

Vortex Dynamics in the Deflected Wake behind a Circular Cylinder

○小田純子（宮崎大工），小園茂平（宮崎大工），宮城弘守（宮崎大工）

Junko ODA*, Shigehira OZONO*, Hiromori MIYAGI*

*Dept. of Applied physics, Miyazaki University, Miyazaki 889-2192, Japan

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 .

1. はじめに

カルマン渦列が形成される後流は、実験的に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³⁻⁶⁾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、円柱後流には不連続に渦放出特性が変わる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。本論文の目的は上流に固定した円柱の背圧係数を計測し、“臨界ギャップ”を同定し、その前後の流れパターンを PIV 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

上部開放の鉛直回流型水槽を使用した。測定部は長さ 4.0m、幅 0.4m、高さ 0.6m であり、水深は 0.4m とした。主に使用した流速は $U=0.5\text{m/s}$ で、この時、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。

図 1 のように直径 15mm の透明アクリル製円柱を 2 本、水中に配置した。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流れ方向へ 250mm のアクリル製の端板で円柱を支持した。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スリットを設けた。

図 1 に示すように、上流円柱を固定し、下流円柱を鉛直位置 $Z/d=0, 0.5, 1.0$ のそれぞれに対し、遠方から徐々に上流円柱へ近づける。その過程の上流円柱の背圧係数 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。直径 0.5mm の背圧孔を、上流円柱の淀み点から 180° のスパン中央に開けた。円柱と L 型ピトー管からチューブで、微差圧計 (SSK DPL6-50) に圧力を導き、動歪計 (SSK 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は $Re=7.4\times 10^3$ であった。

2. 2 風洞実験

Re 数効果を調べるために水槽実験同様の計測を風洞で行なった。本実験に使われたマルチファン型風洞は、室内開放型押込式である。この風洞は本来は乱流生成用

に製作されたもので多数のファンで駆動されるが、全てのファンに定常命令を与えると一様流が生成される。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。水槽実験同様図 1 のように 2 本の円柱を配置し、背圧を測定した。 $Re=5000\sim 45000$ の範囲をカバーするため直径 25mm と 89mm のアクリル製円柱を 2 本ずつ使用した。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 の円柱のアスペクト比は 40.0、閉塞比は 1.4% である。直径 89mm の円柱のアスペクト比は 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。風洞実験では、下流円柱を鉛直位置 $Z/d=0.75$ に固定し実験を行なった。

2. 3 PIV 計測

臨界ギャップ前後における流れ場を比較するため PIV 解析を行なった。背圧測定と同じ水槽、同じ模型を使用した。シート光を円柱と直角に照射させ、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 $U=0.55\text{m/s}$ に設定し、 $Re=7.4\times 10^3$ であった。撮影は 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。カメラの解像度は、1008 pixel $\times$ 1018 pixel。後処理は、Tecplot (Amtec 社製) で行ない、検査領域は 32 pixel $\times$ 32 pixel、パルス間隔は 500 μs とし、相互相関アルゴリズムで流速場を求めた。

3. 実験結果

図 2 は、水槽実験で得られた G/d にともなう背圧の変化を示す。下流円柱を充分遠方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。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。

この原因を明らかにするため、風洞を用いて $Re=5000\sim 45000$ の範囲で背圧測定を行なった。図 3 は、いろいろなレイノルズ数について背圧係数 $-C_{pb}$ の G/d に対する変化を示す。 $-C_{pb}$ の上昇する勾配は Re 数が高くなるにつれ、ゆるやかになっている。臨界ギャップの位置は Re

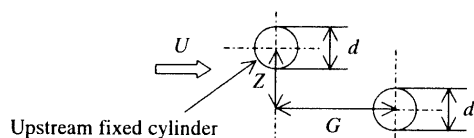


Fig.1 Schematic of the flow configuration

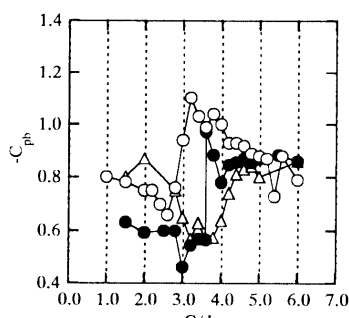
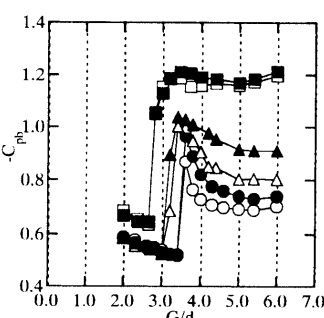
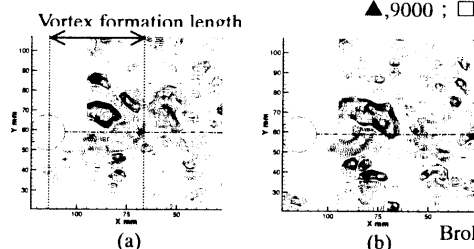
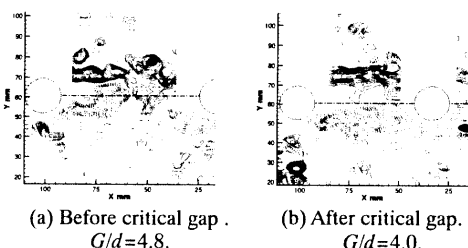
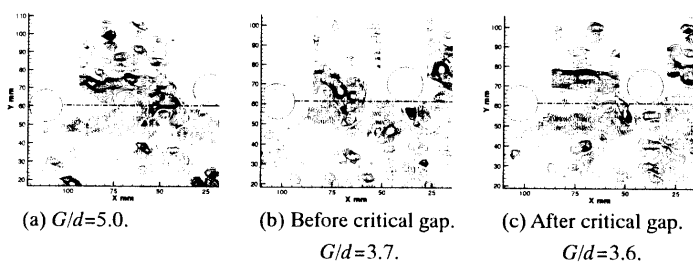
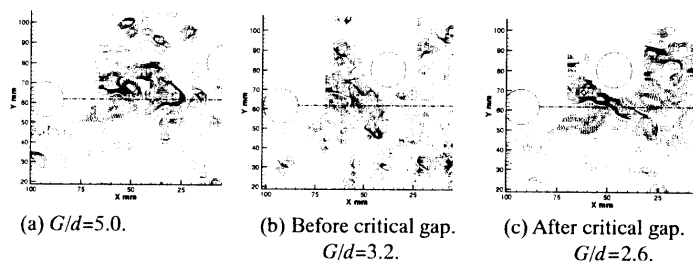
Fig.2 Variation of $-C_{pb}$ with G/d fromwater tank experiments ($Re=7.4 \times 10^3$). $\triangle Z/d=0$; $\bullet 0.5$; $\circ 1.0$ Fig.3 Variation of $-C_{pb}$ with G/d fromwind tunnel experiments ($Z/d=0.75$). $\circ Re=5000$; $\bullet 6600$; $\triangle 7500$
 $\blacktriangle 9000$; $\square 29000$; $\blacksquare 40000$ 

