

4 PIVによる主円柱後流の観察

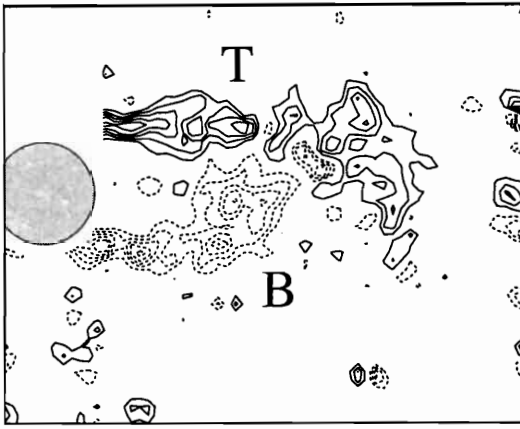
4.1 はじめに

本章では、背圧、ストローハル数の測定と同じ水槽、模型、実験状況でPIV計測を行なう。PIV計測で得られた瞬間および平均渦度分布、平均流線などから以下の項目を考察する。

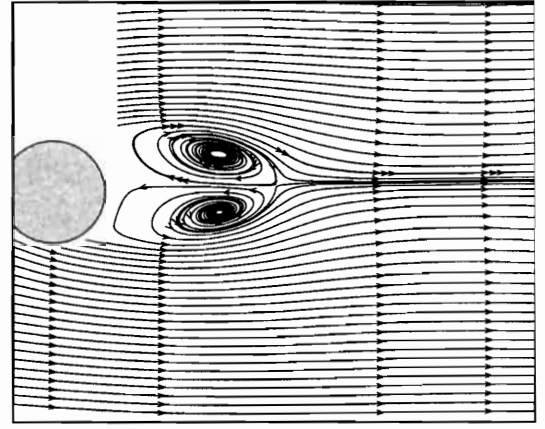
1. 干渉要素のない単独円柱からの剥離剪断層の相互干渉の特徴を述べる。
2. 仕切板と二円柱のケースの典型的な流れパターンを各レベルの臨界ギャップ前後で観察し、主円柱後流の渦の放出の様子がどのように変化するかを調べる。
3. 両ケースについて平均流線により、主円柱からのウェイクキャビティの形状、サイズなどを調べる。
4. 渦形成長さはいろいろな定義があるが、ここでは3種類の定義で渦形成長さを求めて比較検討する。次いで、主流速度変動のr.m.s.値から求めた両ケースの渦形成長さの G/d に対する変化を調べる。
5. 臨界ギャップの空間トレースから、両ケースの渦の臨界的挙動の機構を議論する。

4.2 単独円柱のケースでの流れパターン

図25は単独円柱後流の瞬間渦度分布と平均流線を示す。瞬間渦度分布は全て実線が負の渦度、点線が正の渦度を示す。渦度の範囲は $\pm 6 \sim \pm 30$ [1/s]であり、増加分は6 [1/s]である。瞬間渦度分布は、剪断層Tが剪断層Bに切断され渦が放出される瞬間を示している。よく知られているように上下面から対等にこのような渦放出を周期的に繰り返すのが単独円柱後流の特徴である [24]。



Vorticity distribution



Averaged streamlines

図 25: Vorticity distribution for the single cylinder case. Vorticity ranges ± 6 to ± 30 [1/s], contour increment 6 [1/s]. Solid lines represent negative vorticity; dashed lines represent positive vorticity.

4.3 仕切板のケースでの流れパターン

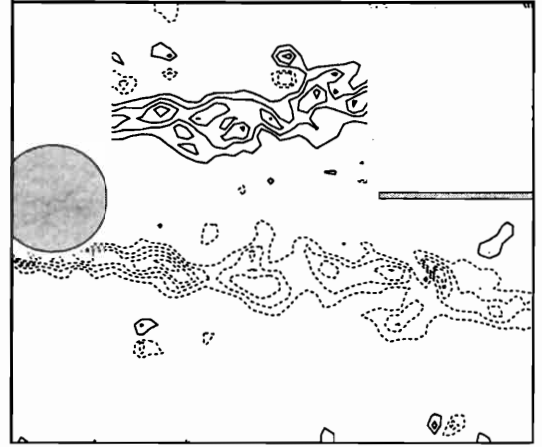
4.3.1 対称配置 $Z/d = 0$

$Z/d=0$ の臨界ギャップ前後の流れ場を図 26, 27 に示す。臨界ギャップ前は、仕切板が下流遠方にあるとき、単独円柱のケース (図 25) と同様の流れパターンだが、仕切板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ているように見える。これは平均流線のウェイクキャビティの長さが単独円柱のケースに比べて短いことから分かる。ここでは、剥離剪断層の相互干渉とは、物体の一方から剥離した剪断層が次第に他方の剪断層をひきつけながらも渦度の供給を断ち切られ、渦を下流へ放出する過程を指している。また相互干渉位置とは、このような干渉を行ないながら渦をさかんに生み出す位置を指す [24].

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、遠方下流まで伸びている。これにより背圧が臨界的に回復し、ストローハル数を定義できなくなったものと思われる。平均流線のパターンも瞬間渦度のパターンと同様、再循環領域が下流に対称に長く伸びている。

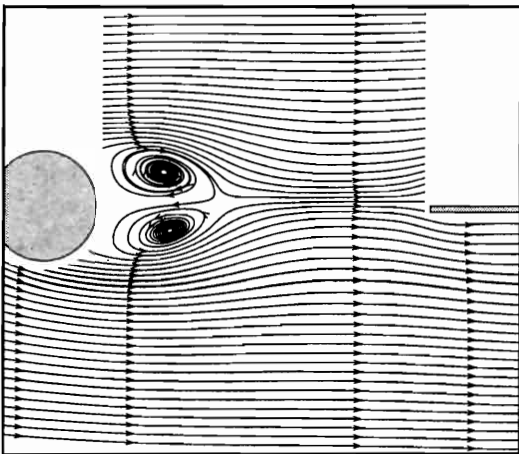


Pre-critical régime $G/d=3.6$

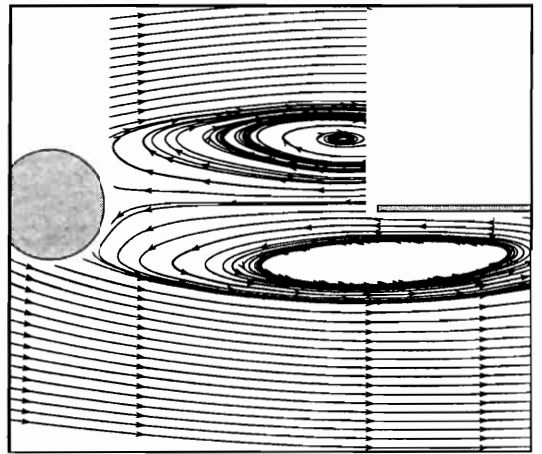


Post-critical régime $G/d=3.0$

☒ 26: Vorticity distribution for $Z/d=0$.



