

円柱放出渦と非対称配置仕切板の干渉のPIV解析

小園 茂平¹⁾・岩切 広志²⁾・小田 純子³⁾

PIV Analysis of the Interaction between Vortex Shedding and a Splitter plate

Shigehira OZONO, Hiroshi IWAKIRI, Junko ODA

Abstract

The wake dynamics behind a circular cylinder (diameter d) is investigated using a water tank at $Re=1.12 \times 10^4$. A long splitter plate with a chord length of $6d$ is inserted in the wake as an interference element. Attention is made to a discontinuity of the wake dynamics, when the plate is traversed upstream horizontally at several levels. As the plate is shifted upstream, the base suction coefficient increases gradually, until it falls critically. Details of the vortex formation process and its correspondence to the change in base pressure were addressed by PIV (particle image velocimetry).

Key Words:

Splitter plate, Critical gap, PIV analysis, Strouhal number, Kármán Vortex Street

1. はじめに

円柱を流れの中に置き、レイノルズ数を充分大きくすると、後流にカルマン渦列が発生する。この後流渦は橋梁などの構造物に有害な振動や騒音を引き起こす原因となる。後流渦はまた抵抗の原因でもある。渦放出を抑制することは“流れの制御”の大きなテーマである。渦放出を抑制するにはいろいろな方法が試みられており、大きく分けてパッシブな(静的な)制御とアクティブな(動的な)制御とがある。本論文では干渉要素として仕切板を使用し、パッシブな制御を試みた。

Roshko¹⁾は短い仕切板を円柱後流中心線上でトラバースし、渦放出特性の臨界的な挙動を明らかにした。Ozono²⁾は短い仕切板を非対称配置しても臨界的

な挙動が現れることを示した。しかし、流れ構造との対応はいまだ正確にわかっていない。

本論分の目的は比較的長い仕切板を用いて臨界ギャップを同定し、後流での流れをPIV解析し、どのような規模でこの臨界的变化が生じるかを考察することである。

2. 実験方法

2.1. 水槽の概要

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4000mm、断面幅400mm、高さ600mmである。水深は400mmに設定した。流れはインペラーによって駆動され、流速は0.09~1.00m/sまで制御可能である。流速を一様にするためインペラーの回転数に応じて水面の流速をローターで加速させている。表面波を抑制するために制波板が設置してある。水面および壁から50mm以上離れたコア領域での乱

1) 材料物理工学科助教授

2) 材料物理工学科4年

3) 物質工学専攻大学院生

れの強さ ($I = \sqrt{u^2} / U$; u , 変動流速 ; U , 平均流速) は 1.0% 以下である。

2.2. 実験の概要

実験状況を図1に示す。円柱は透明アクリル製パイプ (直径 $d=25\text{mm}$, 肉厚 2mm), 干渉要素にはステンレス製仕切板 (弦長 $6d$, 厚さ 1.5mm) を使用した。流れの2次元性を確保するために, 縦 600mm , 横 250mm のアクリル製端板で円柱を支持した。有効スパン長は 300mm でアスペクト比は 12.0 であった。測定部の入り口から 1340mm の位置に円柱中心を設置した。端板の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ている。円柱と仕切板の相対位置を表わすために, 円柱中心から仕切板先端上面角までの水平距離を G , 鉛直距離を Z とした。以下の説明の便宜のため, 円柱の剥離剪断層 T を上側, B を下側と呼ぶ。全ての計測において, 水槽の平均流速は, $U=0.5\text{m/s}$ であり, 円柱の直径 d に基づくレイノルズ数は $Re=1.12 \times 10^4$ であった。単独円柱の閉塞率は 6.25% であったが, 背圧やストローハル数の補正は行っていない。

2.3. 背圧の計測

端板に円柱を固定し, $Z/d=0.5, 1.0$ のそれぞれの場所で仕切板を下流遠方から徐々に近づけたときの背圧係数 C_{pb} を測定した。背圧係数 C_{pb} は以下のように定義される。

$$C_{pb} = 2(P_b - P_\infty) / \rho U^2$$

(P_b , 背圧 ; P_∞ , 基準圧 ; ρ , 水の密度)

