

乱流境界層内に存在する近接した 直立二円柱の干渉* (第2報)

—干渉力およびその発生要因—

谷口清一**

坂本弘志**

(昭和54年8月23日受理)

Interference Between a Pair of Circular Cylinders Vertically Mounted in a Turbulent Boundary Layer (Part 2)

—Interference force and its origin—

by Seiichi TANIGUCHI and Hiroshi SAKAMOTO

Measurements of the pressure distributions on two circular cylinders of diameter d , vertically immersed in a turbulent boundary layer, are performed for various cylinder spacings s and angles of attack ϕ . The characteristics of the drag and lift forces acting on the cylinder are classified into three regions: i.e., 1) $0^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$, 2) $30^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$ and 3) $120^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ which are divided by the two zero-lift force lines. Moreover, it is found that the interference between two cylinders is almost negligible for $s/d \geq 4$, except for the influence of the wake region of the upstream cylinder.

1. 緒 論

単一の物体としては一様流の中で揚力を発生しないような形状であっても、複数物体として近接して設置された場合には、物体相互の干渉によって流れと直角方向の力(揚力)の発生することが知られている^{1),2)}。したがって、干渉を受ける物体に作用する流体力は一般に揚力と抗力とのベクトル和となる。このような流体力は、物体群の設置状態によって単独物体に作用する抗力より大きくなり^{1),3)}、さらにわずかな風向の変化によって大きさならびに作用方向が大きく変化することが多い。

複数物体の干渉に関しては、一様流中におかれた二次元二円柱^{1)~9)}、角柱⁷⁾、流線形柱⁸⁾などの干渉力および放出渦の測定に対して多くの実験的研究が行なわれていて、最近これらに関する総合的報告¹⁰⁾もなされている。また、同じ範ちゅうに属する平面壁上に複数で存在する三

* 日本機械学会第903回(流体工学・流体機械)講演会にて発表(昭和54年7月)

** 北見工業大学機械工学科

次元物体の干渉も工学的に重要な課題の一つである。たとえば、Ferribridge において発生した冷却塔群の風圧による倒壊¹¹⁾ の例が示すように、地表面に存在する建造物群の設計・施工に際しては耐風性能が必要になり、またビル風の予測には複数物体間の流れの構造を明らかにする必要がある。

本報告は前報¹²⁾ にひきつづき、乱流境界層内に設置された直立二円柱に関し、二円柱の間隔が比較的小さな範囲における円柱表面上の圧力の測定を行い、円柱間隔ならびに迎角の変化に対する時間平均的流体力を求めたものである。さらに、スモーク・ワイヤ法を用いて直立二円柱周辺の流れの観測を行い、干渉力（特に揚力）の発生要因を明らかにしてある。

2. 使用記号

c_p : 圧力係数	$= (p - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 \right)$	p : 円柱表面上の圧力
C_D : 抗力係数	$= D / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 h d \right)$	p_0 : 主流の静圧
C_{D0} : 単独円柱の抗力係数		s : 二円柱の中心距離
C_L : 揚力係数	$= L / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 h d \right)$	s/d : ピッチ
d : 円柱の直径		U_0 : 主流の速度
D : 抗力		x, y, z : 直交座標
h : 円柱の高さ		θ : 円周角
L : 揚力		ϕ : 迎角
		ρ : 流体の密度

3. 実験装置およびその方法

直立二円柱表面の圧力測定に用いた風洞、供試直立二円柱および実験条件は前報¹²⁾ と同一なので省略する。二円柱表面上の圧力測定は表-1 に示すように迎角 ϕ について 15 通り、ピッチ s/d について 7 通りに変化させて行っている。スモーク・ワイヤ法による可視化実験に用いた風路は図-1 に示すように全長 3,754 mm、長さ 1,574 mm、正方形断面 180 × 180 mm の測定部を有する吸込式風路である。可視化装置は図-2 に示すようにスモーク・ワイヤ（電熱細線）に通電するための放電回路（コンデンサ容量 2 ~ 860 μ F）、通電後任意時間遅らせるための遅延装置（遅延時間 10 μ sec. ~ 1 sec.）、発煙を照射するためのストロボスコープとこれを撮影するためのカメラから構成されている。電熱細線（ニクロム線、直径 0.12 mm）は図-3 に示す状態でプローブに取り付けられていて、実験では電熱細線が直立二円柱の中央高さになるように設定し

