

下流円柱の接近に伴う上流円柱後流渦挙動の PIV 解析

小田 純子¹⁾・小園 茂平²⁾・宮城弘守³⁾・若杉 康雄⁴⁾

PIV analysis of the vortex shedding from a circular cylinder with secondary one of an equal diameter approached

Junko ODA, Shigehira OZONO, Hiromori MIYAGI, Yasuo WAKASUGI

Abstract

The flow around a circular cylinder behind which secondary one was shifted along the wake was investigated. The relative position of the secondary cylinder is defined by horizontal distance G and level Z between the two cylinders. As the secondary cylinder was shifted upstream, when it reached a certain gap, the base suction fell critically; the gap is referred to as "critical gap". To make clear the mechanism of the critical behavior, PIV (Particle Image Velocimetry) analysis was conducted in a water tank. It was proved that the shear-layer interaction changes significantly depending on level Z .

Key Words:

Circular cylinder, Critical gap, Base suction, PIV analysis

1. はじめに

ブラフボディを流れの中に置き、レイノルズ数が充分大きくなると、物体後流にカルマン渦が発生する。カルマン渦は鉄塔、煙突、高層建築物などに有害な振動や騒音を引き起こす。実験的な研究からカルマン渦列が形成される後流は、臨界的特性を示す不安定構造が指摘され^{1), 2)}、理論的には絶対不安定や対流不安定との対応が議論されている。今までの研究は、ほとんどが対称な環境下で実験が行なわれてきた。これに対して渦放出の機構を新たな視点から捉え直すために、Ozono ら^{3), 4), 5), 6), 7)}は一連の非対称環境下のブラフボ

ディ周りの流れをとりあげ、上流円柱後流には不連続に渦放出特性が変わる臨界的な構造が内在することを報告した。

本論文では円柱後流に同一直径の円柱が非対称に配置された状況を取りあげる。本論文の目的は背圧係数を計測し、その結果から臨界ギャップを同定し、その前後の流れパターンを PIV (Particle Image Velocimetry) 解析し、臨界的挙動の機構を解明することである。

2. 実験方法

2.1 水槽実験

水槽は鉛直回流型で上部が開放されており、測定部は長さ 4.0m、測定部の断面幅 0.4m、高さ 0.6m である。水表面の高さは 0.4m とした。流れはインペラーによって駆動され、流速 0.09~1.00m/s がコンピューター

- 1) 物質工学専攻大学院生
- 2) 材料物理工学科助教授
- 3) 材料物理工学科助手
- 4) 材料物理工学科技官

により制御可能である。面内の流速を一様にするためインペラーの回転数に応じてローターで水面の速度を加速させている。また波をおこさないために制波板が設置してある。水表面、壁から 50mm 以上離れた領域での乱れの強さ ($I = \sqrt{u'^2} / U$, u' ; 変動風速, U ; 平均風速) は 1.0% 以下であった。

二円柱模型は直径 $d=15.0\text{mm}$ の透明アクリルパイプを 2 本使用した。アスペクト比は 23.3, 閉塞率は 3.8% である。閉塞率の補正は行っていない。流れの 2 次元性を確保するために, 縦 600mm, 横 250mm のアクリル製の端板で円柱を支持した。測定部の入り口から 1340mm の位置に上流円柱中心を設置した。上流角部には, 有害な剥離流を避けるためにテーパをつけた。下流円柱を水平に移動させるために, 端板に $Z/d=0, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ のいろいろな鉛直距離でスリットを設けた。

図 1 に示すように, まず, 上流円柱を固定し, 下流円柱を $Z/d=0, 0.5, 1.0$ のそれぞれの鉛直位置 Z で, 遠方から徐々に上流円柱へ近づけて, 背圧係数 C_{pb} ($C_{pb}=2(P_b - P_\infty) / \rho U^2$, P_b ; 背圧, P_∞ ; 基準圧, ρ ; 水の密度) を測定した。上流円柱の淀み点から 180° のスパン中央に背圧を測定するための直径 0.5mm の背圧孔を開けた。L 型ピトー管 (岡野製作所 LK-00) を十分上流に設置し基準の静圧とした。円柱と L 型ピト

