

乱流境界層内に存在する近接した直立二円柱の干渉*

(第1報 圧力分布および干渉力)

谷口清一**
坂本弘志**

(昭和54年4月28日受理)

Flow Interference Between two Circular Cylinders of the Finite Height Vertically Placed in the Turbulent Boundary

(Part I Pressure Distribution and Interference Force)

by Seiichi TANIGUCHI and Hiroshi SAKAMOTO

This report presents the interference force arising from various arrangements of two-cylinders of finite height vertically mounted in the turbulent boundary layer. The variations of interference drag and lift force are found to have symmetrical characteristics with respect to the change of the attack angle. Moreover, it is clarified that the drag force has a maximum value at the attack angle $\varphi \cong 75^\circ$ and lift force has two maximum values at $\varphi \cong 15^\circ$ and $165^\circ \sim 170^\circ$.

1. 緒 論

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、大気乱流境界層内に設置される高層建造物、冷却塔などの風圧による振動、倒壊の防止など^{1),2)}に関連して、工学的に重要な課題の一つに挙げられる。かかる見地で最近この分野に多くの研究者が関心を払うようになり、特に Cermak³⁾、Castro and Robins⁴⁾は乱流境界層内におかれた単独角柱周辺の流れに関して詳細な研究を行っている。

しかし、実際には高層建造物群、冷却塔群などのように複数物体が近接して接置されることがあり、各物体間の相互干渉によって、複数物体間の流れは単独物体周辺の流れとは大きく異なる^{5)~7)}。

本研究は、なめらかな平面壁に沿って発達する乱流境界層内に、境界層厚さより幾分大きい高さを有する直立二円柱を近接させて設置し、これら二円柱に作用する干渉力を明らかにし

* 日本機械学会北海道支部第21回講演会にて発表 (1978-10)

** 北見工業大学機械工学科

たものである。実験では、二円柱の間隔と流れの方向をそれぞれ変化させて、円柱に作用する時間平均的流体力を求めてある。

使用記号

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

u : 境界層内の平均流速

$$C_D: \text{抗力係数} = D / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 h d \right)$$

u_τ : 摩擦速度 $= \sqrt{\tau_0 / \rho}$

U_0 : 主流速度

$$C_L: \text{揚力係数} = L / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 h d \right)$$

x, y, z : 直交座標 (図-2 参照)

δ : 境界層厚さ ($u/U_0 = 0.99$)

C_{D0} : 単独円柱の抗力係数

$$\delta^*: \text{排除厚さ} = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_0} \right) dy$$

d : 円柱の直径

θ : 運動量厚さ $= \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_0} \right) \frac{u}{U_0} dy$, 円柱の円周角

D : 抗力

θ_0 : 円柱前面に存在するよどみ点の位置

h : 円柱の高さ

φ : 迎角

H : 形状形数 $= \delta^* / \theta$

τ_0 : 壁面せん断応力

L : 揚力

p : 円柱表面上の圧力

ν : 流体の動粘性係数

p_0 : 主流の静圧

Re_0 : 境界層レイノルズ数 $= U_0 \theta / \nu$

ρ : 流体の密度

s : ピッチ (図-2 参照)

2. 実験装置および方法

実験には断面 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た。試験円柱は図-1 に示すように高さ $h = 45$ mm, 直径 $d = 15$ mm, の同一寸法を有する黄銅製の二円柱からなり、一方の円柱を圧力測定用円柱, 他方の円柱をダミー円柱として使用した。また, 圧力測定用円柱には, 円柱の高さ方向に直径 0.4 mm の静圧孔が 11 個設けられてある。これらの圧力孔はあらかじめ油粘土によって密閉され, 気密試験を経てから 1 個ずつ開孔して, 円柱表面上の圧力測定を行うようにしてある。

二円柱は, 図-2 に示すように風洞測定部床面上に存在する乱流境界層内に直立している。主流速度 U_0 は 16 m/s の一定値に保持し, 円柱直径に対する二円柱間の相対的ピッチ s/d (以下ピッチとする) および風向をそれぞれ変化させることにした。なお, 風向の変化は図-2 に示すように流れに対して円柱の迎角 φ を変化させることによって行った。二円柱間のピッチ s/d は主に 1.5, 2, 3 の 3 通り, 迎角 φ は $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で 15 通りに変化させた。なお, 二円柱設置位置における乱流境界層の特性量は表-1 に示す通りである。

