



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	主流方向の変化に伴う平行2円柱の相互干渉
Author(s)	有江, 幹男; Arie, M; 木谷, 勝 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 88, 1-9
Issue Date	1978-08-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41485
Type	departmental bulletin paper
File Information	88_1-10.pdf



主流方向の変化に伴う平行2円柱の相互干渉

有江幹男* 木谷勝* 田村尚敬* 森隆茂**
(昭和52年12月28日受理)

Interaction between a Pair of Circular Cylinders in a Varied Free-Stream Direction

M. ARIE, M. KIYA, H. TAMURA and T. MORI
(Received December 28, 1977)

Abstract

An experimental investigation of the interaction between a pair of circular cylinders in a varied free-stream direction was performed for several fixed distances between the cylinders; the Reynolds number based on the cylinder diameter is 7,100. The principal aim is to enhance the understanding of the flow around buildings in close proximity or the flow around tube banks in heat exchangers. The experimental results predict that the cylinder pair will undergo highly unsteady drag and lift forces, both in magnitude and frequency, when the free-stream direction is in a particular range which depends on the distance between the two cylinders. The time-averaged and turbulence characteristics of the wake behind the cylinders are also presented.

1. 緒 言

流れの中におかれた円柱などの流体力学的にぶい物体のまわりの流れについては、これまで広範な研究結果が蓄積されている¹⁾。これに対し複数物体の周辺の流れは、各物体間の相互干渉により、単一物体の場合の流れとは大きく異ってくる。工学的には、近接して建設された高層建築物あるいは熱交換器内の円管群をよぎる流れなどがこの範ちゅうに含まれる。これらの複数物体に対する主流の方向の変化および物体相互間の近接の度合により物体に作用する平均流体力および変動流体力は複雑な変化過程を示す。この分野の研究には、主流に対し直角に配列された2円柱の周りの流れに関する Spivack²⁾ および Bearman and Wadcock³⁾ によるものがあり、円柱間隔が円柱直径より小さい範囲において2種類の渦放出周波数が存在することが明らかにされている。石谷ら⁴⁾は主流に対し種々の相対位置にある2円柱からの渦放出周波数を測定し、シュリーレン法によって求められたフローパターンとの関連を求めている。また2円柱の間隔と主流に対する迎角とを変化させたときの平均流体力および渦放出周波数の測定が Hori⁵⁾ によって報告されているが、この実験データには円柱間隔が円柱直径よりも小さいときに現われる渦放出周波数の多価性が認められない。したがって、この問題の工学的重要性を考えると、より広範囲な信頼性の高い実験資料を求めておく必要がある。本研究はこのような観点から、2円柱の間隔と主流に対する角度とを種々に変化させた場合の、2円柱に作用する平均流体力、渦放出周波数およ

* 機械工学科流体工学第一講座

** 三菱重工株式会社

び後流の平均速度分布，主流方向の乱れ強さの分布を実験的に明らかにしたものである。いうまでもなく，2円柱の軸を結ぶ直線の傾きを主流方向に対して変化させることは，相対的には，固定された配置をもつ2円柱に対して主流の方向が変化することに対応する。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した風洞は $400 \times 400 \times 1,300$ mm の正方形試験断面を有する吸込式貫流型風洞である。円柱に作用する平均流体力の測定時には直径 8 mm の2本の供試円柱を用いたが，実際の表面圧力の測定は片側の円柱に 180° の間隔をもって設けられた2個の静圧孔（直径 0.8 mm）によって行なっている。圧力の測定はリアクタンstype圧力変換器を用いて行なった。供試風洞の試験部長さの制限から円柱直径のおよそ110倍までの下流の範囲における2円柱の後流の測定には直径 6 mm の円柱を用いた。円柱表面の圧力分布の測定時における風洞試験部の主流速度 U_∞ は 12.4 m/sec，後流特性の測定の場合は 9.5 m/sec であり，それぞれ円柱の直径 d を基準長さとするレイノルズ数 (Re) は 7,100 および 4,200 である。後流の平均速度分布，乱れ強さの分布および2円柱から放出される渦の周波数は定温度型熱線風速計によって測定した。なお渦放出周波数は，各円柱の外側および2円柱のほぼ中央において下流方向に 5~25 mm 離れた位置での速度変動のスペクトル分析により決定した。2円柱間隔 δ を円柱直径 d の 1, 2 および 3 倍の3種類に変化させ，主流に対する2円柱の傾斜角度 α (Fig. 1 参照) を $0 \sim 90^\circ$ の範囲で変化させてある。

