

速度勾配をもつ流れの中に置かれた円柱に作用する流体力

深 田 三 夫*・山 本 陽 児**

1. ま え が き

一様でない流れの中に置かれた物体の例は多く、たとえば、流れの中に複数個の物体が存在する時、上流側物体よりはくせん断層が生じ、そのせん断流の中に下流側物体がさらされることになる。この時に一様流中では生じなかった揚力（流れ方向と直方向むきの力）が生じたり、また互いの位置関係によっては揚力が抗力と同程度の大きさになることが予想される。

本研究では、上述の最も簡単な場合を想定した水槽実験を行ない、速度勾配をもった流れの中に一個の円柱を置いた時の時間平均抗力、揚力を求め、一様流に置いた場合との比較を行なった。また上と同じ速度勾配をもつ流れの中に同一径の二個の円柱を迎え角（流れ方向と円柱中心間を結ぶ線のなす角）を変えておき、その角度の違いによる二円柱の抗力、揚力の変化を調べた。

2. 実験装置および方法

(1) 水 槽

図-1 に示すように、二円柱および単独円柱表面の圧力測定に使用した水槽は長さ 200 cm、幅 7.5 cm、高さ 40 cm の片面アクリル製の循環式水槽で測定円柱は直径 5.0 cm、長さ 7.5 cm のアクリル製で水路入口より 65 cm、高さ 16 cm 位置に外部より回転可能な形に取りつけてある。円柱表面には 90° おきに径 1.0 mm の静圧孔があけてあり、それぞれが水槽側壁を通して直径 40 mm のマンメーターに導かれ、その中の水位はフックゲージにより差圧 0.1 mm まで直読可能である。円柱を 5° おきに回転し、全周にわたる圧力分布が測定された。速度勾配をもつ流れは水槽入口より 40 cm の位置に取りつけた高さ 13.5 cm の金網によってつくられる自由せん断流を利用した、金網と円柱の x 方向、 y 方向の相対的な位置を変えることにより、ほぼ任意の速度勾配をもつ流れの中に円柱を入れることが可能であるが本実験では相対的な位置を一定にして行なった。単独円柱の場合との比較を行なうために、円柱前方 10 cm の位置にお

ける接近流速 U_0 を等しくして実験を行なった。実験条件は表-1 に示されている。

表-1 実験条件

No.	U_0 cm/s	Re	K	L/D	ϕ
1	9.7	3 800	1.8	1.25	$0^\circ, 15^\circ,$
2	17.3	8 600	2.3	"	$30^\circ, 60^\circ,$
3	24.0	12 000	3.6	"	90°

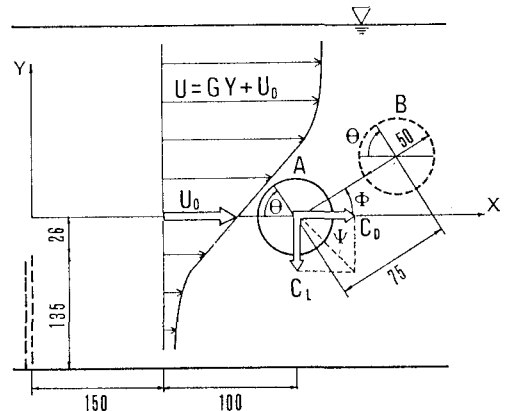
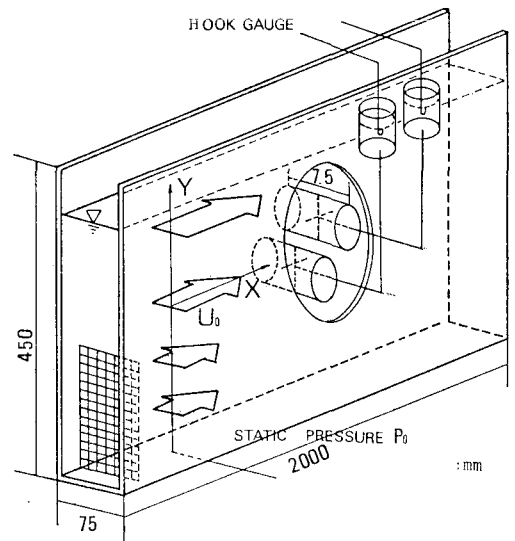