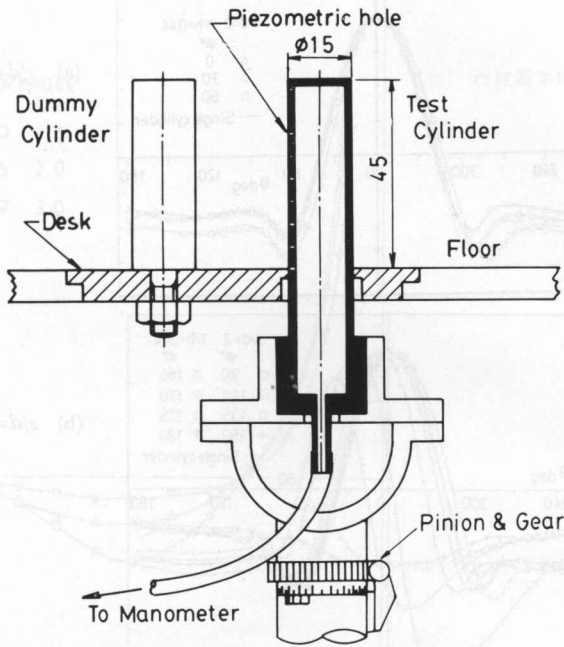


図-1 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

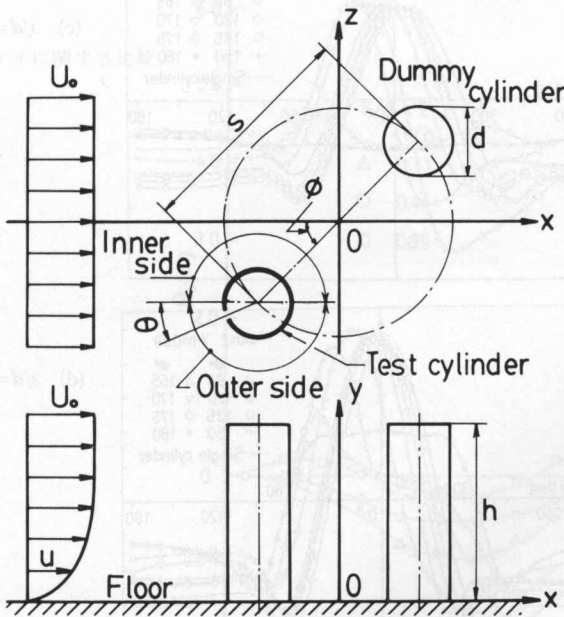


図-2 座標の定義

Fig. 2. Definition sketch and coordinate system.