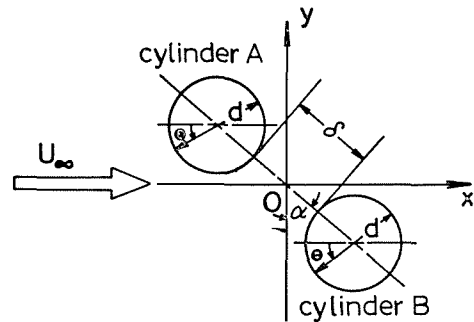
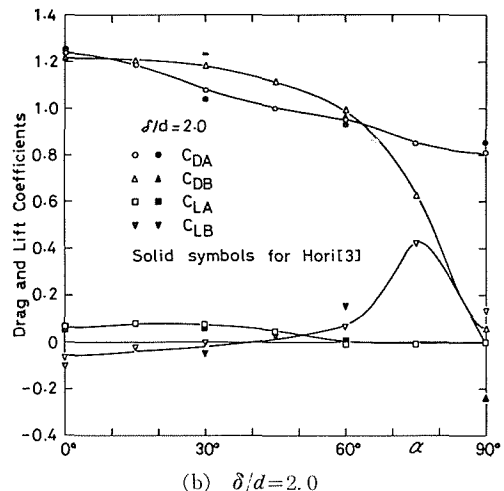
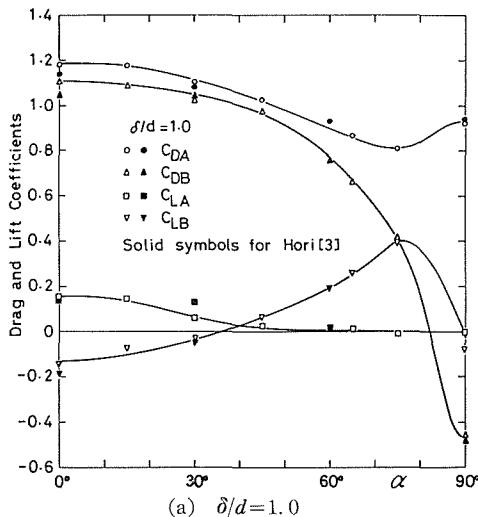


Fig. 1 Definition sketch of configuration of flow around circular cylinders

3. 実験結果および考察

3-1 円柱に作用する抗力および揚力

各円柱間隔 δ に対応する円柱表面上の圧力分布より円柱に作用する平均抗力および揚力を算出した結果を傾斜角 α の関数として Fig. 2 (a), (b) および (c) に示してある。 $\delta/d=1.0$ およ



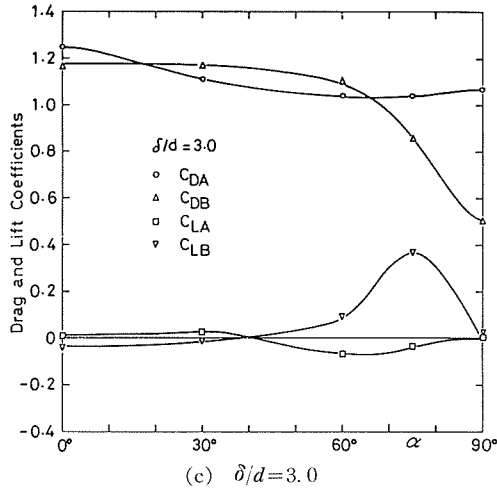


Fig. 2 Variation of drag and lift coefficients (C_D and C_L) of the cylinder pair with free-stream direction α . Suffixes A and B imply the cylinders A and B in Fig. 1. Reynolds number = 7, 100.