背圧計測のため, 円柱の淀み点から 180° のスパン中央に背圧測定用の直径 0.5mm の背圧孔を開けた。静圧計測用の L 型ピトー管 (岡野製作所, LK-00) は円柱後流渦への影響を抑えるため, 十分上流に設置し基準の静圧と動圧を定めた。円柱と L 型ピトー管から圧力を微差圧計 (エス・エス・ケイ, DPL6-50) に導き, 動歪計 (エス・エス・ケイ, M-1101) で増幅してデータ収集システム (KEYENCE 社 NR-2000) に出力した。

2.4. ストローハル数の計測

ストローハル数の計測に用いた熱線プローブ (KANOMAX 社 CTA1011) は図1に示すように, 円柱

中心から水平方向に $3d$, 鉛直方向に $1d$ の位置に設置した。熱線流速計で信号を校正した後, データ収集システム (KEYENCE 社 NR-2000) に出力した。このデータを FFT 解析しパワースペクトルを求め, 卓越周波数を同定した。ストローハル数の定義は次の通りである。

$$S_t = f_v d / U$$

(f_v , 渦放出周波数 ; U , 平均流速)

2.5. PIV 実験装置と測定法

TSI 社製 PIV システムを使用して二次元 PIV 計測を行なった。背圧測定から得られた各 G/d での臨界ギャップ前後において計測を行なった。PIV システムの概要を図2に示す。円柱には背圧測定と同じ直径 $d=25\text{mm}$ 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た時, 円柱後流がシート光の範囲に入るように機器の配置を調節した。

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 HighSpeedDigital) により, パソコンにデータを取り込んだ。画像変換定数 $\alpha = 0.134[\text{mm/pixel}]$ よりカメラの解像度は, $1008\text{pixel} \times 1018\text{pixel}$ (即ち視野範囲は $135.1 \times 136.4\text{mm}$) であった。トレーサ粒子は水との比重差が少なく流れの変動によく追従する不定形のナイロンパウダー (粒径 $65 \mu\text{m}$ 以下) を使用した。

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 $4.3\text{mm} \times 4.3\text{mm}$), 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。平均流線は 450 コマの一連の速度場を平均して求めた。

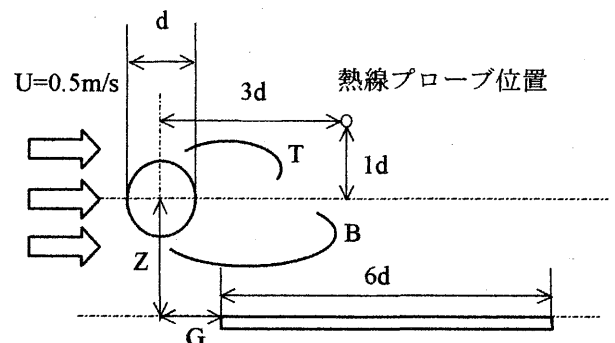


図1 実験状況

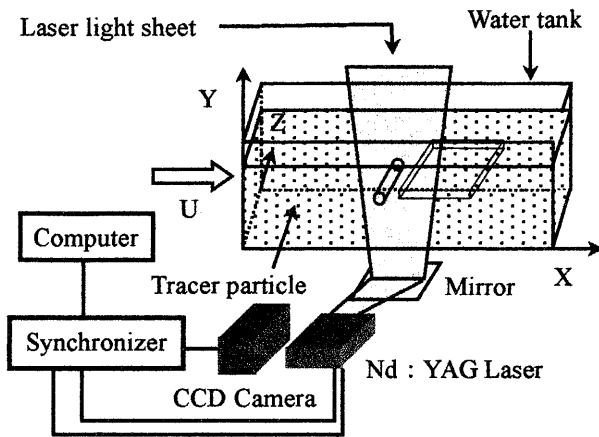


図2 PIVシステム.