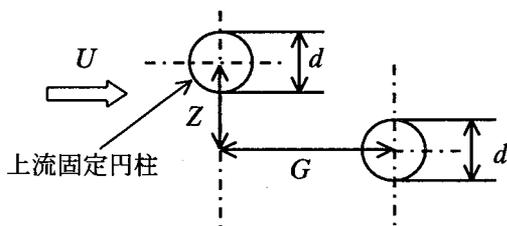


図 1 二円柱模型。

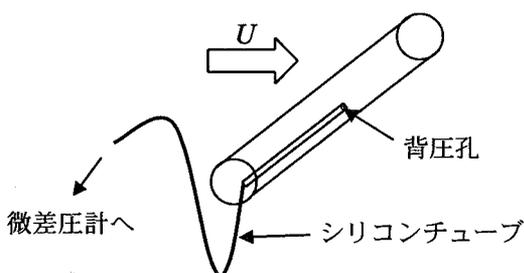


図 2 上流円柱背圧孔。

一管からチューブで, 微差圧計 (エス・エス・ケイ DPL6-50) に圧力を導き, 動歪計 (エス・エス・ケイ M-1101) で信号を増幅して, ペンレコーダに出力した。水槽の平均流速 U は, $U=0.5\text{m/s}$ であり, 直径 d に基づくレイノルズ数 Re は, $Re=7.4 \times 10^3$ であった。

2.2 風洞実験

本実験に使われたマルチファン型風洞⁹⁾は, 室内開放型押込式 (エッフェル型) である。この風洞は縦 11 個×横 9 個=合計 99 個のファンが 750W の AC サーボモーターに接続されており, パソコンで制御可能である。全てのファンに定常命令を与えると風洞内に一様流が生成される。

二円柱模型は, 風洞測定部入り口から 10m 下流地点に設置した。風洞気流はその地点で一様流に近づけるように調整されており, 平均風速の非一様性は, $\pm 2.0\%$ 以下であり, 乱れの強さは約 2.0% である。予備的に円柱背圧のスパン方向分布を計測し非一様性の影響が小さいことを確かめた。

模型はアクリルパイプを 2 本使用し模型を製作した。真鍮管を上流円柱背面に埋め込み, 0.5mm の背圧孔をスパン中央に開けた (図 2)。様々なレイノルズ数 $Re=5000 \sim 45000$ で背圧を計測するため, 直径 25mm と直径 89mm の二円柱模型を使用した。レイノルズ数を水槽実験に合わせた風洞での背圧測定では, 直径 25mm の二円柱模型を使用した。また比較的大きなレイノルズ数での実験では, 直径 89mm の二円柱模型を使用した。円柱は, 風洞中心に流れに直角, 床面に水平に設置した。直径 25mm の円柱ではアスペクト比は 40.0, 閉塞比は 1.4% であり, 直径 89mm の円柱では, アスペクト比は 14.6, 閉塞比は 4.4% である。流れの 2 次元性を確保するために, 縦 1800mm, 横 1350mm のベニヤ板を端板とした。このベニヤ板に円柱模型を支えるアクリル板をはめ込んだ。アクリル板には水槽での模型と同様にスリットを設置し, それに沿って下流円柱をトラバースした。ベニヤ板の上流角部は, 有害な剥離流を避けるためにテーパをつけた。

風洞実験では上流円柱を固定し, 下流円柱を $Z/d=0, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ のいろいろな鉛直位置 Z で,

十分遠方から徐々に上流円柱へ近づけ、上流円柱の背圧の変化を調べた。但し、 Re 数効果を調べる実験では、鉛直位置 $Z/d=0.75$ に固定した。直径 25mm の円柱では流速 $U=3.3\sim 5.8\text{m/s}$ ($Re=5000\sim 9000$)、直径 89mm の円柱では流速 $U=5.0\sim 8.0\text{m/s}$ ($Re=29000\sim 45000$) で実験を行なった。

3. 実験結果

3.1 水槽実験

図3は、二円柱模型における G/d にともなう背圧の変化を示す。後流円柱を下流から上流に向かって移動する時、ある水平位置 G/d を越えると、背圧が急激に回復している。これらの位置を“臨界ギャップ”と呼ぶことにする。臨界ギャップは、 Z/d が大きくなるにつれて、 G/d の小さい方へと移動している。例えば $Z/d=0.5$ では $G/d=3.6$ だが、 $Z/d=1.0$ では臨界ギャップは $G/d=3.2$ となっている。興味深いのは水槽実験では、 $Z/d=0.5, 1.0$ の時、臨界ギャップより少し大きな G/d (“臨界ギャップ前”という) に $-C_{pb}$ の上昇が見られることである。後流円柱が臨界ギャップを越えてさらに上流円柱に近づく時、いったん臨界的に低下した $-C_{pb}$ は再び徐々に増加する傾向がある。

