

# 壁面の影響を受ける円柱に作用する流体力

斎藤 隆\*・赤松 利之\*\*・斎藤 健\*\*  
河元 信幸\*

## The Effect of Plane Wall on Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder

Takashi SAITOU, Toshiyuki AKAMATU, Ken SAITOU  
and Nobuyuki KAWAMOTO

### Abstract

It is the purpose of this paper to make clear the change of fluid forces and pressure distribution along the surface of circular cylinder with the change of distance between circular cylinder and plane wall, and vortex shedding from a circular cylinder.

We measured of fluid forces acting on a circular cylinder in the Reynolds number range of  $10^4$  to  $7 \times 10^4$  and pressure distribution along the surface of circular cylinder at the Reynolds number of  $7 \times 10^4$ .

The following properties became evident often examining the experimental results. The Strouhal number calculated from the variation of lift in the region of spacing ratio  $Y/D=0 \sim 0.3$  are nearly zero. The physical meaning of these fact is considered to be formation of separation region behind a circular cylinder. In region of the distance between a circular cylinder and plane wall  $Y/D=0 \sim 0.7$ , position of stagnation point separation are influenced considerably by the spacing ratio. And in the case of  $Y/D > 2$ , it can be consider that there is no effect of wall.

### 1. まえがき

海底あるいは河床上におかれるパイプライン、また管胴形熱交換器の胴壁面近傍の伝熱管など壁面と鈍い物体との間の流れの干渉問題は工学上重要課題である。よく知られているように、流れの中に単独に置かれた二次元の鈍い形状の物体は、広いRe数の範囲にわたって、その形状に特有なストローハル数の渦を放出し、抗力係数などの流体力学的諸特性値も固有の一定値を保有する。しかしながら、複数の物体が流れの中に置かれると、それらの後流が相互に干渉し合い、単独の

場合とは異なるフローパターンが観察される。Bearman<sup>7)</sup>は円柱と壁面の間隔が0.3倍で物体から渦放出が抑制されると報告している。また、亀本<sup>8)</sup>は三角柱を用いた実験を行うとともに、渦面モデルにより渦放出抑制限界が物体形状によらず、 $S/h=0.3$  ( $h$ :渦面間距離、 $S$ :渦面と壁面の間隔)であることを示した。檜和田<sup>9)</sup>は時間平均的流体力学諸特性に及ぼす乱流境界層厚さの影響を調べている。しかしながらいずれの研究においても境界層流れの諸特性の挙動が主目的であって、円柱径が境界層厚さの数倍である場合についての研究は著者らのもの以外見当たらない。

本研究では、一様流中に置かれた円柱に作用する流体力(抗力・揚力)、また円柱周りの圧力分布を測定し、円柱と壁面との距離の変化による流体力の変化を明らかにするとともに、円柱からの渦放出を調べ、円柱周

\*社会建設工学科

\*\*大学院社会建設工学専攻

りの流況との関連について考察したものである。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

実験風洞は、測定部断面が高さ10cm、長さ100cm、幅100cmの貫流式風洞である。流体力測定に用いた円柱は直径 $D = 5$  cm、測定部の長さ6 cmで、境界層流れの影響を除くため、高さ2 cmのダミー円柱が上下面に設置されている。流体力の測定は片持ち梁方式で、梁の基部に張り付けたP・N半導体ゲージで梁の歪みから、抗力成分と揚力成分を同時に測定する。梁は流体力測定円柱内にあり、下部ダミー円柱でベークライト板に固定されている。また圧力測定に用いた円柱は流体力測定円柱と同様の径を用い、内部には小型の圧力計が2基組み込まれており、圧力測定孔は直径1 mmで測定円柱の中心軸に対して対称の位置にある。2つの対称位置の測定孔(2基の圧力計)により、180°の回転で全周360°の圧力測定が可能になっている。

2.2 実験方法

本研究では、Re数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲で、円柱と壁面の間隔を変化させて円柱に作用する流体力を測定した。また圧力測定に関しては、 $Re = 70000$ で測定を行った。円柱と壁面の位置関係及び流体力の作用方向の関係は、Fig. 1のように定義してある。流体力は、小型アンプを通してデータレコーダーとペンレコーダーに記録した。このデータをサンプリング周波数500Hz、サンプリング時間30秒でAD変換した後にパソコンで統計処理した。圧力に関しても流体力と同様の方法で処理した。

