

直交二円柱の抗力係数

山田 英巳*・武田 修**・大坂 英雄*・影山 芳郎*

Drag Coefficient of the Crossed Two Circular Cylinders

Hidemi YAMADA, Osamu TAKEDA, Hideo OSAKA and Yoshiro KAGEYAMA

Abstract

Measurements were made of the surface pressure distributions and drag coefficient for two circular cylinders forming a cross with low blockage ratio and high aspect ratio. The results showed that integrated drag coefficient was smaller than that of two-dimensional circular cylinder over a range of a Reynolds number from 10^3 to 8×10^3 . The local drag coefficient of upstream cylinder at the location of about $y/d=1$ was larger than that of a single cylinder by 25%. On the other hand the local drag coefficient of downstream cylinder took the minimum value at about $z/d=0.2$.

1. まえがき

十字形に組まれた二円柱は、整流金網や各種の骨組構造物の1つの基本要素と考えられ、工学上重要である。しかしながら、過去に行なわれた複数の円柱¹⁾に関する理論的あるいは実験的研究は、二次元の条件に関するものがほとんどであり、直交した細長い物体周りの流れに関する研究は極めて少ない。この種の研究には、わずかにDonoso²⁾らによる直交平板、大坂ら³⁾による相貫体の十字形円柱、およびZdravkovich⁴⁾による接触した直交二円柱についての研究がある程度である。この中、Zdravkovichは、upper subcritical regionにおいて高い閉そく率(5.6, 11.3%)と小さいアスペクト比($L/d=9, 18$)の条件の下で、本実験と同様の直交二円柱周りの流れを取り扱っている。

本研究では、閉そく率およびアスペクト比の影響が小さい場合の直交二円柱について実験を行ない、円柱表面圧力分布および抗力係数を評価した結果について報告する。

主要記号

x, y, z : 上流円柱軸のスパン中心位置を原点とする直角座標 (Fig. 1 参照)
 d : 円柱直径
 U_0 : 主流速度

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

L : 端板間距離
 C_p : 圧力係数 ($= (p-p_0)/(1/2)\rho U_0^2$, ρ は空気の密度)
 P : 円柱表面圧力
 P_0 : 円柱取り付け位置における主流静圧
 C_{p0} : $\theta=0^\circ$ 位置での圧力係数
 C_{p90} : $\theta=90^\circ$ 位置での圧力係数
 C_{p180} : $\theta=180^\circ$ 位置での圧力係数
 C_d : 局所抗力係数 ($= (1/2) \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta d\theta$)
 C_D : 平均抗力係数 ($= \int_0^l C_d d\ell / l$, ℓ は平均範囲)
 R_d : レイノルズ数 ($= U_0 \cdot d / \nu$, ν は空気の動粘性係数)

2. 実験装置および方法

実験は400mm×400mm断面、925mm長さの試験部をもつブローダウン型風洞を用いて行なった。Fig. 1に示す直交二円柱は、上流円柱と下流円柱が風路断面の中央で直交するように設置されている。なお、上流円柱は絞り部出口から670mmの位置に設置されている。

供試円柱には直径5mmおよび10mmのステンレス管あるいは真ちゅう管を用いた。また、円柱には風洞壁面に沿う境界層の影響を取り除くため円柱径の7倍直径のシャープエッジをもつ端板を風洞壁面から10mmの位置に取り付けた。上流円柱および下流円柱には、直径0.3mmの圧力取出孔が1個設けてあり、表面圧力の測

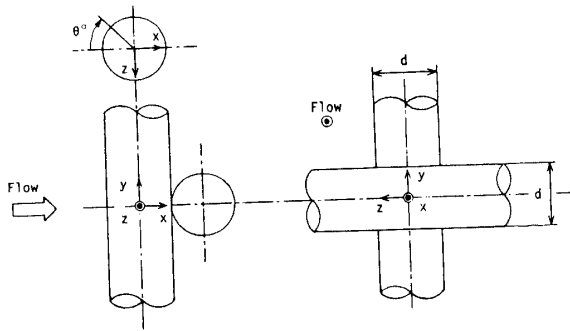


Fig. 1 Coordinate system and nomenclature

定は、それぞれの円柱を回転支持器（読み取り精度1分）により回転させて行なった。円柱直径を代表寸法とするレイノルズ数は直径5mmの円柱に対しては、 $Rd=10^3$, 2×10^3 , 4×10^3 とし、直径10mmの円柱に対しては、 $Rd=8 \times 10^3$ とした。従って、 $Rd=10^3 \sim 4 \times 10^3$ の場合、閉そく率は2.5%、アスペクト比は $L/d=76$, $Rd=8 \times 10^3$ の場合、閉そく率は4.9%、アスペクト比は $L/d=38$ である。