3.2 風洞実験

水槽実験の結果を裏付けるため、水槽実験とレイノルズ数をほぼ等しくさせて風洞実験を行なった。直径 $d=25\text{mm}$ の二円柱模型を用いて背圧を測定した。図4は、 G/d にともなう背圧の変化を示す。水槽実験と同様、下流円柱が上流円柱に近づく時、全ての Z で臨界的な背圧の回復が見られる。さらに、臨界ギャップ前の $-C_{pb}$ に注目すると、全ての Z で上昇が見られる。この結果は水槽実験の結果を支持する。同じ風洞で、直径 $d=89\text{mm}$ の二円柱模型を用いて比較的高いレイノルズ数で、同様に背圧を測定した。図5にその結果を示す。ある水平位置 G/d を越えると背圧が臨界的に回復する臨界ギャップが全ての Z で見られる。しかし比較的低いレイノルズ数の実験とは異なり臨界ギャップ前で $-C_{pb}$ の上昇が見られない。この臨界ギャップ前で

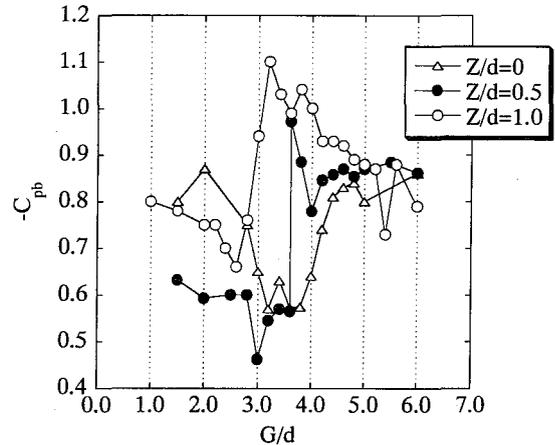


図3 水槽実験結果 ($Re=7.4\times 10^3$) .

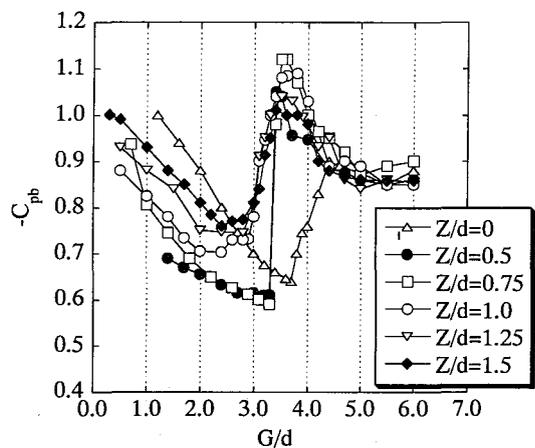


図4 風洞実験結果 ($Re=7.6\times 10^3$) .

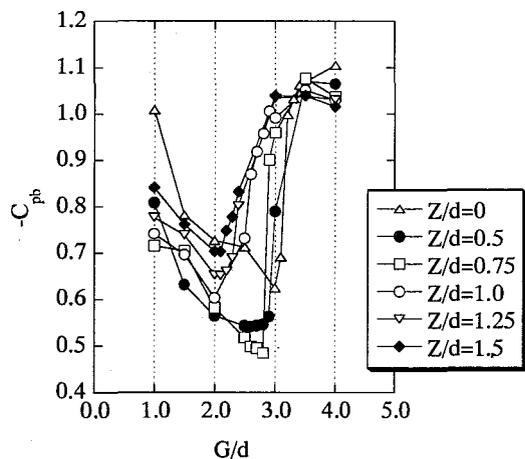


図5 風洞実験結果 ($Re=2.94\times 10^4$) .