3. 実験結果とその検討

3.1 流体力係数

通常の定義に従った抗力係数 $C_D$ ・揚力係数 $C_L$ と円柱径 $D$ に対する壁面間隔 $Y$ の比 $Y/D$ をRe数をパラメータにして描点したものがFig. 2, 3である。Fig. 2によると $Y/D$ が0~1.0では揚力はすべて円柱を壁面から遠ざげる方向に作用している。それ以上では、 $C_L$ の値はほぼ0となっている。図中の縦線は、Fig. 5のTYPE Bに示すような時間的に大きな揚力が発生するスパイク波形をあらわしており、Re数が大きく壁面に近い付近で顕著にみられた。Fig. 3によると $Y/D$ が0~0.8付近では、 $Y/D$ が大きくなると $C_D$ は大きくなり、 $Y/D$ が0.8~2.0では、 $Y/D$ が大きくなると $C_D$ は緩やかに減少し、それ以上ではほぼ一定値をとっている。また、 $Y/D$ が0~0.4では、Re数が大きくなると $C_D$ は大きくなり、それ以上では逆にRe数が大きくなると $C_D$ は小さくなっている。Fig. 4は、抗力係数 $C_D$ と単円柱の場合の抗力係数で正規化(単円柱を1とする)したものを

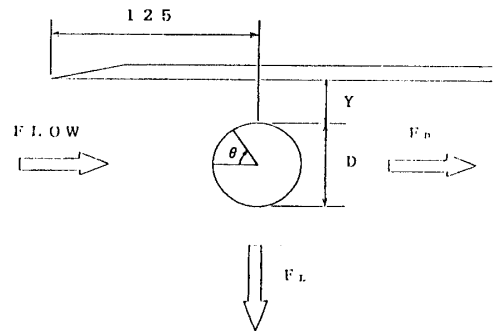


Fig. 1 Definition of fluid forces

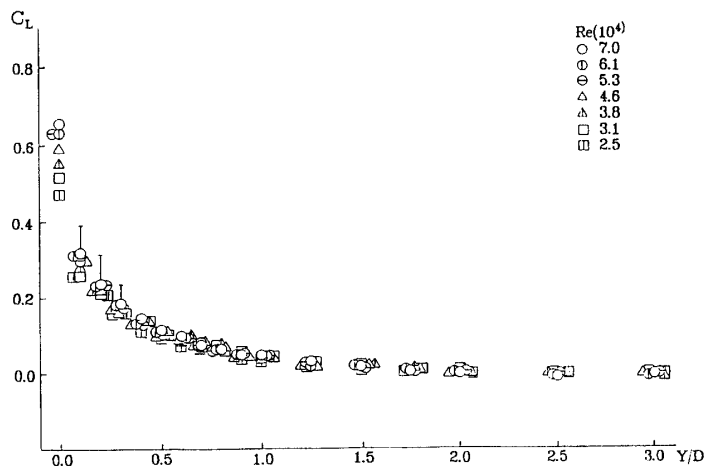


Fig. 2 Relation between the coefficient of average lift forces and the spacing ratio Y/D

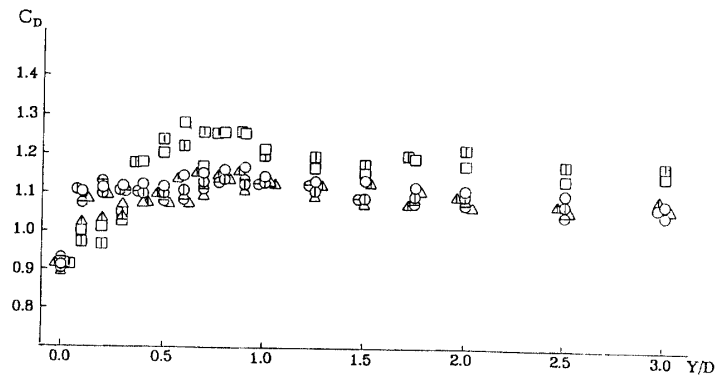


Fig. 3 Relation between the coefficient of average drag forces and the spacing ratio Y/D