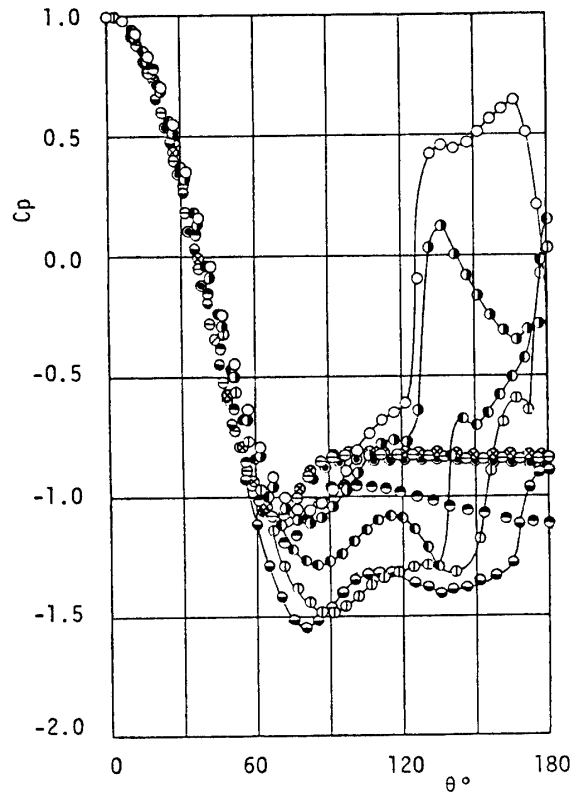
3. 実験結果および考察

3.1 表面圧力分布

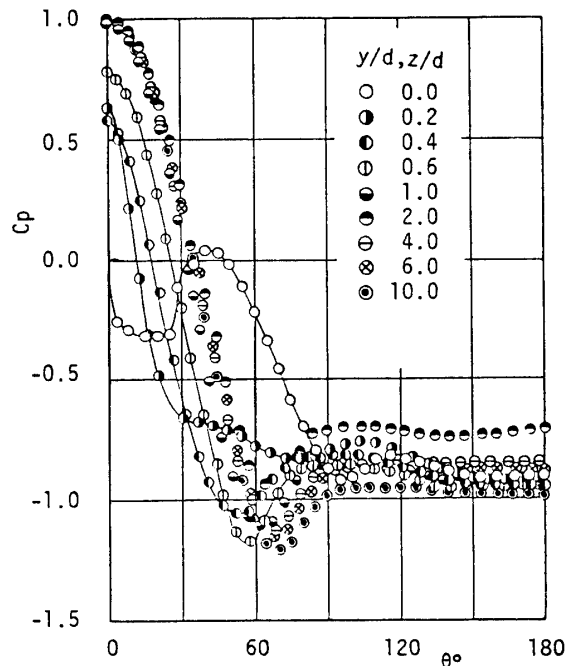
Fig. 2(a), (b) および Fig. 3 (a), (b) は、それぞれ $Rd=8 \times 10^3$ および $Rd=2 \times 10^3$ における上流円柱と下流円柱の表面圧力分布を示している。なお、図中の記号は、各円柱についてのスパン位置 (y/d は上流円柱, z/d は下流円柱) を示す。

上流円柱の表面圧力は、両レイノルズ数の場合とも y/d によらず $\theta=0^\circ$ で一定値1.0をとる。また、円柱前面側 ($\theta \leq 60^\circ$ の領域) においても y/d に対してほぼ同様な値をとる。 $y/d=0$ における圧力分布は、最小値から接触点 ($\theta=180^\circ$) 付近の正の値まで急上昇する。この様な円柱後面での圧力の上昇は、下流円柱を取り囲む馬蹄形渦による高速流体のもち込みによるものと考えられる。 $y/d=0.2 \sim 1.0$ においても、円柱後面側で極大値をとる分布となっているが、さらに y/d が大きくなるにつれこの極大値は減少する。 $y/d=2$ より大きい範囲では円柱後面側の極大値はなくなり、単円柱の分布に近づいている。

