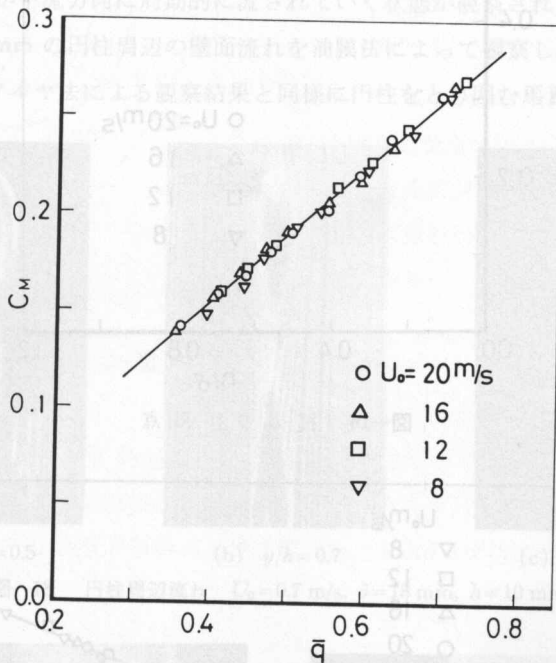


図-15 平均動圧 \bar{q} とモーメント係数 C_M との関係

の関係が存在する。ここに、 y_0 は抗力の作用点を示す無次元量 y_D/h である。図-15 は C_M と \bar{q} との関係を示すものであって、これら両者の間にも良好な一次関数の関係が存在し、モーメント係数は

$$C_M = 0.519\bar{q} - 0.035 \quad (11)$$

として与えることができる。抗力の作用点 y_0 は図-16 に示してあるが、円柱の高さおよび乱流境界層の特性量とは無関係な $y_0=0.51$ なる一定値を示している。このことは局所的抗力の分

布が各円柱について相似であることを裏付けているものである。

このように乱流境界層内に設置される直立円柱に作用する平均的流体力はすべて境界層内の近寄り流れが保有する平均動圧 \bar{q} の一次関数として表示されることが明らかにされたが、これらの結果を実際を使用するためには、あらかじめ当該乱流境界層の速度分布を測定する必要がある。本実験で用いた試験円柱の高さ h と乱流境界層の厚さ δ からなる無次元値 h/δ と平均

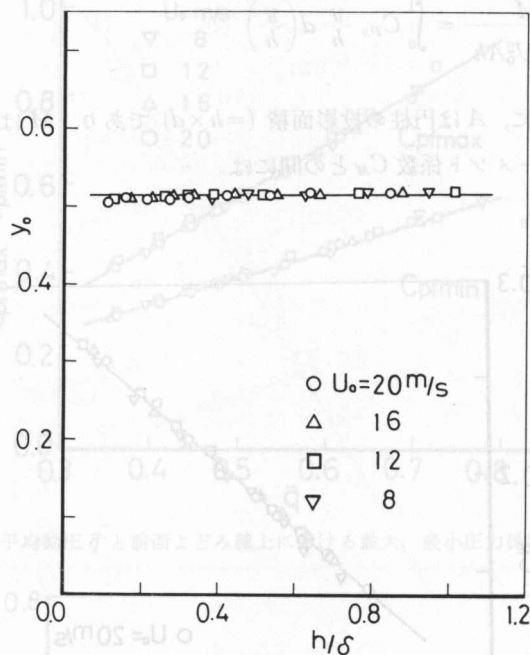


図-16 抗力の作用点

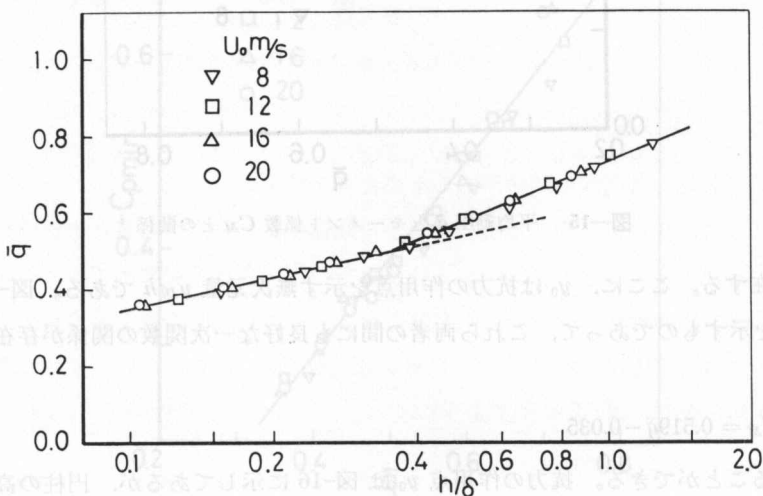


図-17 平均動圧 \bar{q} と h/δ との関係

動圧 \bar{q} との関係を図-17に示す。したがって、円柱設置予定位置における乱流境界層内の平均動圧特性が既知であれば、直ちに円柱に作用する流体力が算定できることとなる。