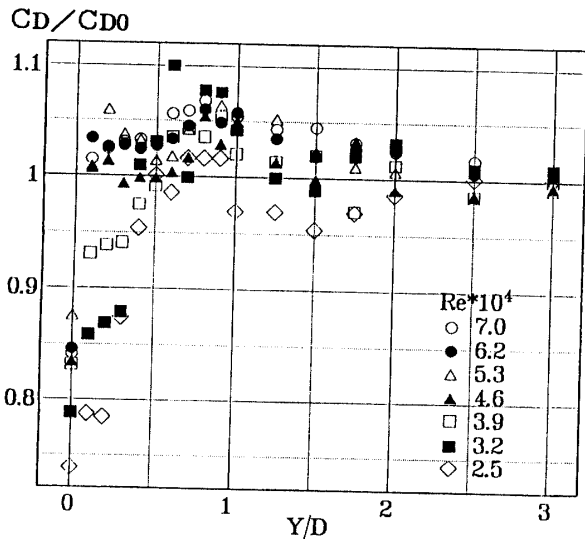


Fig. 4 Relation between  $C_D/C_{D0}$  and the spacing ratio Y/D

Y/Dに対して描点したものである。この図からY/D=0では単円柱よりもかなり小さい値をとっている。これは、円柱と壁面の間隔が狭くFig.14からも推測できるように前方岐点が移動し壁側円柱剝離点が下流側に移動し、剝離域も狭くなり、背面圧力も上昇したためと考えられる。また、Y/D=3で単円柱とほぼ同じ値をとっていることから、壁の影響を受けていないことがわかる。

### 3.2 揚力の変動波形と頻度分布

流体力（揚力）が時間的に不安定な変動をすることから、揚力の変動波形と変動流体力の頻度分布を調べた。本研究では、Fig. 5に示すような2種類の変動波形がみられた。つまり変動値の頻度分布が正規分布となる場合と2つの山をもつ分布となる場合の2種類で

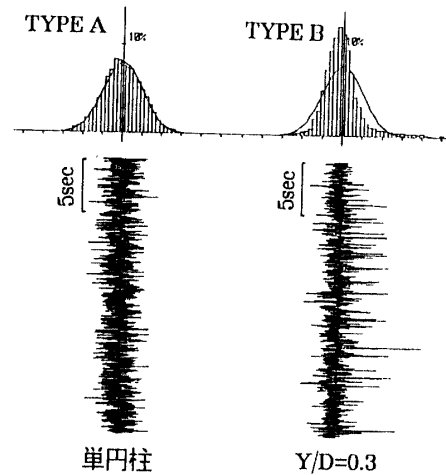


Fig. 5 Typical records and hystogram of lift forces

ある。後者の場合、頻度分布の形状は平均値まわりの対称性が崩れ、平均値からずれたところに頻度のピークが見られ、平均値よりも大きい値の裾が広がっていることがわかる。この領域では、揚力の変動波形は、平均の揚力よりも絶対値が非常に小さいスパイク状の揚力が間欠的に出現しており、その揚力の挙動とよく対応している。次に、変動値の分布特性、広がりや分布の片寄りを知るために、その変動の確率関数を積分し圧縮した指標を用いることは有用なことであり、ここでは、歪係数 $C_s$ （平均値まわりの非対称性をあらわす指標）・尖度 $C_t$ （中央部の高低の度合いをあらわす指標）・抗力と揚力の相関係数を指標として用い、円柱と壁面の間隔の変化にともなう移り変わりが、これらの指標によりどのように特徴づけられるかを調べた。解析処理をするにあたって、まず生データ（データ個数 15000、周波数 500Hz）を高周波成分を除去するために移動平均をとった。移動平均サンプル数は、カル

マン渦の放出周期の2波分がはいるように15個と決めた。この個数によって、次式により歪係数 $C_s$ 、尖度 $C_T$ 、相関係数を求めた。

$$\text{歪係数 } C_s = \frac{\sum (MF_L - \overline{F_L})^3}{N \cdot \delta_L^3}$$

$$\text{尖度 } C_T = \frac{\sum (MF_L - \overline{F_L})^4}{N \cdot \delta_L^4}$$

$$\text{相関係数} = \frac{\sum (MF_D - \overline{F_D}) \cdot (MF_L - \overline{F_L})}{N \cdot \delta_D \cdot \delta_L}$$

$MF_D, MF_L$ : 移動平均をとった抗力・揚力データ  
 $\delta_D, \delta_L$ : 抗力・揚力の標準偏差  
 $N$ : データ個数  
 $\overline{F_D}, \overline{F_L}$ : 抗力・揚力の平均値

