

## 高レイノルズ数領域における直列2円柱まわりの流れ

辰野, 正和  
九州大学応用力学研究所

前川, 悟  
川崎重工 (株)

石井, 幸治  
九州大学応用力学研究所

烏谷, 隆  
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/6768589>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 122, pp. 59-65, 2002-02. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :

# 高レイノルズ数領域における直列2円柱まわりの流れ

辰野正和\*<sup>1</sup> 前川 悟\*<sup>2</sup> 石井幸治\*<sup>1</sup> 鳥谷 隆\*<sup>1</sup> 天本 肇\*<sup>1</sup>  
(2001年12月27日受理)

## On the Flow around Two Circular Cylinders in a Tandem Arrangement at High Reynolds Numbers

Masakazu TATSUNO, Satoru MAEKAWA, Koji ISHI-I,  
Takashi KARASUDANI and Hajime AMAMOTO

E-mail of corresponding author: tatsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

The aerodynamic interference between two circular cylinders in a tandem arrangement has been examined over the Reynolds number range  $10^5$  to  $5 \times 10^5$ . The static pressure distributions around the circumference of each cylinder were measured and the drag and lift forces were obtained for each cylinder. Over a small range of Reynolds number at the critical regime, a laminar separation bubble is formed on one side only of the upstream cylinder and both cylinders experience the lift forces. The Reynolds number range where a bubble is formed on one side only of the upstream cylinder becomes large with decrease of the spacing between two cylinders. The flow patterns in the gap between two cylinders were visualized by means of smoke injection method.

**Key words :** *Two cylinders in tandem, Critical Reynolds number, Drag, Lift, Laminar separation bubbles*

## 1. 緒言

レイノルズ数が  $10^5$  以上の単独円柱まわりの流れは、亜臨界、臨界、超臨界、極超臨界と4つの領域に区分される<sup>1)</sup>。臨界域においては、一般に、円柱の両側面の境界層には層流バブルが形成され、その後方へは乱流境界層の形成、乱流剥離にいたる構造を持っている。ところが、Bearman<sup>2)</sup>は、円柱の両側面に層流バブルが形成されるレイノルズ数よりも若干小さいレイノルズ数領域において、円柱の片側だけに層流バブルが形成され、円柱は横力(揚力)を受ける場合があることを報告した。その後、この片側だけの層流バブルの形成は、Kamiya et al<sup>3)</sup>, Uzuki<sup>4)</sup>, Farell&Blessmann<sup>5)</sup>, Schewe<sup>6)</sup>等によって確認された。また、辰野等<sup>7)</sup>は、流れの可視化も行っている。

2円柱に関する研究は、種々の姿勢について多くの研究がなされているが、その多くは亜臨界域の流れに

関するものであり、臨界、超臨界域の流れについての研究はほとんど無い。唯一、Okajima<sup>8)</sup>が、 $0.4 \times 10^5 < Re < 6.2 \times 10^5$ の領域において直列2円柱の抗力および渦発生振動数の計測を行っている。しかし、揚力の計測は行っていない。

本研究の目的は、亜臨界から超臨界にいたるレイノルズ数範囲において、直列2円柱の境界層構造の変化の相互作用と抗力、揚力変化を詳細に調べようとするものである。

## 2. 実験装置と方法

実験は、幅4m、高さ2m、長さ6mの計測部を備えた回流型風洞で行われた。Figure 1に装置の概略図を示す。等しい大きさの塩化ビニール製の2円柱の直径は42.0cmであり、表面はなめらかに仕上げられている。図に示すように、2円柱を直列に配置し、両端には端板を取り付けている。円柱の風洞測定断面に対する閉

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 川崎重工(株)

塞率は 0.105 だったので、抗力、揚力の測定値は Allen & Vincentini の方法によって修正された。円柱の高さ方向中央部に  $7.5^\circ$  毎に 48 個の圧力孔(直径 0.5mm)を備えており、表面圧力分布が計測された。さらに、2円柱の表面の流れ模様を可視化するためには表面塗膜法が、2円柱間の流れを可視化するためには煙注入法が用いられた。

実験が行われたレイノルズ数範囲は、 $2.1 \times 10^5$  から  $5.0 \times 10^5$  までであり、2円柱の間隔は  $0.05 \leq s/d \leq 2.0$  の範囲で変えられた。ここで、 $s$  は2円柱の間隔、 $d$  は円柱直径である。