図-1 実験装置概略図と記号図

* 正会員 山口大学助手 工学部土木工学科

** 日建工学(株)

円柱を入れない場合の自由せん断流の平均速度分布の測定は径 1.0 mm のピトー静圧管を使用し、総圧管、静圧管が感量 200 mg の天秤に導かれ、ほぼ 5 cm/sec の平均流速まで測定可能である。

(2) 抗力, 揚力, 流体力 (合力) の算定

抗力, 揚力の算定は測定された表面圧力水頭 $P/\rho g$ と基準圧力水頭 $P_0/\rho g$ (円柱前面 10 cm 底面圧力水頭) の差 $\Delta(P/\rho g)$ を円柱全局にわたって積分することによって求めた。すなわち

$$C_D = \frac{\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{P}{\rho g} - \frac{P_0}{\rho g} \right) \cos \theta d\theta}{\left(\frac{U_0^2}{2g} \right)} \\ \doteq \frac{\frac{\pi}{72} \sum_{j=0}^{71} \Delta H_j \cos \frac{2\pi}{72} j}{\left(\frac{U_0^2}{2g} \right)} \quad (1)$$

$\Delta H_j = P/\rho g - P_0/\rho g$, 同様に

$$C_L \doteq \frac{\frac{\pi}{72} \sum_{j=0}^{71} \Delta H_j \sin \frac{2\pi}{72} j}{\left(\frac{U_0^2}{2g} \right)} \quad (2)$$

流体力 (合力) 係数とその作用角は次式による。

$$C_F = \sqrt{C_D^2 + C_L^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \frac{C_L}{C_D} \quad (3)$$

3. 実験結果および考察

(1) 自由せん断流流速分布

図-2 にレイノルズ数 8 600 場合の ($R_e = U_0 d/\nu$, U_0 : $x=25$ cm, $y=0$ cm の位置における流速, D 円柱径) 円柱がない時の y 方向の速度分布形が $x=15, 25, 25,$

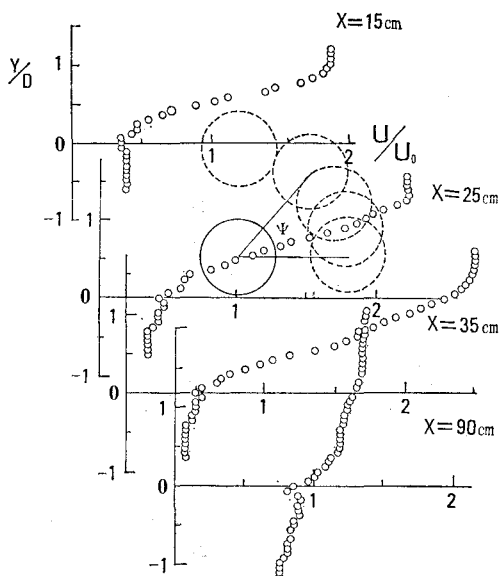


図-2 自由せん断流の平均速度分布 ($R_e=8600$)

90 cm について示されている。円柱の挿入位置と流速分布形の相対的な位置関係もあわせて示してある。迎え角が $0, 15^\circ$ までは下流側円柱も完全にせん断流の中にあると考えてよいが、 30° 以上になると、下流側円柱上面はせん断流定速域にあり、その圧力分布形は一樣流のそれに近づくものと予想される。一方せん断流中の円柱表面圧力分布は、円柱上下の速度差のため、一樣流の場合とは異なりそのため抗力, 揚力係数は、速度勾配の程度をあらわす無次元パラメーター $K=GD/U_0$, そして二円柱の場合にはその間隔比, 迎え角 ϕ によってあらわされる。すなわち

$$C_D, C_L = f(R_e, K, L/D, \phi) \quad (4)$$

接近流速 U_0 が小さい低いレイノルズ数で、かつシアパラメーター K が小さい場合 ($R_e=40, 80, K=0.1, 0.2$) の数値計算によれば¹⁾ 揚力の値は抗力の高々 20% であり、しかもその向きは低速側から高速側にむかっている。本実験では、流れは乱流域にあり、しかも表-1 に示すようにシアパラメーターが 1 以上と大きい。