表-1 迎角とピッチ

Table 1. Angle of Attack and pitch

Angle of attack (ϕ°)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 170, 175, 180
Pitch (s/d)	1.2, 1.35, 1.5, 1.75, 2, 3, 4

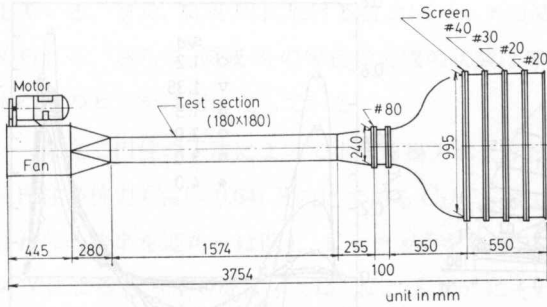


図-1 可視化用風路

Fig. 1. Wind Channel for the visualization of the flow by the smoke-wire technique.

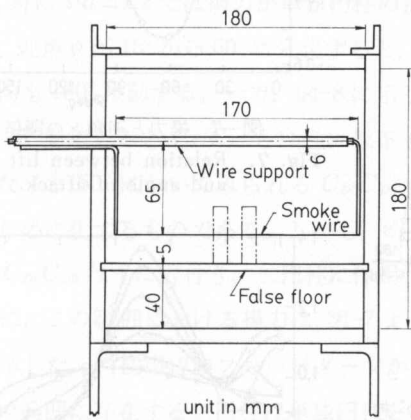


図-3 スモーク・ワイヤの設置状態

Fig. 3. Installation of the smoke wire.

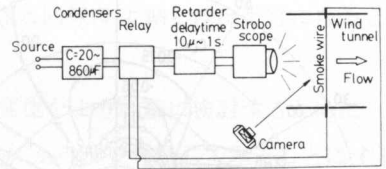


図-2 スモーク・ワイヤ法のブロック図

Fig. 2. Block diagram of the smoke-wire technique.

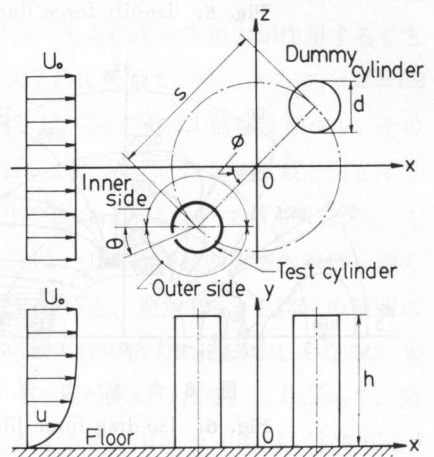


図-4 主な使用記号および座標の定義

Fig. 4. Definition sketch and coordinate system.

た。発煙油剤は流動パラフィン、ケロシンおよびシリコンオイルの混合油であり、これを細い毛筆でニクロム線に塗布してある。可視化実験では主流速度 U_0 を 0.7 m/s の一定値に保持してあり、この場合の円柱設置予定位置における境界層は層流であって、その厚さは約 18 mm であった。また可視化実験に採用した直立二円柱は高さ $h=30 \text{ mm}$ 、直径 $d=10 \text{ mm}$ である。なお、主な記号と座標の定義を図-4 に示してある。