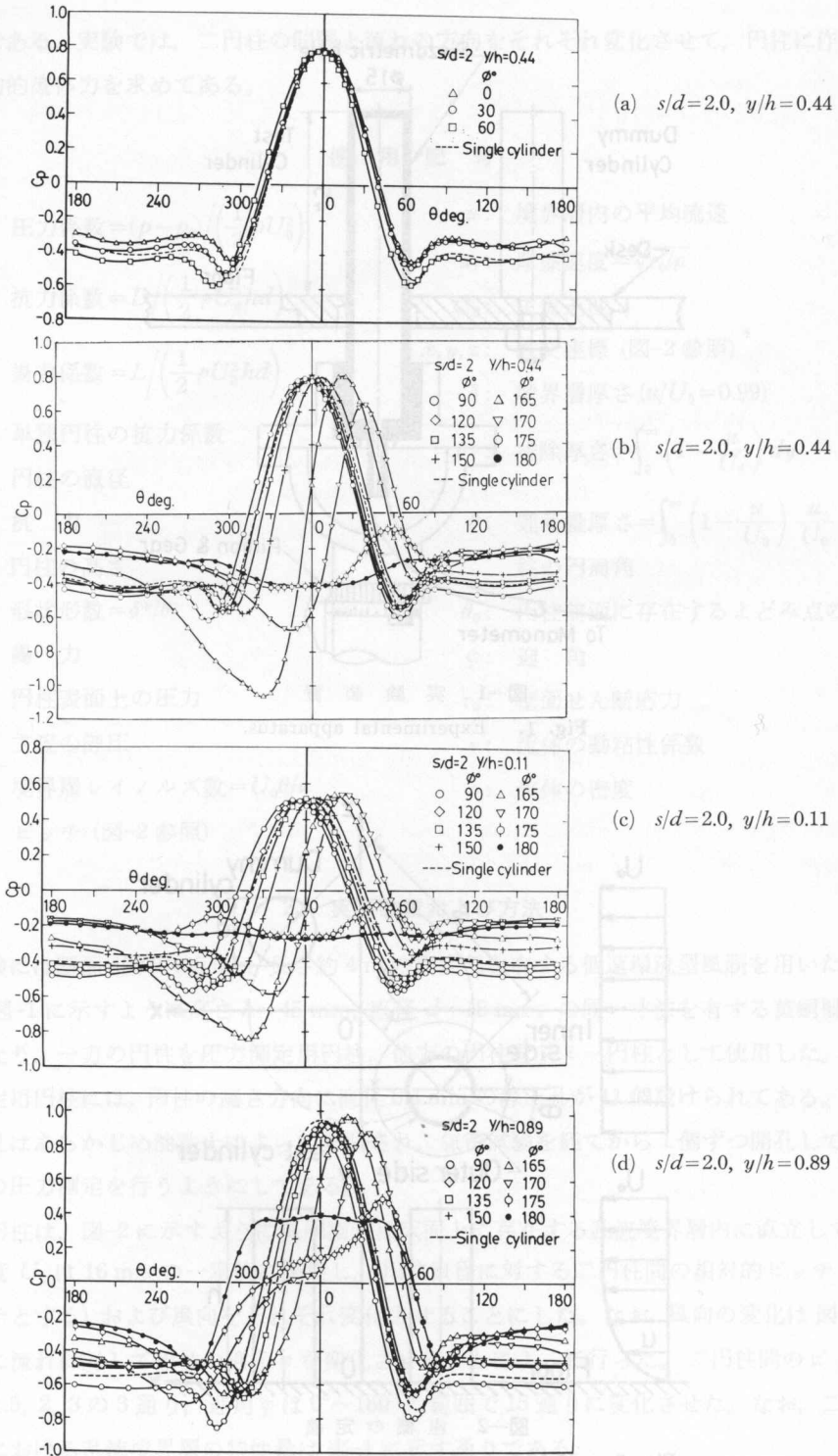


図-3 円柱表面上の圧力分布

Fig. 3. Pressure distributions on the cylinder surface.

