

臨界レイノルズ数領域における直列2円柱の揚力発生機構

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所

浜田, 義勝
応用技術(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/10.15017/6770328>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 124, pp.1-8, 2003-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



臨界レイノルズ数領域における直列2円柱の揚力発生機構

辰野正和*¹ 浜田義勝*² 石井幸治*¹ 烏谷 隆*¹ 天本 肇*¹

(2003年1月30日受理)

Mechanism of the Generation of Lift Forces on Each of Two Cylinders in a Tandem Arrangement at the Critical Reynolds Number Regime

Masakazu TATSUNO, Yoshikatsu HAMADA, Koji ISHI-I,
Takashi KARASUDANI and Hajime AMAMOTO

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

Abstract

The mechanism of the generation of lift forces on each of two equal circular cylinders in a tandem arrangement has been examined at the critical Reynolds number regime for $s/d=0.1$ to 1.0 , where d is the cylinder diameter and s the gap between two cylinders.

When a laminar separation bubble is formed on one side only of the upstream cylinder, it experiences the lift force directed to the side where the bubble is formed. On the other hand, the downstream cylinder experiences the lift force in the opposite or in the same direction as the upstream cylinder depending on the values of Reynolds number.

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¹⁾。亜臨界領域においては、円柱の境界層は左右で層流剥離している。ところが、Bearman²⁾等が報告しているように、レイノルズ数が増大していくと、どちらか一方の剥離した層流境界層が乱流に遷移し、円柱表面に再付着するということが起こる。この層流剥離したところから再付着点までの間に閉じた領域が形成され、これを層流剥離泡(以後、簡単にバブルと呼ぶことにする)と呼んでいる。バブルの後方へは乱流境界層が形成され、約 130° 付近で円柱表面から剥離する。反対側は層流剥離のままなので、左右での圧力分布に差が生じ、円柱は横力(揚力)を受ける。この片側だけのバブルの構造とそのときの流れ特性については、Kamiya et al³⁾, Uzuki⁴⁾, Farell&Blessmann⁵⁾, Schewe⁶⁾等も研究している。また、辰野等⁷⁾は、流れ

の可視化も行っている。レイノルズ数がさらに大きくなると、円柱の左右対称な側面上にバブルが形成され、円柱は揚力を受けない。

ところで、2円柱に関して、臨界、超臨界域の流れについての研究は非常に少ない。Okajima⁸⁾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。辰野等⁹⁾は、亜臨界から超臨界に至る範囲で、直列2円柱それぞれの表面圧力分布を求め、2円柱の相互作用を調べた。彼等は、 $0.05 \leq s/d \leq 2.0$ の範囲で実験を行い、上流側円柱側面の片側だけに1個のバブルが形成されるレイノルズ数範囲は、2円柱間隔が小さくなると、広くなるということを明らかにしている。さらに、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されたとき、上流側円柱はバブルが形成された方向に揚力を受ける。一方、下流側円柱は、多くの場合、上流側円柱と同方向に揚力を受けたが、 $s/d \leq 0.5$ では、下流側円柱が上流側円柱とは逆方向に揚力を受ける場合があったことを報告している。ここで、 s は円柱間の隙間、 d は円柱直径で

*1 九州大学応用力学研究所

*2 応用技術(株)

ある。

本研究の目的は、前回の実験で不明のままであった、上流側円柱側面の片側だけに1個のバブルが形成されるときに、下流側円柱はどの方向に揚力を受けるのか、その場合の流れ場はどうなるのかということの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、筑紫キャンパスに新設の幅 3.6m、高さ 2m、長さ 15m の計測部を備えた回流型風洞で行われた。Fig.1 にモデル設置状況の概略図を示す。前回の実験と同じ直径 42.0cm の 2円柱を使い、設置方法も同様である。円柱の風洞計測部断面に対する閉塞率は 0.117 であったので、抗力、揚力の測定値は Allen & Vincentini の方法によって修正された。円柱表面の平均的静圧分布の計測は、前回同様、円柱の長さ方向中央部に 7.5° 毎に配置された 48 個の圧力孔(直径 0.5mm)でなされた。

今回の実験では、 s/d を 1.0, 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1 と変え、さらにレイノルズ数範囲も概ね $3 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$ の特にバブルが形成されるレイノルズ数領域を中心として細かく変化させて実験を行った。