下流円柱の表面圧力分布は、 $z/d=0$ において円柱前面側 ($Rd=8 \times 10^3$ のとき $\theta=40^\circ$, $Rd=2 \times 10^3$ のとき $\theta=60^\circ$) に極大値をもつ。この極大値はレイノルズ数が小さくなるにつれ小さくなり、また θ の位置も外側へと移動している。 $z/d \geq 0.4$ においては、前方岐点 ($\theta=0^\circ$) における C_p の値は z/d が大きくなるにつ



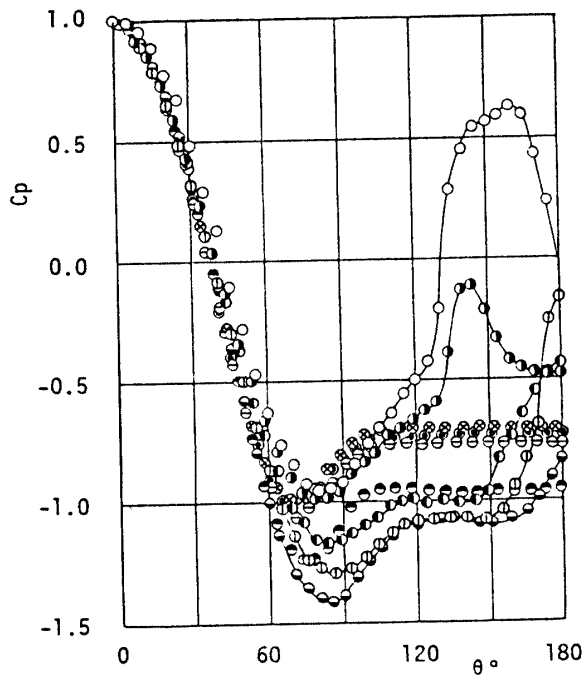
(a) Upstream cylinder



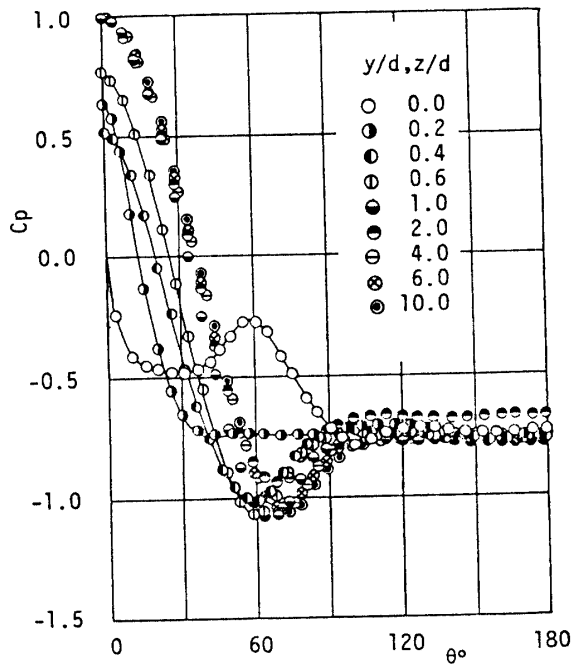
(b) Downstream cylinder

Fig. 2 Pressure coefficient distributions ($Rd=8 \times 10^3$)

れ上昇し、 $z/d \geq 2$ の範囲ではほぼ一定値1.0をとる。円柱後面 ($\theta \geq 90^\circ$) において、各 z/d とも分布は単円



(a) Upstream cylinder



(b) Downstream cylinder

Fig. 3 Pressure coefficient distributions
($Rd=2 \times 10^3$)