4. 揚力および抗力

揚力、抗力の算定法およびその方向の定義は前報¹²⁾で説明したので省略する。図-5 は等揚力線を揚力係数 C_L の形で示したものである。この図から、二円柱の相対位置によって、揚力の状態は三つの領域に大別されることが認められる。すなわち、揚力は迎角 ϕ に関して 1) $0^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$ 、2) $30^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$ および 3) $120^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ の三領域が揚力零の二曲線によって区別される。これら各領域における揚力の特徴を示すとつぎのようになる。まず、領域 1) ではピッチの減少とともに揚力は増加し、 $\phi \approx 15^\circ$ に揚力の峰が存在する。領域 2) ではピッチの減少に

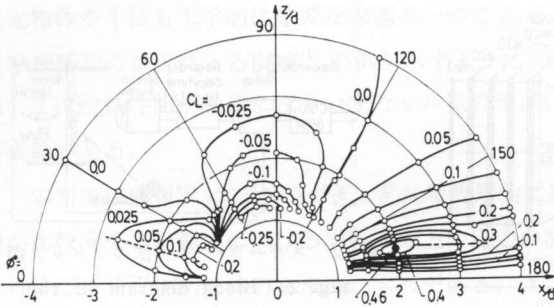


図-5 等揚力線
Fig. 5. Iso-lift force line.

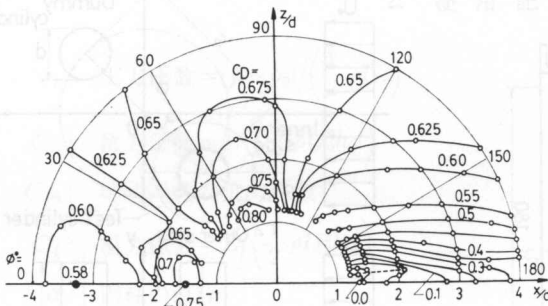


図-6 等抗力線
Fig. 6. Iso-drag force line.

ともない揚力は低下し、 $\phi = 65^\circ \sim 75^\circ$ にその谷がある。また、領域3)では、等揚力線が密になるとともにx軸とほぼ平行になる。このことは、上流側円柱の後流の影響を大きく受ける範囲においては、二円柱の相対位置が流れと直角方向へわずか移動することによって、揚力は大きく変化することを示すものである。特に、 $s/d = 2$ 、 $\phi \approx 165^\circ$ に揚力の最大値が存在することは注目に値する。また、 $x/d \approx 0.5$ にx軸と平行な揚力の峰が存在するが、この結果は一様流中におかれた二円柱の結果¹⁰⁾とほぼ一致している。

つぎに、図-6は抗力係数 C_D の形で定義される等抗力線図を示したものである。先の等揚力線図と等抗力線図の間には興味ある類似性を認めることができる。すなわち、等揚力線図において分類した三領域は、等抗力線図の場合ほぼ $C_D \approx 0.625$ の二つの曲線によって区別されていることがわかる。等抗力線図の各領域における特徴を示すと領域1)では、タンデム配列において $x/d \approx -1.5$ に抗力の最大値、 $x/d \approx -3.3$ に最小値が存在

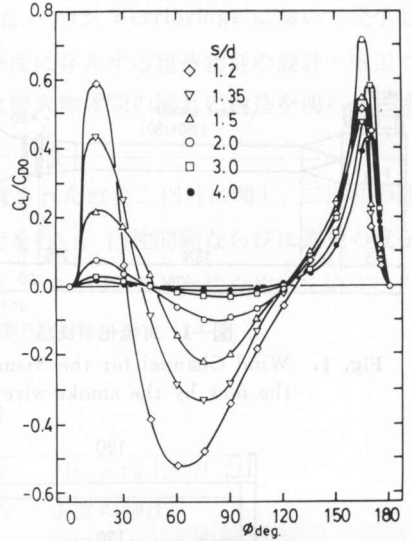


図-7 揚力と迎角との関係
Fig. 7. Relation between lift force and angle of attack.