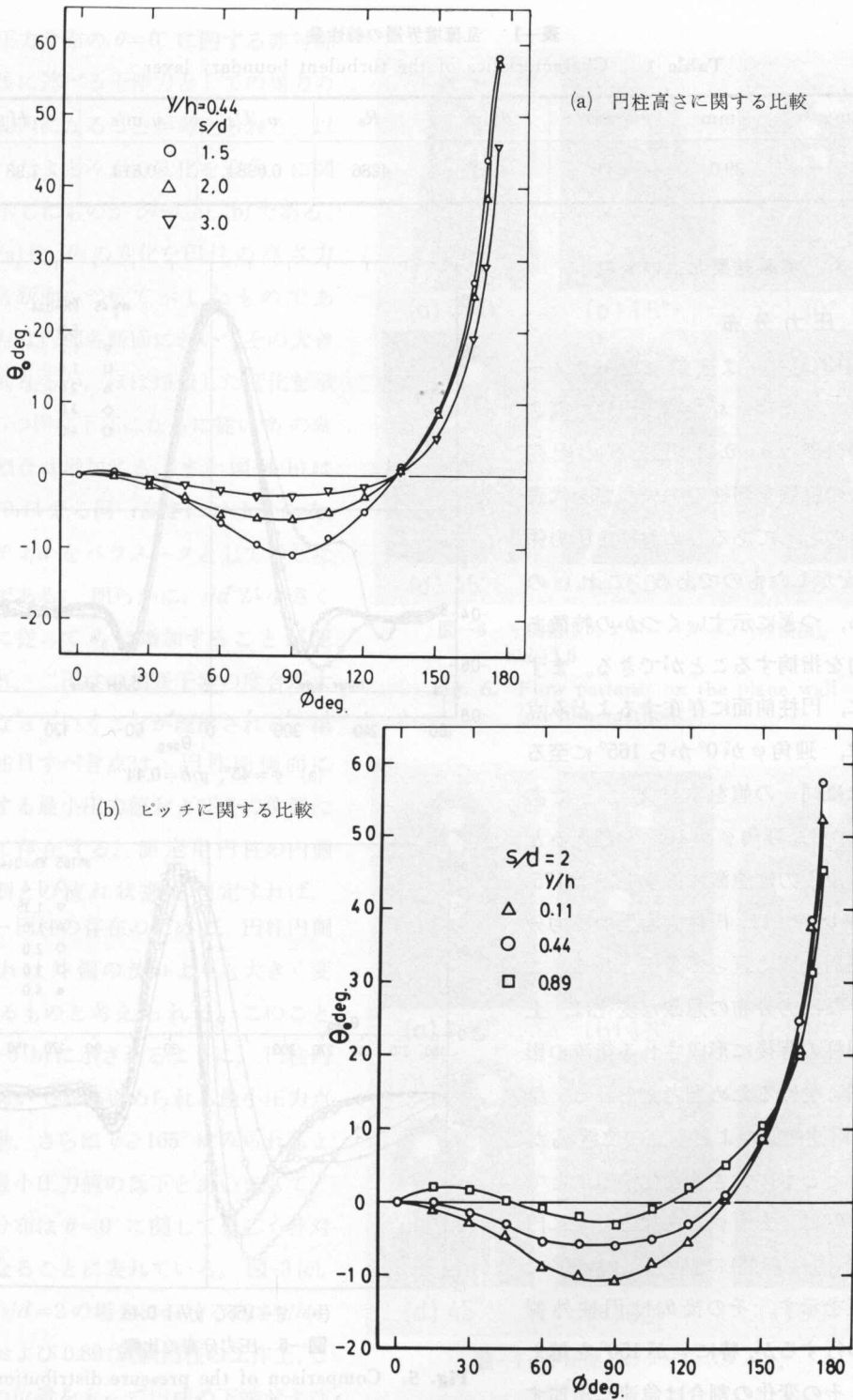


図-4 よどみ点の位置

Fig. 4. Location of the stagnation points on the front surfaces of the cylinders.

表一 乱流境界層の特性量

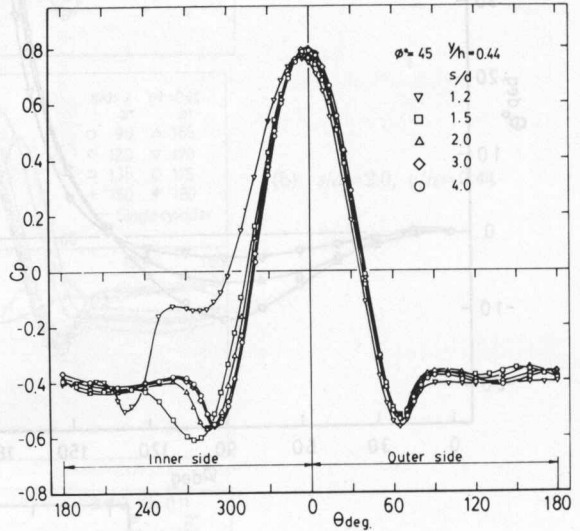
Table 1. Characteristics of the turbulent boundary layer

U_0 m/s	δ mm	δ^* mm	θ mm	R_θ	u_τ/U_0	u_τ m/s	H
16	39.0	6.26	4.53	4286	0.0384	0.614	1.38