柱の分布と類似しており、この範囲においては、上流円柱の影響が小さいものと思われる。

3.2 スパン方向圧力分布

Fig. 4は、上流円柱の $\theta=90^\circ$ と 180° における C_p の

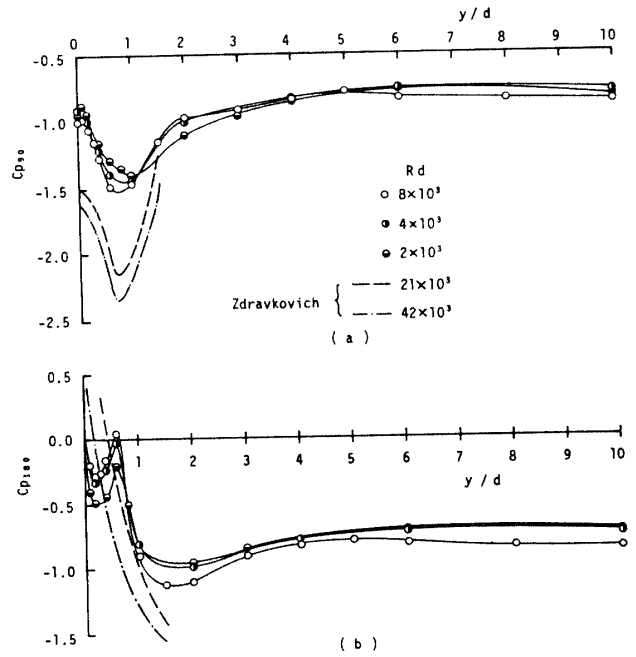


Fig. 4 Spanwise pressure coefficient variations along the upstream cylinder

スパン方向分布を示している。本実験結果と比較のため Zdravkovich⁴⁾の結果を図中に併記している。

C_{p90} の分布は、レイノルズ数によらず分布がほぼ一致している。すなわち、 $y/d=0$ から減少して、 $y/d=0.8 \sim 1$ で極小値をとり、その後上昇して一定値に近づいている。本実験の結果は Zdravkovichの結果と比較し分布傾向は一致しているが、全体的にかなり小さな値をとっている。これは、Zdravkovichの結果には閉そく率の影響^{5) 6)}がかなり大きく効いているためと思われる。

C_{p180} の分布は、レイノルズ数により多少値が異なるが全体の分布傾向は類似している。特に極大値、極小値はレイノルズ数の増加とともに大きくなっている。Zdravkovichの分布傾向とは $y/d \leq 0.5$ の範囲で異なっているが、これは、Zdravkovichの結果には $y/d \leq 0.5$ における測定点がなく、単に予想した線として描かれているためと思われる。

Fig. 5は、下流円柱の $\theta=0^\circ$ と 180° における C_p のスパン方向分布を示している。本実験結果と比較のため Zdravkovich⁴⁾の結果(C_{p0})を図中に併記する。

C_{p0} の分布は、レイノルズ数によらずスパン方向に値がほぼ一致している。その分布傾向は、 $z/d=0$ から上昇し、 $z/d=0.1 \sim 0.2$ で極大値、さらに $z/d=0.4$ で極小値をとった後、再び上昇して1.0の値となる。この極小値をもつ分布より、下流円柱を取り囲む馬蹄形渦の存在が示唆される。Zdravkovichは C_{p0} のスパン

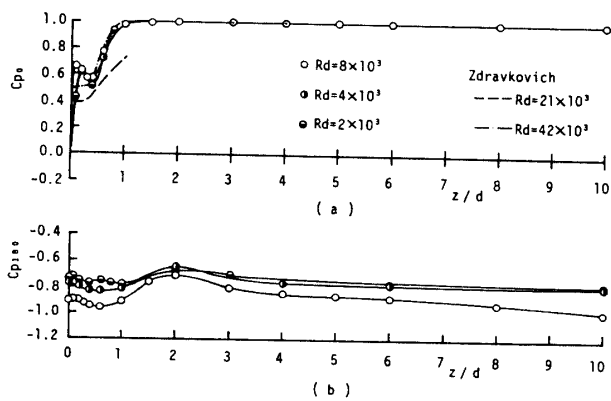


Fig. 5 Spanwise pressure coefficient variations along the downstream cylinder

ン方向分布が非対称であると述べているが、本実験においては対称性が良好であった。

C_{p180} の分布傾向は、レイノルズ数によらずスパン方向に一致している。急激なスパン方向変化はなく、上流円柱の影響は少ないものと思われる。

一般に、円柱表面圧力が最小となる角度と剥離点の角度はほぼ一定の関係にあると考えられるので、 C_p の最小となる角度のスパン方向分布について調べてみた。その結果を Fig. 6 (a), (b) に示す。

