



## 異径二円柱まわりの流れ場に関する一考察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤原, 徳一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007742">https://doi.org/10.24729/00007742</a>

## 異径二円柱まわりの流れ場に関する一考察

藤原徳一\*

## Study on the Flow Field Around Two Cylinders with Different Diameter

Tokuichi FUJIWARA\*

## ABSTRACT

The effect of the interaction between circular cylinders which have different diameter to flow field was investigated experimentally. Measurements of defect velocity and Reynolds stress are carried out using a X-hot-wire probe for four kinds of cylinder configuration. The results show that the velocity profiles have similar figure and the difference among the configurations is not seen. Maximum value of Reynolds stress in each section decreases characteristically along main flow direction and the magnitude varies with the cylinder configuration. This paper also discussed pressure distribution and separation on the cylinders and Strouhal number versus drag coefficient plot.

*Key Words* : Two Cylinders, Defect Velocity, Reynolds Stress, Pressure Coefficient, Separation, Drag Coefficient, Strouhal Number.

## 1. 緒言

近接した複数個の物体や構造物をよぎる流れにおいては、はく離域の相互干渉が流れの状態をさらに複雑にするため、単体の場合の結果と大きく異なり、予測しえない現象を引き起こすことがある。この現象の解明は、近年の建築構造物の高層巨大化や車両の高速化に伴う安全性や安定性の向上、また一般の熱交換器、原子炉熱交換器の管群の振動対策に関連して重要な課題となってきている。流れに直交して一本の対称形柱体を設けると、その下流にカルマン渦が形成され、これが柱体の後流域の流れを支配する。円柱群の渦流れも、それぞれの円柱後流とその相互干渉によって基本的な性格は決まってくると思われる。そのため、多数の円柱が近接している場合の後流の流れ特性を検討する必要がある。

この問題に関する研究は多く行われているが<sup>(1-4)</sup>、単円柱および同径二円柱について取り扱っている場合が多い。円柱の抗力減少を目的として円柱近傍に小径の円柱を配置し、小円柱で発生する乱れとの相互干渉を取り扱った研究もあるが<sup>(5)</sup>、後流特性については論じていない。そこで本報では、より実用的な例として直径の異なる二円柱を用い、流れの中に種々の組み合わせで配置した場合の干渉流れを取り扱い、相互干渉による流れ特性と円柱配列の相関について検討した。

## 2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置の全体図を示す。軸流送風機から送られた空気流を漸縮部に導き、整流すると共に流路断面を直径300mmの円形から200mm×200mmの正方形断面に変換する(A-B)。それに続く正方形流路内に、ハニカムおよび整流用金網2枚を用いて断面変化による乱れを整流し(B-C)、その下流に供試円柱を設置するアクリル製試験部を設けた(C-D)。試験部断面は200mm×200mmの正方形である。さらに試験部の静圧に対する大気圧の影響を防ぐため、試験部下流に長さ1000mmの正方形断面流路を取り付けた(D-E)。試験部壁面には熱線プローブ挿入用の長孔および供試円柱取付用孔を設けた。

Fig. 2 に実験に用いた異径二円柱配列を示す。供試円柱は、試験風洞部の寸法を考慮して大円柱直径 $d=20\text{mm}$ 、小円柱直径 $d'=10\text{mm}$ とした。二円柱中心間距離 $l$ を大円柱直径 $d$ で割った無次元距離は、 $l/d=1.6, 6.0$ の2種類とし、上流側に小円柱を置いた場合および下流側に小円柱を置いた場合との組み合わせで、合計4種類の配列(:DC1~DC4)を採用した。 $l/d=1.6, 6.0$ の値は、上流側大円柱の渦形成領域と関連づけ、下流側小円柱がこの渦形成領域内(:DC4)および外(:DC3)に存在するように考慮して採用した。さらに比較のため単円柱(:SC)および同径二円柱配列( $d=20\text{mm}$ ,  $l/d=8.0$ :EC)の実験も行った。