Fig.2 に、直列2円柱の配置図と物理量の定義を示す。

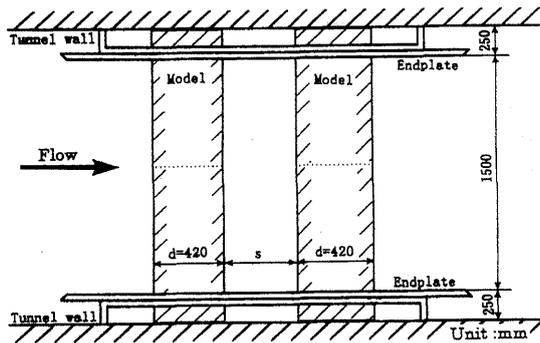


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

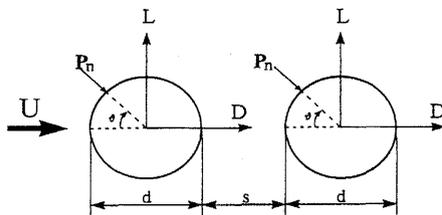


Fig.2 Notations in the general configuration of two cylinders

### 3. 実験結果

Fig.3 より Fig.7 までは、2円柱のそれぞれの表面圧力分布から求めた抵抗係数  $C_d$  および揚力係数  $C_l$  を各  $s/d$  について示している。

いずれの場合も、上流側円柱が亜臨界領域にある間は、上流側円柱の両側では層流剥離が起こっており、下流側円柱はその後流の中にある。それゆえ、上流側円柱の受ける抵抗が下流側円柱の抵抗より

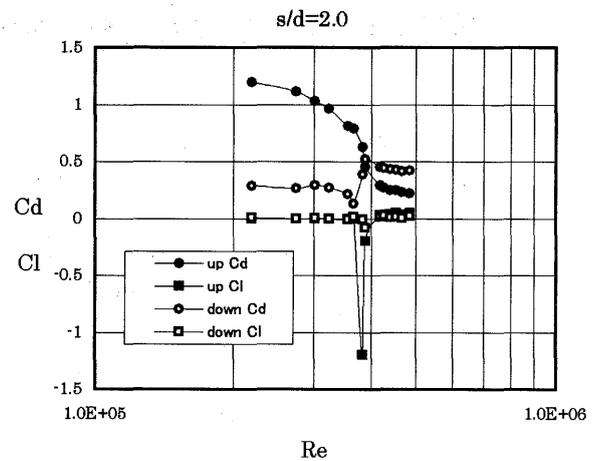


Fig.3 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds at  $s/d=2.0$ .

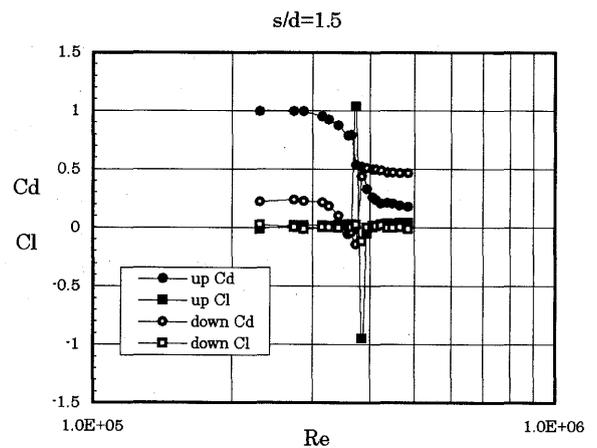


Fig.4 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds at  $s/d=1.5$ .

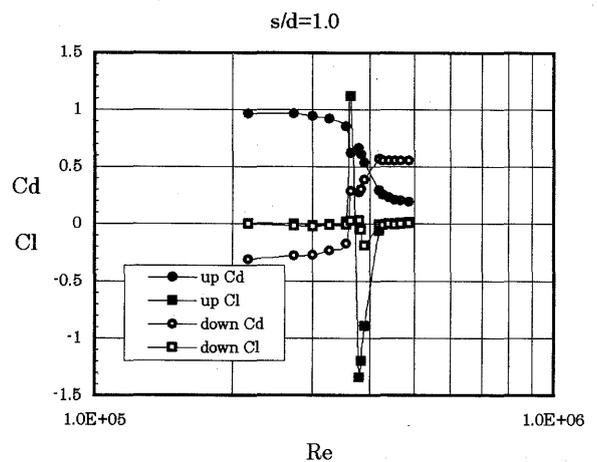


Fig.5 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds at  $s/d=1.0$ .