Fig. 6 は、 $Re=70000$ における歪係数、尖度、相関係数と $Y/D$ の関係を示したものであり、この図によると $Y/D=0.1\sim0.5$ で $Y/D$ が大きくなると歪係数、尖度は小さくなっている。 $Y/D=0.5$ 以上で歪係数は0となり、また尖度は小さくなり、やがて $Y/D=1$ で0となる。よって、 $Y/D=0\sim0.5$ では、Fig. 5のTYPE Bのような傾度分布形状となり、 $Y/D=0.5\sim1.0$ ではTYPE Aの中央部の高い分布で、 $Y/D=1$ 以上ではTYPE Aの分布となる。 $Y/D=0.1$ で歪係数、尖度が最大値を示しているが、これは変動波形の傾度分布の非対称性がかなり強く、瞬間的に大きな力が作用していることになる。 $Y/D=0$ では相関係数は負に大きい。つまり揚力が大きくなると抗力が小さくなるということである。

### 3.3 変動強さ

円柱と壁面の変化による流体力変動の挙動を見ることを目的に、揚力について変動波形の変動幅（標準偏差）を主流速度と円柱の投影面積とで流体力係数の形に無次元化した変動強さ $C_L'$ を次式のように求めた。

$$\text{変動強さ} = \frac{g \cdot \delta_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_L}$$

$U$ : 主流速度  
 $\sigma_L$ : 揚力標準偏差  
 $A_L$ : 投影面積

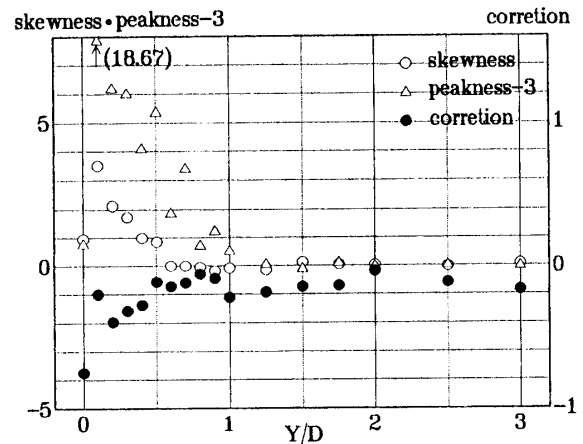


Fig. 6 Relation between the statistics volume of variation fluid forces and the spacing ratio  $Y/D$

Fig. 7 は変動強さ $C_L'$ と $Y/D$ の関係を示している。 $C_L'$ は $Re$ 数が小さいほど大きくなっている。 $Y/D=0.3\sim0.7$ では、 $Y/D$ が大きくなると $C_L'$ は大きくなり、 $Y/D=0.7\sim1.5$ では、 $Y/D$ が大きくなると $C_L'$ は緩やかに減少し、それ以上では一定値をとっている。また、 $Y/D=0.7$ 付近で $C_L'$ は最大値となっていることより、円柱からの渦放出による変動が最も強いと考えられる。

### 3.4 ストローハル数

渦発生に伴う流体力は、抗力成分よりも揚力成分が支配的であると考えられるので、 $Re=70000$ で揚力変動波形のスペクトル解析を行い、得られた卓越周波数を用いて、ストローハル数を次式によって求めた。

$$S_r = \frac{f \cdot D}{U}$$

$f$ : 卓越周波数 (Hz)

Fig. 8 はストローハル数と $Y/D$ の関係を示したものである。図中の棒グラフは、第一卓越周波数と第二、第三卓越周波数のパワースペクトル比を示している。 $Y/D$ が0.5でストローハル数は最大値をとっている。また $Y/D$ が0.4以上では、ストローハル数が0.2付近の値をとっていることから、この範囲では単円柱からの渦（カルマン渦）の放出と基本的に変わらないと考えられるが、 $Y/D$ が0.3以下では急激にストローハル数が小さくなっていることから、壁付近では円柱の片側だけから渦が放出しているのではないかと考えられる。

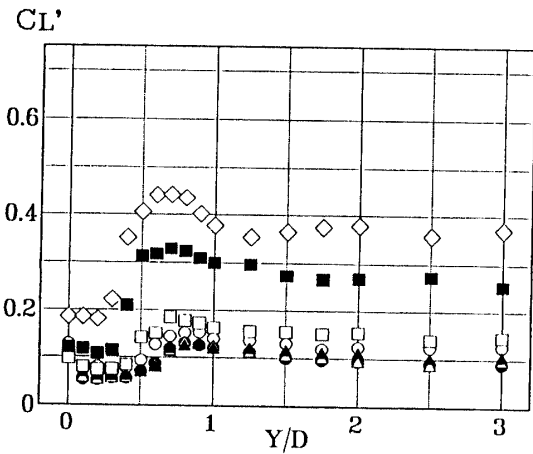


Fig. 7 Relation between intensity of variation in lift forces and the spacing ratio  $Y/D$