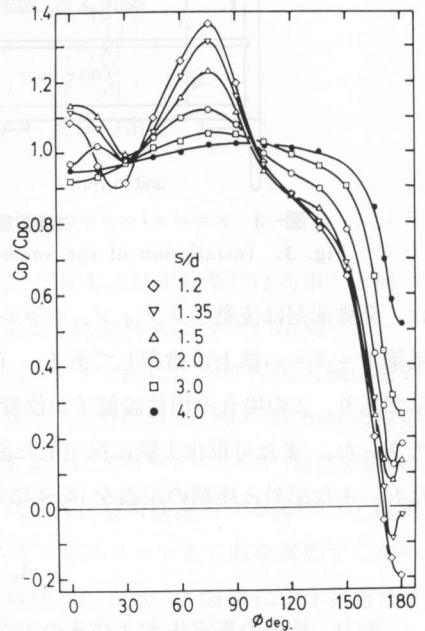


図-8 抗力と迎角との関係
Fig. 8. Relation between drag force and angle of attack.

している。また、領域 2) における抗力はピッチの減少とともに増加し、 $\phi \approx 75^\circ$ に抗力の峰が認められる。さらに、領域 3) の等抗力力線の状態は等揚力線と同様に x 軸とほぼ平行になるとともにそのピッチは密になっている。

直立二円柱の干渉によって生ずる揚力および抗力の変化をより詳細に検討するために、単独円柱の抗力 C_{D0} ($=0.64$) との比である C_L/C_{D0} および C_D/C_{D0} の形で考察してみることにする。これらの結果を迎角 ϕ は関し、ピッチ s/d をパラメータとして図-7 および 図-8 に示してある。図-7 によると、 C_L/C_{D0} は $\phi \approx 15^\circ$ および 165° にそれぞれ第 1, 第 2 の極大値を有する。直立二円柱の配置を考えれば、 $\phi = 15^\circ, 165^\circ$ は二円柱の中心を結ぶ直線が主流方向と 15° をなす位置に相当し、この配置における上流側および下流側円柱には、ともに大きな揚力が作用することとなり、特に $s/d \approx 1.2$ では揚力が単独円柱の抗力の $0.6 \sim 0.7$ 倍に達している。さらに、 $s/d \approx 1.2$ の場合、迎角 ϕ が 15° から 60° に変化すると、揚力係数 C_L は C_{D0} の約 1.1 倍程度減少し、その作用方向も 180° 移動する。一方、図-8 に示してある C_D/C_{D0} は $\phi \approx 75^\circ$ において最大値を示すが、 $\phi \approx 75^\circ$ を越えると C_L/C_{D0} とは逆に低下し、その変化の度合は $\phi \geq 150^\circ$ で著しくなる。このような $\phi \geq 150^\circ$ においてみられる C_D/C_{D0} の大きな変化は、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である。しかし、ピッチ $s/d = 4$ になると、迎角 $0^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$ の範囲において C_D/C_{D0} は 1 に近付き、二円柱に作用する抗力は単独円柱の抗力にはほぼ等しくなる。また同時に、この範囲における揚力は、図-7 より零に近付くことが認められる。したがって、前報¹²⁾ に示した二円柱周辺のフローパターンからも推察したように、ピッチ $s/d \geq 4$ 、迎角 $0^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$ の範囲に存在する二円柱は単独円柱とみなしてもよいと理解される。

5. 干渉力の発生要因

先に述べた揚力および抗力線図から、二円柱に作用する流体力の状態は二円柱の配置によって三つの領域に分類されることが明らかになったが、これら三領域における揚力の発生要因を円柱表面上の圧力分布および二円柱周辺の流れの可視化観測結果から考察してみる。図-9 (a), (b), (c) は上述した三領域を代表するものとして選んだ迎角 $\phi = 15^\circ, 75^\circ$ および 165° の円柱高さ $y/h = 0.44$ における圧力分布を各ピッチについて示したものである。まず図-9 (a) に示される迎角 $\phi = 15^\circ$ の場合には、二円柱の接近にともない、円柱内側における圧力は順次低下し、結果的に圧力分布が $\theta = 0^\circ$ に関して著して非対称となることがわかる。このことを図-10 に示した可視化観測結果からみても。迎角 $\phi = 0^\circ$ では、下流側円柱は上流側円柱の後流の中に存在するのに対して、 $\phi = 15^\circ$ になると二円柱間には下流側円柱の前面に衝突した流れが円柱表面上で曲折されて発生する間隙流が認められる。理想流体の場合、このような曲率を有する流れの圧力勾配 ∇p は流線曲率の定理¹³⁾ として知られていて、