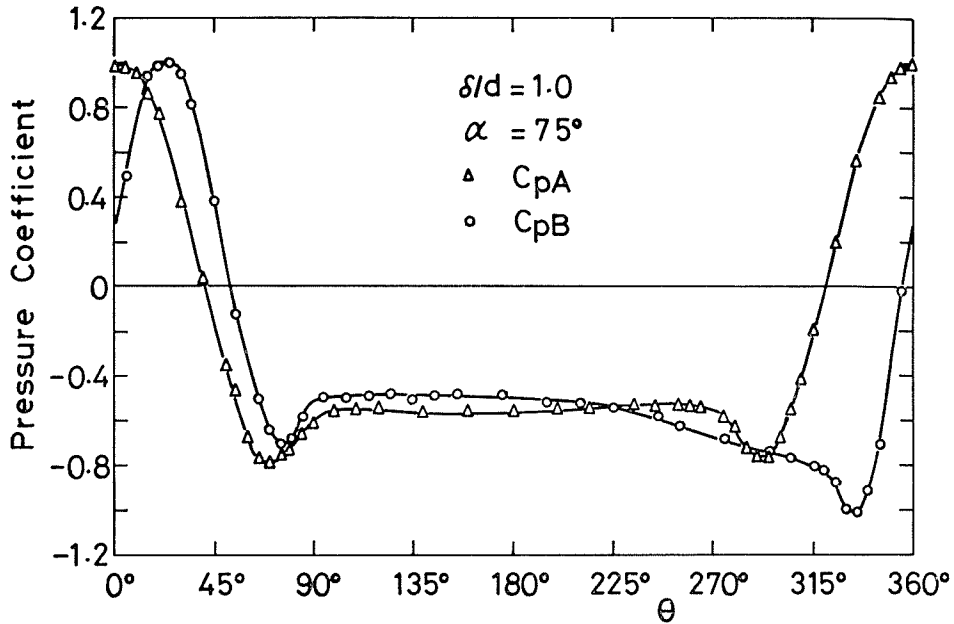


Fig. 3 Pressure distribution along the surface of the cylinders. C_p = pressure coefficient. $\delta/d = 1.0$ and $\alpha = 75^\circ$.

び 2.0 の場合については Hori³⁾ の測定結果もあわせて示してある。主流に対する 2 円柱の傾斜角 α が 0° の場合、それぞれの円柱に作用する抗力の値および揚力の絶対値は、円柱配置の幾何学的対称性から考えると等しくなるものと予想されるが、 δ/d が小さい時には実際の流れの非対称性および実験誤差などのため必ずしも同一の値とはならないことがある。 δ/d が 1.0, 2.0 および 3.0 の場合をまとめると $\alpha = 0^\circ$ のときの抗力係数 C_D は 1.15~1.25 の範囲内にあり、同程度のレイノルズ数における単独円柱の抗力係数より僅かではあるが大きめの値である。 α が増加すると各円柱の抗力は減少する傾向を示し、 $\alpha \leq 65^\circ$ の範囲内では $\delta/d = 1.0$ の場合を除き上

流側円柱の抗力係数 C_{DA} は下流側円柱の抗力係数 C_{DB} より小さい。 $\alpha \geq 65^\circ$ において C_{DB} は急激に減少し、とくに $\delta/d=1.0$ のとき $\alpha \approx 85 \sim 90^\circ$ の範囲で負の値をとる。一方円柱に作用する揚力の大きさは $\alpha \approx 35^\circ$ 程度までは δ の増加とともに減少するが、その作用方向は相互に遠ざかる方向にある。しかし、 δ の増加とともに上流側円柱の揚力係数 C_{LA} の減少および下流側円柱の増加傾向が見られ、 $\alpha > 35 \sim 45^\circ$ の範囲において C_{LA} と C_{LB} の作用方向が逆転する。 C_{LB} は当該円柱の抗力が急な減少を示す角度とほぼ同一角度において急激な増加を示し $\alpha \approx 70 \sim 85^\circ$ で最大値をとる。円柱間隔 δ が比較的小さく傾斜角 α が $\alpha \approx 60 \sim 80^\circ$ の範囲にある場合には、上流側円柱の後流はそのすぐ下流に存在する円柱のため急に屈曲されることが石谷ら⁴⁾の可視化写真に示されている。このことは Fig. 3 に示す $\delta/d=1.0$, $\alpha=75^\circ$ の場合の円柱表面圧力分布において、下流側円柱のよどみ点が外側に移動することにも現われている。上述の C_{LB} および C_{DB} の急激な変化の開始点はこのようなフローパターンの急変に対応するものである。

