

# 円柱周りの流れに及ぼすフランジ型端板の影響

## (近接端板間距離における特異現象)

山田 英 巳\*・大坂 英 雄\*・岡野 卓 也\*\*

### The Effect of Flange Type End Plates on the Flow Around a Circular Cylinder

(The Peculiar Phenomenon for the Small Distance Between Two End Plates)

Hidemi YAMADA, Hideo OSAKA and Takuya OKANO

#### Abstract

The effect of the end plates, which are often used to reduce the influence of side-wall boundary layer on the flow field around a circular cylinder normal to the flow, has been studied experimentally. Both the distance between two end plates and the diameter of flange type end plates are altered for the measurements of surface pressure distribution and wake velocity profile. Flow visualization with smoke-wire technique is also carried out to make clear the flow pattern around a circular cylinder.

It was found that the drag coefficient decreased drastically with a sudden increase the base pressure coefficient when the distance between two end plates becomes smaller than the critical value. So this state was regarded as a peculiar phenomenon. In this peculiar phenomenon, both the velocity defect and the turbulent intensity in the wake showed the large value. It was also observed that the flow field around the cylinder was definitely three-dimensional.

#### 1. まえがき

円柱等の二次元物体周りの流れの特性は、実在する複雑な構造の物体に作用する流体力や後流の性質を予測するための基礎資料として重要であり、これまでに数多くの研究がなされてきている。実験的研究において円柱等の細長い物体は風洞側壁により支持されるため、これまでに得られた結果の中にはこの側壁面上の境界層が影響していると思われる場合がかなり認められる<sup>1)2)</sup>。このため細長い物体の両端部に端板を取り付ける方法がよく用いられているが、この際端板の有無により流れ場の特性が大幅に異なる場合のあることが

指摘されている<sup>3)~5)</sup>。したがって端板自身が流れ場に及ぼす影響の詳細を明らかにすることが必要であると考えられる。これまでに Stansby<sup>6)</sup>, Gerichら<sup>7)8)</sup>, Westら<sup>9)</sup>は円柱について, Donosoら<sup>10)</sup>, Kuboら<sup>11)</sup>は垂直平板について, また Toyら<sup>12)</sup>は角柱についてその周りの流れを対象として端板の影響を調べているが, 端板の形状, 寸法および取り付け位置等の条件が多様でありそれらの効果が系統的に明らかとされるまでには至っていない。

そこで, 本研究では円柱への取り付けが容易なフランジ型端板を用いて端板直径と端板間距離が円柱周りの流れに及ぼす影響について調べることを試みた。この過程において, 端板間距離がある臨界距離以下になると, 背圧の急上昇とともに抵抗が急減少する特異現象が現れることを見出した。これまでに, この種の現象に関する報告は極めて少ないので, 本報告では特に

\* 機械工学科

\*\* 大学院機械工学専攻

この特異現象の生じる過程で見られる流れ場の変化と、これらの発生する条件および機構について検討する。

主要記号

- $x, y, z$  : 円柱軸上のスパン中心を原点とする右手系直交座標
- $\theta$  : 円柱前方淀み点より測った角度
- $d$  : 円柱直径
- $D$  : 端板直径
- $L$  : 端板間距離
- $U$  : 平均速度
- $u_{rms}$  : 変動速度の rms 値
- $U_0$  : 基準主流速度
- $U_1$  : 円柱下流の主流速度
- $p$  : 円柱表面圧力
- $p_0$  : 円柱設置断面における主流静圧
- $Red$  : レイノルズ数,  $Red = U_0 \cdot d / \nu$
- $C_p$  : 表面圧力係数,  $C_p = (p - p_0) / (1/2) \rho U_0^2$
- $C_{pb}$  :  $\theta = 180^\circ$ における表面圧力係数 (背圧係数)
- $C_d$  : 抗力係数,  $C_d = \int_0^{2\pi} C_p \cos\theta d\theta$