$$\nabla p = -\frac{\rho}{2} \frac{\partial q^2}{\partial s} \mathbf{t} - \rho \frac{q^2}{R} \mathbf{n} \quad (1)$$

となる。ここに、 q は流速、 s は流線方向の座標、 t, n は流線方向および法線方向の単位ベクトル、 R は流線の曲率半径である。式(1)によると、流線が曲っている場合には曲率中心に向って圧力は低下し、その割合は曲率半径に反比例する。いま、二円柱間の流れを模式的に表した図-11において、迎角 ϕ を一定とした状態で円柱が $0'$ から 0 に接近すると、間隙流は破線から実線の状態へ移行し、その結果間隙流の曲線半径 R' は $R (< R')$ に変化する。したがって、図-9(a)に示したピッチの減少にともなう円柱内側の圧力低下は、このような曲率変化に基づくものと考えられる。かかる流線曲率の定理は理想流体に対して成立するものではあるが、粘性流体に対しても定性的に適用できるものと考えられる。

つぎに、図-9(b)の迎角 $\phi=75^\circ$ においては、円柱前面の内側の圧力がピッチ s/d の減少とともに増加することが認められる。また、図-9の可視化写真では、 $\phi=75^\circ$ の二円柱間の流れは円柱外側の流れと比較し、著しく減速していることが観察される。これらを総合すると、ピッチが小さくなるに従って二円柱間の流れに対する閉鎖効果が大きくなり、圧力の上昇を招来するものと考えられる。このように迎角 $\phi=15^\circ$ および 75° の例が示すような円柱表面上の圧力分布が $\theta=0^\circ$ に対して示す非対称性は干渉力としての揚力の発生要因となる。

図-9(c)は迎角 $\phi=165^\circ$ における圧力分布を示したものである。この場合は、上流側円柱の後流の影響を強く受けるものと考えられる例であって、ピッチ s/d に関する