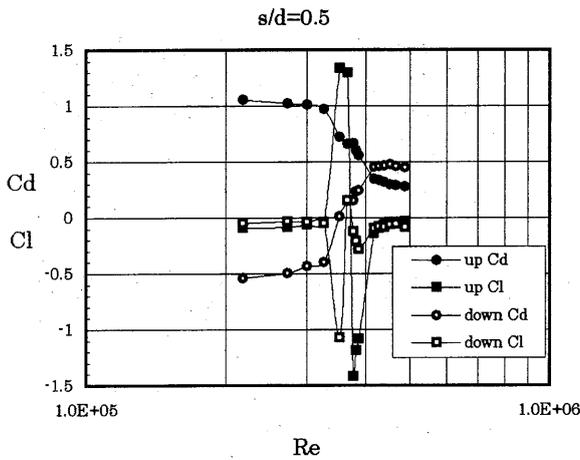


Fig. 6 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds at  $s/d=0.5$ .

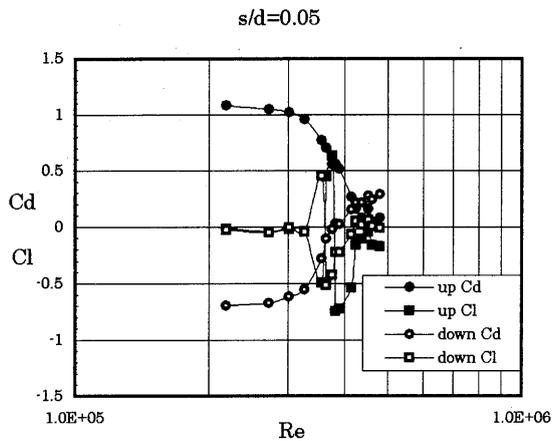


Fig. 7 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds at  $s/d=0.05$ .

大きい。また、流れは対称であるので揚力は発生しない。

レイノルズ数増大とともに、上流側円柱の抵抗は徐々に小さくなり、ある臨界のレイノルズ数に達すると上流側円柱の片側だけに1個の層流バブルが形成されるようになる。その時、上流側円柱の抵抗は小さくなると同時に、上流側円柱は揚力を受けるようになる。Fig.3~Fig.6で明らかのように、 $s/d=2.0 \sim 0.5$ では、その揚力係数の値は $|Cl| \approx 1.0 \sim 1.4$ 程度と大きい。また、Fig.3の $s/d=2.0$ では、負の方向に揚力を受けているが、Fig.4~Fig.7の $s/d=1.5 \sim 0.05$ では、正の方向にも負の方向にも揚力を受けている。このどちらの方向に揚力を受けるかは層流バブルがどちら側に来るかによっている。層流バブルが円柱側面のどちら側に来

るかは全くの偶然である。

上流側円柱の側面の片側だけに層流バブルが形成されたとき、2円柱を取り巻く流れは大きく変わり、下流側円柱まわりの圧力分布も非対称となって揚力を受けるようになる。その揚力の方向は、Fig.3( $s/d=2.0$ )~Fig.5( $s/d=1.0$ )で見られるように、一般的に上流側円柱の受ける揚力方向と同方向である。このとき、下流側円柱の受ける抵抗は徐々に大きくなる。上流側円柱側面に1個の層流バブルが形成されるレイノルズ数は、 $s/d$ の値が小さくなるほど、広がっている。つまり、下流側円柱の存在が、上流側円柱の層流バブル形成に影響を与えていることになる。

さらにレイノルズ数が大きくなり、ある臨界値に達すると、上流側円柱の両側面に層流バブルが形成され、下流へと両側面に乱流境界層が形成されるようになる。このとき、上流側円柱の剥離点は後退し、抵抗は激減する。一方、下流側円柱の抵抗は、上流側円柱の抵抗より大きくなる。

こうした直列2円柱の抵抗係数、揚力係数の変化を表面圧力分布と流れ場の変化と対応させて示す。ここでは、主に $s/d=1.0$ の場合を例にとって示す。

Fig.8は、 $s/d=1.0$ 、 $Re=3.26 \times 10^5$ の場合の2円柱それぞれの表面圧力分布を示している。両円柱の圧力分布は、 $\theta=0^\circ$ に対して対称である。また、下流側円柱の圧力分布は全周にわたって負である。つまり、下流側円柱は上流側円柱の後流の中に埋没していることがわかる。