大円柱の設置位置で風洞の正方形断面中心を原点とし、主流方向をx軸、風洞断面上で円柱の中心軸と直角方向をy軸、円柱中心軸方向をz軸にとる。流れの平均量および統計量は熱線流速計を用いて測定した。円柱後方に形成されるカルマン渦の放出周期は、熱線流速計の出力をFFTアナライザーに導き、周波数解析を行うことにより求めた。

1997年4月9日受理

\* 機械工学科(Department of Mechanical Engineering)

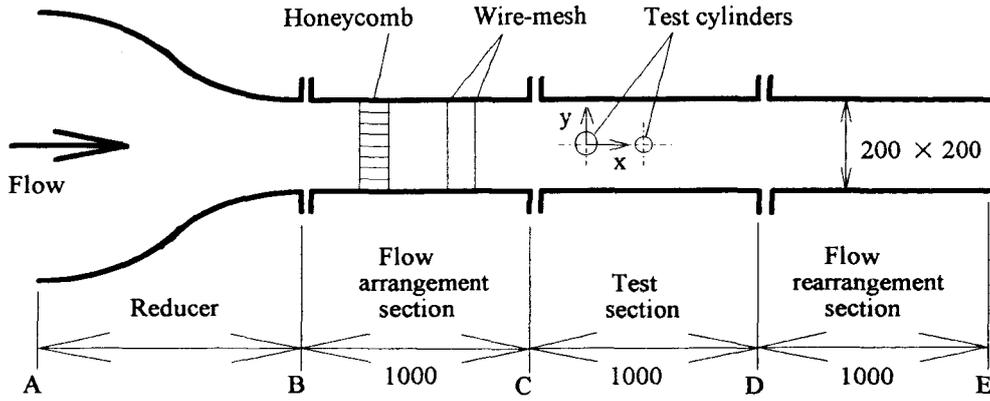


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup (Dimensions are in mm).

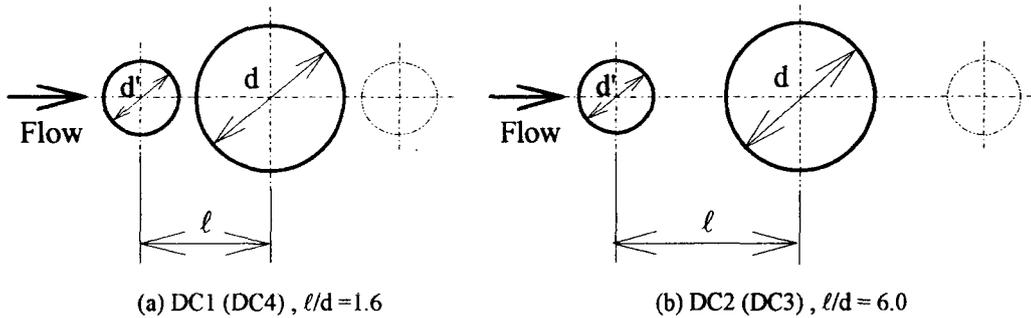


Fig. 2 Configuration of two cylinders with different diameter.

円柱には直径0.3mmの圧力測定孔を設け、壁面上圧力を円柱支持部を通して導管により圧力変換器に導いた。圧力分布の測定は、円柱をその中心軸上で回転させることにより行った。また各円柱の抗力は、圧力分布曲線を図式積分することにより求めた。

### 3. 基礎式

Fig. 3 に示すように、円柱後方では速度の欠損が生じている。この後流欠損部の速度分布は、自由噴流中の速度分布が適用できることが知られている。本報では、Ginevskiに従って後流中のせん断応力をべき乗則で表わし、Prandtlのk-ε理論を用いて求めた次式を用いることにする<sup>(6)</sup>。

$$\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - u_{\min}} = 1 - 0.8926 \eta_{1/2}^2 + 0.4590 \eta_{1/2}^3 - 0.06639 \eta_{1/2}^4 \quad (1)$$

ここで、 $u$  : 後流速度,  $u_{\max}$  : 後流最大速度,  $u_{\min}$  : 後流

最小速度,  $\eta_{1/2} = \frac{y}{b_{1/2}}$ ,  $b_{1/2}$  : 後流欠損速度の半値幅。

後流中のレイノルズ応力は速度こう配に比例する。すなわち、

$$\frac{\tau}{\rho U^2} \propto -1.785 \eta_{1/2} + 1.377 \eta_{1/2}^2 - 0.2656 \eta_{1/2}^3 \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  : レイノルズ応力,  $\rho$  : 空気の密度,  $U$  : 円柱上流の一樣流速。