Pre-critical régime $G/d=3.6$



Post-critical régime $G/d=3.0$

☒ 27: Averaged streamlines for $Z/d=0$.

4.3.2 非対称配置 $Z/d = 0.5$

$Z/d=0.5$ の流れ場を図 28, 29 に示す。臨界ギャップ前の瞬間渦度分布から、仕切板が円柱に近づくとつれて剪断層 T の巻き込む曲率が増しながら剪断層 B と相互干渉することが分かる。

臨界ギャップ後の流れの様子は、剪断層 B が下流までほぼ水平に長く伸びている。剪断層 T は一部が仕切板の上部へ流れ、仕切板下部への流れは、円柱と仕切板の間で渦を巻き、剪断層 B と相互干渉を起こす。しかし渦の巻き込みは非常に弱い。平均流線によると、円柱と仕切板先端間の距離 G 程度の水平スケールを持つ剪断層 T を起源とする再循環領域が形成され、この下側に他方の縮小された再循環領域が見られる。これらの再循環領域の形状はかなり異なっており、臨界ギャップ後はもはや上下の渦放出が対等でないことを示している。

4.3.3 非対称配置 $Z/d = 1.0$

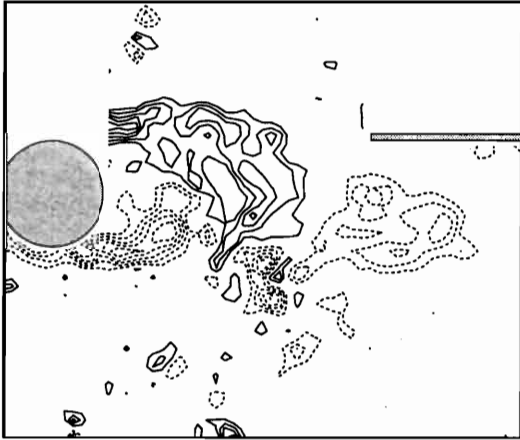
$Z/d=1.0$ の流れ場を図 30, 31 に示す。臨界ギャップ前は、 $Z/d=0.5$ のときと同様に仕切板の接近とともに剪断層 T の曲率が増している。

臨界ギャップ後は、剪断層 T が仕切板の下面に沿って流れ、比較的遠方下側で剪断層 B と相互干渉している。渦の鉛直運動は仕切板によって抑制されている。この流れパターンが図 20 の $G/d \leq 2.0$ のストローハル数の上昇に対応している。平均流線の上下の再循環領域は、わずかに下側に傾いているがほぼ対称である。平均流線のウェイクキャビティの水平スケールは G よりもかなり大きく伸長し、 $Z/d=0.5$ の場合とはこの点で異なる。

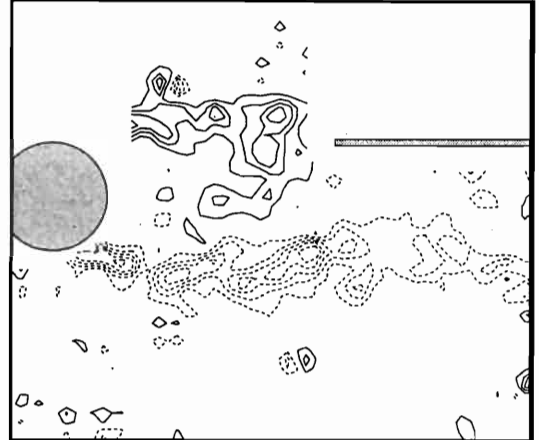
4.4 二円柱のケースの流れパターン

4.4.1 対称配置 $Z/d = 0$

$Z/d=0$ の流れ場を図 32, 33 に示す。臨界ギャップ前は、副円柱の手前で上下の剪断層が直接に相互干渉するモードと剥離剪断層が副円柱を乗り越えるモードが混在した。しかも

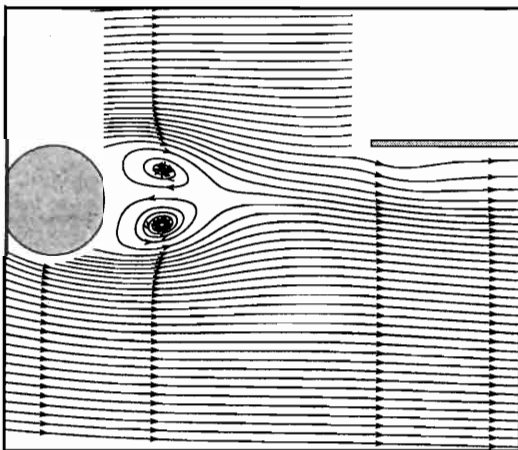


Pre-critical régime $G/d=3.0$

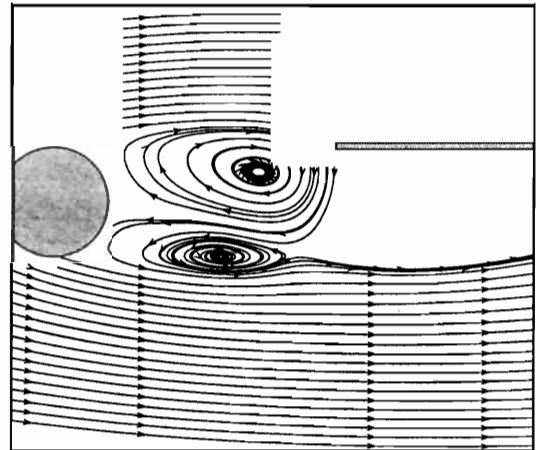


Post-critical régime $G/d=2.6$

⊠ 28: Vorticity distribution for $Z/d=0.5$.