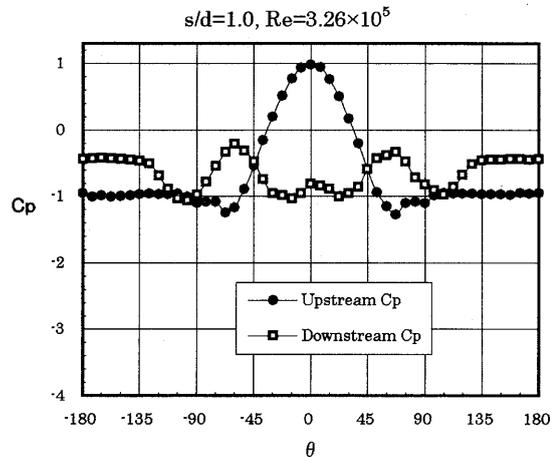


Fig. 8 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=3.26 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

Fig.9は、こうした場合の2円柱間の流れ模様を煙注入法で観察したものである。この場合、主流は左から右に向かって流れている。

Fig.10は、 $s/d=1.0$ 、 $Re=3.63 \times 10^5$ の場合の2円柱

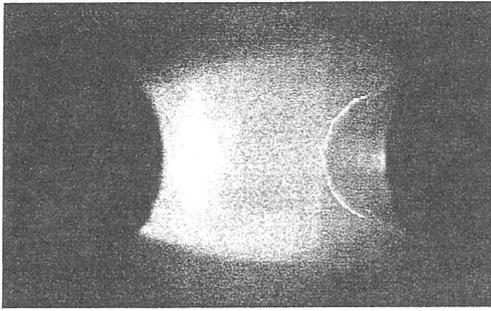


Fig.9 Flow pattern in the gap between two cylinders at  $Re=3.26 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

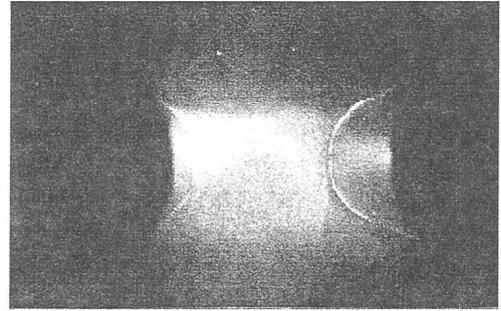


Fig.12 Flow pattern in the gap between two cylinders at  $Re=3.82 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

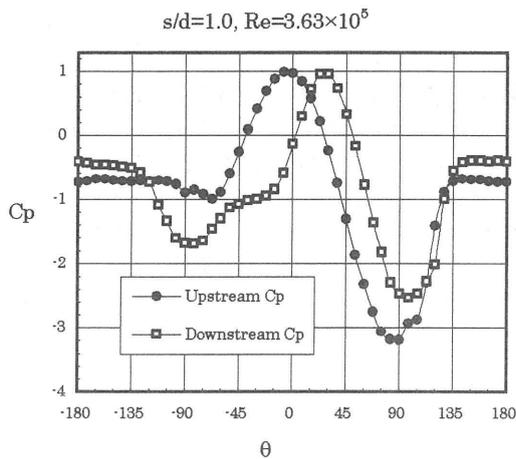


Fig.10 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=3.63 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

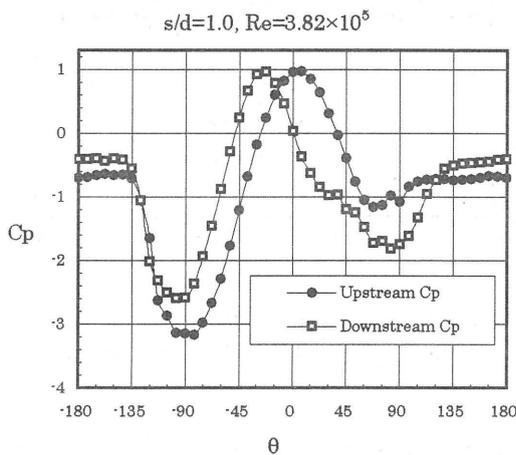


Fig.11 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=3.48 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