上流円柱の場合、 $y/d = 0$ から上昇して $y/d = 0.6$ 付近で最大値をとり、その後、減少して二次元の値へと

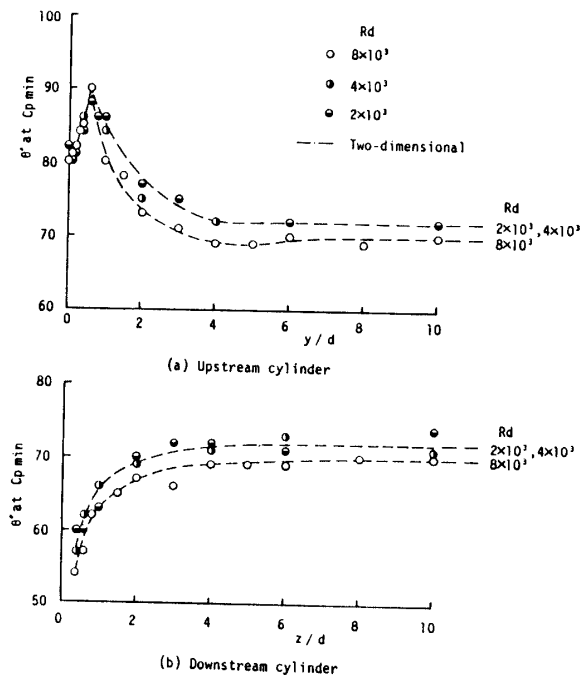


Fig. 6 Spanwise variations of angle at the minimum value of C_p

近づく。写真を割愛したが、油膜法による表面流れの可視化において $y/d = 0.6$ 付近に剥離線の後退が観察された。

下流円柱の場合、剥離点の観察結果と同様に接触点に向かって値が小さくなっている。なお、Fig. 2 および Fig. 3 の表面圧力分布からわかるように $z/d = 0, 0.2$ における最小値は不明確なのでここでは省略した。

3.3 抗力係数

Fig. 7は、各 $y/d, z/d$ の位置の円柱表面圧力分布より求めた上流円柱および下流円柱の局所抗力係数 C_d のスパン方向分布を示している。局所抗力係数は、

$$C_d = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta \, d\theta$$

として求めている。比較のため Zdravkovich⁴⁾ の結果も図中に併記する。

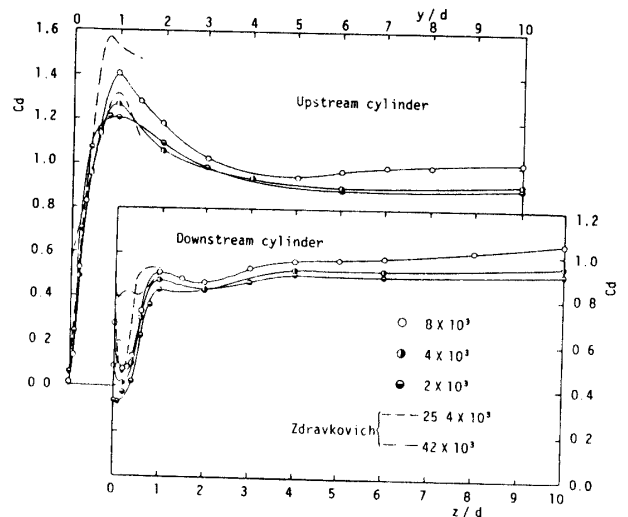


Fig. 7 Spanwise variations of local drag coefficient

上流円柱の場合、レイノルズ数によらず分布傾向が一致している。すなわち、 $y/d = 0$ から局所抗力係数は急上昇し、 $y/d = 1$ で最大値をとる分布を示している。この最大値は二次元の値より各レイノルズ数の場合ともほぼ25%大きな値である。同様な傾向は平板上に置かれた境界層外の有限長円柱の自由端近くでも見られる⁷⁾。Zdravkovich の実験結果も本実験と同様に25~30%大きい値を示している。しかしながら、Zdravkovichはこの C_d の増加が主に高い閉そく率のために生じたと述べている。