の $-C_{pb}$ の挙動の違いはレイノルズ数の違いに起因すると推定し、さらに広範囲でレイノルズ数を変えて実験した。レイノルズ数は $Re=5000\sim 45000$ の範囲で行なった。グラフより $Re=5000\sim 9000$ では、臨界ギャップ前で $-C_{pb}$ の上昇が見られた。図6はいろいろなレイノルズ数に対するの背圧の G/d に対する変化を示したグ

ラフである。また $-C_{pb}$ の上昇する勾配は Re 数が高くなるにつれ、ゆるやかになっており、臨界ギャップの位置は Re 数が大きくなるにつれて、 G/d の小さい方へ移っている。十分レイノルズ数の大きい $Re=29000$ 以上では、臨界ギャップまではほぼ一定の $-C_{pb}$ をとり、臨界ギャップ前の上昇はゆるやかである。図6より、主円柱背圧の G/d に対する挙動はレイノルズ数に依存することが明らかである。図3や図4の比較的低いレイノルズ数と図5の高いレイノルズ数での $-C_{pb}$ の挙動の違いは、このようなレイノルズ数の効果によるものと思われる。

4. PIV 実験装置と測定法

PIV システムの概要を図7に示す。背圧測定から得られた各 Z/d での臨界ギャップ前後において、計測を行なう。対象とする流れ場は図1のような二円柱模型である。背圧測定と同じ直径 $d=15\text{mm}$ のアクリル円柱を使用した。シート光を円柱と直角に照射させ、主に上流円柱後流がシート光の範囲に入るように調節をした。平均流速は、背圧計測の時よりやや大きい $U=0.55\text{m/s}$ とし、この時 $Re=7.4 \times 10^3$ である。撮影は、デジタルクロスコリレーション CCD カメラ (630046 PIVCAM10-30) で行ない、Nd:YAG レーザー (MiniYAG, 最大 50mJ/pulse) でシート光を照射し、シンクロナイザー (610034) とフレームグラッパ (600067 High Speed Digital) により、パソコンにデータを取り込んだ。画像変換定数 $\alpha = 0.132[\text{mm/pixel}]$ から、カメラの解像度は、 $1008 \text{ pixel} \times 1018 \text{ pixel}$ (即ち視野範囲は $132.4 \times 134.5\text{mm}$) であった。データ解析は、Tecplot (Amtec 社製) で行ない、検査領域は $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ (即ち分解能は $4.2 \text{ mm} \times 4.2\text{mm}$)、パルス間隔は $500 \mu\text{s}$ とし、相互相関アルゴリズムで流速場を求めた。

5. PIV 実験結果

5.1 単独円柱での流れパターン

PIV 解析で渦度分布を求めた。単独円柱の結果を図8に示す。主流方向は、右から左である。実線部分は正

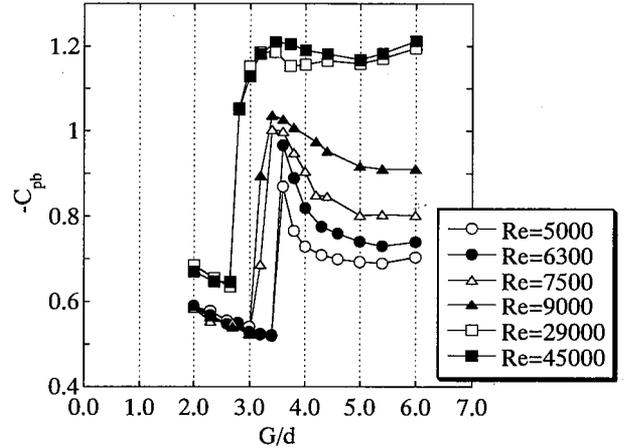


図6 風洞実験結果 ($Z/d=0.75$)