それぞれの表面圧力分布を示している。この場合、上流側円柱の  $\theta > 0^\circ$  の側面に1個の層流バブルが形成されており、この側面での圧力の低下は著しく、上流側円柱はこの方向に大きな揚力(横力)を受ける。層流バブルの後方へは乱流境界層が形成される。圧力分布より、この乱流境界層の剥離点の位置は、約  $135^\circ$  付近まで後退しているのがわかる。このとき、下流側円柱の表面圧力分布も非対称となり、 $\theta > 0^\circ$  の側面の圧力が低下し、この方向に揚力を受ける。

Fig.11 は、 $s/d=1.0$ ,  $Re=3.82 \times 10^5$  の場合の圧力分布を示しているが、この場合、上流側円柱の  $\theta < 0^\circ$  の側面上に層流バブルが形成され、上流側円柱はこの方向に大きな揚力を受ける。同時に、下流側円柱の表面圧力分布も  $\theta < 0^\circ$  で負の値が大きくなり、同じ方向に揚力を受けているのがわかる。

このように上流側円柱の片側側面に1個の層流バブルが形成されているときの流れ模様の例を Fig.12 に示す。主流の方向は、左から右へ向かっている。この場合、上流前方より下流方向を見て、上流側円柱の左側面に層流バブルが形成されている。

Fig.13 は、 $s/d=1.0$ ,  $Re=4.26 \times 10^5$  の場合の圧力分布であるが、 $\theta=0^\circ$  に対して対称となっているのがわかる。この場合、上流側円柱の両側面に層流バブルが形成され、その後方の乱流剥離点は、両側面とも  $130 \sim 135^\circ$  後方へと後退している。 $-90 < \theta < 90^\circ$  の範囲の圧力の負の絶対値は大きく、この負の圧力の主流方向成分は推力となる。また、背圧の負の絶対値は小さくなる。こうした結果上流側円柱の抵抗は激減する。一方、この時、下流側円柱の前面には、上流側円柱の両側面で剥離した乱れた強い流れが当たっており、 $-45 < \theta < 45^\circ$  の範囲の圧力は正となっている。その後方へは乱流境界層が形成されていると思われる。 $-90 < \theta < 90^\circ$  の範囲の圧力の負の絶対値は、上流側円柱に比べて小さく、その主流方向成分である推力は小さい。また、背圧の絶対値は、上流側円柱より大きい。その結果として、上流側円柱の両側面に層流バブルが形成されている領域では、上流側円柱より

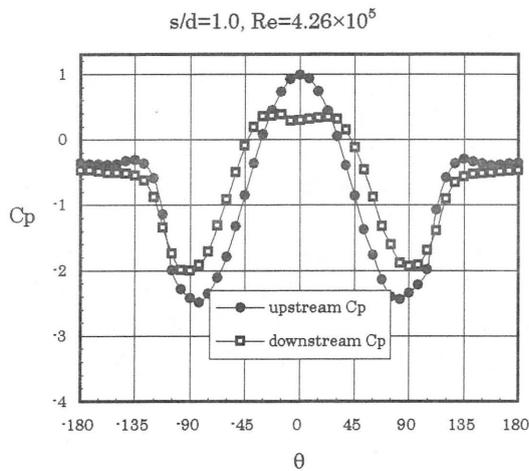


Fig.13 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=4.26 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

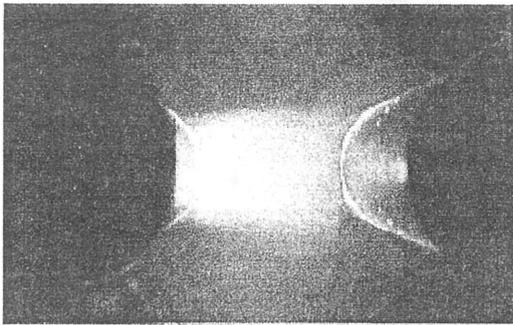


Fig.14 Flow pattern in the gap between two cylinders at  $Re=4.35 \times 10^5$  for  $s/d=1.0$ .