理想流体中に置かれた単円柱壁面上の圧力分布は次式で示される<sup>(7)</sup>。

$$C_p = \frac{p_\theta - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (3)$$

ここで、 $C_p$  : 圧力係数,  $\theta$  : 上流岐点よりの角度,  $p_\theta$  :  $\theta$  における円柱表面圧力,  $p_\infty$  : 円柱上流の圧力。

有限断面積の流路中に物体が置かれた場合、主流と直角な平面への物体の投影面積が流路断面積に比べて十分に小さくないとき、物体に働く抗力は広い流れの中に置かれた場合より増加する。このような拘束効果に対する補正式は次式で与えられる<sup>(8)</sup>。

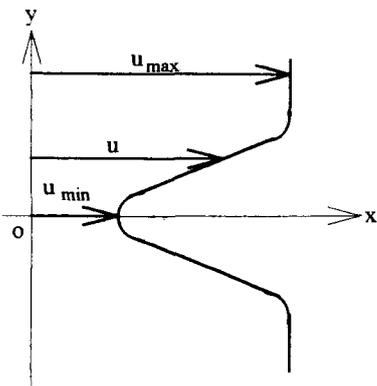


Fig. 3 Definition sketch of defect velocity distribution.

$$\frac{C_{DC}}{C_D} = 1 - 0.5C_D\left(\frac{d}{B}\right) - 0.25\pi^2\left(\frac{d}{B}\right)^2 \quad (4)$$

ここで、 $C_D$  : 抗力係数 ( $= \frac{2D}{\rho U^2 A}$ )、 $D$  : 円柱の単位長さあたりの抗力、 $A$  : 円柱の単位長さあたりの投影面積)、 $C_{DC}$  : 補正抗力係数、 $B$  : 正方形流路の一辺の長さ。

種々の二次元物体に対するストローハル数  $S_t$  と  $C_{DC}$  の関係は次式で与えられる<sup>(9)</sup>。

$$S_t = 0.21 / C_{DC}^{0.622} \quad (5)$$

ここで、 $S_t = fd / U$ 、 $f$  : 渦放出頻度。

#### 4. 実験結果と考察

本実験のレイノルズ数は  $Re = 1.09 \sim 1.13 \times 10^4$  である。また風洞性能試験結果より、試験部の平均速度の変動率は  $2y/B = -0.8 \sim +0.8$  で 3.5%、 $2z/B = -0.8 \sim +0.8$  で 1.8% である。乱れ度は  $2y/B = -0.8 \sim +0.8$  の範囲で  $x, y$  方向共に 1.8% である。

##### 4-1. 欠損速度分布

Fig.4-7 に異径二円柱配列 DC1-DC4 の後流内欠損速度分布を示す。縦軸に無次元欠損速度、横軸には欠損速度が最大速度の半分になる距離 (半値幅) で標準化した無次元距離をとっている。すなわち、横軸は流路幅ではなく欠損速度の無次元幅を示している。また、図中の実線は(1)式を表わしている。これらの図より、欠損速度分布は(1)式でよく近似でき、円柱配列による顕著な差は表われていないといえる。しかし、詳細にみると配列1 (:DC1) では他の配列に比べて  $x/d$  による欠損速度のパラツキが大きいことがわかる。この傾向は円柱表面圧力分布 (後述) にも表われている。配列1では、他の配列に比べて前置小円柱の作り出す渦流れが後置大円柱に大きく影響していることがわかる。プロットが  $\eta_{1/2} = 0$  に関して左右非対称で、 $\eta_{1/2} \geq 0$  の側のプロットと(1)式と