Fig.2 に、直列2円柱の配置図と物理量の定義を示す。前報にも述べたように、上流側円柱側面のどちら

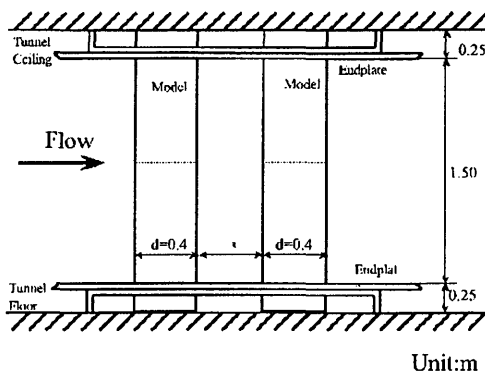


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

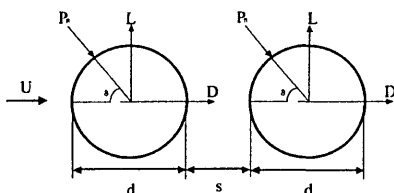


Fig.2 Notations in the general configuration of two cylinders

側に1個のバブルが形成されるかどうかは全くの偶然であり、不明である。また、バブルは、1つの側面から反対側の側面へと間欠的に移動することもある。そこで、ここでは、上流側円柱の受ける揚力の値を常に正で表すこととする。そうすると、下流側円柱の揚力は、上流側円柱と同方向の場合正であり、上流側円柱と逆方向である場合は負で表されることになる。

3. 実験結果

Fig.3 より Fig.8 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、前報でも示したように、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

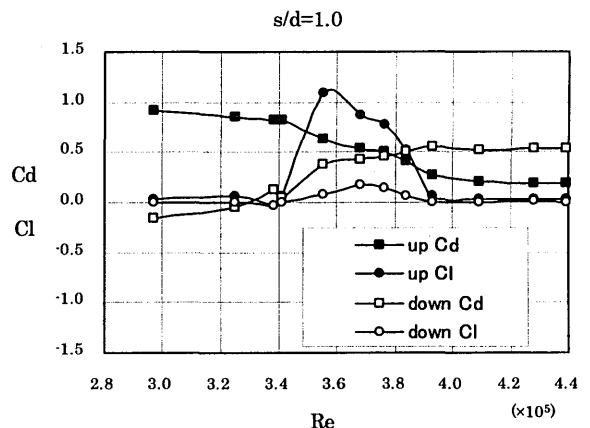


Fig.3 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=1.0$.

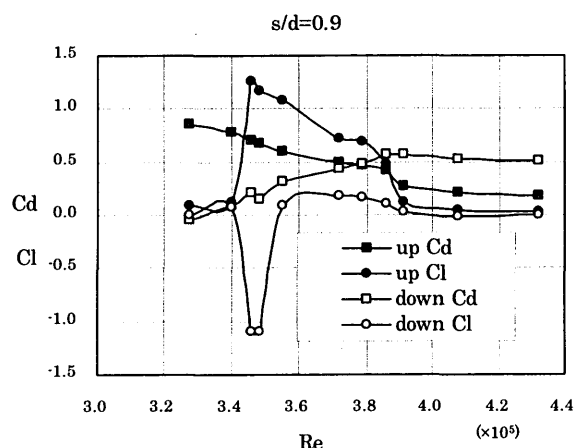


Fig.4 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=0.9$.

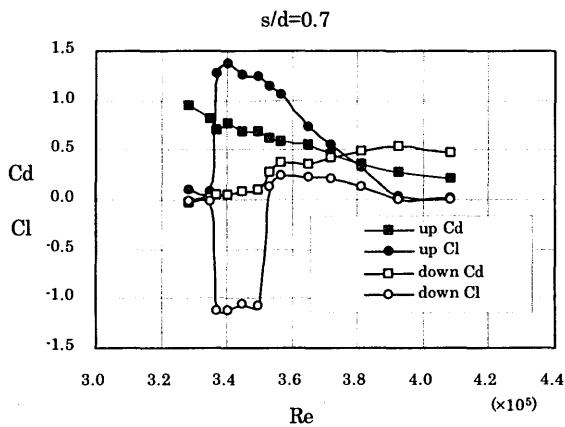


Fig.5 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=0.7$.

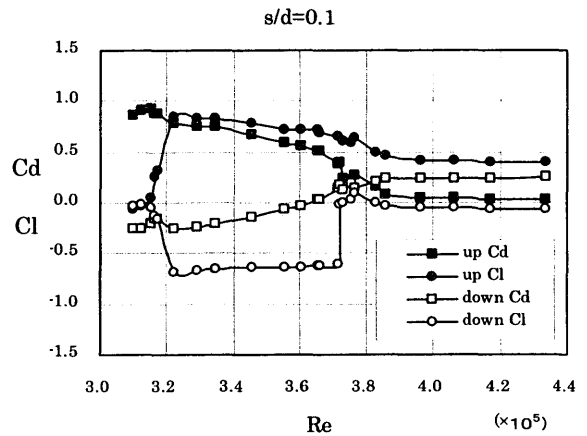


Fig.8 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=0.1$.