6. 直立円柱周辺の圧力分布および周辺流れ

直立円柱周辺の流れ状態を明らかにするために、油膜法およびスモーク・ワイヤ法による流れの可視化を行った。図-18(a)~(c)はスモーク・ワイヤ法による直立円柱各断面高さにおけるフローパターンを示したものである。図において、 $y/h=0.5$ の高さにおける発煙は円柱をとり囲むように馬蹄型うずを形成する。しかし、 $y/h=0.7$ および 0.8 の高さでは、発煙は平面壁とほぼ平行にあることが確認されている。図-19(a),(b)は流れの対称面 (xy 面) における流れ状態を示したものである。図-19(a)において、円柱に近づく流れは、円柱が設置される平面壁と平行な状態にあることが認められる。また、図-19(b)に示される円柱後方の流れには、円柱から放出されたうずが下流方向に周期的に流されていく状態が観察される。

図-20は $d=30\text{ mm}$ の円柱周辺の壁面流れを油膜法によって観察したものである。円柱周辺には、スモーク・ワイヤ法による観察結果と同様に円柱をとり囲む馬蹄型うずの根跡が確認

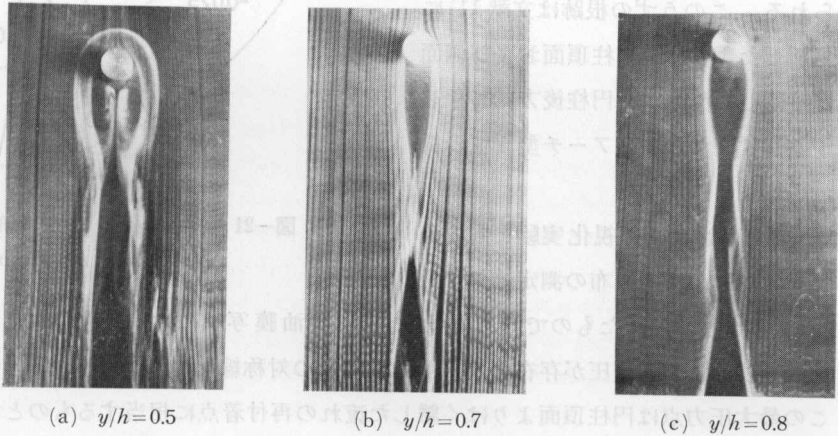


図-18 円柱周辺流れ $U_0=0.7\text{ m/s}$, $\delta=18\text{ mm}$, $h=10\text{ mm}$

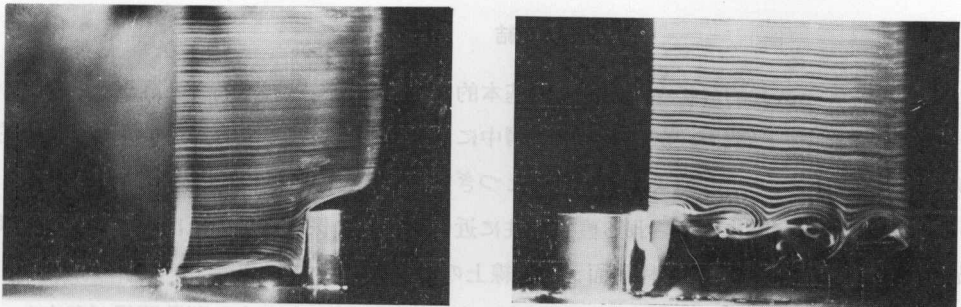


図-19 直立円柱前後のフローパターン (対称面)

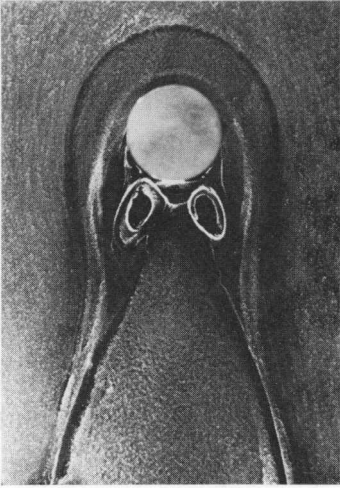


図-20 直立円柱周辺の壁面流れ
 $U_0=16$ m/s, $h=30$ mm

される。さらに、円柱後方には一対のうずの根跡が認められる。このうずの根跡は文献11)においても指摘したように、円柱頂面および側面においてははく離した流れが、円柱後方にまき込んで形成するうず、すなわちアーチ型うずの根本である。

図-21 は油膜法による可視化実験と同一条件で行った円柱周辺の圧力分布の測定結果を圧力係数 c_p の等圧力線で示したものである。円柱後方には油膜写真において観察された一対のうずと一致する位置に強い負圧が存在する。また、流れの対称線上 $x/d \approx 2.7$ に圧力の最大値がある。この最大圧力点は円柱頂面よりはく離した流れの再付着点に相当するものと考えられるが、詳細な確認は行っていない。