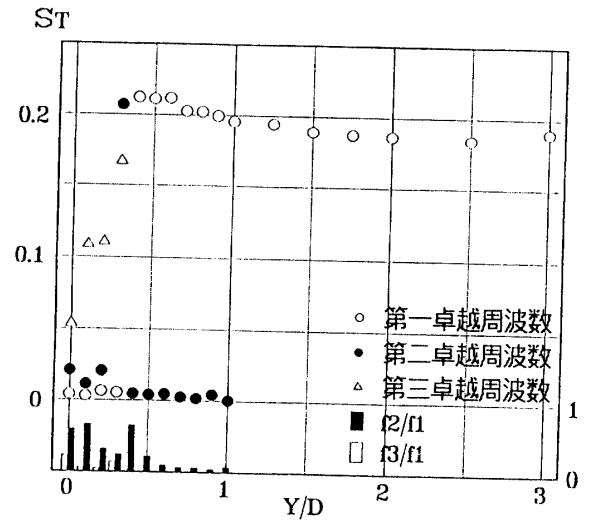


Fig. 8 Relation between Strouhal number and the spacing ratio  $Y/D$  ( $Re = 70000$ )

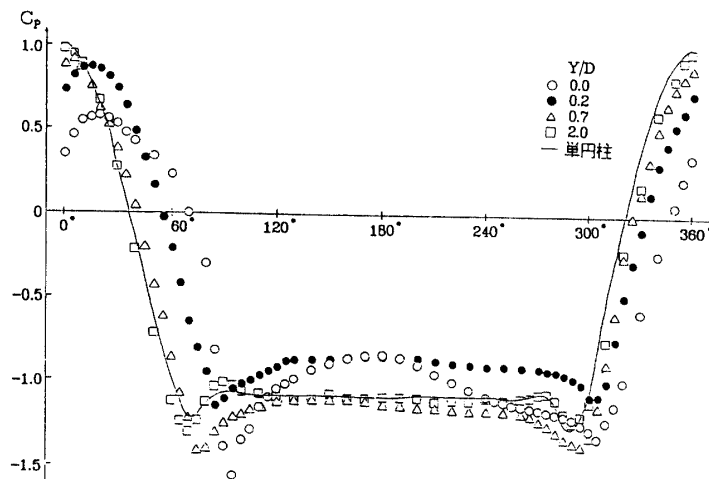


Fig. 9 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder

### 3.5 円柱表面圧力分布

流体力測定結果の挙動と円柱まわりの圧力分布との関連を調べるために、円柱まわりの圧力分布を測定した。Fig. 9は、横軸を測定位置 $\theta$ 、縦軸を圧力係数 $C_p$ として表したものであり、図中の実線は単円柱の圧力分布を示したものである。

ここで、Fig. 9の結果を全体的にみて $\theta = 0^\circ$ に関してみると、 $Y/D$ が小さくなると $C_p$ が小さくなっている。また、 $Y/D$ が小さくなると、最小圧力係数と背圧係数の差は壁側の方が大きくなっている。 $Y/D = 0$ では $\theta = 90^\circ$ （壁側）まで圧力低下が激しくそれから $\theta = 180^\circ$ （背圧）まで急激に圧力は回復している。また、単円柱とかなり違った圧力分布を示しており、壁の影響を非常に強く受けていることが分かる。図から分かるように、

最大圧力係数が $\theta = 20^\circ$ であることよりこの位置が前方岐点となっている。

$Y/D = 0.2$ では、壁側の最小圧力係数は単円柱とほぼ同じであるが、それを示す角度は下流側へずれており、その角度よりも下流側では、単円柱よりも圧力係数は小さい値を示している。

$Y/D = 0.7$ では、最小圧力係数が単円柱よりも大きく、背圧係数も大きい。 $Y/D = 2.0$ では、単円柱と似た分布をしていることより、壁の影響を余り受けていないことが分かる。