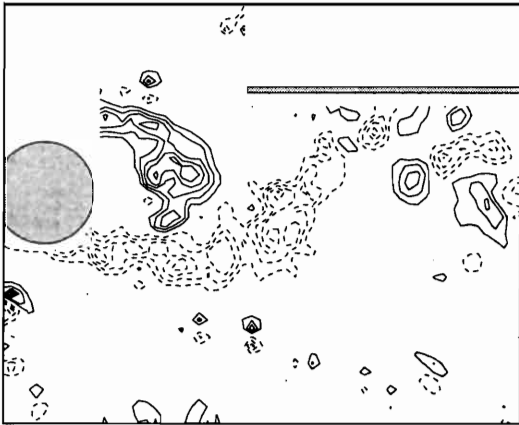


Pre-critical régime $G/d=3.0$

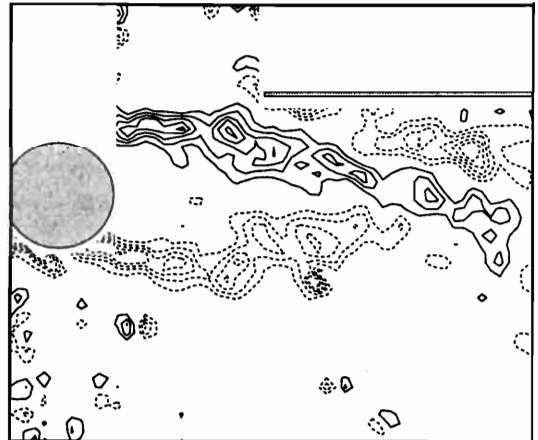


Post-critical régime $G/d=2.6$

⊠ 29: Averaged streamlines for $Z/d=0.5$.

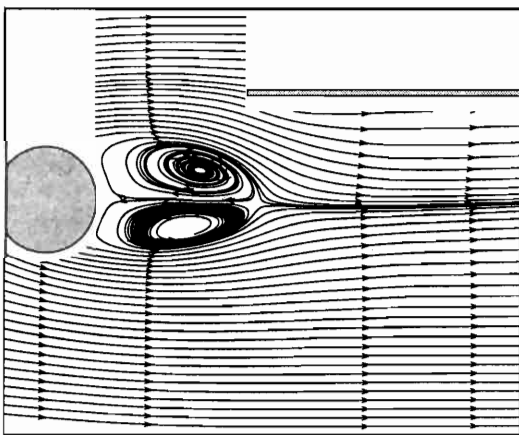


Pre-critical régime $G/d=2.0$

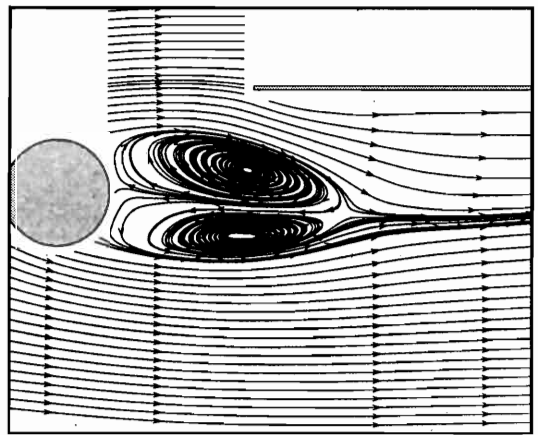


Post-critical régime $G/d=1.9$

☒ 30: Vorticity distribution for $Z/d=1.0$.



Pre-critical régime $G/d=2.0$



Post-critical régime $G/d=1.9$

☒ 31: Averaged streamlines for $Z/d=1.0$.

二つのモードは間欠的に切り替わり、双安定であることが観察された [9].

臨界ギャップ後は、上下の剥離剪断層が副円柱を乗り越えた後、相互干渉を行なっている。平均流線は副円柱に至るまでは仕切板のケースの $Z/d=0$ と類似している。

4.4.2 非対称配置 $Z/d = 0.5$

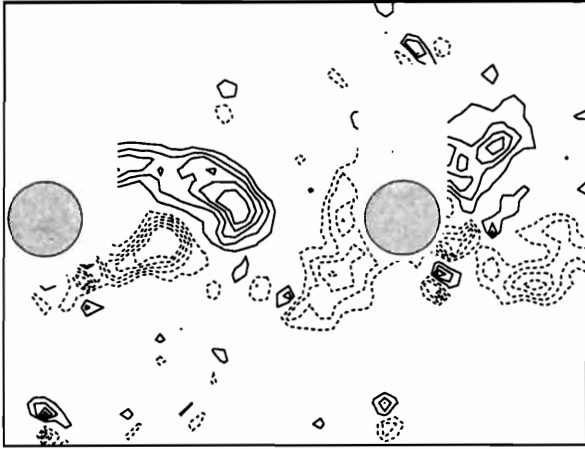
$Z/d=0.5$ の流れ場を図 34, 35 に示す。臨界ギャップ直前の干渉位置は、単独円柱のそれより主円柱に近づく。平均流線は剪断層 T が副円柱の存在によりわずかに下方への変位を強制されるものの、どうにか対称を保っている。

臨界ギャップ後では、上下の剥離剪断層は副円柱直前までまっすぐに伸び、剪断層 T は副円柱にぶつかり、一部は円柱上面を越えて流れるが大部分は下方に変位を強制され剪断層 B と副円柱の前で弱い相互干渉をしている。これは Gu *et al.* [10] の II_B パターン、Sumner *et al.* [11] の IS(Induced Separation) パターンに相当すると思われる。主円柱後流の平均流線に着目すると、両円柱の間隙程度のスケールを持つ剪断層 T による再循環領域が形成され、下側に縮小された再循環領域が見られる。これは仕切板のケースの $Z/d=0.5$ と類似している。