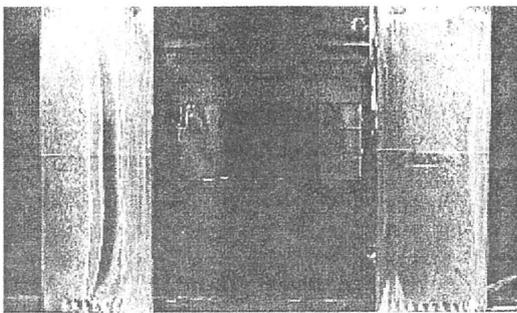


Fig. 15 Oil-flow patterns on the surfaces of each cylinder at  $Re=3.90 \times 10^5$  for  $s/d=2.0$ .

下流側円柱の受ける抵抗が大きくなる。

このときの2円柱間の流れ模様を Fig.14 に示す。この場合も主流は左から右に向かっており、上流側円柱

の後流幅が狭くなっているのがわかる。

また、Fig.15 に、表面塗膜法によって円柱表面の境界層構造を観察した1例を示す。 $s/d=2.0$ ,  $Re=3.90 \times 10^5$  の場合であり、主流は左から右へと向かっている。左側の上流側円柱表面に示した三角形のマークは、前方岐点より  $70^\circ$  の位置から  $140^\circ$  まで  $10^\circ$  毎の位置を示している。一方、右側の下流側円柱の三角形のマークは、前方岐点より  $30^\circ$  の位置から  $140^\circ$  まで  $10^\circ$  毎の位置を示している。上流側円柱表面には3本の線が明瞭に見られる。最上流側の約  $90^\circ$  の位置の白線は層流剥離線であり、次の約  $105^\circ$  の白線は再付着点を示す。この線より上流側に層流バブルが形成されていることになる。再付着点より下流側には、白い油膜がほとんどなく、円柱の黒い下地が現れた帯状の領域がある。ここが乱流境界層の領域であり、その下流端の約  $125^\circ$  の位置の線が乱流剥離線を表している。下流側円柱では、前面から後方へ向かって表面に沿った流れがあり、約  $120^\circ$  の位置で剥離しているのがわかる。

ところで、Fig.6 に示した  $s/d=0.5$  の  $C_d$ ,  $C_l$  の変化のグラフで、 $Re=3.52 \times 10^5$  の時、上流側円柱の  $C_d$  は正、下流側円柱の  $C_d$  は負となっている場合があった。このときの両円柱の表面圧力分布を Fig.16 に示す。上流側円柱は、 $\theta > 0^\circ$  の側で負の大きな圧力降下があり、この側面上に層流バブルが形成され、円柱は正の方向へ大きな揚力を受けている。一方、下流側円柱の大きな圧力降下は  $\theta < 0^\circ$  の側にあり、円柱は負の方向への揚力を受けている。このように、2円柱はそれぞれ逆方向に揚力を受けている。

これより大きなレイノルズ数では、両者は、正か負の同じ方向に揚力を受けている。そのときの表面圧力分布の一例を Fig.17 に示す。この場合は、両円柱は共に  $\theta < 0^\circ$  の方向へ揚力を受けているのが明白であろう。

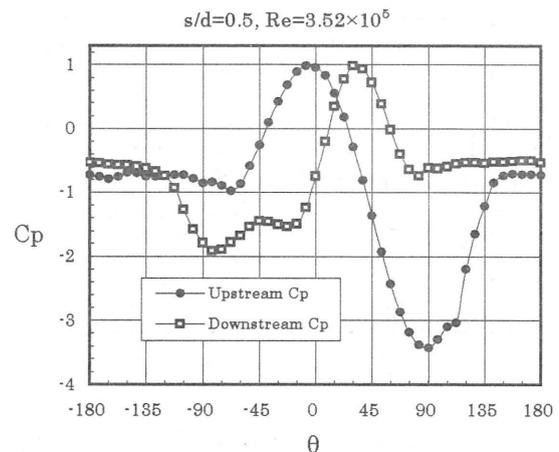


Fig.16 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=3.52 \times 10^5$  for  $s/d=0.5$ .