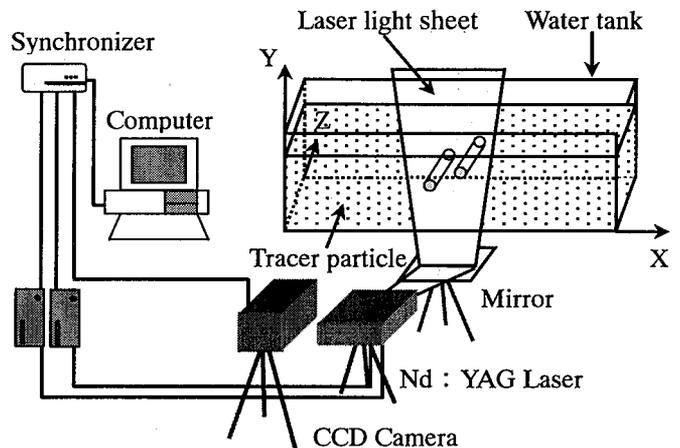


図7 PIV システム。

の渦度、破線部分は負の渦度を示している。剥離剪断層の干渉位置と上流円柱の関係を見るために上流円柱の中心線を引いた。図8(a)では上流円柱上側から剥離した剪断層 (実線) が下側から剥離した剪断層 (破線) を切断しようとしている。次に図8(b)では反対に下側から剥離した剪断層 (破線) が上側の剪断層 (実線) を切断しようとしている。このような流れパターンを周期的に繰り返すのが単独円柱の特徴である。渦形成領域の定義を上流円柱中心から、相互干渉する剥離剪断層の最も外側とすると、単独円柱の渦形成領域長さは約 $2.2d$ である (図8(a)参照)。また単独円柱での剥離剪断層の渦度は $\pm 25[1/\text{s}]$ 程で安定している。

5.2 対称配置 $Z/d=0$ の流れパターン

図9(a), (b)は対称配置 ($Z/d=0$) での臨界ギャップ前 ($G/d=4.8$) での結果である。単独円柱での流れパターンと同様であり、上下の剥離剪断層の渦度の強さも単

単独円柱と同等である。このときの渦形成領域長さは単独円柱の場合より伸張り $2.8d$ である。

臨界ギャップ後の位置 ($G/d=4.0$) での結果を図 9(c) に示す。臨界ギャップ後の流れパターンは、上下の剥離剪断層が、ほとんどまっすぐに伸び後流円柱の側面から乗り越える。渦度は下側の剥離剪断層が約 $17[1/s]$ になっている。

5.3 非対称配置 $Z/d=0.5$ の流れパターン

図 10 (a),(b)に非対称配置 ($Z/d=0.5$) の $G/d=5.0$ での流れパターンを示す。単独円柱での流れパターンと似ているが、渦形成領域長さが約 $3.0d$ と長くなっている。渦度は $2\sim3 [1/s]$ 程度単独円柱より弱い。図 10 (c),(d) は臨界ギャップ前 ($G/d=3.7$) の流れパターンである。単独円柱と似ているが、 $G/d=5.0$ と違い渦形成領域が短く約 $2.3d$ である。これは下流円柱の存在により、剥離剪断層の巻き込みが変位させられることが原因と考えられる。また上下の剥離剪断層の渦度の強く、その範囲が広い。上下の剥離剪断層の渦度は約 $\pm 30 [1/s]$ になり、上側の剥離剪断層の渦度は最大で約 $40[1/s]$ である。

図 10 (e),(f)は臨界ギャップ後 ($G/d=3.6$) の結果である。上下の剥離剪断層は下流円柱まで伸びており、上側の剥離剪断層は下流円柱にぶつかり上下に分岐する。この下方に分かれたものは下側の剥離剪断層と下流円柱の前でかろうじて相互干渉している。これは対称配置での臨界ギャップ後の流れパターンと類似している。上側の剥離剪断層の渦度は約 $20\sim 25[1/s]$ である。

図 10 (g), (h)は $G/d=2.2$ での流れパターンを示す。図 10(g)では、上側の剥離剪断層の渦度が弱く約 $16[1/s]$ になっている。これは上流円柱から剥離してすぐに下流円柱に剪断層の発達を阻害されたことが原因と考えられる。