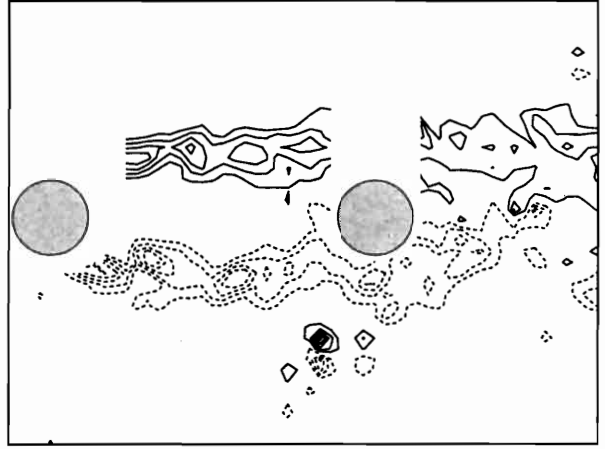
4.4.3 非対称配置 $Z/d = 1.0$

$Z/d=1.0$ の流れ場を図 36, 図 37 に示す。臨界ギャップ直前は、主円柱と副円柱の剪断層 T と T', 剪断層 B と B' が同期する。平均流線は副円柱の存在によってわずかに下方へ変位しているがほぼ対称である。

臨界ギャップ後では、剪断層 T は剥離直後から下方へ変位を受け始める。剪断層どうしの相互干渉位置は副円柱真下に移動する。二円柱間では、剪断層 T と副円柱の剪断層 B' が並行して流れ、ジェット状の加速した流れが周期的に観察され、画像から見積もられる周波数を f_J とすると $f_J \times d/U \sim 0.2$ で単独円柱の St 数と同程度である。この加速流は仕切板のケースの $Z/d=1.0$ でも見られるが、二円柱のケースの $Z/d=1.0$ で最も顕著に現われた。このパターンは Gu *et al.* [10] の III_B パターン、と Sumner *et al.* [11] の VPE, VPSE(Vortex

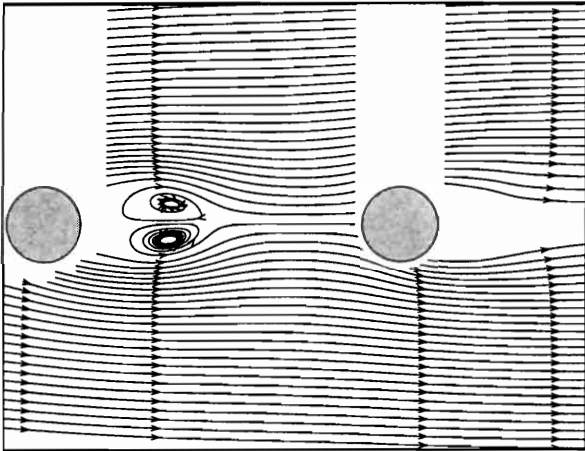


Pre-critical régime $G/d=4.8$

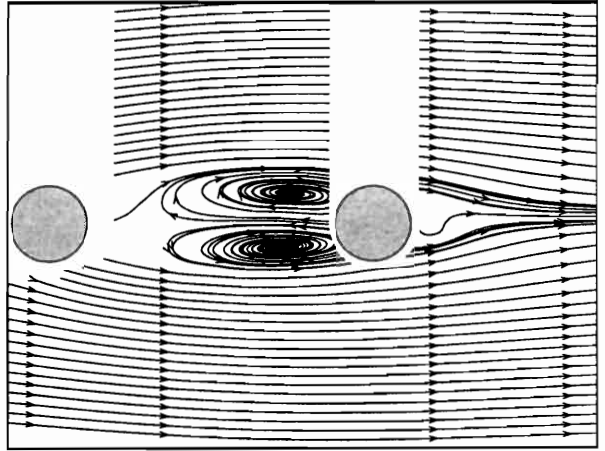


Post-critical régime $G/d=4.3$

☒ 32: Vorticity distribution for $Z/d=0$.

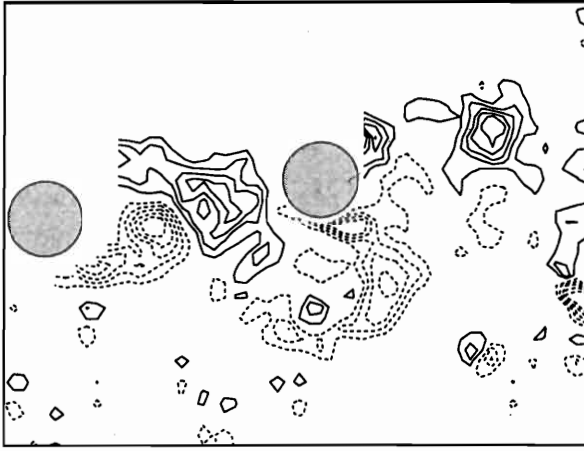


Pre-critical régime $G/d=4.8$

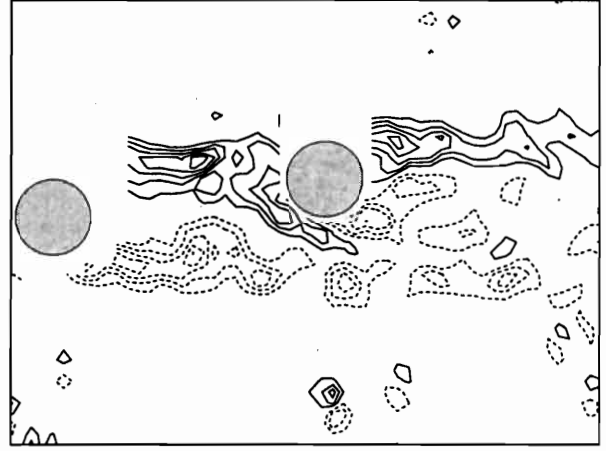


Post-critical régime $G/d=4.3$

☒ 33: Averaged streamlines for $Z/d=0$.