さらに、Fig.7 に示した  $s/d=0.05$  の場合にも、 $3.56 \times 10^5 < Re < 3.75 \times 10^5$  の範囲で、上流側円柱の揚力の方向と下流側円柱の揚力の方向は逆方向であった。これより大きいレイノルズ数範囲では、両円柱は同方向に揚力を受けている。

このように、上流側円柱の片側のみに層流バブルが形成された時、2円柱が同方向に揚力を受けるのは、 $s/d \geq 1.0$  でも現れる一般的特性といえる。しかし、 $s/d \leq 0.5$  で現れた2円柱それぞれが逆方向に揚力を受ける場合のメカニズムの詳細は不明であり、さらに調べる必要がある。

Fig.18 は、上流側円柱表面で境界層が層流剥離している  $Re \approx 2.7 \times 10^5$  において、2円柱の抵抗係数、

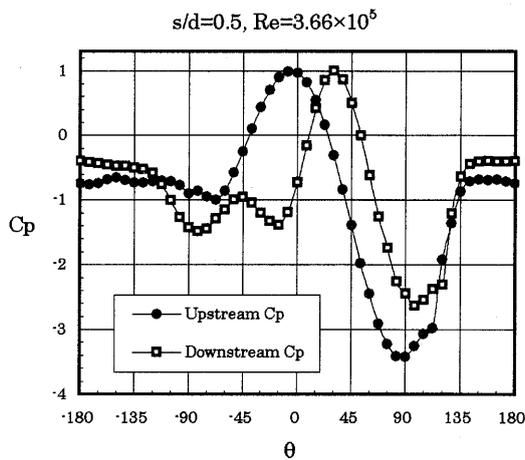


Fig.17 Mean pressure distributions for each cylinder at  $Re=3.66 \times 10^5$  for  $s/d=0.5$ .

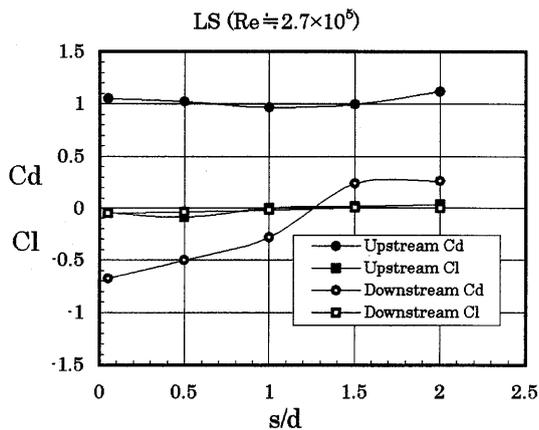


Fig.18 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with  $s/d$  at  $Re \approx 2.7 \times 10^5$ .

揚力係数の  $s/d$  による変化を示したものである。上流側円柱の  $C_d$  は、 $s/d$  でほとんど変化しないが、下流側円柱の  $C_d$  は、 $s/d$  が小さくなるにつれて負となる。

Fig.19 は、上流側円柱の片側だけに層流バブルが形成されている  $Re \approx 3.8 \times 10^5$  で、2円柱それぞれの  $C_d$ ,  $C_l$  の  $s/d$  による変化を示したものである。上流側円柱の  $C_d$  は 0.5 程度と小さくなる。下流側円柱の  $C_d$  は、これより小さいが、正の値となる。一方、上流側円柱は揚力を受け、 $s/d \geq 0.5$  では、 $C_l$  の値は絶対値 1 を越える程度に大きい。また、下流側円柱も同方向に揚力を受けているが、その値は大きくない。

Fig.20 は、上流側円柱の両側面に層流バブルが形

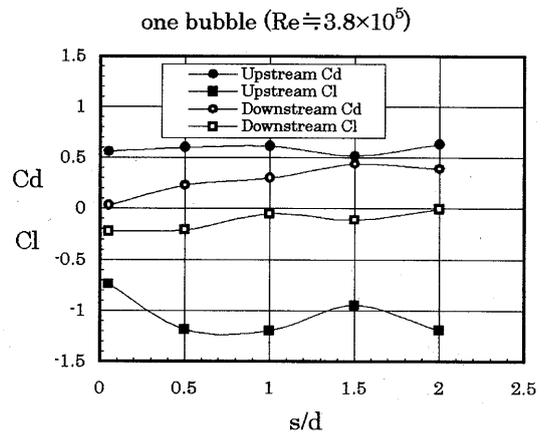


Fig.19 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with  $s/d$  at  $Re \approx 3.8 \times 10^5$

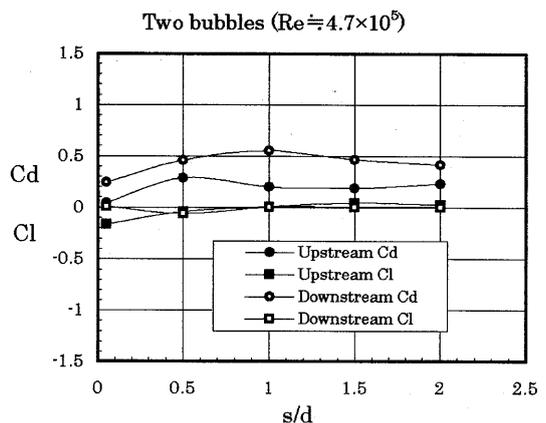


Fig.20 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with  $s/d$  at  $Re \approx 4.7 \times 10^5$ .