2. 実験装置および方法

実験には、入口寸法が高さ210mm、幅400mmで、長さが1210mmの測定部をもつ吹出し型風洞を用いた。実験概要を Fig. 1 に示す。供試円柱は、直径  $d = 5\text{mm}$  の黄銅製円管であり、測定部入口より800mm下流位置で風洞側壁を貫いて回転式分度器 (分解度  $1/60$ 度) により支持されている。供試端板の形状を Fig. 2 に示す。供試端板は、円板部の直径が  $D = 25, 30, 35, 40$  および  $50\text{mm}$  の黄銅製のフランジ型端板であり、厚さ  $1.5\text{mm}$  の円板部の端が長楕円形に加工され、円柱への取付けのため直径  $10\text{mm}$  の支持部を有している。

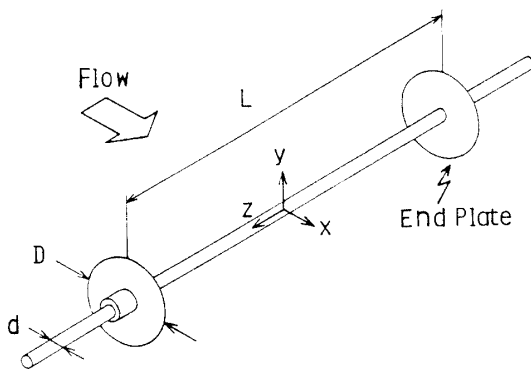


Fig. 1 Experimental setup and coordinate system.

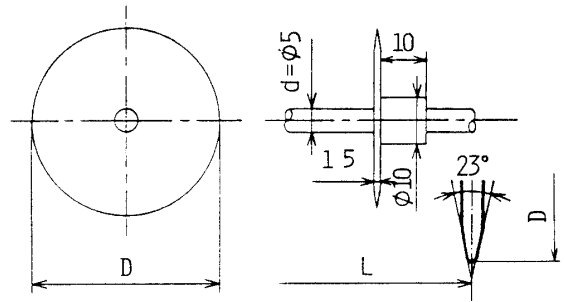


Fig. 2 Shape of end plate.

実験は主にレイノルズ数  $Red = 3000$  のもとで、端板の直径および2枚の端板間の距離を種々変化させて行った。円周方向 ( $z/d = 0$  面) とスパン方向 ( $\theta = 180^\circ$ ) の表面圧力分布は、円柱表面にあげられた直径  $0.3\text{mm}$  の単一の圧力測定取出し孔を円周方向およびスパン方向に移動することにより求めた。後流の平均速度と変動速度分布は、I型熱線プローブ (受感部長さ  $1.0\text{mm}$ 、直径  $5\ \mu\text{m}$ ) を  $z/d = 0$  面内で移動することにより測定した。また円柱および端板近傍における流れの可視化には、スモークワイヤ法 ( $Red = 1500$ ) およびタフトスティック法 ( $Red = 3000$ ) を用いた。スモークワイヤ法による流れの可視化では、直径  $0.1\text{mm}$  のニクロム線に流動パラフィン塗布し、これに通電加熱後パルス光を照射して写真撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 抗力係数

Fig. 3 および 4 は、それぞれ  $z/d = 0$  面における端板間距離  $L/d$  に対する円柱の圧力抗力係数  $C_d$  および背

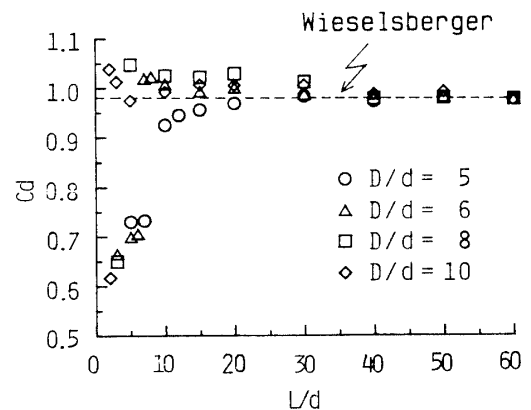


Fig. 3 Variation of drag coefficient with distance between two end plates.