(2) 円柱表面時間平均圧力分布

圧力分布形はレイノルズ数による差異はほとんどなくほぼ相似形をなしている。したがって図-3 にはレイノルズ数が 8 600 の場合を代表で示してある。一樣流中に単独円柱が置かれた場合は x 軸上に圧力のピーク値が存在し、最小位置が $\theta=\pm 70^\circ$ にあるような x 軸に関する対称形を有している。このため揚力はほとんど生じない。このような場合の実験は今まで数多く行なわれ、抗力係数は次式で表わされる²⁾

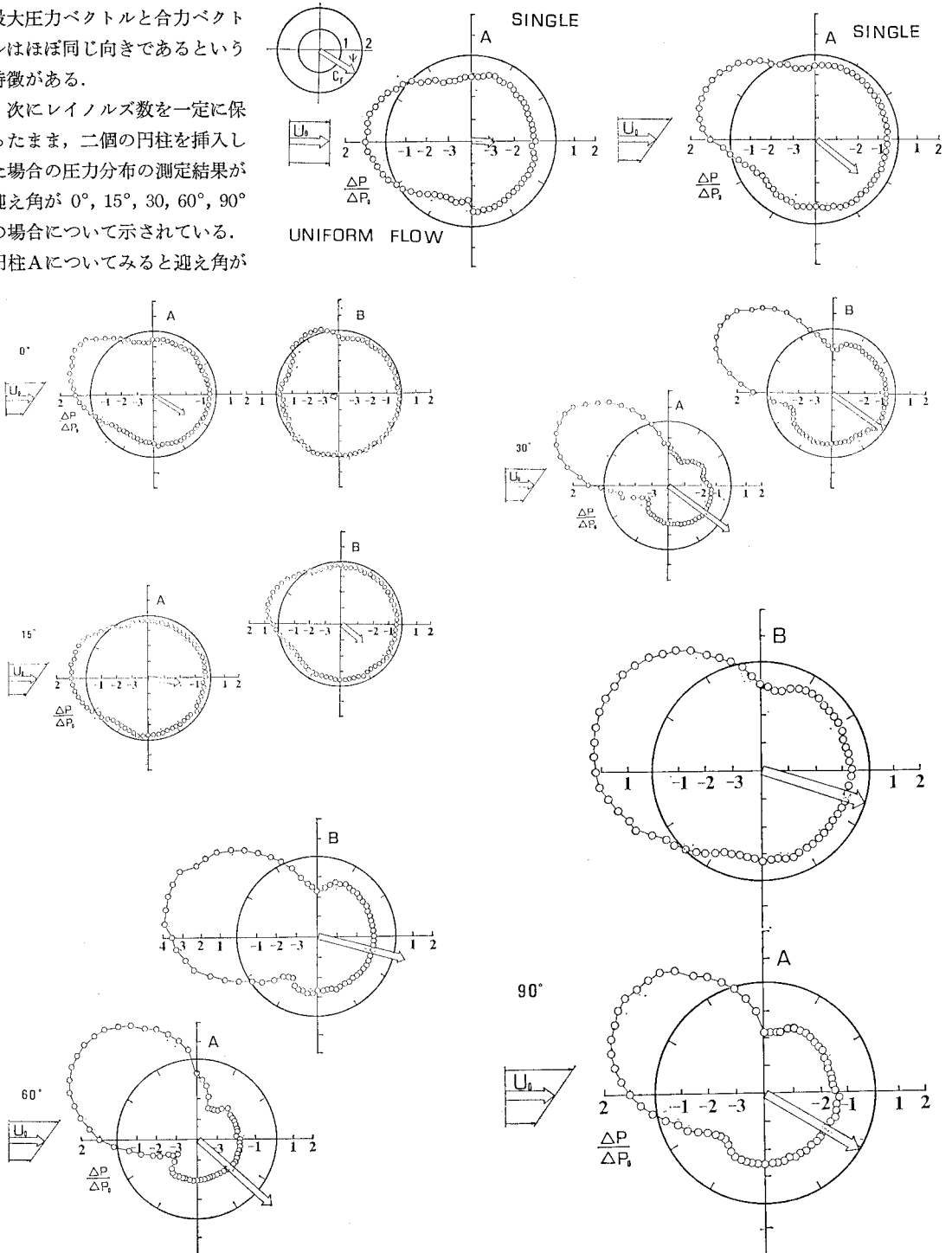
$$D_D \sim 1 + 10.0 R_e^{-2/3} \quad (5)$$