図 10(h)では上側の剥離剪断層が下流円柱を越えるような渦度分布を示している。

5.4 非対称配置 $Z/d=1.0$ の流れパターン

図 11 (a),(b)に非対称配置 ($Z/d=1.0$) の $G/d=5.0$ での

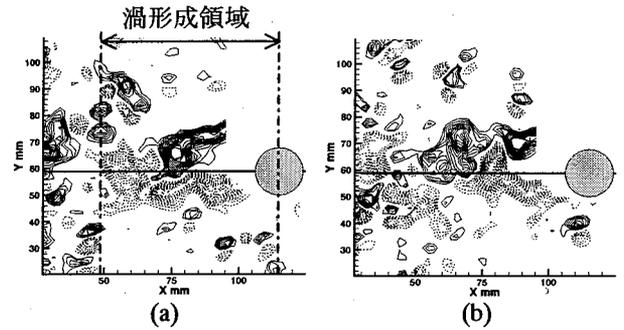
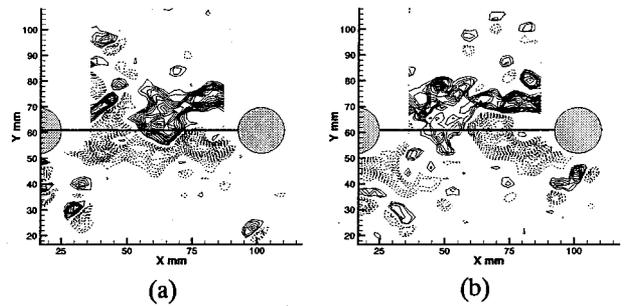
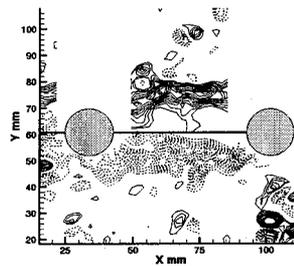


図 8 単独円柱の流れパターン。

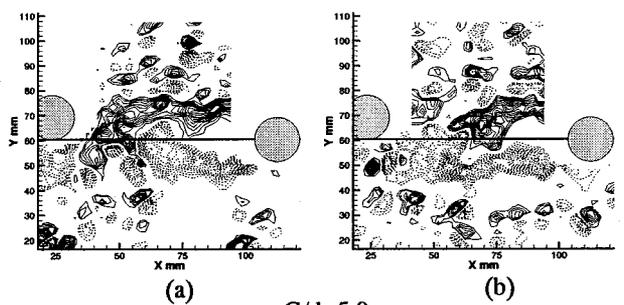


臨界ギャップ前 ($G/d=4.8$)

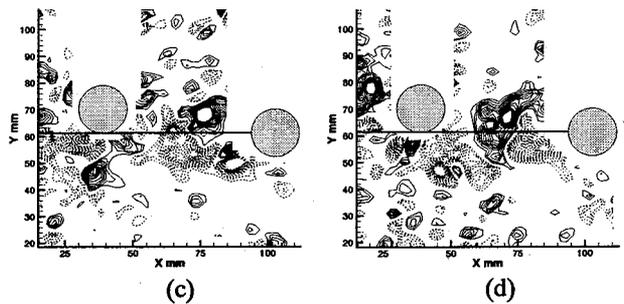


(c) 臨界ギャップ後 ($G/d=4.0$)

図 9 対称配置 $Z/d=0$ の流れパターン。



$G/d=5.0$



臨界ギャップ前 ($G/d=3.7$)

図 10 非対称配置 $Z/d=0.5$ の流れパターン。

流れパターンを示す。 $Z/d=0.5$ と同様に、渦形成領域が長く $3.0d$ 以上となっている。流れパターンは単独円柱と似ている。

図 11(c)~(f)に臨界ギャップ前($G/d=3.2$)の流れパターンを示す。この位置での流れパターンには2つのモードが現れた。ひとつは、 $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ前($G/d=3.7$)のように短い渦形成領域で相互干渉をするモード(図 11(c),(d))である。もうひとつは、上流円柱上側の剥離剪断層が $3d$ 程伸び、下流円柱の存在により下まで曲げられた後、相互干渉するモード(図 11(e),(f))である。これら2つのモードが間欠的に繰り返すものと思われる。それぞれの渦形成領域は前者が $2.5d$ 、後者が $3.0d$ である。またこのときの渦度は前者では $Z/d=0.5$ の時よりも大きい $30[1/s]$ で上側の剥離剪断層は最大で約 $50[1/s]$ になる。

臨界ギャップ後($G/d=2.6$)の流れパターンを図 11(g),(h)に示す。上側の剥離剪断層は、下流の干渉要素の存在により上側の剥離剪断層の発達が阻害されて、剥離剪断層の干渉位置が下流円柱の下方に変位する。剥離剪断層の渦度は $20[1/s]$ 以下の範囲が広い。