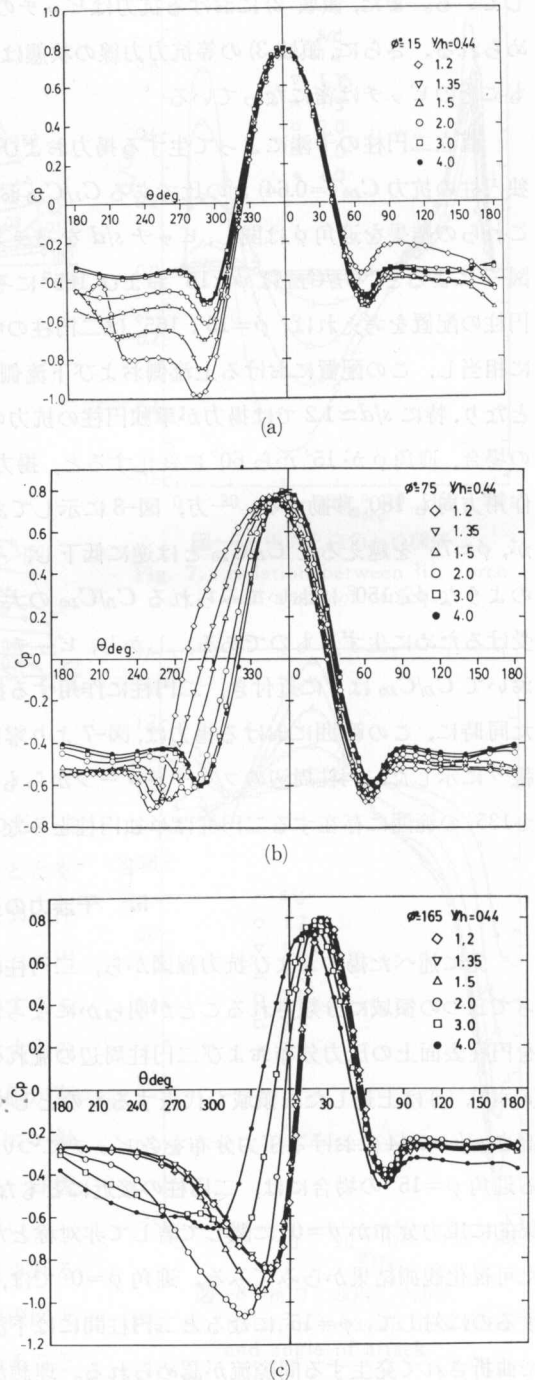


図-9 円柱表面上の圧力分布
(a) $\phi=15^\circ$, (b) $\phi=75^\circ$, (c) $\phi=165^\circ$
Fig. 9. Pressure distributions on the surface of the cylinder.

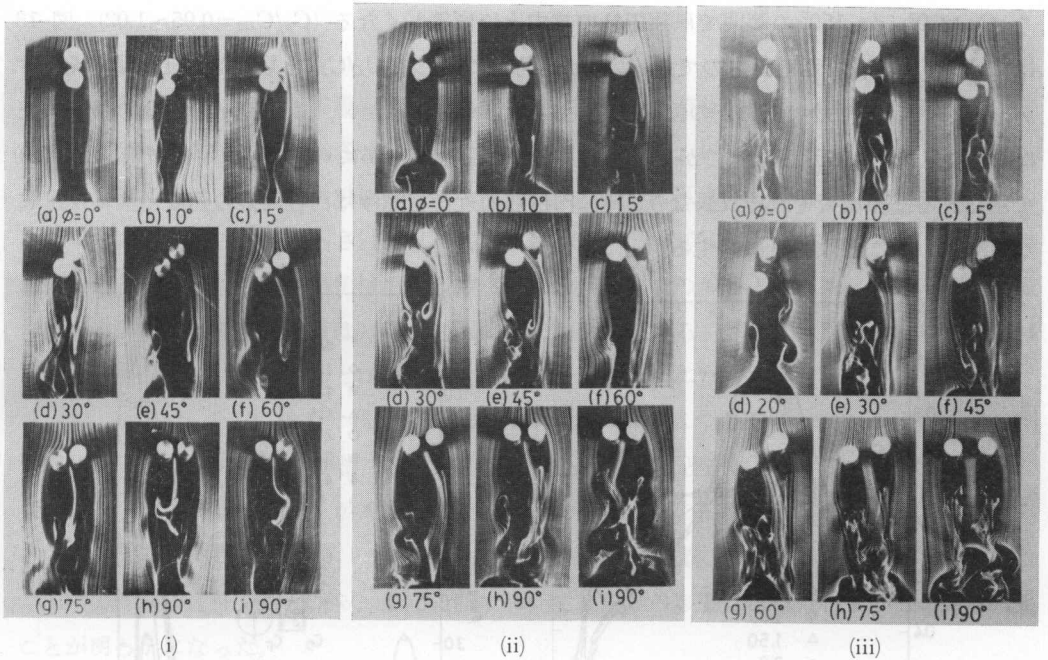


図-10 二円柱周辺の流れ (スモーク・ワイヤ法) (i) $s/d=1.2$, (ii) $s/d=1.5$, (iii) $s/d=2.0$
 Fig. 10. Flow pattern around a pair of cylinders (by the smoke-wire technique)