本実験による結果は後に図-7 で示されているが、低いレイノルズ数で (5) と比較して大きい。これは平均流速 20 cm 以下での流速の測定誤差と、円柱長さ/円柱径が小さく、水槽の中の流れが三次元的であるのが原因と思われる。接近流速を一定に保った自由せん断流 ($K=2.3$) に単独円柱を入れた場合の圧力分布形の際だった特徴は、円柱前面の最大圧力点 (よどみ点) が高速流体側にずれ、しかもピーク値も一樣流の場合と較べて約 2 倍によっている。一方最小圧力点は最大圧力点の移動に呼応して同じように高速流体側へと移動し、かつ圧力値は小さくなっている。このようにして分布形は x 軸に対して非対称形をなす。このために、流れ方向に対して直方向力が円柱の高速流体側から低速側にむかう向きに作用する。すなわち揚力が発生することになる。(1), (2) に従って求められた揚力, 抗力は同程度の大きさである。式 (3) に従って合力を計算したものが図中にベクトル ($\Rightarrow$) で、スケールと共に挿入してある。このように接近流速を等しくとったレイノルズ数を同じにしても、圧力分布形及び流体力, その作用方向は異なる。低レイノ

ルズ数で、シアパラメーターの小さい数値実験との大きな相違は最大圧力点（よどみ点）のずれ、および、高速側から低速側に向う揚力の発生である。圧力分布形は最大圧力点と円柱中心を結ぶ線に関してひょうたん型のほぼ対称形を有する。このため最大圧力ベクトルと合力ベクトルはほぼ同じ向きであるという特徴がある。

次にレイノルズ数を一定に保ったまま、二個の円柱を挿入した場合の圧力分布の測定結果が迎え角が 0° , 15° , 30° , 60° , 90° の場合について示されている。円柱Aについてみると迎え角が

0° の時はせん断流中におかれた単独円柱との相違はほとんどなく後側円柱の影響を受けていない。 15° になると圧力分布の非対称形がいったん一様流での対称形に近づいた後、 30° になると再び対称形が崩れ、最大圧力点



図—3 円柱周囲圧力分布測定例 ($Re=8600$)