3-2 渦放出周波数

渦放出周波数 f 、主流速度 U_∞ および円柱直径 d を用いて定義されるストローハル数 St ($St = fd/U_\infty$) と傾斜角 α との関係を示したのが Fig. 4 (a), (b) および (c) である。Spivack²⁾、石谷ら⁴⁾および Bearman and Wadcock⁵⁾ らは $\alpha=0^\circ$ のとき、 δ/d がおおよそ1より小さい範囲において2種類の渦放出周波数が存在することを明らかにした。本実験の場合、 $\alpha=0^\circ$ および $\delta/d=1.0$ における最も顕著なストローハル数は $St=0.23$ であるが、このほかにも $St=0.37$ お

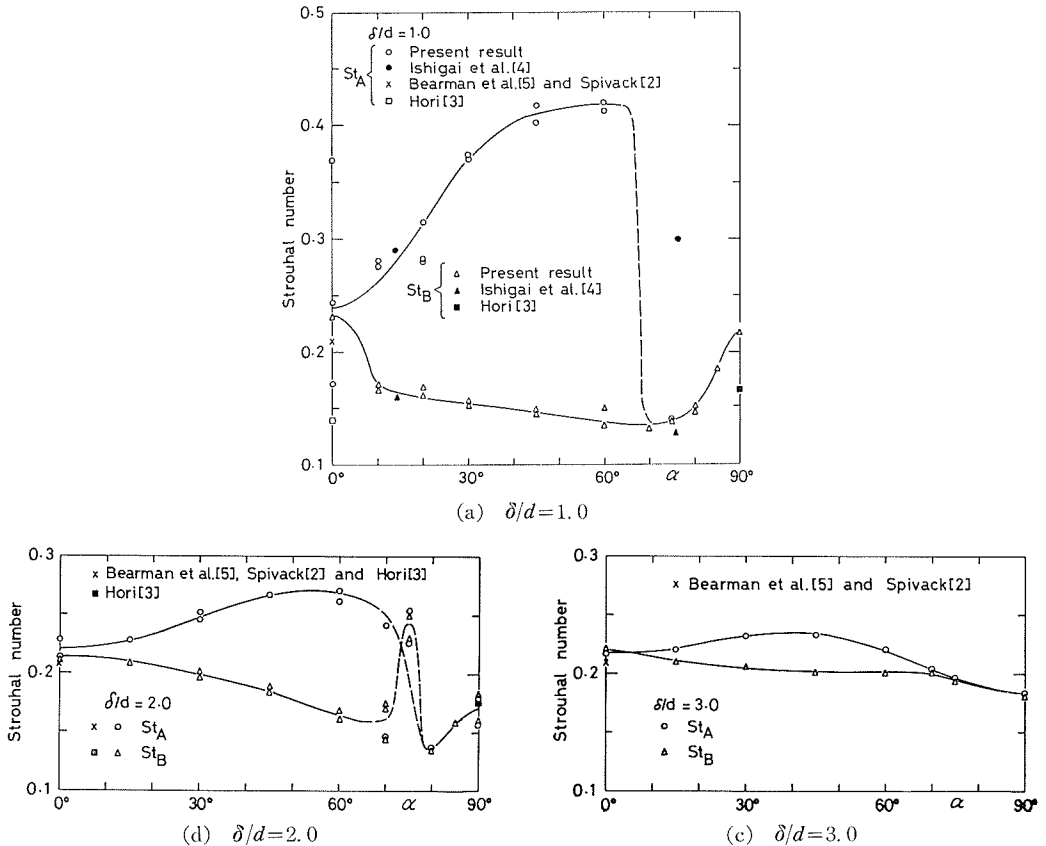


Fig. 4 Variation of Strouhal number St of vortex shedding from the cylinder pair with the free-stream direction.