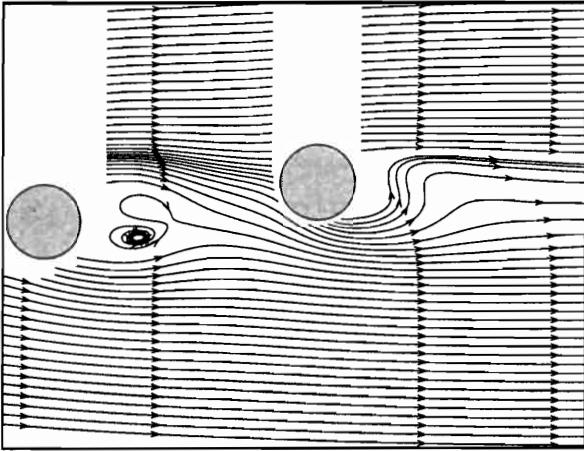


Pre-critical régime $G/d=3.7$

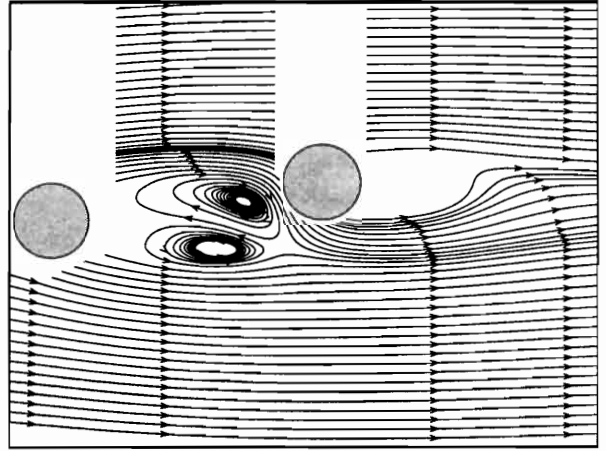


Post-critical régime $G/d=3.6$

☒ 34: Vorticity distribution for $Z/d=0.5$.

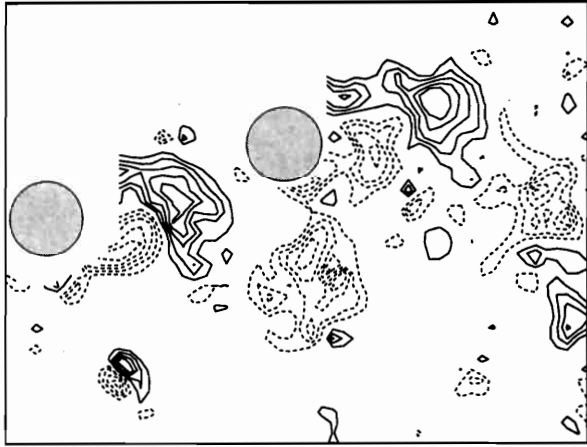


Pre-critical régime $G/d=3.7$

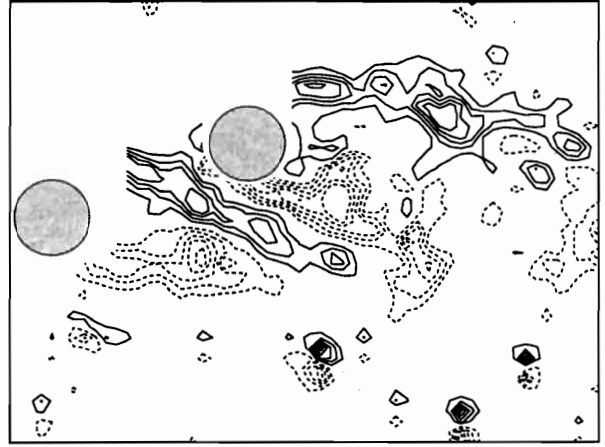


Post-critical régime $G/d=3.6$

☒ 35: Averaged streamlines for $Z/d=0.5$.

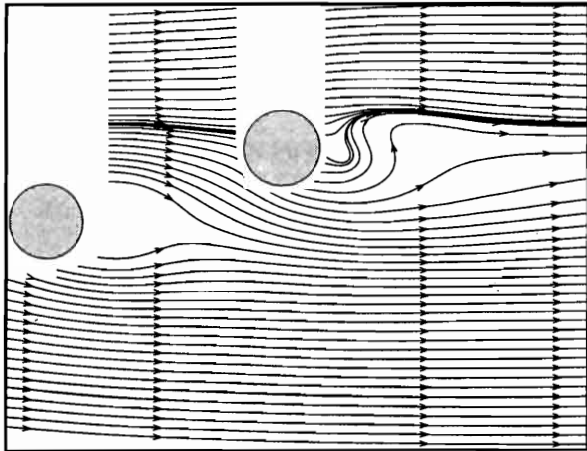


Pre-critical régime $G/d=3.2$

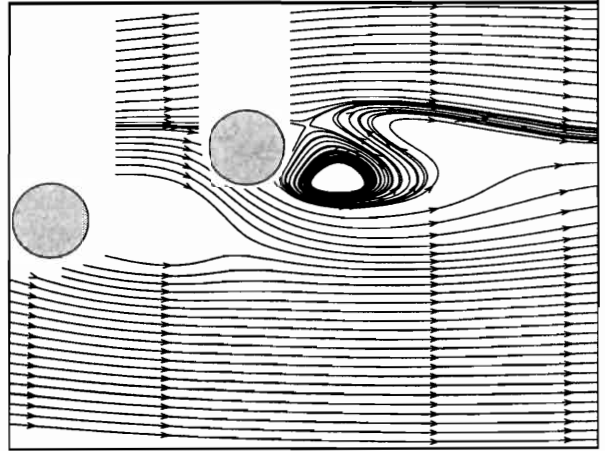


Post-critical régime $G/d=2.6$

☒ 36: Vorticity distribution for $Z/d=1.0$.



Pre-critical régime $G/d=3.2$



Post-critical régime $G/d=2.6$

☒ 37: Averaged streamlines for $Z/d=1.0$.

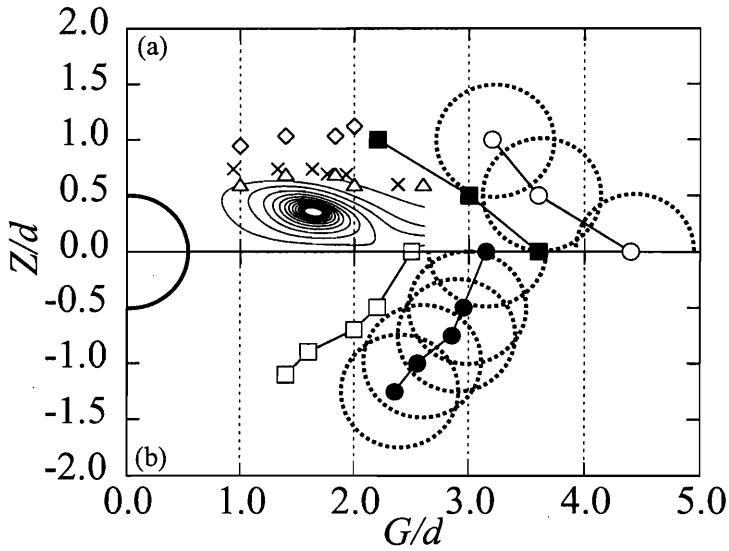


図 38: Trace of critical gaps for all levels. ■, splitter-plate case ($Re=1.1 \times 10^4$); ○, two-cylinder case ($Re=7.4 \times 10^3$); □, splitter-plate case ($Re=1.7 \times 10^4$); ●, two-cylinder case ($Re=3.0 \times 10^4$) from Ozono [15]; ◇, local maximum averaged velocity for the single cylinder case ($d=25$ mm); ×, local maximum u' ; ◇, local maximum averaged vorticity.