る圧力分布の系統的变化は認められないが、円柱内側の圧力は外側に比較して著しく低下すると同時に複雑な変化を呈するようになる。

6. 合力およびその作用方向

直立二円柱に作用する揚力、抗力についてそれぞれ検討してきたが、一様流中におかれた二次元円柱に作用する力はこれら二種類のベクトル和となる。しかし、直立二円柱の場合揚力および抗力の作用する高さは異なり、合力としてこれら両者の単純なベクトル和を採用することはできない、しかし、結果的に揚力および抗力は円柱の基底部にせん断力として作用することになるので

$$C_F = \sqrt{C_L^2 + C_D^2} \quad (2)$$

を定義し、この C_F をもって円柱に作用する全流体力を評価してみる。図-12 に示す C_F は迎角 ϕ に関して C_D/C_{D0}

とはほぼ同一の傾向を有するが、特に $\phi=75^\circ$, $s/d=1.2$ に存在する最大値は単独円柱の抗力係数 C_{D0} の約 1.4 倍に達する。さらに、ピッチ s/d が 4 程度になると干渉の影響は著しく小さくな

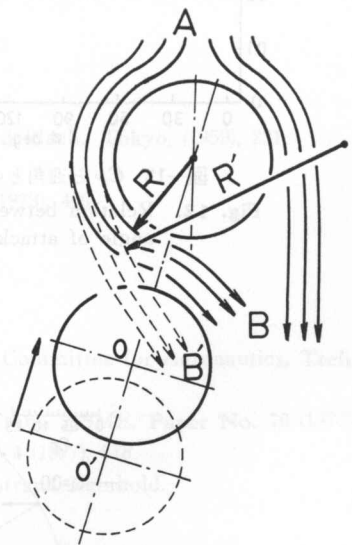


図-11 二円柱間の流線の曲率変化
 Fig. 11. Change of the curvature of the gap flow between a pair of cylinders.

り、 C_F は $0^\circ \leq \phi \leq 150^\circ$ の範囲で単独円柱の抗力とほぼ等しくなる ($C_F/C_{D0} = 0.95 \sim 1.02$)。図-13 は C_F の作用角 β を示したものである。 β は迎角 ϕ に関して C_L/C_{D0} と類似した変化傾向を示すが、前報で示した最大圧力点の位置 θ_0 とは必ずしも一致しない。以上の C_F および β をもとに C_F のベクトル表示したものが図-14 である。図より明らかにベクトル C_F は破線 ($C_L = 0.0$) で示される三領域でそれぞれ異なり、特に円柱前面近傍を除けば円柱周辺の数ベクトル¹⁴⁾ に類似していることは注目に値する。

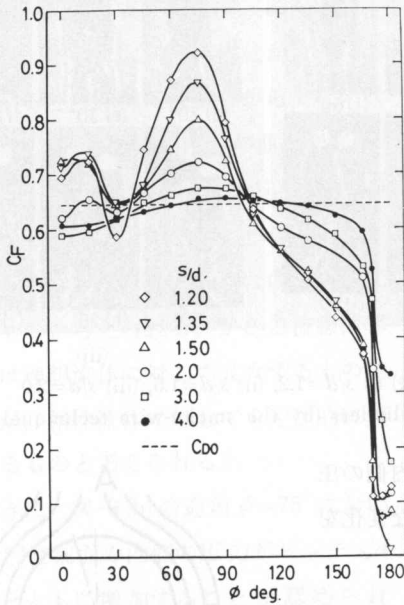


図-12 C_F と迎角との関係

Fig. 12. Relation between C_F and angle of attack.

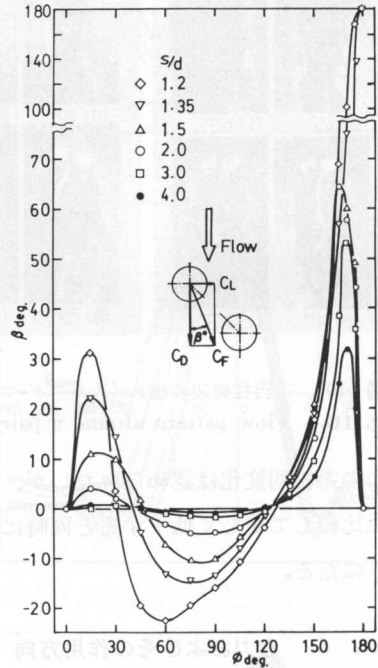


図-13 C_F の作用角と迎角との関係

Fig. 13. Relation between acting direction of C_F and angle of attack.