3. 実験結果と考察

3.1. 背圧

図3はG/dに対する背圧の変化を示している。充分遠方から徐々に仕切板を円柱に近づけて行く時、最初全てのZ/dでC_{pb}は序々に低下する。ところがあるG/dで背圧が急激に回復する地点がある。このような位置を本論文では“**臨界ギャップ**”と呼ぶ。臨界ギャップは鉛直方向Zが大きくなるにつれてG/dの小さな位置へと移動していることに注目されたい。

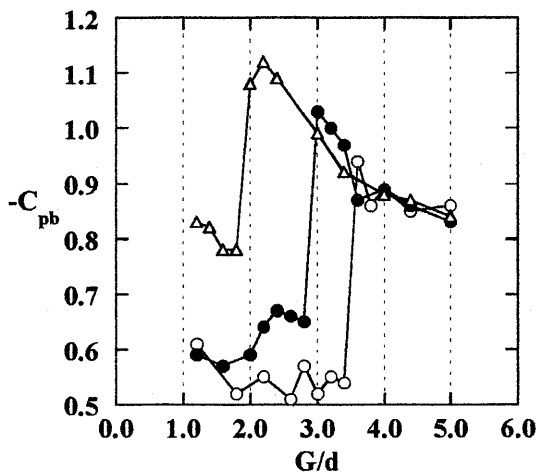


図3 背圧計測 (Re=1.12×10⁴)

○, Z/d=0; ●, Z/d=0.5; △, Z/d=1.0

3.2. ストローハル数

図4はG/dに対するストローハル数の変化を示している。図4の矢印は臨界ギャップのG/dの位置を示している。臨界ギャップ前において、ストローハ

ル数は各Z/dともに0.18~0.19を示す。これは単独円柱のストローハル数とほぼ同じ値を示している。臨界ギャップ後のZ/d=0,0.5では渦放出を示すピークがノイズレベル以下になり、ストローハル数を定めることができなかった。しかし、Z/d=1.0では臨界ギャップ後も渦放出を示すピークが同定できた。また仕切板が円柱に接近するにつれて、ストローハル数が上昇する傾向があった。

図5はG/dに対するパワースペクトルのピーク値の変化を示す。ピーク値は臨界ギャップ位置において各Z/dとも低下したが、非対称配置であるZ/d=1.0においては仕切板をさらに近づけていくと増加する傾向があった。

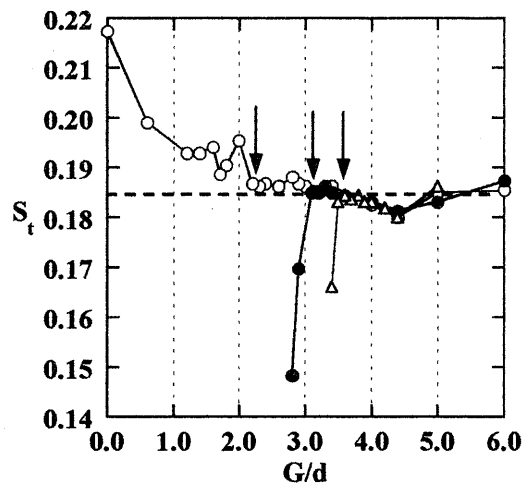


図4 ストローハル数計測 (Re=1.12×10⁴)

○, Z/d=0; ●, Z/d=0.5; △, Z/d=1.0

矢印は臨界ギャップ位置を示す。

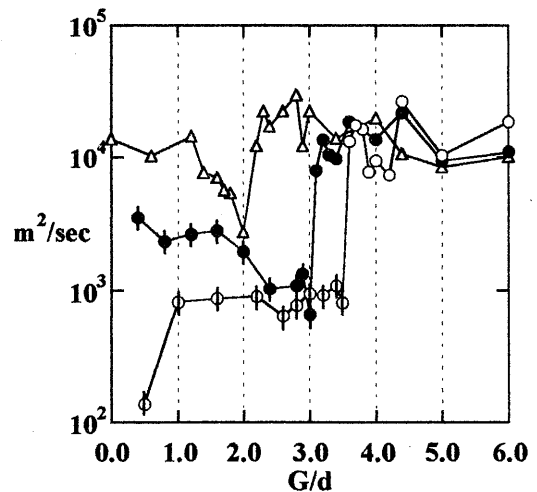


図5 パワースペクトルのピーク値 (Re=1.12×10⁴)