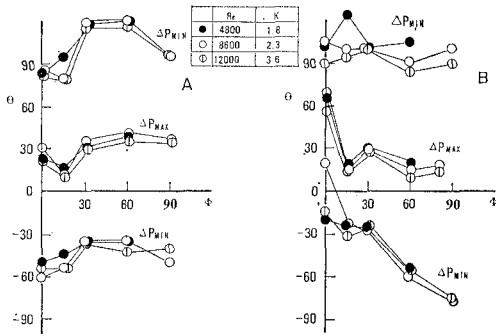


図-4 (1) 最大, 最小圧力点と迎え角の関係

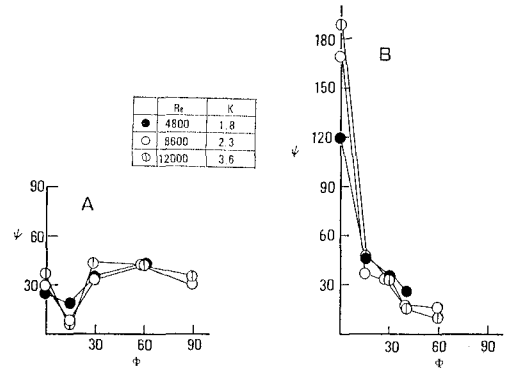


図-5 流体力ベクトルの迎え角による変化

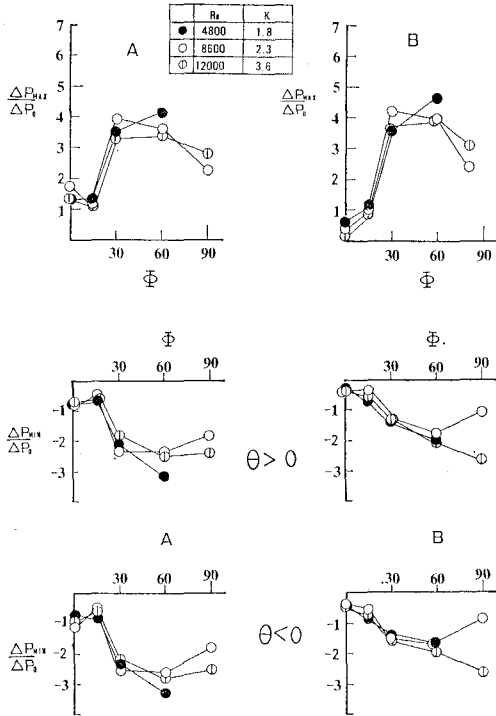
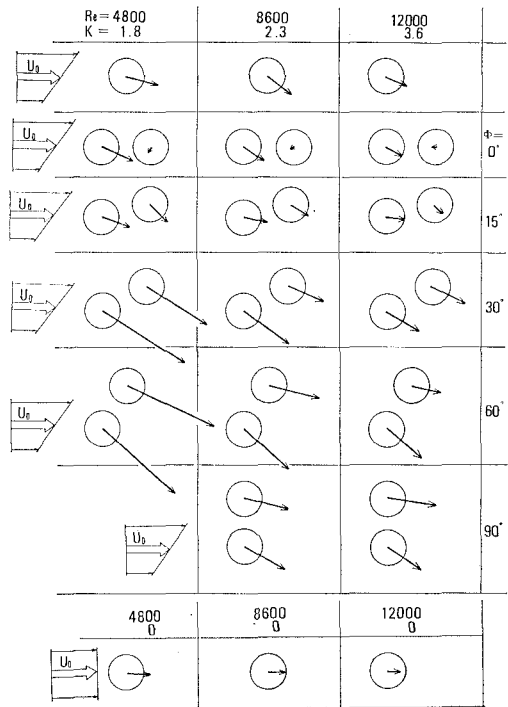


図-4 (2) 最大, 最小圧力値と迎え角との関係

図-6 流体力ベクトルの Re 数迎え角による変化

および最小圧力点とも、単独の場合と較べて更に大きく高速流体側に移動しているのが目立つ(図-4 (1)). またその大きさもより大きな値をとる。(図-4 (2)). 60° でピークに達した後 90° になると再び減少の傾向がみられる。一様流中に 90° の配列で2円柱を置くと $Re=8000$ で $C_D=1.2$, $C_L=0.53$ であるのに比較するとこの配列でもせん断流の影響が大きくきいていることがわかる。後方円柱についてみると迎え角 0° の直列の場合は前方円柱の後流域内に存在し、円柱前面の圧力分布はやや複雑である。圧力の顕著なピーク値は存在しないが、円柱上面に小さなピーク値が存る。 15° で前方円柱と相似な分布形にもどった後は、前方円柱と同じ傾向を示していくことがわかる。ただし、 30° , 60° , 90° における円柱

Bはその上面が自由せん断層の定速域に存在し、圧力分布の傾向としては一様流のそれに似てくるのがわかる。このように大きな抗力の発生と、高速側から低速側に向う揚力の発生は迎え角によって大きく変わることがわかる。このことは 0° , 15° では前方円柱の後流域に円柱Bが存在しそのため円柱間に流れがなくよどんだ状態にあるのに対して、迎え角 30° がになると、下流円柱Bは後流域を脱し、二円柱間に流れが存在するようになる。このことが最大圧力点、最小圧力点を更に高速側に移動させている原因と考えられる。一方、最大圧力点をはさみ最小圧力値はほとんど同じであり、圧力分布形は最大圧力点を中心とする対称形を有する。このために図-5に