よび0.17に対応する弱い渦放出周波数が観測された。

δ/d が1.0, 2.0および3.0の場合とも $\alpha \leq 50^\circ \sim 60^\circ$ の範囲では, α の増加とともに上流側円柱のストローハル数 S_{IA} は増加し, 下流側円柱のストローハル数 S_{IB} は減少する。この傾向は δ が小さい場合ほど顕著である。 $\alpha \geq 50 \sim 60^\circ$ において α の増加とともに S_{IA} は減少し, $\delta/d=1.0$ の場合を除けば, α と共に減少し続けた S_{IB} はある角度で急に上昇する。 $\delta/d=1.0$ の場合にはこの傾向が見られない。このことは揚力の項でも述べたように, 上流側円柱の後流がそのすぐ下流にある円柱の存在によって屈曲され, その角度に至るまでの上流側円柱より発生していた渦が抑圧され, 2円柱全体としての渦放出周波数が下流側円柱からの渦の発生数によって規定されるためと解釈される。これらの実験結果から変動揚力の周波数が渦放出周波数と同一であることを考慮すると, 近接した2円柱に対する主流の角度が $60^\circ \sim 80^\circ$ 付近で変化する場合には, 上流側および下流側円柱に作用する流体力は極めて複雑な様相を示すことがわかる。したがって, 建築構造物および管群の配置を定めるにあたって, この点に十分な考慮を払う必要がある。

3-3 後流の平均速度分布および平均乱れ分布

$\delta/d=2.0$, $\alpha=30^\circ$ および 75° の場合の2円柱下流の数断面について, 無次元欠損速度 w^* ($w^*=w/U_\infty$, Fig. 5 参照) の分布および主流方向の乱れ強さ $\sqrt{w'^2}/U_\infty$ の分布を Fig. 6 および7に示す。2円柱が接近して, かつ主流に対し傾斜角をもって配置されている場合, 円柱相互間の干渉により円柱間を通過する流れは偏流を受け, この影響により後流の速度分布は単一物体の後流とは異なる。とくに後流内の速度欠損量は $y=0$ を対称面とする分布形状をとらず, 上流側に位置する円柱側へ移動した分布形状を呈することが認められる。

物体の背後に形成される後流中の速度欠損分布は当該物体に作用する抗力に依存する。したがって, 後流の速度分布形状を記述するためには物体に作用する抗力を取込む必要がある。いま2円柱全体の抗力を

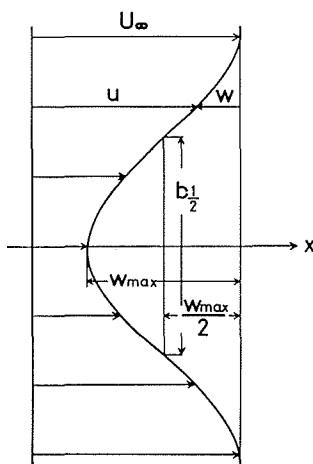


Fig. 5 Definition sketch of velocity defect $w^*=w/U_\infty$ and half width $b_{1/2}$ of the wake.

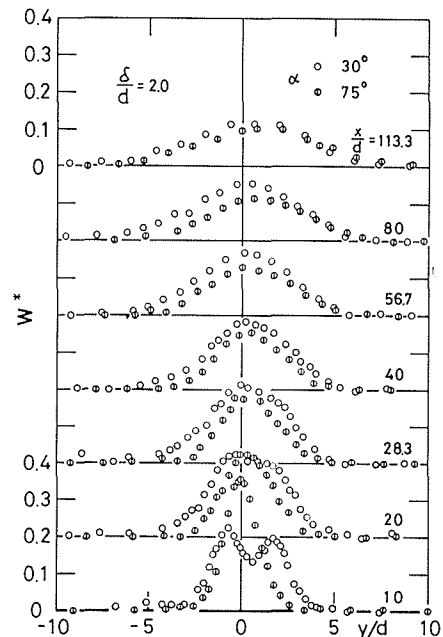


Fig. 6 Distribution of non-dimensional velocity defect w^* in the wake. $Re=4,200$, $\delta/d=2.0$, $\alpha=30^\circ$ and 75° .