○, Z/d=0; ●, Z/d=0.5; △, Z/d=1.0

⊙, ●はノイズにより有意なデータではない。

3.3. PIV 実験結果

3.3.1. 単独円柱での流れパターンと渦形成長さ

単独円柱後流の渦度分布を図6(a),(b)に示す。図6(a)では円柱上側からの剥離剪断層が下側からの剥離剪断層を切断しようとしている。反対に図6(b)では下側からの剥離剪断層が上側の剥離剪断層を切断しようとしている。このように上下からの剥離線断層が相互干渉を周期的に繰り返すのが単独円柱後流の特徴である。

平均流線を図6(c)に示す。渦形成長さ L の定義を円柱中心から発達する剥離剪断層が後流中心線を横切る位置までの外側とする。単独円柱の渦形成長さは約 $2.7d$ であった。

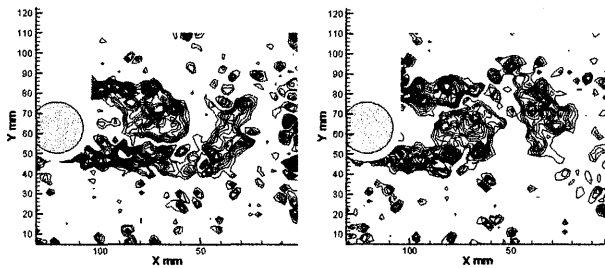


図 6(a) 図 6(b)
単独円柱後流の瞬間渦度分布

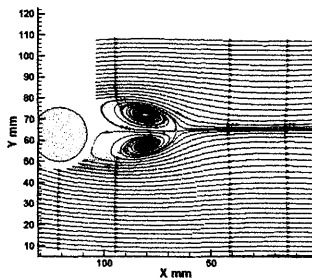


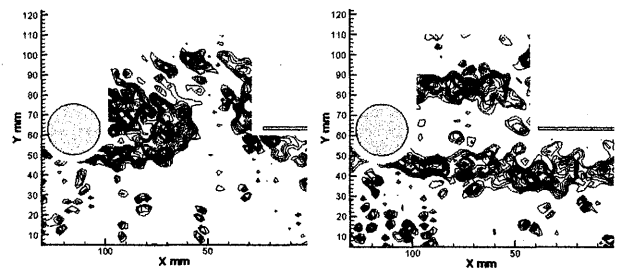
図 6(c) 単独円柱後流の平均

3.3.2. $Z/d=0$ の場合の流れパターン (対称配置)

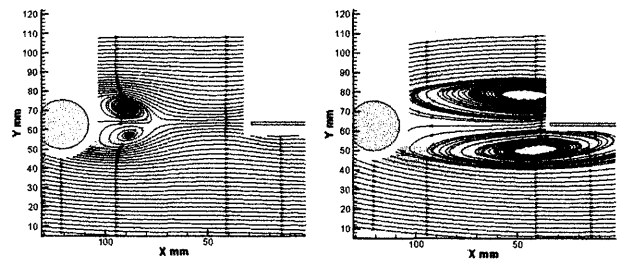
$Z/d=0$ の臨界ギャップ前後の渦度分布を図7(a), 平均流線を図7(b)に示す。まず, 臨界ギャップ前の流れの様子を述べる。仕切板が下流遠方にあるときは単独円柱(図6(c))と同様だが, 円柱に近づくとつれ, 剥離剪断層の相互干渉位置も円柱に近づいた。すなわち仕切板が円柱に近づくとつれ, 渦形成長さは小さくなった。臨界ギャップ寸前の渦形成長さは約 $2.2d$ になった。この結果, 円柱後流渦の巻き込みは強くなり, 後流渦中心の低圧化が起き, 図3で示す

ような背圧係数 C_{pb} の低下が起こる。

臨界ギャップ後は仕切板の存在により二つの剥離剪断層が分断され, 相互干渉を阻害された剥離剪断層は下流遠方まで伸びた。これにより渦放出が阻止され, その結果, 臨界的な背圧の回復とストローハル数の消失, パワースペクトルのピーク値の低下が見られた。平均流線の循環領域は下流に対称に長く伸びており, 相互干渉が仕切板により阻止されたことをよく表わしている。