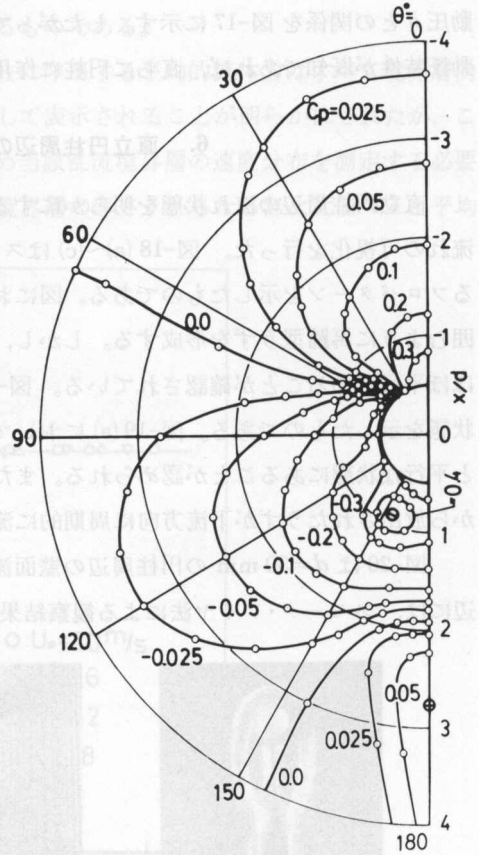


図-21 平面壁上の静圧分布
 $U_0=16$ m/s, $h=30$ mm

7. 結 論

本研究は、三次元的形状を有する最も基本的な物体と考えられる高さと同径とが等しい直立円柱を対象とし、当該円柱が乱流境界の層中に直立して存在する場合の流力特性を実験的に明らかにしたものである。結果を要約するとつぎのようになる。

(1) 乱流境界層内に設置される直立円柱に近づく流れの保有する動圧は、円柱高さ $0.15 \leq y/h \leq 0.65$ の範囲において、円柱前面よどみ線上の圧力に一致する。

(2) 抗力係数 C_D と、乱流境界層内の平均動圧 \bar{q} との間には一次の関数関係が存在し、実験式(5)を与えることができる。

(3) 平均流体力学特性量としての最大圧力, 最小圧力およびモーメント係数なども \bar{q} の一次関数として表され, それぞれ式 (6), (8), (10) によって表示される。

(4) 抗力の作用点は, 円柱の高さの変化および乱流境界層の特性量の変化にもかかわらず $y_0 \doteq 0.51$ なる一定値を有する。

参 考 文 献

- 1) Good, M. C. and Jourbert, P. C.: J. Fluid Mech., 31-3 (1968), 547.
- 2) 有江ほか3名: 機論, 41-343 (昭和50-3), 839.
- 3) 坂本ほか2名: 機論, 42-357 (昭和51-5), 1442.
- 4) Halitsky, J.: Meteorol. At. Energy, US AEC TID-24190 (1968), 221.
- 5) Castro, I. P. and Robins, A. G.: J. Fluid Mech., 79-2 (1977), 307.
- 6) 岡本ほか2名: 機論, 42-359 (昭和51-7), 2107.
- 7) Klebanoff, P. S. and Diehl, Z. W.: NACA Rep., No. 1110 (1952).
- 8) Coles, D.: J. Fluid Mech., 1 (1956), 191.
- 9) Fage, A. and Falkner, V. M.: Rep. & Mem., Aeron. Res. Council, No. 1369 (1931).
- 10) Goldstein, S.: Modern Development in Fluid Dynamics, Vol. 2 (1938), 424, Oxford.
- 11) 谷口ほか2名: 北見工業大学研究報告, 9-1 (昭和52-11), 1.

1. Introduction

The flow around a three-dimensional bluff body mounted on a plane wall exhibits some interesting and complicated phenomena. Namely, the boundary layer of a bluff body encounters an adverse pressure gradient, so that flow separation is induced at a certain distance upstream of the body. The separated flow rolls itself up downstream and surrounds the bluff body to form a system of horse shoe vortices. Further, the flow separated on the top surface wraps up and becomes a so-called arch-typed vortex.

In engineering, the aerodynamic behaviour of a three-dimensional bluff body in a turbulent boundary layer has attracted the attention of many investigators in the field of industrial aerodynamics. Okamoto [1] and Piedrier [2] have studied fluid force and wake formation of right circular cylinders of various heights. Castro and Robins [3] and Okamoto [4] have investigated aerodynamic characteristics of cube and cone, respectively. There exist many practical problems relating to this category of flow, but theoretical treatment is almost impossible, except for a few cases of numerical investigation of the laminar flow (Mason and Sykes [5], Daiguji [6]). This is because of their complicated nature and the lack of knowledge about such flows.

In previous papers (Taniguchi [7], Sakamoto [8]), the relation between the aerodynamic forces of right circular cylinders and cubes, cited as typical three-dimensional bluff bodies, and the characteristics of the boundary layer flows

* Department of Applied Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology.

** Ashikawa Nissan Automobile Co. Ltd.

*** Showa Seiki Co. Ltd.