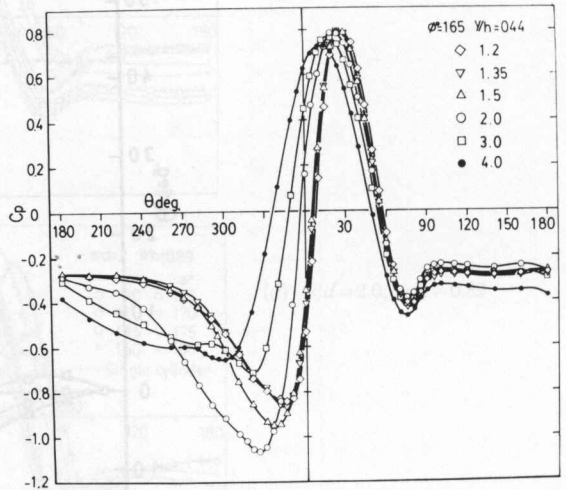
3. 実験結果および考察

3.1 圧力分布

図-3 (a), (b) は迎角 φ をパラメータとして、ピッチ $s/d=2$, 円柱の高さ方向の位置 $y/h=0.44$ (圧力孔の配列上, この位置を円柱の中央高さを代表するものとしてある。)における圧力係数 c_p を示したものである。これらの図から, つぎに示すいくつかの特徴ある傾向を指摘することができる。まず第一に, 円柱前面に存在するよどみ点圧力は, 迎角 φ が 0° から 165° に至るまでほぼ同一の値を有することである。しかし, 迎角 φ が 165° を越えるるとよどみ点圧力は急激に減少し, $\varphi \approx 175^\circ$ および 180° では, 円柱表面上の圧力分布は円周全域に亘って負圧となる。このような圧力分布の急激な変化は, 上流側円柱の背後に形成される後流の影響を強く受けるためと考えられる。第二に, 円柱前面のよどみ点の位置 θ_0 が迎角 φ とともに大きく変化することである。 θ_0 は, まず φ の増加とともに円柱内側(図-2 参照)に移動し, $\varphi \approx 90^\circ$ で最小値を示す。その後 θ_0 は円柱外側へと移行するが, 特に φ が 150° を越えると, その変化の割合は急速に増加する。よどみ点のかかる移動によって生



(a) $\varphi = 45^\circ, y/h = 0.44$



(b) $\varphi = 165^\circ, y/h = 0.44$

図-5 圧力分布の比較

Fig. 5. Comparison of the pressure distributions on the variation of the pitch.

ずる圧力分布の $\theta=0^\circ$ に関する非対称性は後に述べる干渉力としての揚力の発生要因になることが考えられる。以上述べたよどみ点の変化を迎角 φ に関して示したものが 図-4(a), (b) である。図-4(a) は、 θ_0 の変化を円柱の高さ方向の各断面について示したものである。 θ_0 は円柱各断面においてその大きさは異なるが、ほぼ類似した変化を示し、かつ円柱下部になるに従い θ_0 の変化の割合は増加する。また 図-4(b) は $y/h=0.44$ なる同一高さにおける θ_0 を、ピッチ s/d をパラメータとして示したものである。明らかに、 s/d が小さくなるに従って θ_0 は増加することが認められ、二円柱の相互干渉の度合いが大きくなっていくことが理解される。第三の注目すべき点は、円柱両側面に存在する最小圧力値およびその位置に関して存在する。測定用円柱の内側と外側との流れ状態を想定すれば、ダミー円柱の存在のために、円柱内側の流れは外側の流れよりも大きく変化するものと考えられる。このことは 図-3(b) に示されるように、円柱内側において特に認められる最小圧力点の移動、さらに $\varphi \geq 165^\circ$ にみられるような最小圧力値の低下とあいまって、圧力分布は $\theta=0^\circ$ に関して著しく非対称になることに表れている。図-3(c), (d) は $s/d=2$ の場合における高さ $y/h=0.11$ および 0.89 (試験円柱の工作上、これらの位置をもって円柱の下端および上端を代表しているものとする。) に対

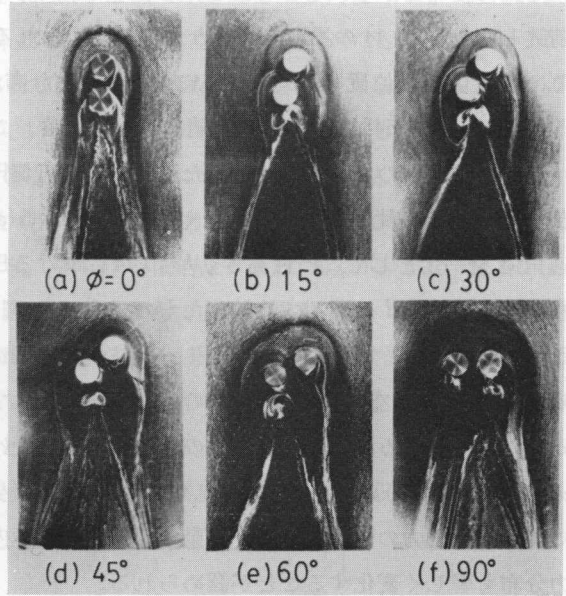


図-6 平面壁上のフローパターン (油膜法), $s/d=1.5$

Fig. 6. Flow patterns on the plane wall (oil film method).