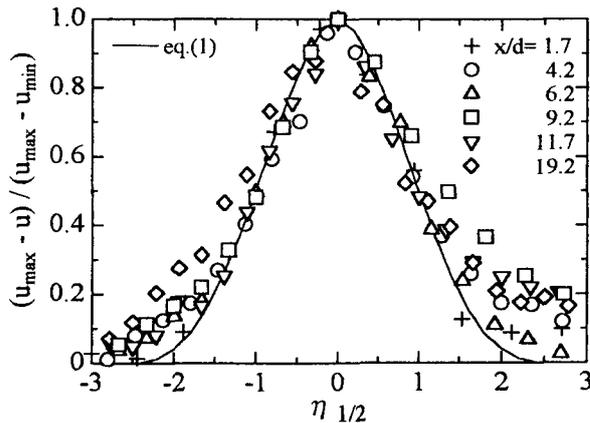


Fig.4 Nondimensional velocity distribution for DC1

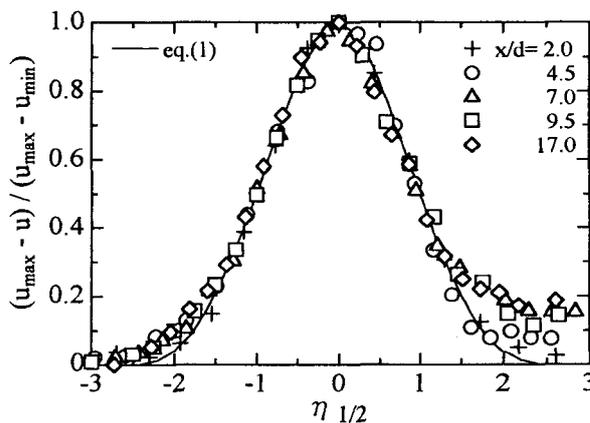


Fig.5 Nondimensional velocity distribution for DC2

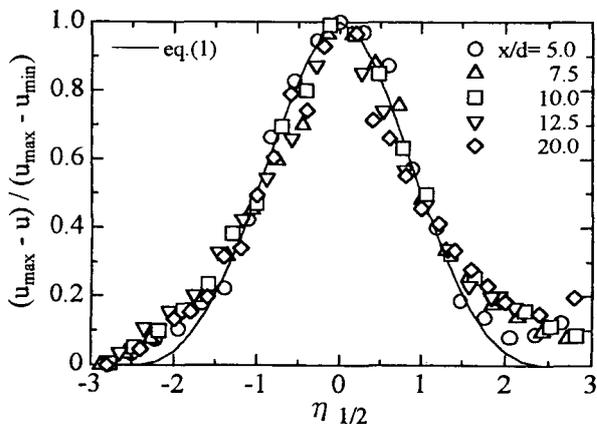


Fig.6 Nondimensional velocity distribution for DC3

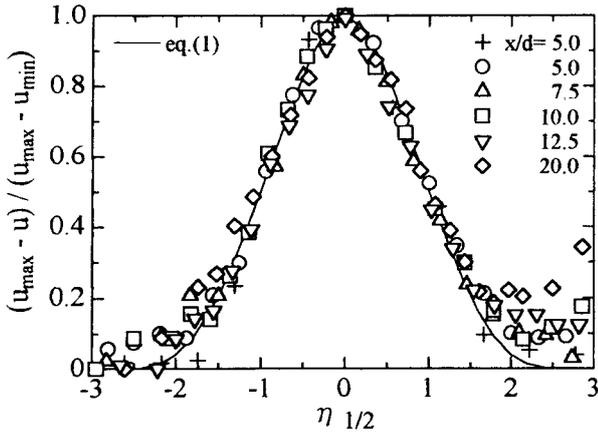


Fig.7 Nondimensional velocity distribution for DC4

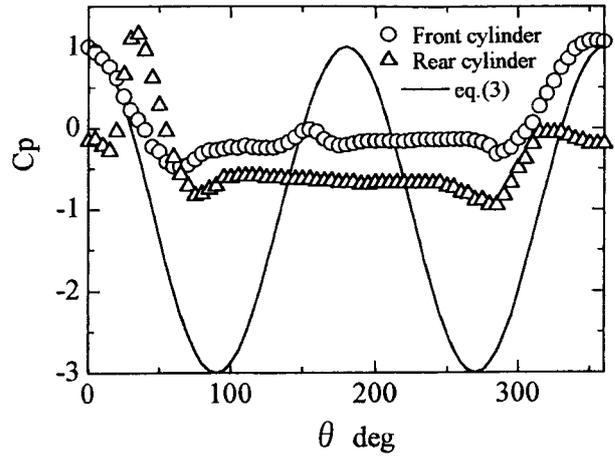


Fig.10 Pressure coefficient for DC1

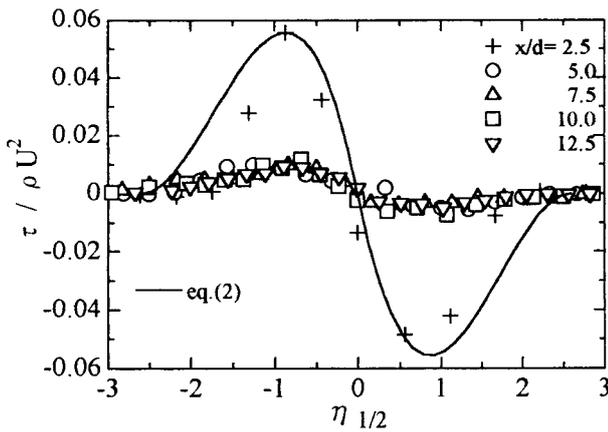


Fig.8 Reynolds stress distributin for DC4

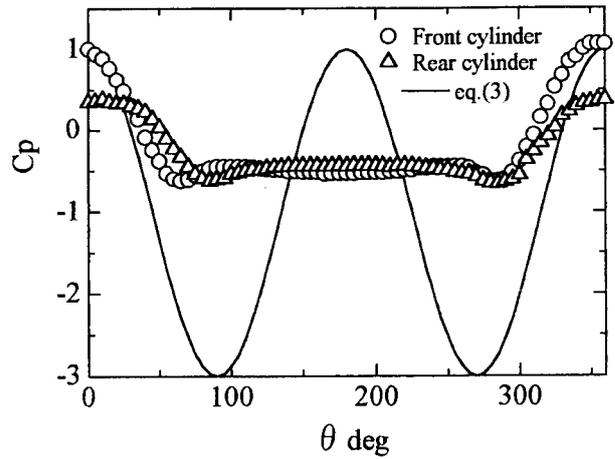


Fig.11 Pressure coefficient for DC2

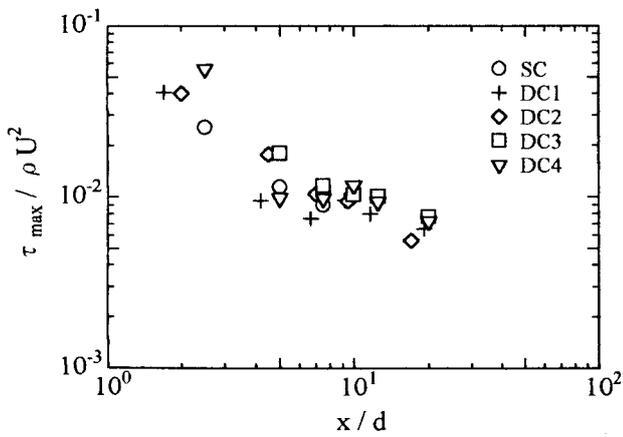