下流円柱の場合、レイノルズ数によらずほぼ同様な分布傾向をとる。すなわち、 $z/d = 0$ から減少して z/d

=0.2で極小値をとり、 $z/d = 1$ で極大値をとる。Zdravkovichはこの極小値が小さな閉そく率の場合 ($R_d = 25.4 \times 10^3$ の場合) に対してのみ見られると述べている。

Fig. 8は、レイノルズ数に対する中心面抗力係数の分布を示したものである。比較のため二次元円柱における Wieselsberger の結果を示す。

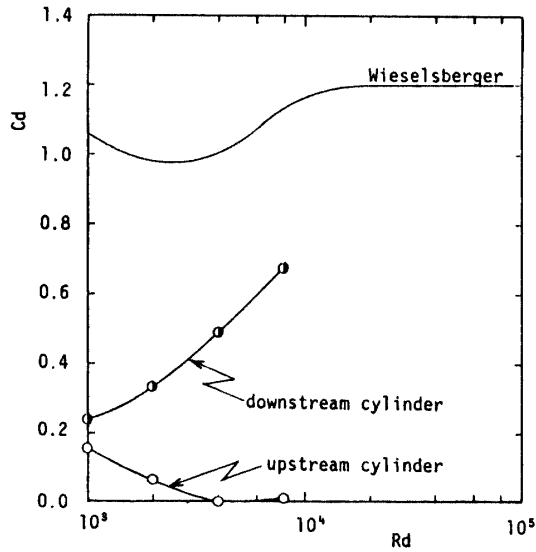


Fig. 8 Local drag coefficient in the center plane

上流円柱は、抗力が極めて小さくレイノルズ数が小さくなるにつれてわずかに大きくなる。逆に下流円柱では、レイノルズ数が小さくなるにつれて小さくなる。これはレイノルズ数が大きくなるにつれ、上流円柱については後面側の圧力の値が大きくなり、一方、下流円柱については前面側の圧力が上昇するためと思われる。

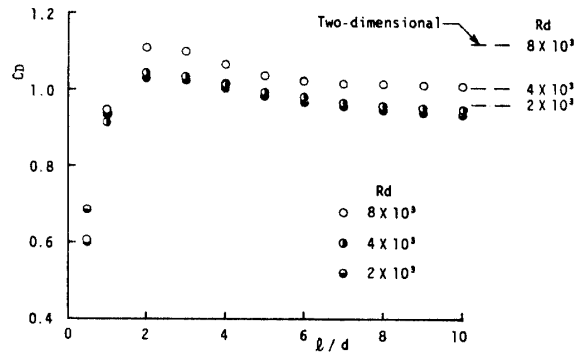
Fig. 9は、上流円柱および下流円柱のそれぞれについて次式で示す平均抗力係数のスパン方向分布を示したものである。

$$C_D = \frac{\int_0^{\ell} C_d d \ell}{\ell}$$

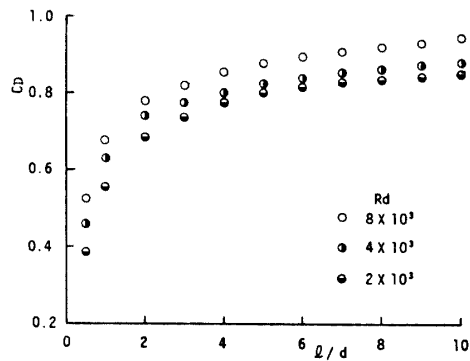
ここで ℓ は、上流円柱および下流円柱のスパン方向の積分距離であり、平均範囲と呼ぶこととする。

上流円柱の C_D の値は、平均範囲が $\ell/d = 2$ のとき極大値をとり、 $\ell/d = 8$ 付近で減少がゆるやかとなっている。平均範囲 ℓ/d の増加とともに C_D の値は極めてゆっくりと二次元の値に近づくものと思われる。

下流円柱の C_D の値は、平均範囲が $\ell/d = 0.5$ から増加するとともに単調に増加している。平均抗力係数 C_D の値の二次元値への漸近は上流円柱の方がはやい