pairing, splitting and enveloping) パターンに対応するものと思われる。平均流線から、ウェイクキャビティはわずかに下側へ傾きながら下流に伸長していることが分かる。これは仕切板の $Z/d=1.0$ の平均流線と類似している。

4.5 臨界ギャップの空間トレース

両ケースの背圧の結果から臨界ギャップの空間トレースを図 38(a) に示す。干渉要素の形状を区別するため二円柱のケースにおける副円柱の占める領域も表示した。興味深いことに、二円柱のケースの臨界ギャップ位置の副円柱の包絡線は仕切板のケースの臨界ギャップの軌跡とほぼ重なる。このデータを補強するため、図 38(b) にレイノルズ数が比較的高い風洞実験 [15] で得られたトレースを示している。図 38(a) と同様な軌跡の一致が見られる。この軌跡よりも上流の領域は主円柱から発せられた剥離剪断層が干渉要素から影響を受け、渦が弱まる領域と考えられる。このような軌跡の一致は両ケースの臨界的な挙動の原因は

共通であり、剪断層のダイナミックな巻き込みと干渉要素との相互干渉が引き起こすことを示唆している。

図 38(a) に単独円柱の場合の平均流線を示す。さらに剪断層に対応すると思われる薄い層の領域において平均流速、主流方向の変動 u の r.m.s. 値 ($=u'$)、および平均渦度の極大値の軌跡を PIV で求めて示している。剪断層の幅を定量的に明確に定めるのは困難であるが、平均流速の極大位置は剪断層外縁、 u' の極大位置は剪断層の中心に対応するものと考えられる [6]。 u' と渦度の極大値の軌跡はほぼ一致した。 $G/d \sim 3.0$ 前後の後流領域では相互干渉で大スケールの渦が巻き上がり剪断層の幅を同定できなくなるが、臨界ギャップのトレースは、ほぼ剪断層外縁の延長上にある。

4.6 渦形成長さ

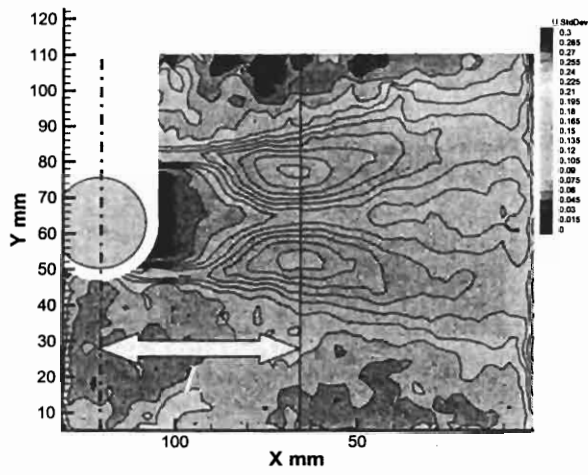
4.6.1 様々な定義による渦形成長さ

後流渦のスケールの尺度として主円柱後流渦の渦形成長さを見積もった。渦形成長さの定義は、円柱中心から次のような点までの水平距離が考えられる。円柱後流中心線で平均速度が0になる位置、主流方向速度変動の r.m.s. 値の最大位置、主流直角方向速度変動の r.m.s. 値の最大位置、レイノルズ応力の最大位置、変動成分のベクトルの絶対値の r.m.s. 値の最大位置、渦度変動の r.m.s. 値の最大位置、平均渦度の絶対値が十分小さくなる中心線上の位置などである。Noca[25] は、単独円柱で様々な定義による渦形成長さについてレイノルズ数を変化させて検討した。いずれの定義による渦形成長さも傾向は同じであったが絶対値は異なった。

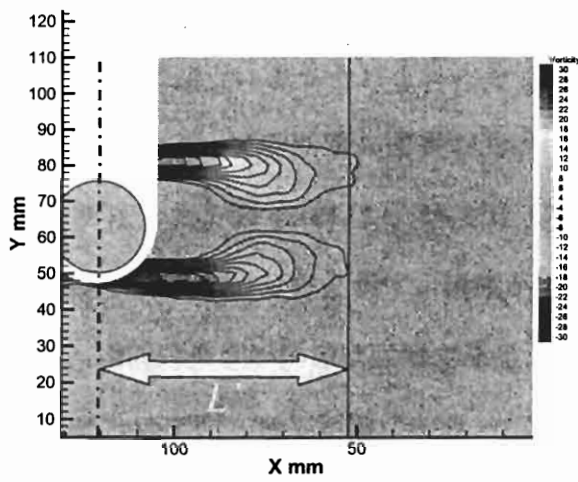
本論文では、単独円柱のケースと仕切板のケースにおいて、三種類の定義で渦形成長さを求めた。両ケースとも $d = 25 \text{ mm}$ の円柱を用いた。第一の定義では、円柱中心から主流方向速度変動 r.m.s. 値 u' の最大値までの水平距離を L (図 39) とする。第二の定義では、円柱中心から平均渦度が 0 に十分に近づく (ここでは $|\omega| = \pm 4 [1/s]$ とした) 等高線の縁までの水平距離を L' (図 40) とする。第三の定義では、円柱中心から主流直角方向速度変動の r.m.s. 値 v' の最大値までの水平距離を L'' (図 41) とする。図 39, 40, 41 は単独円柱のケースの渦形成長さの一例である。 u' と v' の等高線の表示では、値域は $0 \sim 0.30 [\text{m/s}]$, 増分は $0.015 [\text{m/s}]$ とした。図中の矢印の長さは、それぞれの定義による渦形成長さを示している。それぞれの定義による渦形成長さは $L = 2.2d$, $L' = 2.8d$, $L'' = 2.8d$ となった。