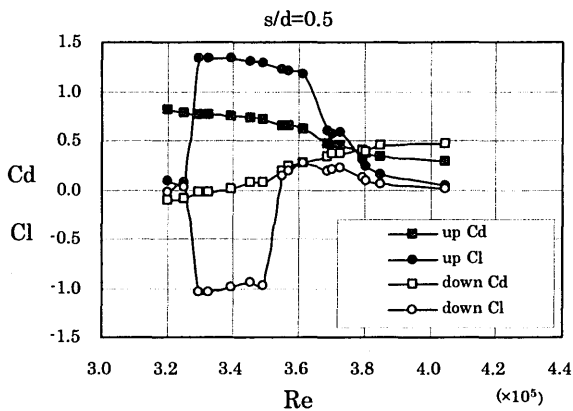


Fig.6 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=0.5$.

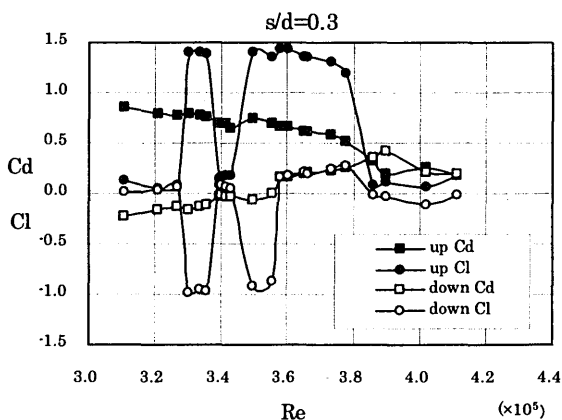


Fig.7 Variations of the drag and lift coefficients for each cylinder with Reynolds number at $s/d=0.3$.

中に埋没している。それゆえ、 $s/d < 1$ では、下流側円柱の受ける抵抗は負である。また、流れは対称であるので揚力は発生していない。

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、一方、下流側円柱の抵抗は大きくなる。レイノルズ数がある臨界値に達すると上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されるようになる。その時、上流側円柱は揚力を受けるようになる。同時に下流側円柱も揚力を受ける。バブルが形成されているレイノルズ数範囲内では、上流側円柱と下流側円柱の受ける抵抗の大きさは逆転する。また、この範囲内では、下流側円柱の受ける揚力の大きさ、方向も s/d によって大きく変わっている。

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。この時、上流側円柱の抵抗は激減する。

ところで、本研究においては、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されたときの下流側円柱の受ける揚力の特性について調べるのが目的である。つまり、下流側円柱の受ける揚力の大きさ、向きの上流側円柱の揚力との関係を調べるのであるから、Fig.3～Fig.8の各 s/d について、上流側円柱、下流側円柱の揚力係数のみを抜き出して Fig.9～Fig.14に示す。

Fig.9が示す $s/d=1.0$ の場合、上流側円柱が揚力を受ける範囲で下流側円柱も揚力を受けているが、その値はともに正であり、2円柱は同方向へのみ揚力を受けているのがわかる。また、下流側円柱の Cl の値は、上流側円柱の Cl の値に対してかなり小さい。

Fig.10の $s/d=0.9$ の場合、ほぼ $3.42 \times 10^5 < Re < 3.53 \times 10^5$ の範囲で、下流側円柱の Cl の値は負である。つまり、この範囲内では上流側円柱と下流側円柱とは逆方向に揚力を受けていることになる。また、この

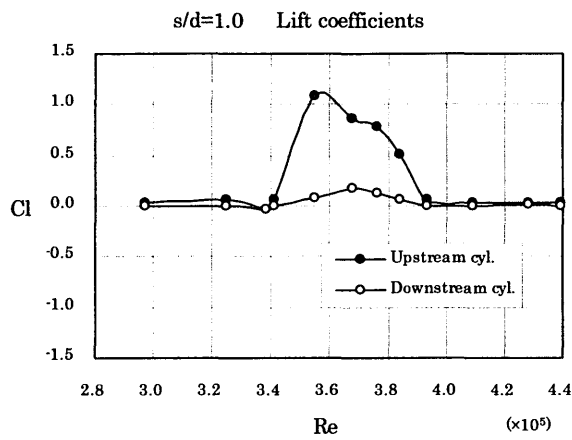


Fig.9 Variations of the lift coefficients for each cylinder at $s/d=1.0$.