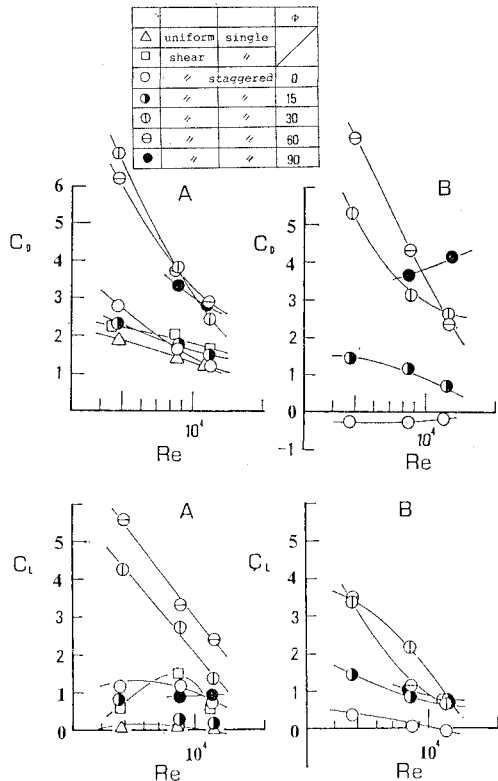


図-7 (1) 抗力、揚力係数と Re 数との関係

示すように最大圧力ベクトルと流体力(合力)ベクトルはほぼ同じ向きを有する。

図-6 は (1), (2), (3) によって算出した流体力ベクトルをレイノルズ数と迎え角でまとめたものである。

4. ま と め

自由せん断流中に置かれた単独円柱、及び二円柱まわりの圧力分布を測定し、次のことが明らかになった。

(1) 自由せん断流中の円柱まわりの圧力分布は最大圧力、最小圧力位置が高速側にずれ、そのため流れ方向に非対称性を有する。このため一様流では生じなかった高

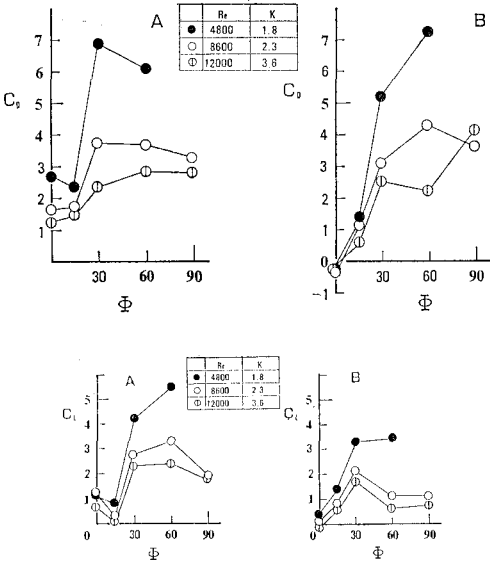


図-7 (2) 抗力、揚力係数と迎え角との関係

速側から低速側に向う時間平均揚力が生ずる。

(2) さらに間隔比を一定にし ($L/D=1.25$)、迎え角を変えて円柱を置くと前方円柱、後方円柱はそれぞれの影響を強く受け、迎え角 $30^\circ \sim 60^\circ$ 前方円柱まわりの圧力分布形はさらに非対称を増し、抗力、揚力ともせん断流中の単独円柱の場合と較べて 2~3 倍にも達する。

最後に本実験結果の検討において有益な意見をいただいた斉藤隆教授、蒲地政文教務員に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田村尚敬・木谷 勝・有江幹男: 円柱をよぎる粘性せん断流れの数値解析, 機械学会論文集, 46 巻 404 号, pp. 555~564, 1980.
- 2) White, F. M.: Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, pp. 210, 1974.
- 3) Zdravkovich, M. M.: Reviews-Reviews of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangement, Transaction of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 1977, pp. 618~633.