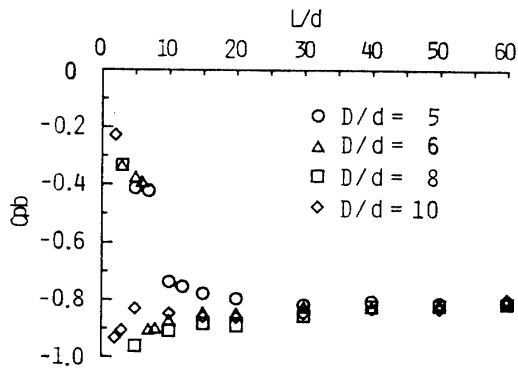


Fig. 4 Variation of pressure coefficient with distance between two end plates.

圧係数  $C_{pb}$  の変化を示す。およそ  $L/d > 40$  の範囲ではどの端板直径  $D/d$  の場合とも二次元円柱の抗力係数として知られている Wieselsberger の値 0.98 (Red = 3000)<sup>13)</sup> と良く一致している。これに対応して背圧係数も  $-0.81$  の一定値をとっている。したがって  $L/d > 40$  の場合には少なくとも  $z/d = 0$  面付近までは端板の影響が及んでいないものと推察される。一方  $L/d < 40$  の場合には  $C_d$  および  $C_{pb}$  の値に変化が見られる。また、その領域における  $C_d$  および  $C_{pb}$  の変化パターンが、 $D/d = 5$  の場合と  $D/d = 6 \sim 10$  の場合とで異なることが分かる。これは、次節で述べるように本実験で用いたフランジ型端板の形状と寸法により円柱背後の二次流れの強さが異なるためと予想される。さらに  $L/d$  を小さくしていきある値に達すると、 $C_d$  が突如大幅に減少し、同時に  $C_{pb}$  が急増加する特異現象が現れる。この現象について以後詳しく検討していく。そこでこのような急激な変化を生じる場合の  $L/d$  を臨界端板間距離  $(L/d)_{cri}$  と呼ぶこととする。またこの現象は、端板間距離が比較的小さい場合において渦放出周波数が急激に低下することを報告している Gerich<sup>8)</sup> の結果 (Red = 136) とも関連するものと思われる。

### 3.2 表面圧力分布

Fig. 5 は、代表として  $z/d = 0$  面における  $D/d = 6$  の場合の円周方向の圧力分布を示す。円柱周りの流れにおいて剥離点の後退が円柱背後の後流部を縮小させ、円柱に作用する抗力を減少させることはよく知られている。しかしながら  $L/d < (L/d)_{cri}$  の条件にある  $L/d = 5$  の場合をみると、剥離点が他に比べて前進しているにもかかわらず、 $C_{pb}$  が大きく増加し、同時に  $C_d$  が大きく減少することを示している。このことは、端板間距離が臨界距離以下である場合の円柱周りの流れが通

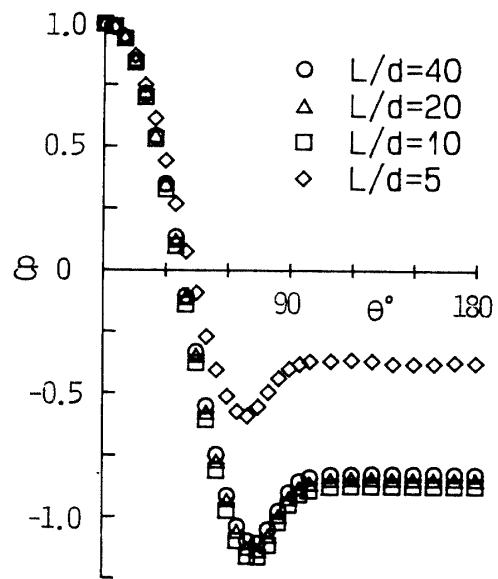


Fig. 5 Circumferential pressure distribution around the centerline of the circular cylinder ( $D/d = 6$ ).