Fig. 10は、Fig. 9を極座標系で表示したものである。Fig. 10より、 $Y/D$ が小さくなると全体的な分布形状は、壁側に歪んでいることが分かる。また、 $\theta = 0^\circ$ に対し圧力分布の形状の非対称性が強くなり、壁側と反対側と

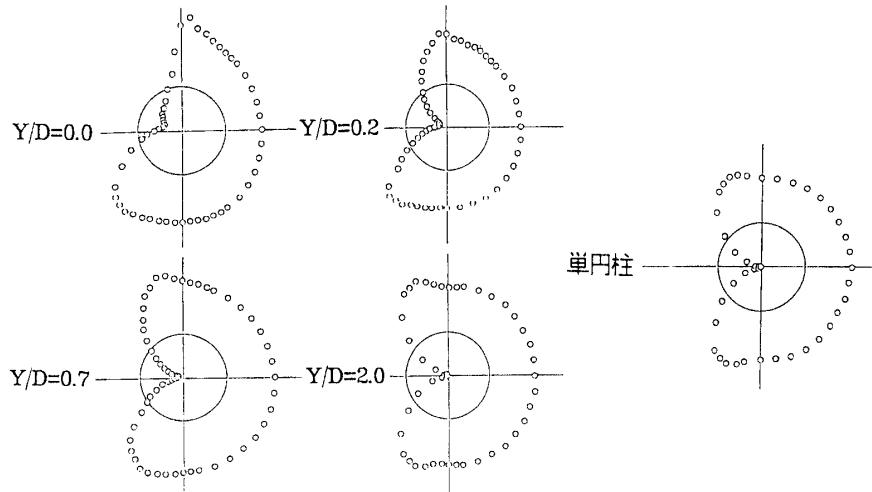


Fig.10 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder

の圧力差が大きくなっている。前方岐点は、 $\theta = 0^\circ$ から壁側へ移動していることがわかる。

Fig.11は前方岐点とその点の圧力係数を描点したものである。●描点は、圧力分布から求めた岐点位置、□描点は、岐点での圧力係数、○描点は流体力測定によって得られた $C_D$ と $C_L$ を次式により求め合成流体力作用方向 $\theta$ として示したものである。

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{C_L}{C_D} \right]$$

$Y/D = 0$ を除くと岐点位置の角度と合力の作用方向とがよく一致していることから、合力は円柱軸を通るように作用しているが、 $Y/D = 0$ となると岐点角度と合力の作用方向に差がある。この時、合力は円柱軸を通らなくて、回転力が円柱に作用していると考えられる。この結果とFig. 2からも分かるように前方岐点の移動により、流体力作用方向も変わり揚力も増大することが分かる。また $Y/D$ が大きくなると岐点位置の角度は $0^\circ$ に近付き、またその時 $C_D$ は大きくなり、 $C_D = 1$ となっている。Fig.12は、横軸 $Y/D$ 、縦軸に背圧係数(主流方向 $0^\circ$ に対して円柱の背面角度 $180^\circ$ )をとったものである。 $Y/D$ が0に近づくとき $-C_{PB} = 0.8$ と小さい値をとっており、そこから急激に上昇し、 $Y/D = 0.7$ 付近では $-C_{PB} = 1.15$ 程度をとりMaxとなっている。 $Y/D = 2.0$ では、 $-C_{PB} = 1.1$ 程度をとり、単円柱とほぼ同じ値となっている。この背圧係数の挙動特性は、Fig. 3からもわかるように抗力係数の挙動とよく対応していることがわかる。

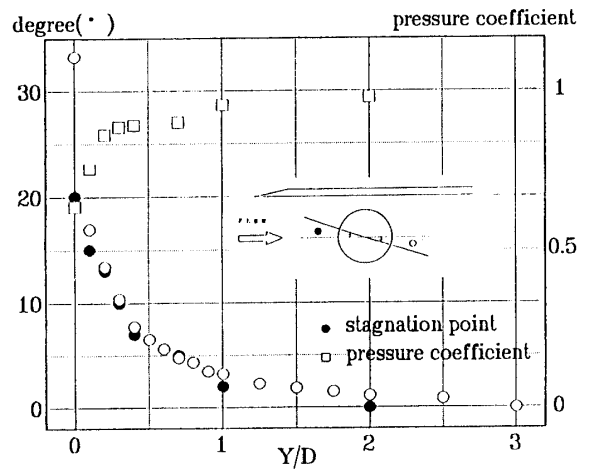


Fig.11 Relation among stagnation point and coefficient of pressure and direction of function