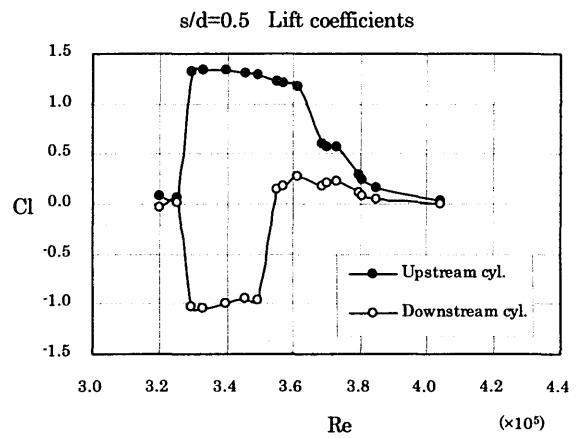


Fig.12 variations of the lift coefficients for each cylinder at $s/d=0.5$.

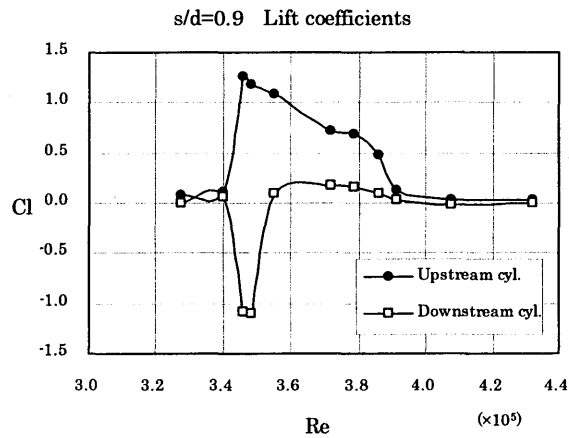


Fig.10 Variations of the lift coefficients for each cylinder at $s/d=0.9$.

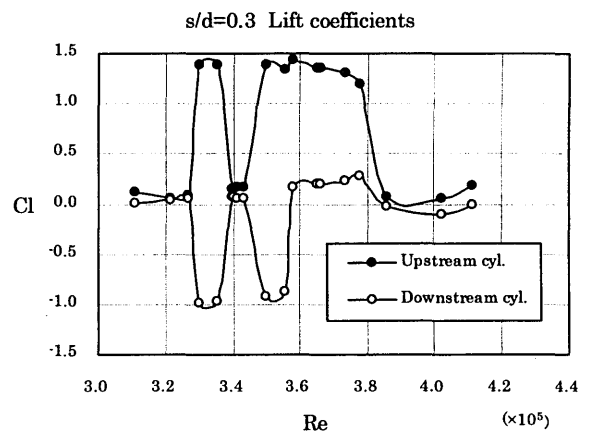


Fig.13 Variations of the lift coefficients for each cylinder at $s/d=0.3$.

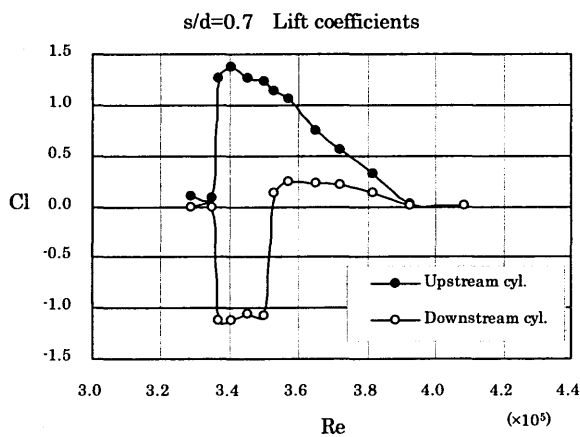


Fig.11 Variations of the lift coefficients of each cylinder at $s/d=0.7$.

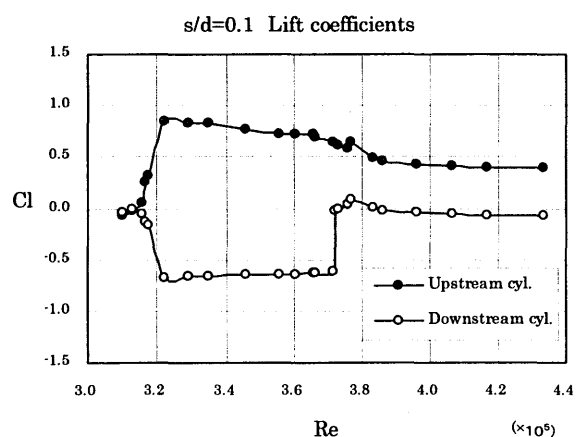


Fig.14 variations of the lift coefficients of each cylinder at $s/d=0.1$.