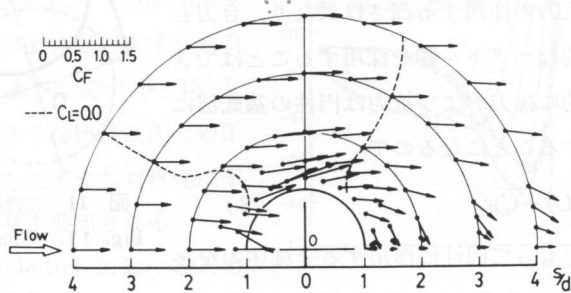


図-14 C_F のベクトル場

Fig. 14. Vector field of C_F .

7. 結 論

乱流境界層内に近接して設置した直立二円柱に作用する流体力および周辺流れに関し、迎角およびピッチを種々に変化させて詳細な測定を行った結果、以下に示す結論が得られた。

1) 揚力場は二円柱の相対位置によって、三つの領域に区別される。すなわち揚力は、二本の零の揚力線によって大別される (1) $0^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$, (2) $30^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$ および (3) $120^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ の領域でそれぞれ異なり、(1) の領域では正の値の揚力がピッチの減少とともに増加し、(2) の領域では揚力が負となり、その値はピッチの減少とともに低下する。さらに、(3) の領域においては正の値の等揚力線が主流方向とほぼ平行になることが明らかになった。

2) 抗力は、揚力の場合で分類した三領域が $C_D \approx 0.625$ の二つの等抗力線によって区別され、領域 (2), (3) においては抗力が揚力と対称的な変化を呈することが明らかになった。

3) 二円柱のピッチ s/d が 4 程度になると、上流側円柱の後流の影響を強く受けないものと考えられる迎角 $0^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$ の範囲で、二円柱に作用する抗力は単独円柱の抗力とほぼ等しく、揚力は零に近付くことから、上記範囲においては干渉の影響はほぼ無視しうる程度になることが明らかになった。

おわりに、実験装置の製作にご尽力いただいた小畑芳弘技官、実験に協力いただいた三浦隆、藤田政志両君に感謝します

参 考 文 献

- 1) Hori, E.: Proc. 9th Japan National Congress for Applied Mech., Tokyo, (1959), 231.
- 2) Price, S. J.: Aero. Quart., Vol. XXVI (1976), 154.
- 3) Bearman, P. W., Wadcock, A. J.: J. Fluid Mech., 61-3 (1973), 499.
- 4) 有江ほか 3 名: 機講論, 780-4 (1978), 98.
- 5) 石谷ほか 3 名: 機論, 37-304 (昭 46), 2319.
- 6) 小林: 機論, 42-357 (昭 51), 1452.
- 7) Spivack, H. M.: J. the Aero. Science, 13 (1946), 289.
- 8) Bierman, D. and Herrnstain, W. H.: National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep. 486 (1933).
- 9) Dalton, C. and Szabo, J. M. J.: Pressure vessel Tech., Trans. ASME, Paper No. 76 (1976).
- 10) Zdravokovich, M. M.: J. Fluids Engr., Trans. ASME, 99-4 (1977), 618.
- 11) Tritton, D. J.: Physical Fluid Dynamics, (1977), Van Nostrand Reinhold.
- 12) 谷口, 坂本: 北見工業大学研究報告, 11-1 (昭 54), 39.
- 13) たとえば, 今井 功: 流体力学 (前編), (1976), 裳華房.
- 14) たとえば, 大宮司ほか 2 名: 機論, 44-387 (昭 53), 3778.