常の場合とは異なる三次元流れとなっていることを予想させるものである。

Fig. 6 は円柱の背圧係数のスパン方向分布を示す。端板間距離が臨界距離に比べて大きい場合のスパン方向背圧分布を見ると、両端板に近づくにつれ圧力が次第に上昇していくことが分かる。この上昇は端板間距離が減少するにつれ弱まる傾向を示している。さらに端板間距離が減少すると、前述した背圧係数の急増する特異現象が見られる。増加した背圧のスパン方向分布は端板間内ではほぼ一定であるが、Fig. 4 から分かるようにその値は  $L/d > 40$  の場合の一定値とは大きく異なっている。また後述する Fig. 10(c), (d) に示すように端板間内の流れは三次元的になっている。

端板間距離が臨界距離に比べて大きい場合のスパン方向背圧分布は、円柱背後の二次流れの強さに応じて両端板に近づくにつれ上昇する傾向を示すものと考えられる。これに関し  $D/d = 8$  の場合についてタフト法により円柱背面近傍の流れの観察を行うと、端板間内ではスパン中央部より両端板に向かう二次流れが生じていることおよびその一部が端板後縁部をまわって端板支持部背後のスケールの大きい再循環流域 (Fig. 10(a), (b) 参照) に吹出していることが認められた。このことは、 $L/d > (L/d)_{cri}$  の場合の二次流れがフランジ型端板の後縁近傍における端板間内の円柱の後流と端板支持部背後の再循環流域との圧力差により誘起されていることを示すものと思われる。端板間距

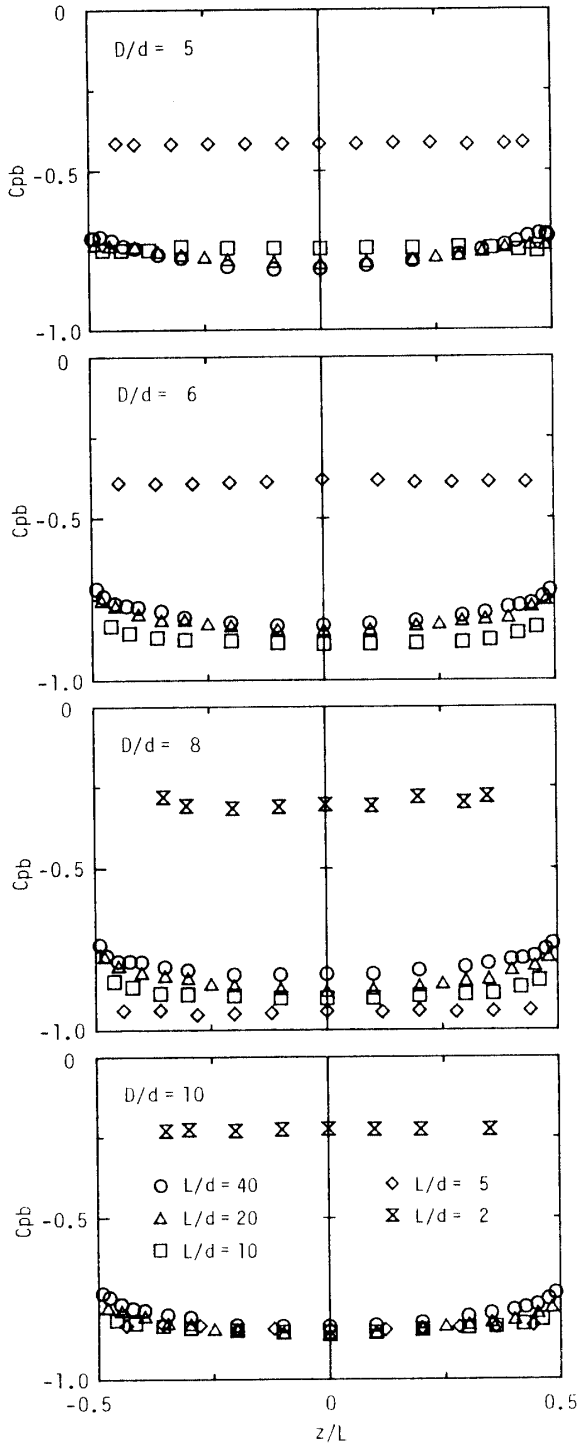


Fig. 6 Spanwise base pressure distribution.