時の下流側円柱の Cl の値は $|1.0|$ を越える程大きい。一方、 $3.53 \times 10^5 < Re < 3.89 \times 10^5$ の範囲では、下流側円柱の Cl の値は正であり、2円柱は同方向に揚力を受ける。この時下流側円柱の Cl の値はそれほど大きくない。

Fig.11 は、 $s/d=0.7$ の場合を示しているが、 $3.36 \times 10^5 < Re < 3.53 \times 10^5$ の範囲内で、下流側円柱の Cl の値は負であり、2円柱は逆方向に揚力を受けている。一方、 $3.53 \times 10^5 < Re < 3.93 \times 10^5$ の範囲で2円柱は同方向に揚力を受けている。

Fig.12 より Fig.14 までは、それぞれ $s/d=0.5, 0.3, 0.1$ の場合の2円柱の揚力係数とレイノルズ数との関係を示しているが、いずれの場合も、上流側円柱が揚力を受けるレイノルズ数範囲で、下流側円柱はレイノルズ数増大とともに、まず上流側円柱とは逆方向に揚力を受け、さらにレイノルズ数が大きくなると2円柱は同方向に揚力を受けるようになる。また、下流側円柱の揚力の値は、上流側円柱と逆方向の場合の方が、同方向の場合よりかなり大きく、2つの場合の2円柱まわりの流れ構造が基本的に異なっているであろうことを示唆している。さらに、 s/d の値が小さい程、上流側円柱が揚力を受け始める、つまり上流側円柱の片側に1個のバブルが形成される臨界のレイノルズ数が小さくなり、また下流側円柱が上流側円柱とは逆方向に揚力を受けるレイノルズ数範囲が広がる。

ところで、 $s/d=0.3$ の場合、 $Re \approx 3.4 \times 10^5$ の近傍で、2円柱の受ける揚力が極端に小さくなる場合があった。この時、表面圧力分布を見る限り、上流側円柱表面にはバブルは形成されていないようである。ただし、圧力分布は、一様流方向に対して対称でなく、2円柱には小さな値の揚力が同方向に現れた。こうした流れは $s/d=0.3$ の場合にだけ現れたが、なぜこうなるのかの詳細は不明である。

また、 $s/d=0.1$ の場合、 $Re > 3.8 \times 10^5$ でも上流側円柱の Cl の値は0となっていない。この領域での表面圧力分布を見ると、明らかに両側にバブルが出来ている圧力分布を示している。しかし、左右でその絶対値に違いがある。そのため揚力が計測されている。 $s/d=0.1$ と小さいため、一様流方向に対する2円柱の配置のわずかの非対称性がその原因かもしれない。詳細は不明である。

上述のように、 $s/d \leq 0.9$ では、下流側円柱が上流側円柱と逆方向あるいは同方向に揚力を受ける場合があり、その2つの状態はレイノルズ数によって明確に区別されることがわかった。そこで、揚力発生のメカニズムを調べるため、円柱まわりの平均的圧力分布および流れ模様を検討する。ここでは、主に $s/d=0.7$ の場合を例にとって示す。

Fig.15 は、 $s/d=0.7$ 、 $Re=3.41 \times 10^5$ の時の2円柱各々の平均的圧力分布を極座標表示したものである。0と表示した円が圧力0の円であり、これより内側へは正圧、外側へは負の圧力を示している。この場合

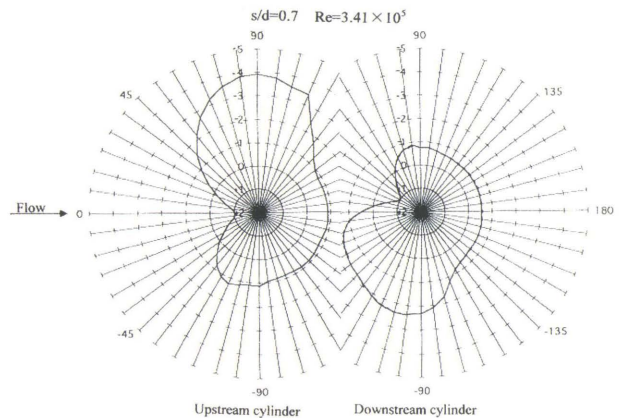


Fig.15 Polar plots of mean pressure distributions for each cylinder at $Re=3.41 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

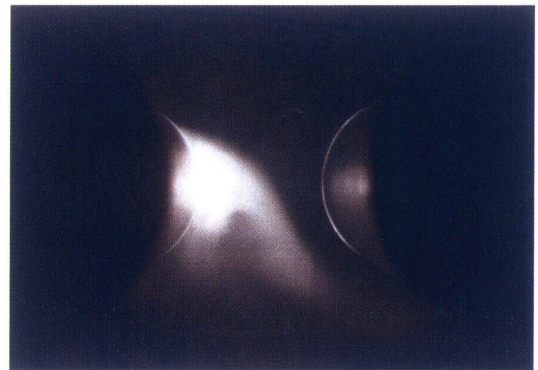


Fig.16 Flow pattern in the gap between two cylinders at $Re=3.47 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