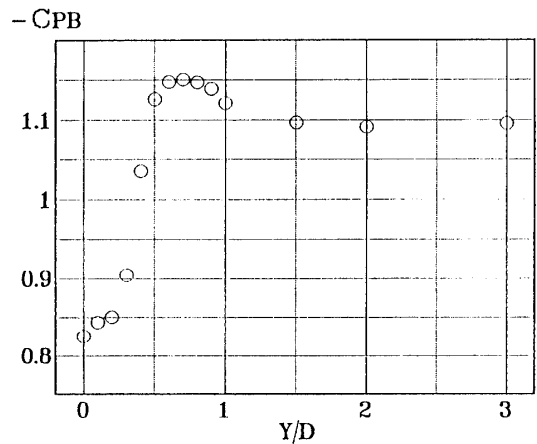


Fig.12 Relation between back pressure and the spacing ratio  $Y/D$

### 3.6 円柱表面圧力変動分布

測定位置 $\theta$ に於ける圧力変動の挙動を見ることを目的に、圧力変動波形の変動圧力係数 $C_p'$ を次式により求めた。

$$C_p' = \frac{\sigma_p}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

$\rho$  : 空気密度

$U$  : 主流速度

$\sigma_p$  : 圧力標準偏差

Fig.13は、変動圧力係数と測定位置 $\theta$ の関係を示したものである。図より、 $Y/D=0.7$ では、 $C_p'$ は単円柱よりも大きく、 $Y/D=0, 0.2$ では小さく、 $Y/D=2.0$ では余り変わらない。この傾向は、流体力測定によって求めた変動係数とほぼ同じである。また、 $Y/D=0.7, 2.0$ の時 $C_p'$ は、前面域に比べて剥離域で増大しており、特に $Y/D=0.7$ に於いては、壁面側に著しく現れている。 $Y/D=0, 0.2$ の時は他の形状と違ってピークが2カ所あるだけで他の $\theta$ ではほぼ0.4付近(一定)の値をとっている。 $\theta=0^\circ\sim 60^\circ$ で、 $Y/D=0.7, 2.0$ では $C_p'$ が急増しているのに対して $Y/D=0, 0.2$ では一定値をとっている。これは円柱と壁面のすきま流れの加速により $C_p'$ の増加が抑制されるためであると考えられる。この図から分かるように $Y/D=0, 0.2$ と $Y/D=0.7, 2.0$ とでは、分布形状は、かなり異なっていることがわ

かる。この理由としては、円柱からの渦放出など後流構造の違いによるものではないかと考えられる。

Fig.14は流れの模式図を示してある。図中の剥離点は、円柱の表面圧力分布の測定結果から求めた境界層外縁流速を用いて境界層計算より算出したものである。壁側の剥離点は $Y/D$ が小さくなると下流側に移動し、剥離領域は狭くなっていることがわかる。また、この剥離点の移動は、前方岐点の移動に依存しており、その移動により流れが偏向し、壁面側から円柱に揚力が生じると考えられる。 $Y/D=0.7$ と $Y/D=2.0$ を比べると、 $Y/D=0.7$ のほうが剥離領域が狭くなっているため渦放出周期が速くなり、ストローハル数は大きく

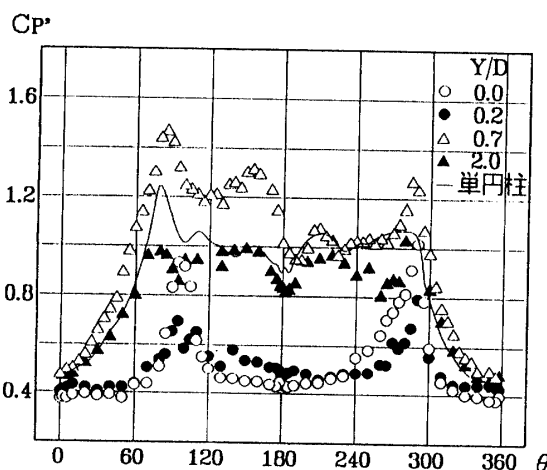


Fig.13 Pressure distribution of variation along the surface of a circular cylinder