離が臨界距離に向かって減少していくと、端板間内の再循環領域のスケールが増加するものと予想されるので、端板後縁近傍の両側の圧力差は減少していき、これによる二次流れの影響は小さくなるものと考えられる。したがって、端板間距離が臨界距離に達すると、

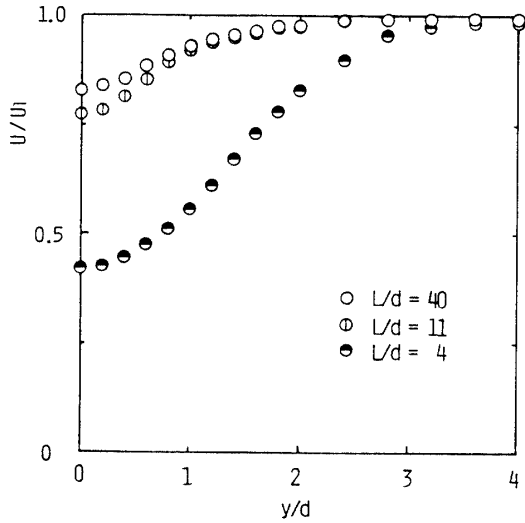
端板後縁近傍での端板間内の円柱の後流と端板支持部の後流との圧力差は小さくなっているため、端板間内の円柱と端板支持部の両方の再循環領域と端板外部の円柱の後流との圧力差の効果が大きくなり、このため端板外部側からの巻き込み流をもつ三次元的流動 (Fig. 10(c), (d)) である特異現象を生じるものと考えられる。

さらに Fig. 6 を見ると、D/d = 6 ~ 10 の場合に比べ D/d = 5 の場合の端板付近の圧力分布上昇が小さいことが分かる。これは D/d = 5 の端板の後縁 (x/d = 2.5) が円柱の再循環領域の後端 (Red = 3000 の場合 x/d = 2.4) に近いので<sup>14)</sup>、端板後縁部近傍における端板両側での圧力差がもともと小さいと考えられ、上述の二次流れの影響が小さいためと思われる。以上のことより、端板直径が端板支持部の再循環領域よりも十分大きく (本実験の場合 D/d > 10 と予想) なると、これまで述べたものとは異なる結果の得られることが予想される。