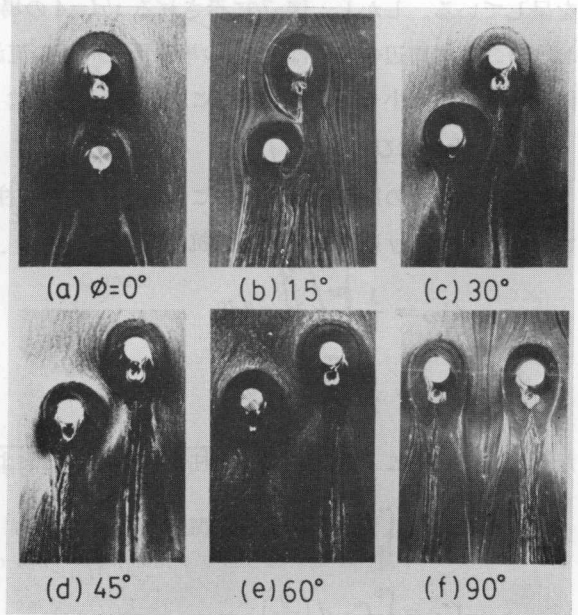


図-7 平面壁上のフローパターン, $s/d=4.0$

Fig. 7. Flow patterns on the plane wall.

する圧力分布を示したものである。これらの圧力分布には、前述した $y/h=0.44$ の場合と同様な傾向が認められる。しかし、 $y/h=0.89$ の位置では $\varphi=180^\circ$ における圧力分布が、円柱前面 $\theta \approx -64^\circ \sim 64^\circ$ において正の値を示している。このことは、上流側円柱の上端ではく離れた流れが、下流側円柱の上部前面において付着するためと考えられる。図-5(a), (b) は迎角 φ を一定として、円柱高さ $y/h=0.44$ における圧力分布をそれぞれの s/d に関して比較したものである。図-5(a) に示されるように、測定用円柱がダミー円柱の上流側に位置する場合、圧力分布は $1.5 \leq s/d \leq 4$ の広い範囲に亘ってほぼ一定した値を有するが、上流側円柱の影響を大きく受けると考えられる。図-5(b) の $\varphi=165^\circ$ においては、 s/d の減少とともによどみ点圧力の位置は大きく移動し、さらに円柱内側の圧力分布も著しく変化することが認められる。

つぎに、二円柱周辺の流れを油膜法による可視化観測結果に基づいて考察してみることにする。まず $s/d=1.5$ の場合、図-6 に示されるように各々の迎角 φ に関して二円柱をとり囲むようにして馬蹄型渦が存在し、二円柱間の流れは複雑な状態を呈している。しかし、図-7 に示される $s/d=4$ の場合になると、迎角 $30^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$ の範囲における二円柱周辺の流れは図-8 の単独円柱周辺の流れとほぼ類似し、 s/d が4程度になると二円柱間の干渉は小さいものであることと想定される。

3.2 抗力および揚力

円柱各断面の圧力を積分することによって、円柱の局所的抗力と揚力とが算定される。いま、円柱の高さ y における局所的抗力と揚力とを

$$C_{Dy} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} c_p \cos \theta d\theta \quad (1)$$

$$C_{Ly} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} c_p \sin \theta d\theta \quad (2)$$

なる係数で表すことにすれば、円柱に対する抗力および揚力係数は

$$C_D = \int_0^1 C_{Dy} d\left(\frac{y}{h}\right) \quad (3)$$

$$C_L = \int_0^1 C_{Ly} d\left(\frac{y}{h}\right) \quad (4)$$

として求められる。ただし、揚力係数 C_L は円柱内側の方向を正にえらぶものとする。

図-9 は抗力係数 C_D を迎角 φ について示したものである。それぞれの s/d において、いずれ

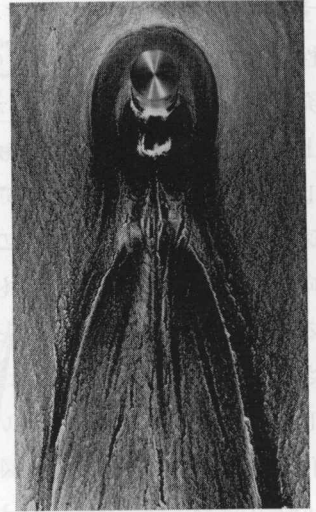


図-8 単独円柱周辺のフローパターン

Fig. 8. Flow pattern around a single cylinder.