Fig.9 Reynolds stress distribution along x-axis

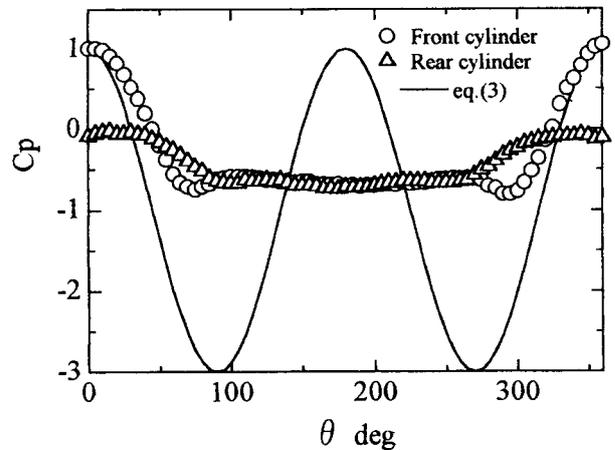


Fig.12 Pressure coefficient for DC3

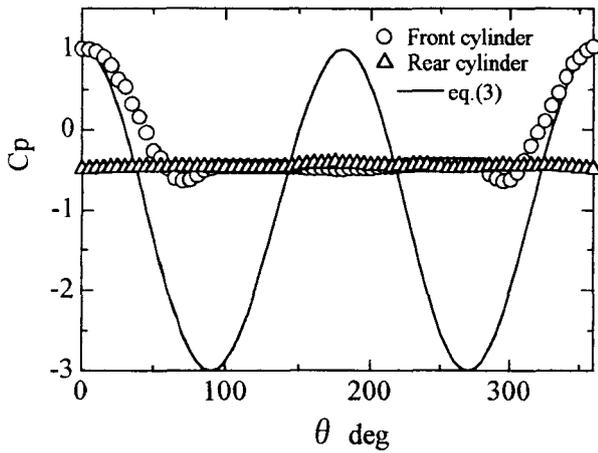


Fig. 13 Pressure coefficient for DC4

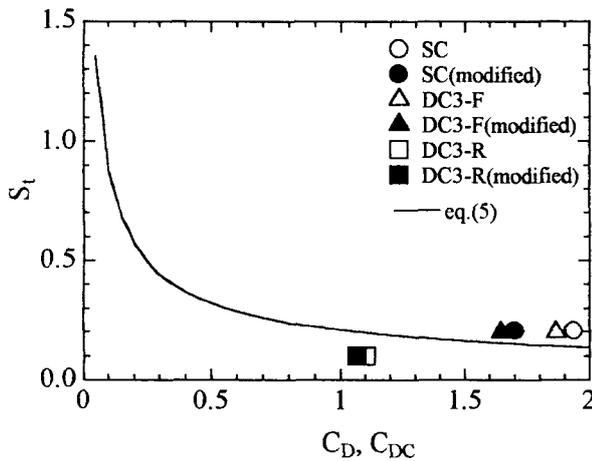


Fig. 14 Relation between  $C_D, C_{DC}$  and  $St$

Table 1 Separation point and drag coefficient for each configuration of cylinder.

	Separation point $\theta_s$ [deg.]	Drag coefficient $C_D$
SC	87	1.94
EC	Front cylinder	83
	Rear cylinder	110
DC1	Front cylinder	84
	Rear cylinder	94
DC2	Front cylinder	87
	Rear cylinder	111
DC3	Front cylinder	83
	Rear cylinder	-
DC4	Front cylinder	88
	Rear cylinder	-