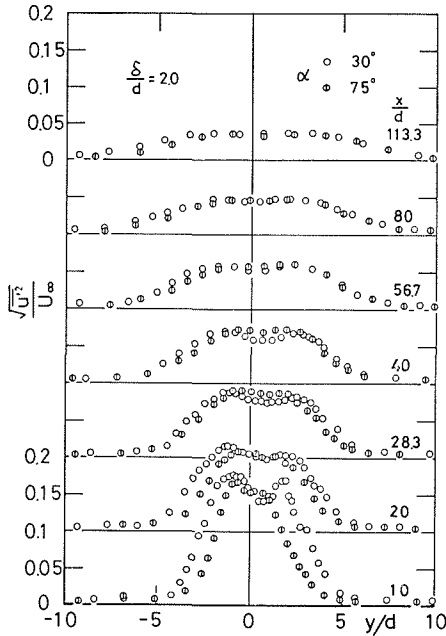


Fig. 7 Distribution of longitudinal turbulence intensity $\sqrt{u'^2}/U_\infty$ in the wake. $Re=4, 200, \delta/d=2.0, \alpha=30^\circ$ and 75° .

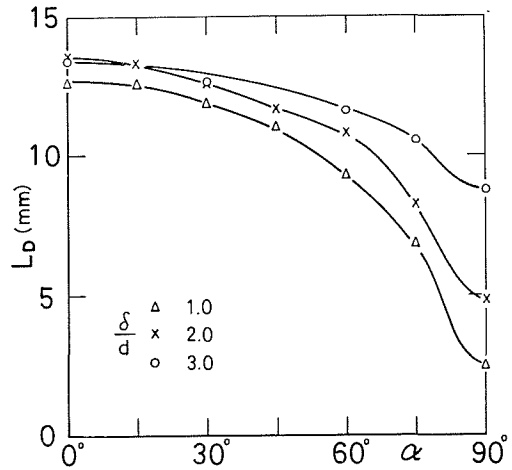


Fig. 8 Variation of drag length L_D with the angle of inclination α of cylinder pair. $d=6$ mm, $Re=4, 200$

$$L_D \equiv C_D d = F_D / \left\{ (1/2) \rho U_\infty^2 \right\}$$

で定義される抗力長さ L_D の形で表わし、 L_D と主流に対する 2 円柱の傾斜角 α との関係をも δ/d をパラメータとして示せば Fig. 8 のようになる。ここに F_D および C_D はそれぞれ 2 円柱全体の単位長さ当りの抗力および抗力係数である。なお円柱に対する抗力係数の値は、レイノルズ数が 4, 200 (本実験における後流測定時) と 7, 100 (流体力の測定時) の場合とでは多少異なっているため、次次に示す補正を行ないレイノルズ数が 4, 200 の場合に対応する抗力長さ L_D を求めてある：

$$L_D = L_D^* (C_D / C_D^*)$$

ここに L_D : $Re=4, 200$ における抗力長さ ($d=6$ mm)

L_D^* : $Re=7, 100$ における抗力長さ ($d=6$ mm)

C_D : $Re=4, 200$ における単独円柱に対する抗力係数 ($C_D=0.95$)⁶⁾

C_D^* : $Re=7, 100$ における単独円柱に対する抗力係数 ($C_D^*=1.03$)⁶⁾

である。抗力長さ L_D は 2 円柱の接近の度合いが大きい程傾斜角 α の影響を受けやすいことが認められる。Fig. 9 および 10 は、 δ/d および α をパラメータとして後流の無次元最大欠損速度 w_{\max}^* および無次元後流半値幅 $b_{1/2}/L_D$ と無次元距離 x/L_D との関係を示したものである。これらの図に示された資料から、主流方向の変化に対する 2 円柱後流の平均速度分布の変化を把握することができる。単独二次元物体の乱流後流の最大欠損速度および後流幅は物体下流方向の距離を x とするときそれぞれ $x^{-1/2}$ および $x^{1/2}$ に比例して変化することはよく知られているが、主流に対し傾斜角をもつ 2 円柱の後流の場合においても w_{\max}^* は $(x/L_D)^{-1/2}$ に、 $b_{1/2}/L_D$ は $(x/L_D)^{1/2}$ にほぼ比例することが認められる。Fig. 11 は後流中の主流方向乱れの最大値 $(\sqrt{u'^2}/U_\infty)_{\max}$ が x/L_D の増加とともに減衰する過程を示したものである。 $(\sqrt{u'^2}/U_\infty)_{\max}$ の減衰過程を $(x/L_D)^n$ の形に