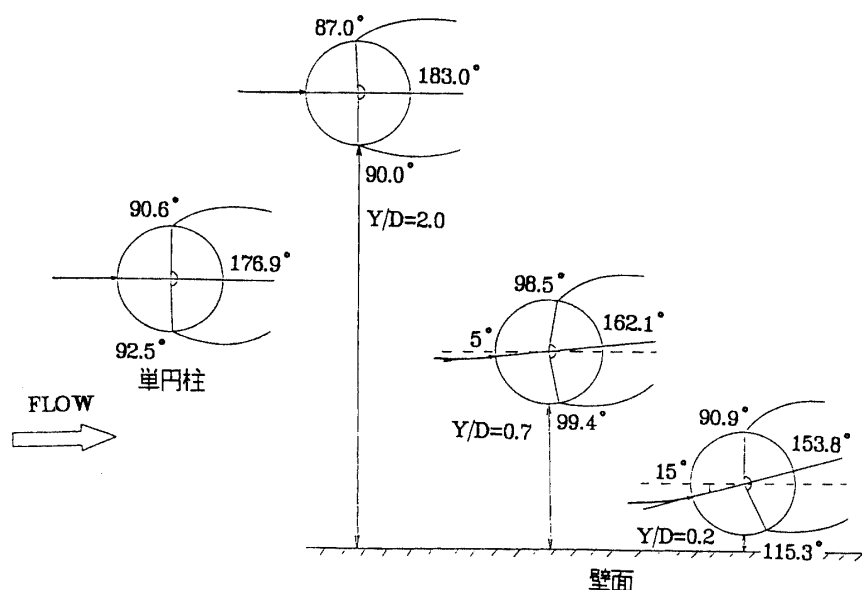


Fig.14 Flow patterns

なることが分かる。しかしながら $Y/D=0.2$ では、 $Y/D=0.7$ よりも剥離領域が狭いにもかかわらず、Fig. 8からもわかるように、流体力測定によって求められたストローハル数は小さい。この理由として考えられるのは、先の3. 4でも述べたように、 $Y/D=0.2$ は円柱と壁面との距離が非常に狭いため、壁面側からの渦放出が抑制されるのではないかと考えられる。

#### 4. まとめ

円柱と壁面の変化による流体力・円柱まわりの圧力分布の挙動及び円柱からの渦放出について検討した結果を要約すると次の通りである。

- 1) 円柱に働く揚力はすべて円柱を壁面から遠ざける方向に作用し、抗力については $Y/D=0$ 付近で小さい値となる。壁面間隔が円柱の3倍程度になると壁面の影響を受けないことが明らかになった。
- 2)  $Y/D$ が $0\sim0.3$ で円柱からの渦放出が抑制されることが明らかになった。
- 3) 前方岐点はすべて壁面側に移動し、その変位角は流体力作用方向とほぼ一致する。また、壁側円柱剥離点は、 $Y/D$ が小さくなると下流側に移動することが明らかになった。
- 4) 揚力の発生は、前方岐点の移動に強く依存することが明らかになった。
- 5) 流体力測定によって得られた諸特性は圧力測定によって得られた諸特性により説明できることが明らか

かになった。

#### 参考文献

- 1) 斎藤 隆, 赤松 利之, 斎藤 健: 壁面近くの円柱に作用する流体力, 中四国土木学会講演集, 1994
- 2) 斎藤 隆, 赤松 利之, 斎藤 健: 壁面の影響を受ける円柱に作用する流体力, 日本土木学会年次講演集, 1994
- 3) 檜和田 宗彦, 馬淵 幾夫, 熊田 雅弥, 岩越 弘恭: 平面壁近傍にある円柱周りの流れ特性に及ぼす乱流境界層厚さの影響, 日本機械学会論文集, 1986
- 4) 檜和田 宗彦, 馬淵 幾夫, 熊田 雅弥, 岩越 弘恭: 平面壁近傍にある円柱周りの伝熱特性に及ぼす乱流境界層厚さの影響, 日本機械学会論文集, 1988
- 5) 亀本 喬司, 小田 曜作, 相沢 政宏: 平面壁近傍にある鈍い形状物体まわりの流れ特性, 日本機械学会論文集, 1983
- 6) 大坂 英雄, 藤井 英樹, 影山 芳郎: 壁面噴流中に置かれた円柱の周りの流れ, 日本機械学会論文集, 1985
- 7) P. W. BEARMAN: Flow around a circular cylinder near a plane boundary, J. Fluid Mech, 1978

(平成6年4月15日受理)