のズレが大きいのは、熱線プローブ挿入用の小孔による影響と考えられる。

#### 4-2. レイノルズ応力分布

Fig. 8 は円柱後流の各断面におけるレイノルズ応力分布の代表例である。縦軸に無次元レイノルズ応力、横軸に無次元距離をとって配列 4 について示している。図中の実線は、 $x/d=2.5$  について式(2)を適用して示したものである。これより、各断面のレイノルズ応力分布は相似形を示すことがわかる。また、レイノルズ応力が最大値を示す位置より外側では、プロットは実線からずれ、主流の圧力勾配の影響を受けていることがわかる。

Fig. 9 は、各断面の最大レイノルズ応力  $\tau_{max}$  の主流方向の変化を調べたものである。縦軸に無次元レイノルズ応力、横軸に主流方向の無次元距離をとっている。4 種の二円柱配列のほかに、参考のために単円柱の結果も示してある。 $\tau_{max}$  の変化は特徴的で、円柱近傍から  $x/d$  の増加とともにその値は減少し、その後一定となり、さらに  $x/d$  が増加すると再度減少する。図には示していないが、同径二円柱配列では、本実験の測定範囲内でこのような傾向はみられなかった。配列 1 では、 $\tau_{max}$  の値は単円柱や他の配列に比べて小さいことがわかる。また、 $\tau_{max}$  の減少率は配列 4 が最も大きい。これらのことより、大円柱近傍に小円柱を置いた場合、円柱間の相互作用がより大きく表われることがわかる。