Fig.4 Vorticity distribution for a single cylinder.

Fig.5. Vorticity distribution for $Z/d=0$.Fig.6. Vorticity distribution for $Z/d=0.5$.Fig.7. Vorticity distribution for $Z/d=1.0$.

数が大きくなるにつれて、 G/d の小さい方へ移る。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一定の $-C_{pb}$ をとる。したがって水槽実験 ($Re=7.4 \times 10^3$) で得

られた臨界ギャップ前の $-C_{pb}$ の上昇はレイノルズ数効果によることが明らかである。

水槽での背圧計測結果に対応させて“臨界ギャップ”前後での PIV 解析を行ない渦度分布を求めた。単独円柱の流れパターンを図 4 に示す。図 4(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。図 4(b)では、上下の剥離せん断層の振る舞いは、反対になっている。単独円柱では、この流れパターンを周期的に繰り返す。渦形成領域の定義を上流円柱中心から、中心線を横切る剥離剪断層の最も外側とすると、単独円柱の渦形成成長さは約 $2.5d$ である (図 4(a)参照)。剥離剪断層の渦度は最大 $25[1/s]$ 程で安定している。

図 5 に対称配置 ($Z/d=0$) の流れパターンを示す。図 5(a)は $G/d=5.0$ の場合で、単独円柱の流れパターンと似ているが、渦形成成長さは単独円柱の場合より伸張し約 $3.1d$ である。渦度の強さは単独円柱と同等である。図 5(b)は臨界ギャップ後の結果である。上下の剥離剪断層が、ほとんどまっすぐに延び下流円柱の側面にぶつかり下流円柱背後で渦を放出するものと思われる。

図 6 に非対称配置 ($Z/d=0.5$) の流れパターンを示す。図 6(a)は $G/d=5.0$ の渦度分布である。この時の渦形成領域は長く約 $2.6d$ 以上である。図 6(b)に臨界ギャップ前での流れパターンを示す。渦形成成長さは約 $2.3d$ で単独円柱のそれに近いが、剥離剪断層の最大渦度は、約 $40[1/s]$ で単独円柱よりも大きい値を示している。図 6(c)に臨界ギャップ後の流れパターンを示す。下流柱の上流面下側で剪断層の弱い干渉がみられる。

図 7 に非対称配置 ($Z/d=1.0$) の流れパターンを示す。

$G/d=5.0$ から臨界ギャップ前までの流れパターンは $Z/d=0.5$ の時と似ている (図 7(a), (b))。臨界ギャップ前の渦形成成長さは約 $2.9d$ である。剥離剪断層の最大渦度は、約 $50[1/s]$ になる。臨界ギャップ後の流れパターンを図 7(c)に示す。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。

結論

i) 下流円柱が上流にシフトする時、レイノルズ数が $Re=5000 \sim 9000$ で臨界ギャップ前に $-C_{pb}$ の上昇が見られた。水槽実験 ($Re=7.4 \times 10^3$) の臨界ギャップ前の $-C_{pb}$ の上昇はレイノルズ数効果によることが判明した。

ii) $Z/d=0$ (対称配置) では上下の剥離せん断層が後流円柱にぶつかり 2 円柱を乗り越えて相互干渉するものと思われる。 $Z/d=0.5 \sim 1.0$ の過程では剥離せん断層と円柱とが出会う関係に応じて流れパターンが変化している。 $Z/d=1.0$ の臨界ギャップ後は上下の剥離せん断層の成長が干渉要素によって下流円柱の下方へ変位を強制されている。 $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ後は剥離せん断層の上方の一部が下流円柱を乗り越え残りが下方からの剥離せん断層と相互干渉しているように見える。

参考文献

- 1) A. Roshko: J. Aeronaut. Sci. 22, (1955) 124-132.
- 2) P. J. Strykowski and K. R. Sreenivasan: J. Fluid Mech. 218, (1990) 71-107.
- 3) S. Ozono, J. Oda, Y. Yoshida, Y. Wakasugi: Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 50, (2001) 335-340
- 4) S. Ozono: Theoretical and Applied Mechanics, Vol.49, (2000) 191-196.
- 5) S. Ozono: Phys. Fluids, Vol. 11, No. 10, (1999) 2928-2934.