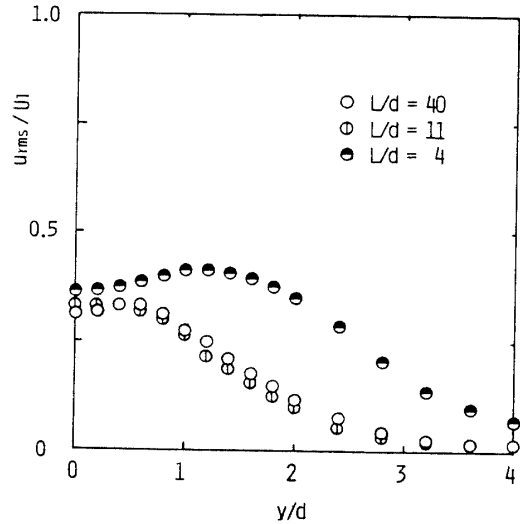
### 3.3 後流特性

Fig 7 (a), および (b) は、それぞれ x/d = 10 断面における D/d = 5 および 8 の場合の平均速度分布を示す。端板直径が D/d = 8 の場合の結果は、端板間距離が L/d = 4 のとき 2 つの流れパターンが存在することを示している。一つは L/d の大きい範囲における通常の二次元的円柱後流の場合と同種の結果を、他方は L/d の小さい範囲における特異現象に対応する場合の結果を示す。後者の場合極めて大きな速度欠損を生じている。また同一条件下の 2 種の流れパターンの存在は、端板間距離の臨界値 (L/d)<sub>cri</sub> がある幅を有することを示唆している。臨界端板間距離 (L/d)<sub>cri</sub> 以下における L/d = 2 と 4 の場合とを比べると、L/d = 2 の場合の方が速度欠損が小さく後流幅が大きくなっており、より下流の段階の後流特性を示しているものと考えられる。これは、同一直径の端板の場合 (L/d)<sub>cri</sub> 以下の範囲において L/d が小さいほど背圧係数 Cpb が高い (Fig. 4) ためであると推察される。一方 D/d = 5, L/d = 4 では速度欠損の大きいパターンのみしか生じず、D/d = 8 の場合と臨界端板間距離が異なることを示している。D/d = 5 と 8 の両方に対して (L/d)<sub>cri</sub> 以下の範囲にある L/d = 4 の場合を比較すると、D/d = 8 の場合の方が速度欠損が大きいことがわかる。これは、同じ端板間距離に対して端板直径が大きいほど背圧が高く、再循環領域のスケールが大きいためと思われる。

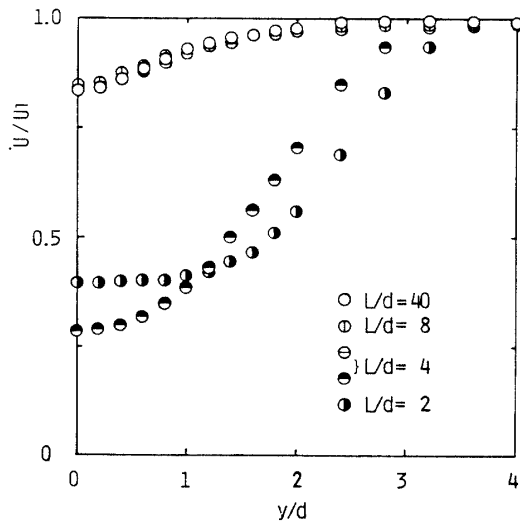
平均速度分布に対応する条件の場合の乱れ強さ分布を Fig. 8 (a) および (b) に示す。D/d = 5 および 8 の場合とも L/d > (L/d)<sub>cri</sub> では、二次元的な場合の分布に類



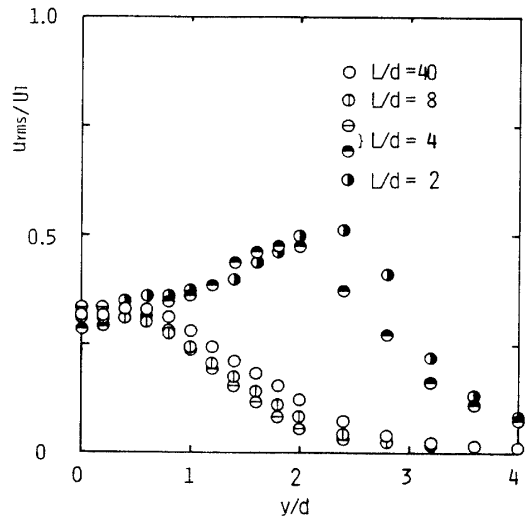
(a)  $D/d=5$



(a)  $D/d=5$



(b)  $D/d=8$



(b)  $D/d=8$

Fig. 7 Mean velocity profile ( $x/d=10$ ).

Fig. 8 Turbulent intensity profile ( $x/d=10$ ).