#### 4-3. 円柱表面圧力分布および抗力係数

Fig. 10 - 13 は縦軸に圧力係数  $C_p$ 、横軸に上流岐点よりの角度  $\theta$  をとり、各円柱の表面圧力分布を調べたものである。図中の実線は、理想流体中の単円柱に対するポテンシャル理論による解、式(3)を示している。配列 2 ~ 4 では前置円柱の  $C_p$  の変化の様相は、単円柱のそれと同じであることがわかる。後置円柱については、配列 2, 3 では上流側の小円柱の作り出す後流領域の範囲が小さく、下流側の大円柱におよぼす影響も小さいため  $C_p$  の傾向は変わらない。配列 4 では、上流側の大円柱の作り出す渦形成領域内に下流側の小円柱が入ってしまうため、 $C_p$  はほとんど変化しない。配列 1 では、速度分布と同様に上流小円柱の作り出す渦流れが下流大円柱に大きく影響していることがわかる。この配列では、非常に小さい円柱間のすきまからの噴流が大円柱方向に曲げられ、この付着噴流の影響により、下流円柱の圧力分布は風洞中心軸に対して対称になっていない。

Table 1 に、単円柱 (:SC)、同径二円柱配列 (:EC)、異径二円柱配列 1 ~ 4 (:DC1-DC4) の各円柱に対するはく離点  $\theta_s$  および抗力係数  $C_D$  を示す。本実験のレイノルズ数範囲では、円柱壁面で層流はく離が生じる。本実験にお

ける単円柱のはく離点は87度で、壁面の拘束効果により既知の値78度よりも大きくなっていることがわかる。配列1, 2では後置円柱のはく離点は、相互干渉により前置円柱より大きくなっている。配列3, 4の後置円柱のはく離点は、本実験結果からは決定できなかった。各配列における大円柱(DC1, 2ではRear, DC3, 4ではFront)の抗力係数に注目すると、配列1の $C_D$ 値はその他の配列に比べて26~33%減少している。これより、物体の抗力軽減対策として相互干渉を利用できることが確認された。

Fig. 14に、抗力係数 $C_D$ および式(4)によって求めた補正抗力係数 $C_{DC}$  (:modified)とストローハル数 $S_t$ との関係を配列3について示す。図中配列記号DC3の後のF, Rは、おのおの前置円柱、後置円柱を、実線は式(5)を表わしている。また、図には参考のため単円柱の結果も示してある。単円柱および前置円柱の補正後の $C_D$ 値は式(5)で示される値に近いが、後置円柱のそれは実線で近似できないことがわかる。

## 5. 結言

異径二円柱を用い、流れの中に種々の組み合わせで配置した場合の干渉流れを取り扱い、相互干渉による流れ特性と円柱配列の相関について検討した。

本報で得た結果を要約すると次のようになる。

- (1) 二円柱後流中の欠損速度分布は相似形を保ち、配列による大きな特徴はみられない。
- (2) 二円柱後流における最大レイノルズ応力の主流方向の変化は特徴的で、円柱配列による傾向の違いがみられる。
- (3) 下流円柱の圧力分布は、配列1では付着噴流の影響により、風洞中心軸に対して対称にならない。これより物体の抗力軽減対策として相互干渉を利用できることを確認した。

## 参考文献

- (1) 小林, 機論, **42-357**, (1976), 1452-1461.
- (2) 五十嵐, 機論, **46-406**, B(1980), 1026-1036.
- (3) 岡本・ほか3名, 機論, **60-573**, B(1994), 1568-1574.
- (4) 岡本・ほか3名, 機論, **60-578**, B(1994), 3336-3344.
- (5) 筒井・ほか2名, 機論, **62-594**, B(1996), 427-433.
- (6) 柳井田・ほか3名, 機講論, **95-10**, (1995).
- (7) S. Goldstein, Modern Developments in Fluid Dynamics vol.1, DOVER PUBLICATIONS, (1965), 23.
- (8) 日本流体力学会, 流体力学ハンドブック, 丸善, (1987), 237-238.
- (9) 日本流体力学会, 流体力学ハンドブック, 丸善, (1987), 233.