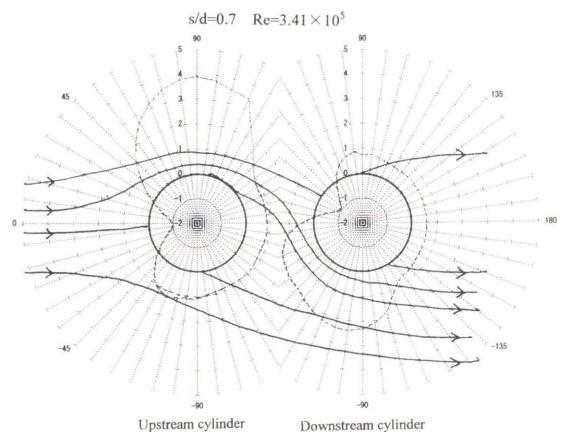


Fig.17 Mean flow pattern around two cylinders when two cylinders experience lift forces in the opposite direction to each other.

は、上流側円柱の $\theta > 0^\circ$ の側面に1個の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を受ける。同時に、下流側円柱の圧力分布も非対称となっており、 $\theta < 0^\circ$ の側で圧力低下が著しいのが明白であろう。下流側円柱の $\theta > 0^\circ$ の側の圧力分布はほとんど層流剥離の場合と同様である。結果として、下流側円柱は負の方向に揚力を受けており、それは上流側円柱とは逆方向であり、Fig.11 に示す関係となっている。

Fig.16 は、 $s/d=0.7$, $Re=3.47 \times 10^5$ で、上流側円柱と下流側円柱とが逆方向に揚力を受けている時の2円柱間の流れ模様を示している。煙は、上流側円柱の真後ろから注入された。主流は、左から右へ向かっている。つまり、左側の円柱が上流側円柱であり、その1つの側面(上流側から見て左側)上に1個のバブルが形成されている。一方、上流側から見て右側側面上では境界層は層流剥離している。この流れで最も大きな特徴は、下流側円柱との間に全く煙が入り込まない領域が形成されていることである。上流側円柱の左側にはバブルが形成され、後方へは乱流境界層の形成、乱流剥離へと続くわけであるが、その乱流剥離した流れは、煙が示す最も外側の流れとして可視化されているはずである。ところが、この乱流剥離した流れは、下流側円柱に当たらず、この流れと下流側円柱との間に帯状の煙の入り込まない領域が形成されている。このことは、この帯状の領域には、バブルよりも外側の流れが入り込んでいることになる。

以上の圧力分布および2円柱間の流れ模様から、この場合の2円柱間の平均的な流線模様は、Fig.17 の様になっているであろうと推測される。上流側から見て、下流側円柱の前面から右側面に沿って、上流側円柱の左側からの強い gap flow が現れ、これが強い圧力低下をもたらしている。下流側円柱にぶつかる流れは、gap flow のさらに外側の流れであろう。

Fig.18 は、 $s/d=0.7$, $Re=3.57 \times 10^5$ の時の圧力分布を極座標表示したものであり、2円柱が同方向に揚力を受けている時の典型的な例である。この場合も、上流側から見て上流側円柱の左側面上($\theta > 0^\circ$)に1個のバブルが形成されている。同時に、下流側円柱の圧力分布も非対称となっているが、この場合の分布は、Fig.15 に示した圧力分布とは著しく異なったものとなっている。Fig.18 の場合の下流側円柱の圧力分布は、 $\theta > 0^\circ$ 側では、上流側円柱の $\theta > 0^\circ$ 側と似た分布、 $\theta < 0^\circ$ 側では表面に沿って強い流れがあるであろうと推測されるような分布となっている。結果として、 $\theta > 0^\circ$ 側へ揚力を受けるのであるが、Fig.11 でも明らかのように、その強さは大きくない。それは、下流側円柱の $\theta > 0^\circ$ 側と $\theta < 0^\circ$ 側の側面の圧力差が小さいからであろう。Fig.19 は、 $s/d=0.7$, $Re=3.67 \times 10^5$ で2円柱が同方向に揚力を受けている場合の2円柱間の流れ模様を示している。この場合も、一樣流は左から右へ向かっている。上流側から見て、上流側円柱の左側(θ