似している。 $L/d < (L/d)_{crit}$ における乱れ強さは全体的に大きく、特に Fig. 7 の速度分布における勾配  $dU/dy$  の大きい領域における乱れ強さは  $L/d > (L/d)_{crit}$  の場合の最大値のおよそ 2 倍に達している。

### 3.4 臨界端板間距離

Fig. 9 は、後流の欠損速度の特徴より求めた各端板直径  $D/d$  に対する臨界端板間距離  $(L/d)_{crit}$  の範囲を示す。 $(L/d)_{crit}$  値はおおよそ  $D/d$  が小さいほど大きいことが分かる。また  $(L/d)_{crit}$  の値はかなりの幅をもっている。これは、3.2 節で述べたように臨界領域において端

板後縁近傍の圧力差に起因する二次流れと端板間外より端板間内に向かう逆方向の二次流れとが微妙なバランスを保っているためと考えられる。実際この領域における流れ場は非常に不安定であり、2 種の流れパターンのうち一方が僅かな攪乱により容易に他方に移り変わる。同図にはレイノルズ数  $Re_d=2000$  の結果を併記しているが、 $Re_d=3000$  の場合と比較すると  $(L/d)_{crit}$  の値が全体的に大きくなっていることが分かる。これはレイノルズ数が  $10^3$  のオーダーでは、レイノルズ数が小さいほど円柱の再循環流域が大きい<sup>14)</sup>ため、相対的に端板直径が減少した場合と同様の傾向が得られるためと考

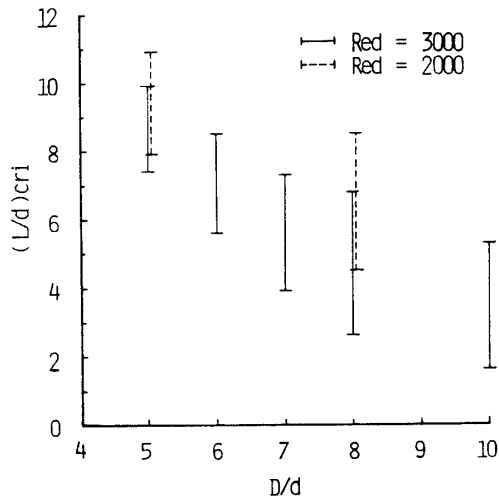


Fig. 9 Critical distance between two end plates.

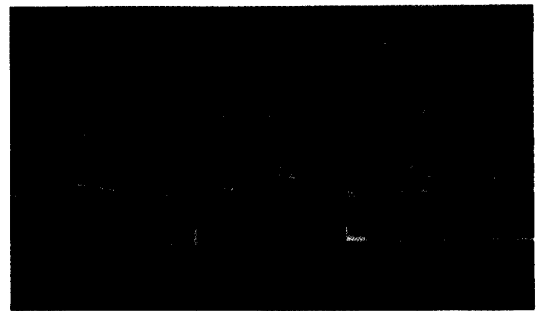
えられる。

### 3.5 流れの可視化

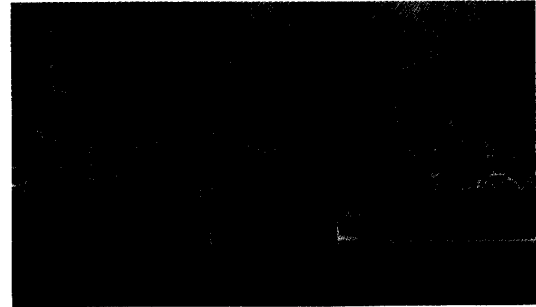
Fig. 10は、一例として  $D/d=5$  において  $x/d=4.5$ ,  $y/d=0$  の位置に加熱細線を設置した場合のスモークワイヤ法による円柱後流の可視化を示す。  $L/d > (L/d)_{cri}$  の範囲の  $L/d=12$  の場合、端板支持部の背後を除き流れはすべて順流であることがわかる。  $L/d < (L/d)_{cri}$  の範囲の  $L/d=4$  の場合、端板間内と端板支持部の後流はすべて逆流を示している。通常  $Red=1500$  における後流の最大逆流域の平均値はおよそ  $x/d=3.0^{(4)}$  であるから、特異現象が生じている場合の逆流域が下流方向にかなり大きくなっていることが分かる。  $(L/d)_{cri}$  の範囲内にある  $L/d=10$  の場合には前節で述べたように順流または逆流の2種の流れパターンが存在している。