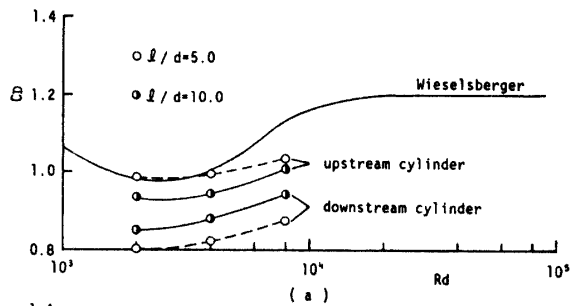


(a) Upstream cylinder

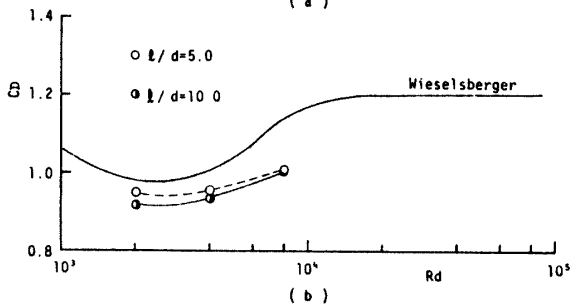


(b) Downstream cylinder

Fig. 9 Overall drag coefficient



(a)



(b)

Fig. 10 Relation between overall drag coefficient and Reynolds number

ようである。

Fig. 10は、平均範囲を $\ell/d = 5$ および10とした場合のレイノルズ数に対する平均抗力係数の変化を示している。Fig. 10 (a) は、上流円柱および下流円柱

の場合の結果を示し、Fig. 10 (b) は直交二円柱についての平均抗力係数を示す。

上流円柱および下流円柱の平均抗力係数はともにレイノルズ数が大きくなるにつれて上昇しているが、二次元円柱の場合に比べて上昇はゆるやかである。また、 C_D の値は平均範囲 l/d によりかなり異なっている。上流円柱の場合 $l/d=5$ の方が、下流円柱の場合 $l/d=10$ の方が C_D の値が大きくなっている。これは、上流円柱の場合 $y/d=1$ 付近に最大値、下流円柱の場合 $z/d=0.2$ 付近に最小値が存在するためと思われる。

直交二円柱の平均抗力係数 C_D は、各円柱についての C_D に比べ平均範囲 $l/d=5$ と 10 の結果が接近している。 C_D の分布はレイノルズ数が大きくなるにつれて上昇しているが、二次元円柱の場合に比べて上昇は小さく、 $R_d=8 \times 10^3$ の C_D は二次元の値に比べてかなり低い値となっている。

4. 結 論

直交二円柱の表面圧力および抗力を詳細に調べ、以下の点を明らかにした。

1. 本実験のように閉そく率やアスペクト比の効果が

小さい場合、 $R_d=10^3 \sim 8 \times 10^3$ の範囲における抗力係数のレイノルズ数に対する変化は同じレイノルズ数領域の二次元円柱の場合より小さい。

2. 上流円柱の局所抗力係数は対称面 ($y/d=0$) で非常に低いが、 $y/d=1$ 付近で単円柱の値より約25%大きい値をとる。

終わりに本実験装置の製作に当り協力頂いた井上忠義技官、並びに実験に協力頂いた卒研生都倉宏之、西一郎の両君に感謝致します。

文 献

- 1) M. M. Zdravkovich: Trans. ASME, J. Fluid Eng, **99**, 618 (1977)
- 2) J. A. Donoso, R. Hillier and C. K. Yeung: J. Wind Eng. and Indust. Aerodyn, **11**, 381 (1983)
- 3) 大坂・他4名: 機論 (B編), **48**, 1229 (昭57)
- 4) M. M. Zdravkovich: J. Fluid Mech., **128**, 231 (1983)
- 5) 岡本・竹内: 機論 (第2部), **41**, 181 (昭50)
- 6) G. S. West and C. J. Apelt, J. Fluid Mech, **114**, 361 (1982)
- 7) 岡本・八木田: 機論 (第2部), **38**, 2259 (昭47)

(昭和59年10月15日受理)