の抗力係数 C_D も $\varphi=75^\circ$ 付近で最大となり、図中破線で示される単独円柱 (円柱の直径および高さは直立二円柱の場合と同じ) の抗力係数 C_{D0} より大きな値を呈する (たとえば、 $s/d=1.5$ の場合、 $\varphi=75^\circ$ における C_D は C_{D0} に比べ約 20% 程度大きな値となる)。さらに、 C_D は φ が 75° を越えるとしだいに小さくなり、特に $\varphi \geq 150^\circ$ では急激に減少する。かかる C_D の急激な減少は、測定用円柱が上流側円柱の後流の影響を強く受けるために生ずるものと考えられる。

一方、図-10 に示してある揚力係数 C_L の変化は、図-4 の θ の変化に類似しており、 C_D とは逆に C_L は $\varphi \geq 150^\circ$ で急激に増加する。さらに特徴的なことは、 C_L が $\varphi \approx 15^\circ$ および $\varphi = 165^\circ \sim 170^\circ$ にそれぞれ第一、第二の極大値を有することである。また、図-10 には、円柱に作用する流体力に関して干渉の影響を明らかにするために、干渉による抗力の変化量 $\Delta C_D (=C_D - C_{D0})$ をあわせて示してある。 ΔC_D と C_L は 0 軸を中心として対称的な変化傾向を有し、その大きさの絶対値がほぼ同じ程度であることは注目に値する。

なお、ピッチ s/d の小さな範囲における測定を現在継続して行っている。

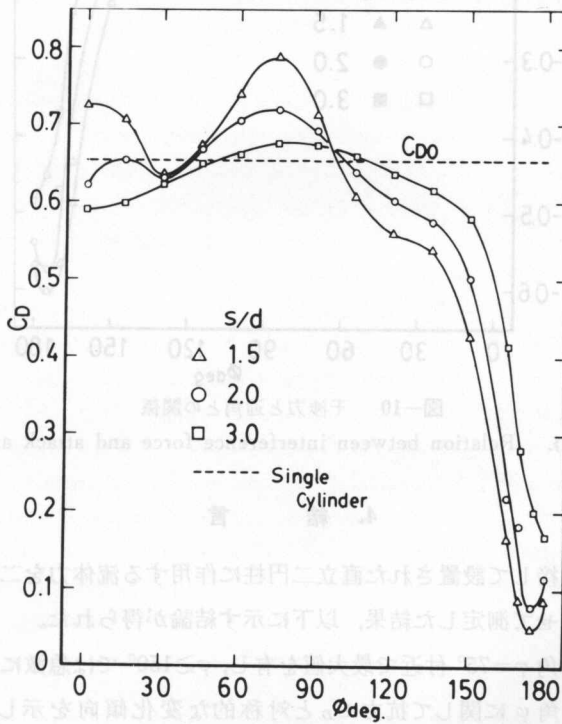


図-9 抗力係数と迎角との関係

Fig. 9. Relation between drag coefficient C_D and attack angle φ .