### 4. むすび

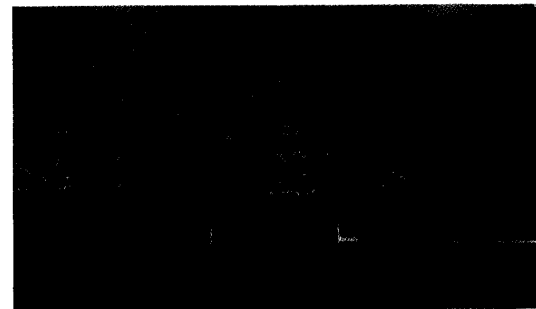
円柱周りの流れに関する実験的研究を行う場合に風洞側壁面上の境界層の影響を低減するために用いられる端板自身による影響が、どのように円柱周りの流れに現れるかについて調べた。直径  $D/d=5 \sim 10$  のフランジ型端板のいずれの場合も端板間距離を小さくしていくと、大幅な背圧係数の増加と抗力係数の減少を生じる特異現象が現れることを見出した。これは端板間の外部からの流れが端板後縁をまわって端板間内へ流入する三次元的流れの発生に起因しており、このとき後流の速度欠損と乱れ強さは極めて大きくなる。本実験のフランジ型端板の結果より、円柱背後の二次流れ



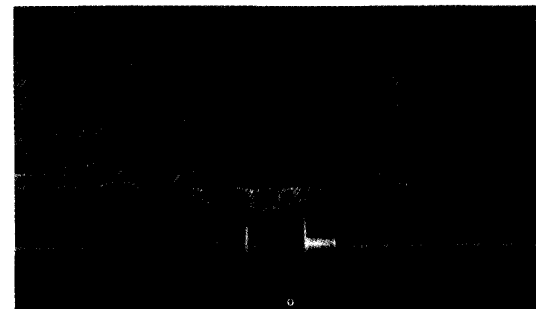
(a)  $L/d = 12$



(b)  $L/d = 10$



(c)  $L/d = 10$



(d)  $L/d = 4$

Fig. 10 Flow visualization by smoke-wire technique ( $Red=1500$ ).

の低減に関しては端板の円板部の直径が支持部背後の再循環流域より十分大きいことが必要であると思われる。したがって、今後さらに相対的に端板支持部の直径をできるだけ小さくすることに留意して実験を進めていく予定である。

終わりに, 本実験を遂行するにあたり井上忠義技官,  
並びに川島賢一氏の協力を得た. 厚くお礼申し上げる.

#### 参 考 文 献

- 1) J. S. Humphreys : J. Fluid Mech., 9, 603 (1960).
- 2) E. Achenbach and E. Heinecke : J. Fluid Mech., 109, 239 (1981).
- 3) 中口・新井・松坂 : 航空学会誌, 12, 29 (1964).
- 4) P. W. Bearman : J. Fluid Mech., 21, 241 (1965).
- 5) 奥出 : 日本航空宇宙学会誌, 26, 198 (1978).
- 6) P. K. Stansby : Aeronautical J., 78, 36 (1974).
- 7) D. Gerich and H. Eckelmann : J. Fluid Mech., 122, 109 (1982).
- 8) D. Gerich : Fouth Int. Sympo. on Flow Visuali-  
zation, 463 (1986).
- 9) G. S. West and C. J. Apelt : J. Fluid Mech., 114, 361 (1982).
- 10) J. A. Donoso, R. Hillier and C. K. Yeung : J. Wind Eng. and Indus. Aerodyn., 11, 381 (1983).
- 11) Y. Kubo and K. Kato : Structural Eng. and Earthquake Eng. (JSCE), 3, 167s (1986).
- 12) N. Toy and T. A. Fox : Experiments in Fluids, 4, 266 (1986).
- 13) H. Schlichting : Boundary Layer Theory, Seventh Edition, McGraw-Hill Book (1979) p.17.
- 14) 種子田・辰野 : 九州大学応用力学研究所所報, 31, 29 (1969).

(昭和63年10月15日受理)