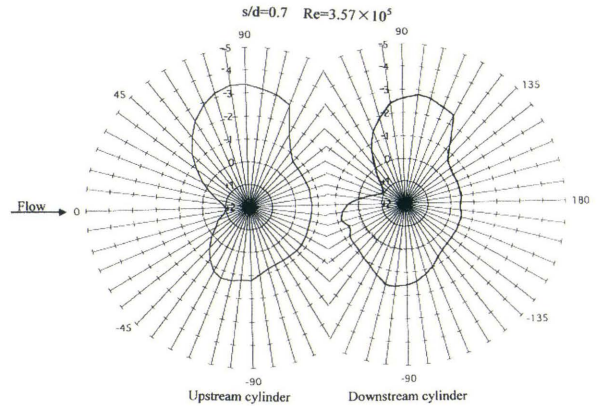


Fig.18 polar plots of mean pressure distributions for each cylinder at $Re=3.57 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

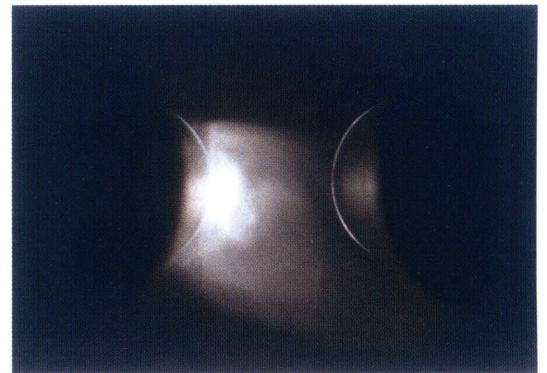


Fig.19 Flow pattern in the gap between two cylinders at $Re=3.67 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

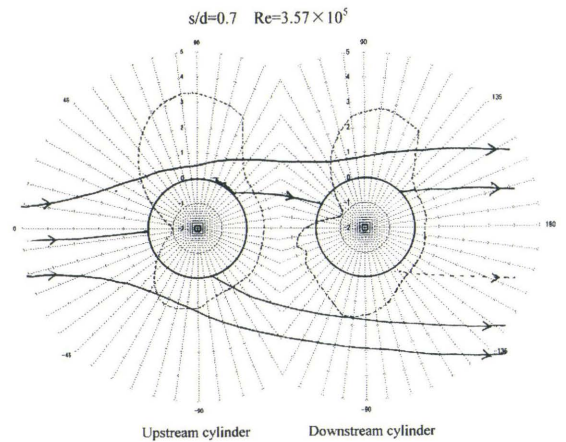


Fig.20 Mean flow pattern around two cylinders when two cylinders experience lift forces in the same direction to each other.

$>0^\circ$)にバブルが形成されている。その下流で乱流剥離した流れは、下流側円柱の前面に当たっているのがわかる。Fig.16の場合と異なり、2円柱間に煙の入り込まない領域はない。

以上の圧力分布、流れ模様から、2円柱が同方向に揚力を受ける場合の平均的な流線模様はFig.20のようであると推測される。上流側円柱上に形成されたバブルの後方へは乱流境界層が形成され、乱流剥離した流れは下流側円柱にぶつかる。ぶつかった流れは、左右に分かれるであろうが、上流側から見て、左側面上を進む流れは乱流境界層を形成しているであろうと思われる。しかし、その圧力分布は上流側円柱のバブルの形成されている側面側の圧力分布とかなり良く似ている。ということは、下流側円柱左側面上には、バブルに相当するような閉じた領域が形成されているのであろうか。現在のところ詳細は不明である。下流側円柱にぶつかった後、上流側から見て右側面上を進む流れは、上流側円柱の後流の中に埋没しているが、その境界層構造の詳細は不明である。

Fig.21は、上流側円柱の左右両側面の対称な位置に1対のバブルが形成されている時の圧力分布を示している。 $s/d=0.7$, $Re=4.08 \times 10^5$ の場合である。上流側円柱の両側面での圧力低下が著しい。しかし、対称であるので揚力は発生しない。一方、下流側円柱の圧力分布も左右対称となるので揚力は発生しない。しかし、その圧力分布は、上流側円柱の圧力分布とは異なっている。上流側円柱の2側面を乱流剥離した流れが、下流側円柱前面の2点にぶつかり、その後方へは乱流境界層を形成していると思われる。しかし、その圧力分布の形は、Fig.18の場合と異なっている。乱流強度の違いにでも依るのであろうか。その詳細は不明である。

Fig.22は、 $s/d=0.7$, $Re=4.09 \times 10^5$ の場合の2円柱間の流れ模様を示したものであり、対称であるのがわかる。

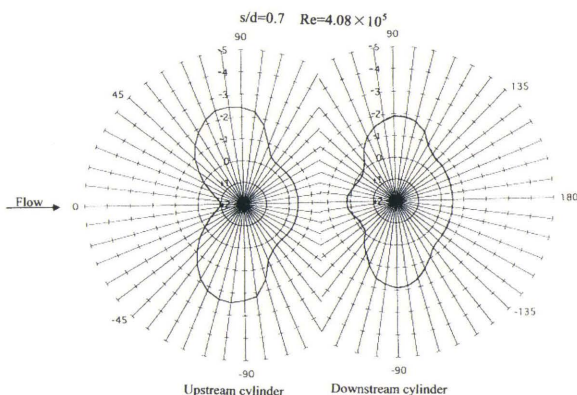


Fig.21 Polar plots of mean pressure distributions for each cylinder at $Re=4.08 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