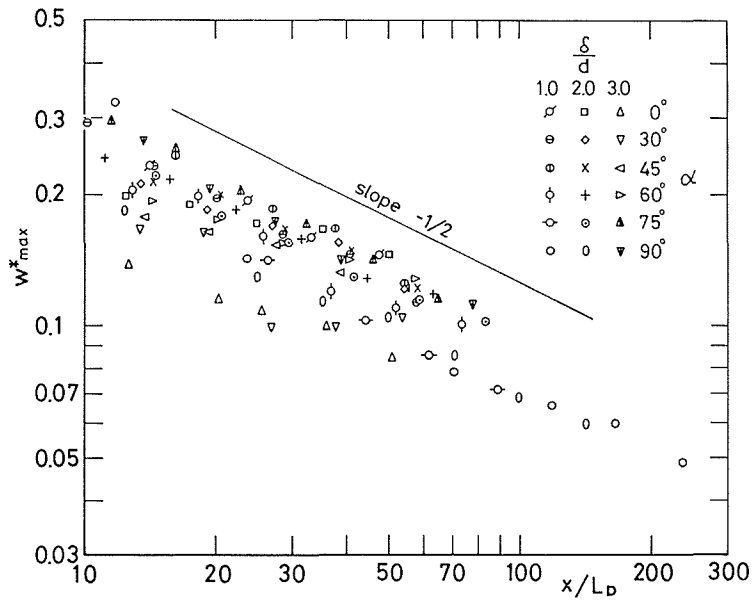


Fig. 9 Variation of non-dimensional maximum velocity defect w_{\max}^* in the wake with non-dimensional downstream distance x/L_D .

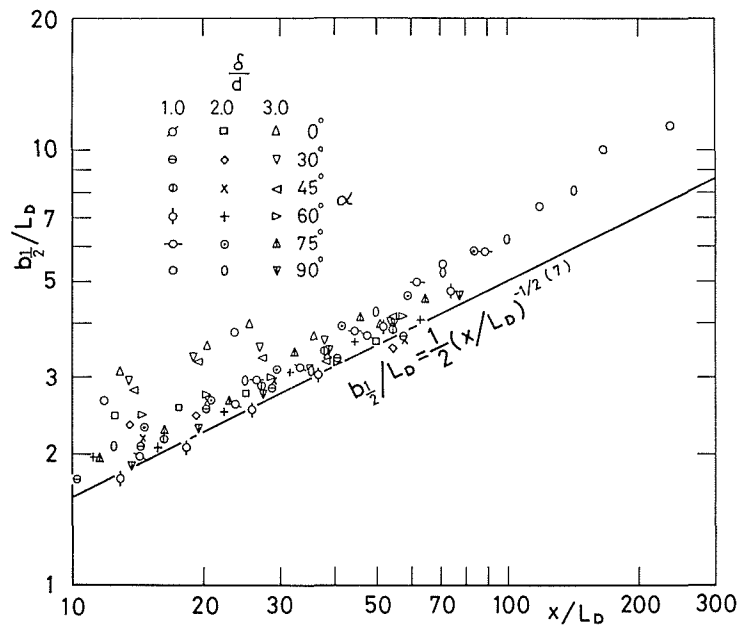


Fig. 10 Variation of non-dimensional half width $b_{1/2}/L_D$ with x/L_D .