臨界ギャップ前 臨界ギャップ後
図 7(a) 瞬間渦度分布 ($Z/d=0$)



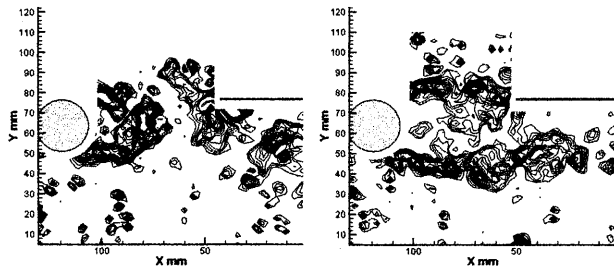
臨界ギャップ前 臨界ギャップ後
図 7(b) 平均流線 ($Z/d=0$)

3.3.3. $Z/d=0.5$ の場合の流れパターン (非対称配置)

$Z/d=0.5$ の臨界ギャップ前後の渦度分布を図8(a), 平均流線を図8(b)に示す。臨界ギャップ前は, 単独円柱の場合と同様に円柱からの上下の剥離剪断層が相互干渉をしている。対称配置 $Z/d=0$ の場合と同様, 仕切板が近づくとつれ, 剥離剪断層の相互干渉位置も円柱に近づいた。臨界ギャップ寸前の渦形成長さは約 $1.7d$ になった。

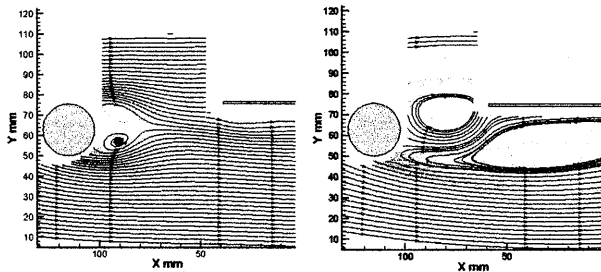
臨界ギャップ後は, 下側の剥離剪断層は下流遠方まで伸びているが, 上側の剥離剪断層は仕切板にぶつかり, 円柱と仕切板の間で渦を巻き, 下側の剥離剪断層と相互干渉を起こすが, 渦の巻き込みは非常に弱い。臨界ギャップ直後の渦形成長さは約 $2.7d$ になった。平均流線もこのような流れ模様になること

を支持している。



臨界ギャップ前 臨界ギャップ後

図 8(a) 瞬間渦度分布 ($Z/d=0.5$)



臨界ギャップ前 臨界ギャップ後

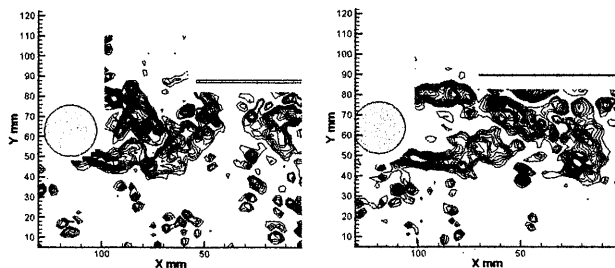
図 8(b) 平均流線 ($Z/d=0.5$)

3.3.4. $Z/d=1.0$ の場合の流れパターン (非対称配置)

$Z/d=1.0$ の臨界ギャップ前後の渦度分布を図 9(a), 平均流線を図 9(b)に示す。

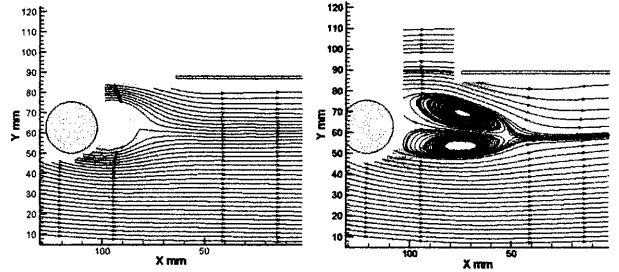
臨界ギャップ前は $Z/d=0.5$ と同じく, 円柱からの上下の剥離剪断層が相互干渉をしている。臨界ギャップ寸前の渦形成長さは約 $2.0d$ になった。