図 11(i),(j)はさらに近づいた $G/d=2.2$ での流れパターンを示す。臨界ギャップ後の $G/d=2.6$ と同様に上側の剪断層が下流円柱下側に流れ込んで弱い干渉を起こしている。渦度は臨界ギャップ後と同等である。

結論

円柱の後流に同一直径の円柱を非対称に配置して背圧の測定を行なった。水槽で臨界ギャップ前後の PIV 解析を行なった。

- 1) 下流円柱を充分遠方から上流に移動させる時、ある地点で臨界的な背圧の回復が見られる。 $Re=7.5 \times 10^3$ 辺りで臨界ギャップ前に $-C_{pb}$ の上昇が見られる。
- 2) 下流円柱が臨界ギャップに近づく時、レイノルズ数が比較的低い範囲 ($Re=5000 \sim 9000$) で臨界ギャップ前の $-C_{pb}$ の上昇が見られ、レイノルズ数が十分に大きい時 ($Re=29000$ 以降) は、ほぼ一定となる。すなわち $-C_{pb}$ の G/d にともなう変化

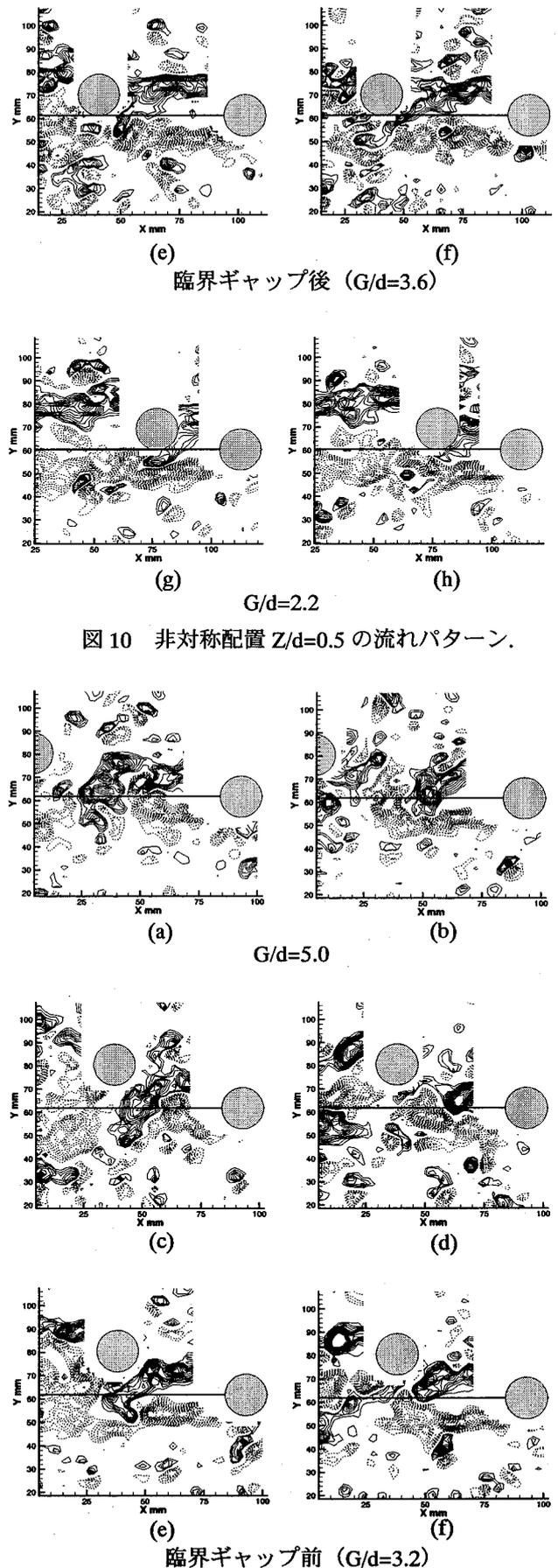


図 11 非対称配置 $Z/d=1.0$ の流れパターン。

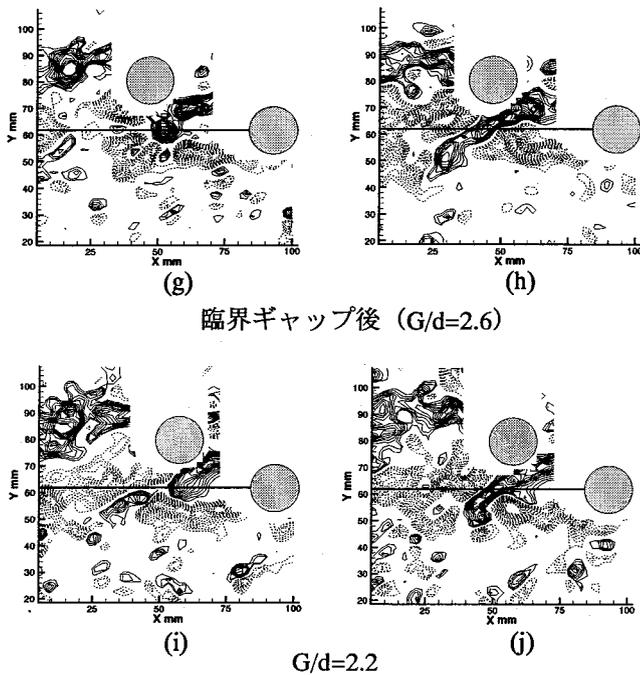


図 11 非対称配置 $Z/d=1.0$ の流れパターン.

はレイノルズ数に依存する

- 3) 二円柱模型を用いた水槽実験での PIV 解析で次のことがわかった
 - ① 対称配置 $Z/d=0$ では臨界ギャップ後は上下の剥離剪断層が下流円柱側面から乗り越え相互干渉が行なわれていない。ゆえに背圧が回復する。
 - ② 非対称配置 $Z/d=0.5$ では、臨界ギャップ前は充分遠方の時 ($G/d=5.0$) に比べ渦形成領域長さが短縮されて、渦の相互干渉位置が上流円柱に近づく。臨界ギャップ後は上側の剥離剪断層が下流円柱にぶつかり分岐して流れ、下流円柱の上流面下側で弱い剪断層の干渉がみられる。
 - ③ 非対称配置 $Z/d=1.0$ では $Z/d=0.5$ 同様、臨界ギャップ前は、充分遠方の時 ($G/d=5.0$) に比べ渦形成領域長さが短縮されて、渦の相互干渉位置が上流円柱に近づく。臨界ギャップ後は剥離剪断層の成長が干渉要素によって下流円柱の下方へ変位させられ渦放出が抑制されている。ゆえに背圧が回復したと考えられる。

謝辞

実験を進めるにあたって御協力いただいた、宮崎大学大学院工学研究科 2 年生の長友誠氏、加藤英明氏、

一木武次郎氏、同材料物理工学科 4 年生の松尾忠輝氏、小部康弘氏、大瀬裕子氏には深く感謝しております。

参考文献

- 1) A. Roshko: On the wake and drag of bluff bodies, *J. Aeronaut. Sci.* 22,124-132, 1955.
- 2) P. J. Strykowski and K. R. Sreenivasan: On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* 218, pp71-107, 1990.