4.6.2 仕切板のケースの渦形成長さ

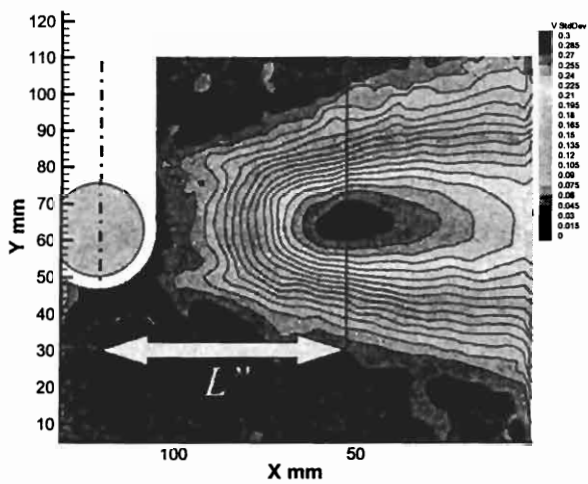
仕切板のケースで前記三種類の定義による水平距離を求め、渦形成長さを比較検討する。仕切板のようなディフレクターが渦形成に影響を与える場合、単独円柱とは異なり非対称な流れパターンになる。また、臨界ギャップ後は渦の巻き込みが弱くなるので、どの渦形成長さの定義が有効であるかの検討が必要である。図 42 は、 $Z/d = 0.5$ の臨界ギャップ後のそれ



☒ 39: Definition of vortex formation length L .



☒ 40: Definition of vortex formation length L' .



☒ 41: Definition of vortex formation length L'' .

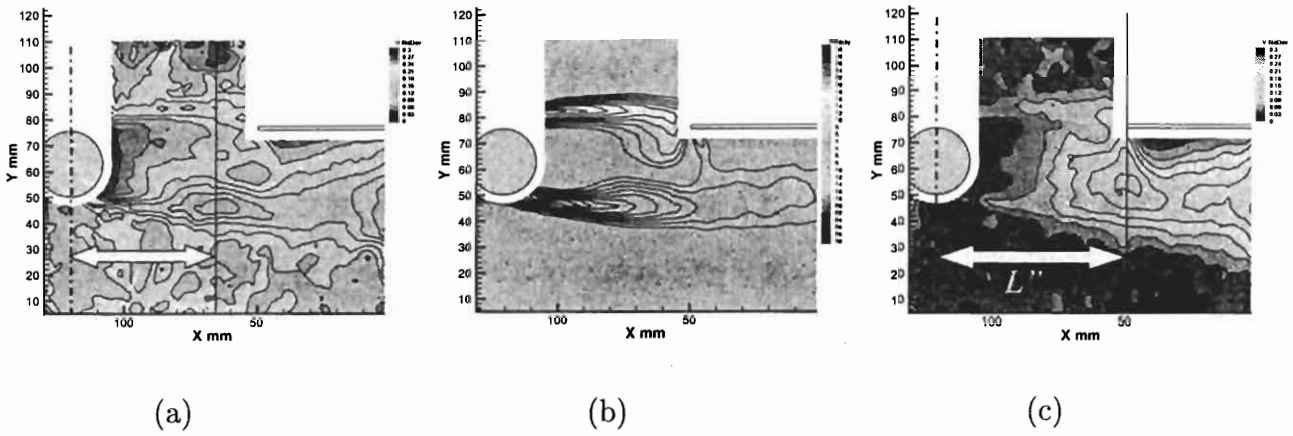


図 42: (a) u' distribution. (b) Averaged vorticity distribution. (c) v' distribution. Post-critical régime ($Z/d=0.5$, $G/d=2.8$).

それぞれの定義による渦形成長さを示す。 u' と v' の等高線の表示では、値域は $0.00 \sim 0.30$ [m/s]、増分は 0.015 [m/s] とした。仕切板の接近によりそれぞれの分布は非対称なパターンを呈している。このような場合、仕切板によって剪断層の成長が直接には阻害されない下側の特性量の分布から渦形成長さを決定した。図 42(a) は u' の空間分布を示す。ここで L は明らかに決定できる。図 42(b) では平均渦度の分布を示す。渦度が十分小さな $|\omega|=4$ [1/s] の等高線は仕切板に沿って広がり、渦形成長さの決定は困難である。図 42(c) は v' の空間分布を示す。 v' の最大値は仕切板先端とほぼ同じ水平距離にあり、 L'' の決定は容易である。以上から渦が弱くなる $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ後でも u' と v' から渦形成長さを定義できた。本論文では主流方向速度変動の r.m.s. 値 u' により定義された L を渦形成長さとして仕切板のケースと二円柱のケースで渦形成長さを比較する。

4.6.3 仕切板のケースと二円柱のケースの渦形成長さの変化

仕切板のケースについて G/d に対する渦形成長さ L/d の変化を図 43(a) に示す。参考のため仕切板先端の位置を点線で示した。 $Z/d=1.0$ は臨界ギャップ前まで仕切板が円柱に近づくにつれて渦形成長さが比例的に減少する。これらの点は直線 $L/d=0.37G/d+0.40$ で近似された。 $Z/d=0, 0.5$ の臨界ギャップ前の渦形成長さも同じ直線上に集中し、 G/d に比例して減少する。 $Z/d=1.0$ では臨界ギャップに達すると渦形成長さは急に増大し、その後は仕