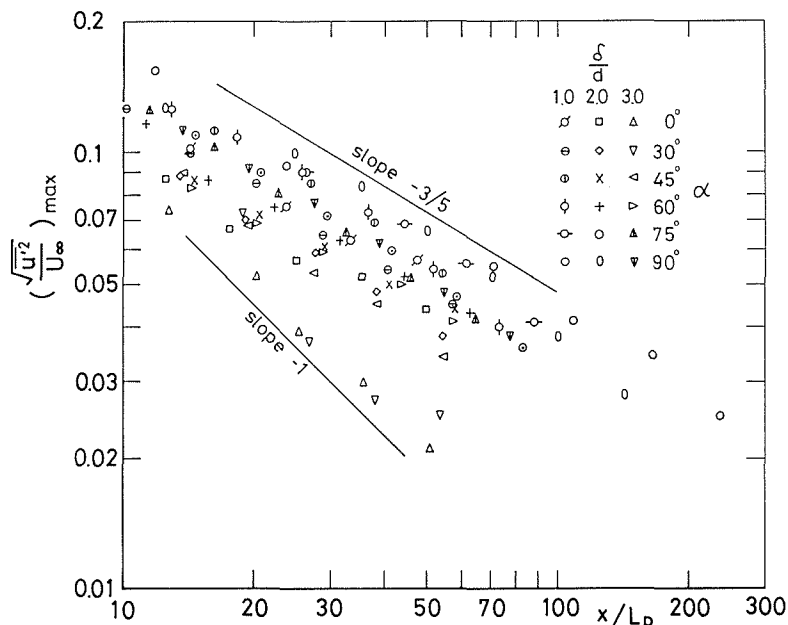


Fig. 11 Variation of maximum turbulence intensity in the wake with x/L_D .

表わすとき、その指数 n は $-3/5 \sim -1$ の範囲内にある。

4. 結 言

主流方向の変化にともなう近接2円柱のまわりの流れの変化を把握するために流れの中にある2円柱に作用する平均流体力、渦放出周波数および後流の平均速度分布、主流方向の乱れ強さの分布を実験的に明らかにした。その主な結果を要約すれば以下の通りである。

(1) 流れに対し直列に配置された近接2円柱において、下流側円柱の抗力は著しく減少することは従来から良く知られているが、この傾向は流れに対する傾斜角が 65° 以上で生ずる。

(2) $\alpha \leq 35^\circ$ の範囲では円柱に作用する揚力は両円柱を互いに遠ざける方向に作用する。下流側円柱の揚力は α の増加とともに増加し、 $\alpha = 75^\circ$ で0.4程度の最大値を示した後、 $\alpha = 90^\circ$ における0の値まで急激に減少する。

(3) $\alpha \leq 60^\circ$ の範囲においては α の増加とともに上流側の円柱のストローハル数は増加するのに対し、下流側円柱のストローハル数は減少する。この傾向は円柱間隔が小さいほど著しい。

(4) 2円柱の間隔が円柱直径の1倍および2倍の場合、上流側円柱のストローハル数は $\alpha = 60^\circ \sim 70^\circ$ の範囲において急激な変化を呈し、下流側円柱のストローハル数に一致するようになる。

(5) $L_D \equiv F_D / \{ (1/2) \rho U_8^2 \}$ で定義される抗力長さをを用いて下流方向の距離に対する後流の最大欠損速度 w_{max}^* および半値幅 $b_{1/2} / L_D$ の変化過程を、2円柱の間隔および主流に対する傾斜角が変化する場合について系統的に明らかにした。

本研究を遂行するにあたり、実験の測定にあたって援助を受けた鈴木雍宏助手、また実験装置の作製に援助を受けた山崎輝夫、山保敏幸両技官に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Morkovin, M. V.; "Flow around Circular Cylinders: A Kaleidoscope of Challenging Fluid Pheno-

- mena," ASME Symp. on Fully Separated Flows, Philadelphia, 1964, pp. 102-118.
- 2) Spivack, H. M.; "Vortex Frequency and Flow Pattern in the Wake of Two Parallel Cylinders at Varied Spacing Normal to an Air Stream," *Journal of Aeronautical Sciences*, Vol. 13, No. 6, 1946, pp. 289-301.
 - 3) Hori, E.; "Experiments on Flow around a Pair of Parallel Circular Cylinders," *Proceedings of the 9th Japan National Congress for Applied Mechanics*, 1959, pp. 231-234.
 - 4) 石谷, 他3名; 円管群に直交する管外流れの構造に関する研究, *日本機械学会論文集*, 37巻, 304号, 昭46, pp. 2319-2326.
 - 5) Bearman, P. W. and Wadcock, A. J.; "The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 6, part 3, 1973, pp. 499-511.
 - 6) Wieselsberger, C., Betz, A. and prandtl, L.; "Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen," II. Lieferung, 1923, p. 24, Druck and Verlag von Oldenbourg.
 - 7) Schlichting, H.; "Boundary Layer Theory," 4th ed., 1960, pp. 600-604, McGraw-Hill Book Company, INC., New York.