- 3) S. Ozono, J. Oda, Y. Yoshida, Y. Wakasugi. : Critical nature of the base pressure of the upstream circular cylinder in two staggered ones in cross-flow, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 50, 335-340, 2001.
- 4) S. Ozono: Flow control of vortex shedding by asymmetrically arranged plates, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 49, 191-196, 2000.
- 5) S. Ozono: Flow control of vortex shedding by a short splitter plate asymmetrically arranged downstream of a circular cylinder, *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 10, 2928-2934, 1999.
- 6) S. Ozono: An anomaly of vortex shedding in the circular cylinder wake caused by stable stratification, *Proc. Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration (Annual Summer Meeting by ASME)*, Washington, D.C., USA, Paper No. 41, 1998.
- 7) Cao Shuyang, S. Ozono, K. Hirano: Vortex shedding from a circular cylinder placed in a linear shear flow at high Reynolds number, *IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations*, Marseille, France, 2000.
- 8) 小園茂平, 小田純子, 吉田保衡, 若杉康雄: 干渉要素によって変位を受ける後流の渦特性 宮崎大学工学部紀要, 第 30 号, 2001.
- 9) A. Nishi, H. Kikugawa, Y. Matsuda, D. Tashiro: Turbulence control in multiple-fan wind tunnels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 67 & 68, 1997, pp861-872.