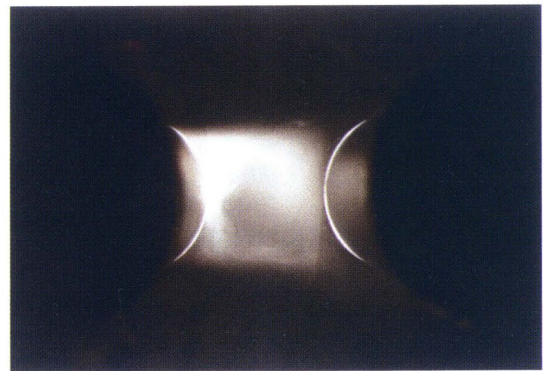


Fig.22 Flow pattern in the gap between two cylinders at $Re=4.09 \times 10^5$ for $s/d=0.7$.

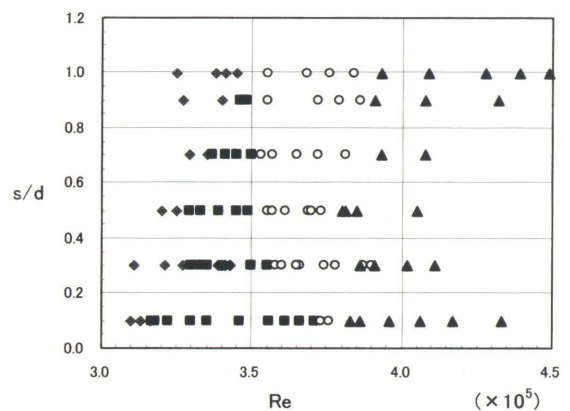


Fig.23 A classification of the flow structures around two cylinders at each value of s/d .

Fig.23は、各 s/d について、流れの構造のレイノルズ数による変化を示したものである。

記号◆は、上流側円柱の境界層は、両側で層流剥離し、下流側円柱はその後流の中に埋没している場合である。

記号■は、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されており、下流側円柱が上流側円柱とは逆方向に揚力を受けている場合である。

記号○は、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されており、下流側円柱も上流側円柱と同方向に揚力を受ける場合である。

記号▲は、上流側円柱の両側に1対のバブルが形成されている場合である。

$s/d=0.3$ の場合の◆は、Fig.13に示したように、圧力分布からは、上流側円柱の片側にバブルが形成されているようには見えない場合を示している。こうした例は、 $s/d=0.3$ の場合にのみ見られた。

Fig.23から明らかなように、 s/d が小さい程、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成される臨界のレ

レイノルズ数は小さい。また、 s/d が小さい程、2円柱が逆方向に揚力を受けるレイノルズ数の範囲は広くなり、2円柱が同方向に揚力を受けるレイノルズ数の範囲は狭くなる。

4. 結論

臨界レイノルズ数領域において、直列に配置された2円柱の受ける揚力発生機構について調べた。

$s/d \leq 0.9$ では、上流側円柱の片側だけに1個のバブルが形成されるレイノルズ数範囲で、下流側円柱はレイノルズ数増大とともに、まず上流側円柱とは逆方向に揚力を受け、さらにレイノルズ数が大きくなると、下流側円柱は、上流側円柱と同方向に揚力を受けるようになる。これは、2円柱間の流れ構造の大きな変化によるものであり、各々の場合の平均的な流線模様も求めた。

s/d が小さくなるとともに、上流側円柱上に1個のバブルが形成される臨界のレイノルズ数は小さくなる。また、 s/d が小さくなるとともに、2円柱が逆方向に揚力を受けるレイノルズ数範囲は広くなり、2円柱が同方向に揚力を受けるレイノルズ数範囲は狭くなる。

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) 73-75.
- 8) Okajima, A. : Flows around two circular cylinders at very high Reynolds numbers, Bull. JSME Vol.22, No.166 (1979) 504-511.
- 9) 辰野正和、前川 悟、石井幸治、鳥谷 隆、天本肇:高レイノルズ数領域における直列2円柱まわりの流れ、応用力学研究所所報 第122号(2002) 59-65.
- 10) Tatsuno, M., Hamada, Y., Iashi-i, K., Amamoto, H. and Karasudani, T. : Mechanism of the generation of lift forces on each of two cylinders in a tandem arrangement at the critical Reynolds number regime, Proc. Conf. Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations, Port Douglas, Australia (2002) 97-100.