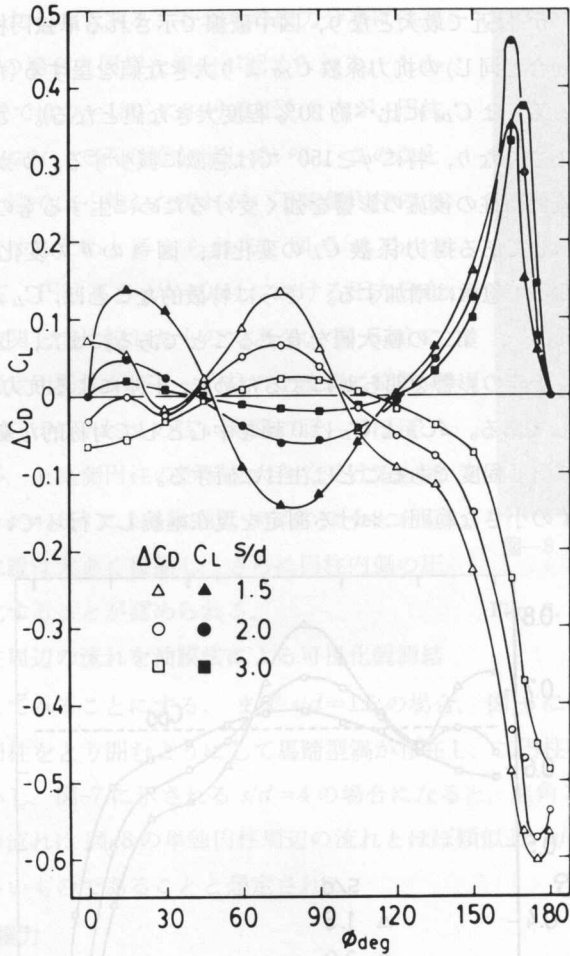


図-10 干渉力と迎角との関係

Fig. 10. Relation between interference force and attack angle.

4. 結 言

乱流境界層内に近接して設置された直立二円柱に作用する流体力を二円柱のピッチおよび迎角をそれぞれ変化させて測定した結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 抗力 C_D は迎角 $\varphi = 75^\circ$ 付近で最大値を有し、 $\varphi \geq 150^\circ$ では急激に減少する。
- (2) 揚力 C_L は迎角 φ に関して抗力 C_D と対称的な変化傾向を示し、 $\varphi \approx 15^\circ$ および $\varphi = 150^\circ \sim 165^\circ$ に極大値を有する。
- (3) 干渉による抗力の変化量 ΔC_D と揚力 C_L は、迎角 φ に関して対称的な変化を有し、その大きさの絶対値はほぼ同程度である。

おわりに、本研究を行うに際し実験装置の製作にご尽力戴いた小畑芳弘技官、実験に協力いただいた中山章、高村秀敏両君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Keith, J. E.: Wind Effects on Buildings and Structures, Proc. of the 4-th International Conf. (1975), Cambridge Uni. Press.
- 2) Tritton, D. J., Physical Fluid Dynamics, (1977), Van Nostrand Reinhold.
- 3) Cermak, J. E. et al.: NASA **CR-2806** (1977).
- 4) Castro, I. P., Robins, A. G.: J. Fluid Mech., **79-2** (1977), 307.
- 5) Spivack, H. M.: J. Aero. Sciences, **13** (1946), 289.
- 6) Biermann, D. and Herrstein, W. H.: National Advisory Committee for Aeronautics, **Tech. Rep. 468** (1963).
- 7) Zdravokovich, M. M.: Trans. of ASME, **99-4** (1977), 618.

by Masao Kato

When power system's constitutional elements are dropping off by a failure, it is necessary to find and remove the cause of the fault, and to restore the power system's faulted elements, because of the reduction of blocked out areas and to maintain safety of the power system. So, in such cases, the faulted elements must be found directly.

If we want to find the faulted elements at the dispatching center, we must infer from the state of protective relays and circuit breakers, after the faulted elements been removed from the deenergized power system. (We can not obtain the information of the sequence of their appearance's action owing to the automation system.) Although some reports have been published by which we can infer the faulted parts from the state of the protective relays, a redesigning of existing protective logic must be necessary for practical application of those logics. So, the author proposes the discriminative logic of faulted elements by which we can infer a faulted part from the state of existing protective relays.

In this paper, at first, the author proposes a discriminative logic of faulted elements which we can infer the faulted elements from the digital information that is made the state of existing protective relays and circuit breakers after the fault.

Next, the author confirms that the proposed logic is very effective for practical application, by comparing the logic using the data of real complex faults which have occurred in power electric utility.

1. ま え が き

電力系統は事故が起ると、閉路の失敗を含め、構成設備の脱落が起った場合、事故区間を閉じて事故区間を隔離、除去するとともに、事故区間を除いた系統の復旧を行なって停電の無い系統の安定性を保つ必要がある。そのため、このように事故発生、イスキヤクと事故区間を感知しなければならぬ。

* 昭和52年電気学会全国大会で一部発表(昭和52年7月)

** 北見工業大学電気工学科