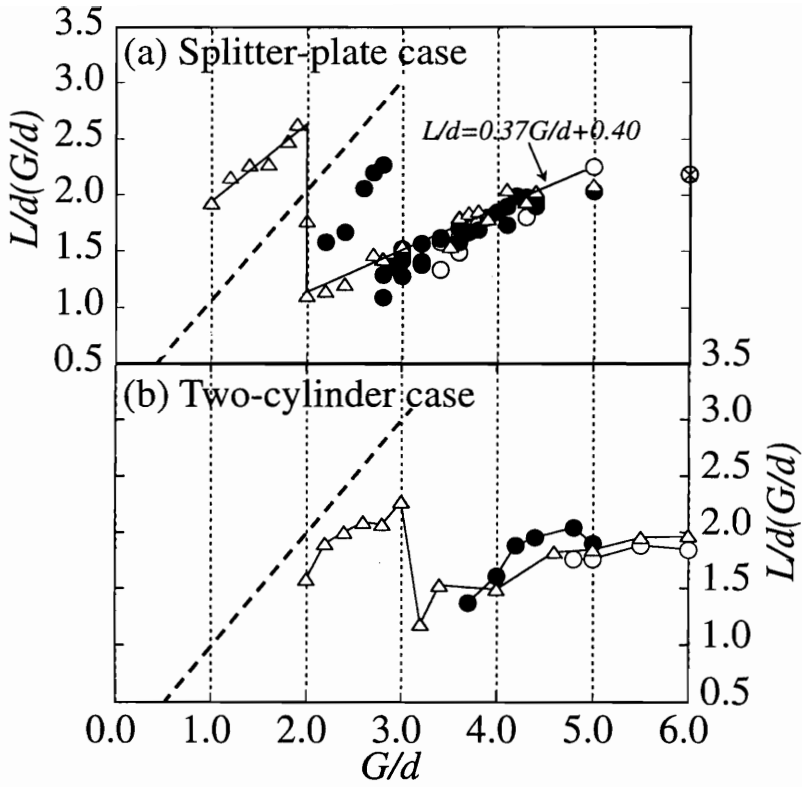
切板の円柱への接近とともに再び比例的に減少する。 $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ後の G/d の挙動も $Z/d=1.0$ と同様である。ただし $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ後は、ストローハル数が定義できないほど渦の巻き込みが弱くなるが、前節の定義に従い渦形成長さをプロットした。 $Z/d=0$ では臨界ギャップ後、上下の剥離剪断層が分断され、渦形成長さは意味を持たない。

臨界ギャップ前までは、全てのレベルで仕切板先端位置を示す点線と比べて L/d は小さく、仕切板先端より上流で渦形成が行なわれることを示す。臨界ギャップ後は仕切板の円柱への接近とともに、 $Z/d=0.5$ では仕切板先端よりも短く、 $Z/d=1.0$ では、さらに長く渦形成してどちらも比例的に減少する。つまり渦形成長さは、図 16 の G/d に対する C_{pb} の変化の傾向と一致することが分かる。すなわち、臨界ギャップ前までは、仕切板の接近につれて剥離剪断層の曲率が増し、巻き込みが強くなり、その結果背圧が低下する。臨界ギャップ後はレベルによって渦の強弱はあるものの、剪断層は遠く下流まで伸びて相互干渉するため巻き込みが弱く、その結果背圧が回復する。

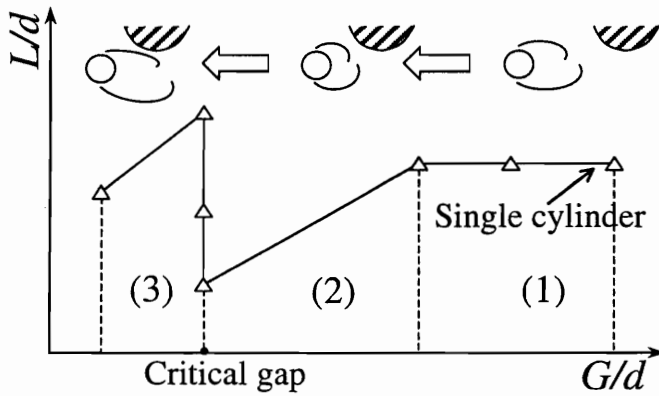
二円柱のケースで G/d に対する渦形成長さ L/d の変化を図 43(b) に示す。参考のため副円柱の中心の位置を点線で示す。 $Z/d=0.5$ の臨界ギャップ後は、渦が弱まり u' から L/d を決定できなかった。円柱の形状が仕切板に比べ横方向へ張り出しているため、臨界ギャップ位置などは異なるが、渦形成長さの変化の傾向は仕切板のケースと非常に良く似ている。

以上の PIV による流れ場の観察と渦形成長さの変化をもとにして、図 44 に主円柱と干渉要素の水平距離に対する渦形成長さの変化を図式的に表わした。干渉要素が十分遠方下流にある状態 (1) では、主円柱から放出される渦は、干渉要素からの影響を受けず、単独円柱の場合と渦形成は同様である。しかしある程度 G/d が小さくなると、主円柱からの放出渦は影響を受けはじめ、干渉要素の接近に比例して渦の水平スケールが縮小する (状態 (2))。干渉要素は、ついには臨界ギャップに到達し、渦は側方に変位を受けつつも急に伸長する。さらに干渉要素が主円柱に近づくと、やはり比例して渦の水平スケールは縮小する (状態 (3))。

臨界ギャップは、図 38 に見られるように平均的な剪断層外縁の延長上に位置しているが、実際の剪断層の軌跡は干渉要素の位置によらず一定しているわけではない。干渉要素の接



⊠ 43: Variation of vortex formation length with G/d . \circ , $Z/d=0$; \bullet , $Z/d=0.5$; \triangle , $Z/d=1.0$; \otimes , the single cylinder case, (a) $Re=1.1 \times 10^4$, (b) $Re=7.4 \times 10^3$.



⊠ 44: Schematic representation of the variation of vortex formation length with G/d .

近につれ、渦はその水平スケールを保つのではなく相互作用によって縮小拡大を行ない、その結果たまたま剪断層外縁のほぼ延長上に臨界ギャップの位置が定まるものと思われる。

4.7 むすび

本章では、両ケースで臨界ギャップ前後の流れ場をPIV計測した。瞬間渦度分布、平均流線、渦形成長さを比較して以下の結果を得た。

1. 臨界ギャップ前まで、干渉要素の上流移動に伴い渦形成領域も縮小し、渦の巻き込みは強まる。
2. 臨界ギャップに達すると渦形成領域は急に伸長し、渦の巻き込みは弱まる。剪断層の相互干渉パターンは干渉要素のレベルに依存する。
3. 臨界ギャップ後ディフレクターがさらに上流に近づくとき、渦形成領域も縮小する。仕切板のケースと二円柱のケースで1.~3.の流れパターンの特徴は共通している。
4. 二円柱のケースの臨界ギャップに対応する一連の副円柱表面が作る包絡線と、仕切板のケースの臨界ギャップのトレースとはほぼ重なる。このことは両ケースにおける臨界的な挙動の原因は共通であることを示唆している。