成されている  $Re \approx 4.7 \times 10^5$  で、2円柱それぞれの  $C_d$ ,  $C_l$  の  $s/d$  による変化を示したものである。この領域での大きな特徴は、上流側円柱の  $C_d$  より下流側円柱の  $C_d$  が大きくなることである。この領域では揚力は発生しない。

Fig.21 は、各  $s/d$  における上流側円柱の境界層の構造の変化を示したものである。図中には、比較のため単独円柱の場合も示している。図中、LS は、上流側円柱の境界層が層流剥離している場合であり、下流側円柱はその後流の中にある。

one bubble は、上流側円柱の片側のみに1個の層流バブルが形成されている場合であり、その現れるレイノルズ数領域は、 $s/d$  が小さくなると、広がる。つまり、上流側円柱側面上のバブルの形成には、下流側円柱の存在が干渉していることになる。

two bubble は、上流側円柱の両側面にバブルが形成されている場合である。

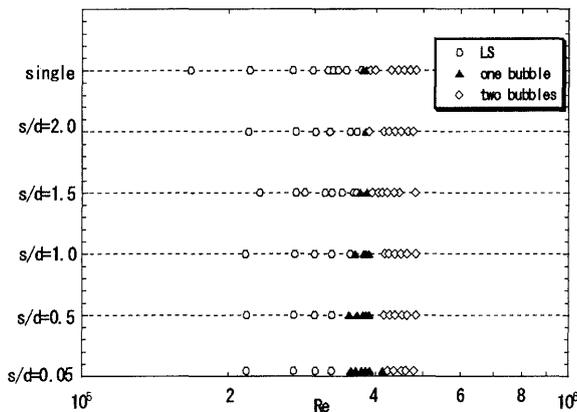


Fig.21 A classification of the boundary layer structures of the upstream cylinder with Reynolds number at each value of  $s/d$ .

#### 4. 結論

直列2円柱の空気力学的相互作用について、レイノルズ数  $10^5$  から  $5 \times 10^5$  の範囲で調べられた。それぞれの円柱周囲の平均的静圧分布が計測され、抵抗、揚力が求められた。

遷移領域の狭いレイノルズ数領域では、上流側円

柱側面の片側だけに1個の層流バブルが形成される。この1個のみのバブルが形成される領域は、2円柱間隔が小さくなると、広がる。この領域では、一般に、上流側円柱、下流側円柱ともに同方向に揚力を受ける。しかし、 $s/d \leq 0.5$  では、両円柱が互いに逆方向に揚力を受ける場合がある。

#### 参考文献

- 1) Roshko, A. : Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, *J. Fluid Mech.* Vol.10 (1961) 345-356.
- 2) Bearman, P. W. : On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number regime, *J. Fluid Mech.* Vol.37, Part 3 (1969) 577-585.
- 3) Kamiya, N., Suzuki, S. and Nishi, R. : On the aerodynamic force acting on circular cylinder in the critical range of the Reynolds numbers, *AIAA Paper*, 79-1495, Williamsburg (1979).
- 4) Uzuki, H. : On lift-coefficient of circular cylinder in two-dimensional flow, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol.25, No.67 (1982) 53-64.
- 5) Farell, C. and Blessmann, J. : On critical flow around smooth circular cylinders, *J. Fluid Mech.* Vol.136 (1983) 375-391.
- 6) Schewe, G. : On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* Vol.133 (1983) 265-285.
- 7) Tatsuno, M. , Maekawa, S., Ishi-I, K., Karasudani, T. and Amamoto, H. : Flow around a circular cylinder at the critical Reynolds number regime, *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, Kyushu Univ. No.122 (2002).
- 8) Okajima, A. : Flows around two circular cylinders at very high Reynolds numbers, *Bull. JSME* Vol.22, No.166 (1979) 504-511.