臨界ギャップ後は, 上側の剥離剪断層が仕切板の下部側に変位され, 剥離剪断層の相互干渉は直接には阻害されなかったが, 渦形成長さは約 $3.7d$ に伸長した。図 9(b)の平均流線によって相互干渉位置は下流に移動し, 後流は下側へ変位されることが分かる。



臨界ギャップ前 臨界ギャップ後

図 9(a) 瞬間渦度分布 ($Z/d=1.0$)



臨界ギャップ前

臨界ギャップ後

図 9(b) 平均流線 ($Z/d=1.0$)

各 G/d に対する渦形成長さを図 10 に示す。臨界ギャップ前では仕切板が円柱に近づくにつれ渦形成長さが減少する。 $Z/d=1.0$ では臨界ギャップ $G/d \sim 2.0$ で渦形成長さが急に大きくなり, その後は仕切板の円柱への接近と共に比例的に減少している。 $Z/d=0.5$ では渦の巻き込みが弱く, 臨界ギャップ後は渦形成長さを定めにくい。仕切板先端の少し上流で上側の剥離剪断層が渦を巻くので, 結果的に渦形成長さは G/d にほぼ比例することになった。

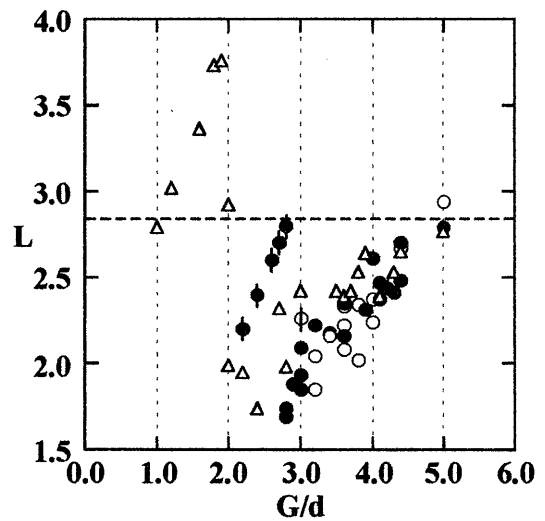


図 10 渦形成長さ ($Re=1.12 \times 10^4$)

○, $Z/d=0$; ●, $Z/d=0.5$; △, $Z/d=1.0$

⊙, ● は有意なデータではない。

4. 結論

円柱後流に仕切板をいろいろなレベルで配置し, 充分遠方から序々に上流へシフトさせ, その渦放出特性を PIV 解析で調べることににより, 次のことがわかった。

- 1) $Z/d=0$ (対称配置)において、剥離剪断層が仕切板の存在により相互干渉ができなくなり、渦放出が抑制された。
- 2) $Z/d=0.5$ (非対称配置)では、上側の剥離剪断層が仕切板にぶつかり、その成長が抑制される。下側の剥離剪断層は仕切板に沿って伸長する。
- 3) $Z/d=1.0$ (非対称配置)では剥離剪断層が仕切板の下部側に変位され、臨界ギャップ後の上側剥離剪断層は仕切板下部に沿って流れることにより相互干渉位置が下流へ移動し、その結果、背圧の回復がみられた。
- 4) 臨界ギャップ位置において対称配置、非対称配置ともパワースペクトルのピーク値の低下が見られた。さらに仕切板を近づけていくと相互干渉のでき

ない対称配置 ($Z/d=0$) は低下したままであるが、相互干渉を阻害しきれない非対称配置ではピークな値の回復が見られた。

謝辞

大瀬裕子氏には、実験の援助を賜りここに深く感謝いたします。宮城弘守助手には、貴重なご助言を頂き、ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) A. Roshko, "On the wake and change of bluff bodies", *J. Aeronaut. Sci.*, 22, 124-132(1955)
- 2) 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(1999)