

### 3 干渉要素の相対位置の変化による円柱後流渦の特性

#### 3.1 はじめに

本章では、まず、風洞実験により主円柱後流渦の臨界的な挙動の変化がレイノルズ数に依存するかを調べる。二円柱のケースで副円柱をあるレベルに固定し、円柱直径や流速を変えることによりレイノルズ数を変化させる。下流遠方から副円柱を上流へ近づけていく時、主円柱背圧が急激に回復する。その  $G/d$  を“臨界ギャップ”と呼ぶことにする。次に、水槽で両ケースの主円柱後流の渦放出特性として背圧とストローハル数を測定し、各レベルでの“臨界ギャップ”を求める。

#### 3.2 レイノルズ数効果

まず、レイノルズ数  $Re=7.6 \times 10^3$  で二円柱のケースで風洞実験を行なった。図 13 はいろいろな副円柱のレベルにおける背圧の変化を示す。各レベル  $Z$  で副円柱を近づけていくと、ある位置で主円柱の背圧が急に回復する。この  $G/d$  を“臨界ギャップ”と定義する。さらに臨界ギャップを越えて主円柱に近づく時、再び背圧は低下する。 $Z/d=0.75$  の臨界ギャップ前後での背圧の落差が他のレベルに比べて大きい。したがって、レイノルズ数効果を調べる副円柱の鉛直位置を  $Z/d=0.75$  とした。

次に、 $Re=5.0 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4$  の範囲で背圧測定を行ない、レイノルズ数依存性があるかを検証した。図 14 は副円柱を  $Z/d=0.75$  に固定し、いろいろなレイノルズ数に対して副円柱をトラバースした時の背圧の変化を示す。参考のため、図 14 右端に Williamson[20] のデータによる各レイノルズ数での単独円柱の背圧を示した。主円柱から最も離れた  $G/d=6.0$  の背圧は、単独円柱の背圧と比べて最大約 20 % 低い。本論文の乱れ強度は 2.0 % 以下であり、乱れ強度が 5 % 以下では、抵抗が最大 20 % 減少すると報告されている [21]。Williamson の単独円柱のデータの乱れ強度は約 0.1 % 以下であることから、この値の差は乱れの影響と考えられる。 $Re=5.0 \sim 9.0 \times 10^3$  では、臨界ギャップ前に主円柱背圧の低下が見られ、その

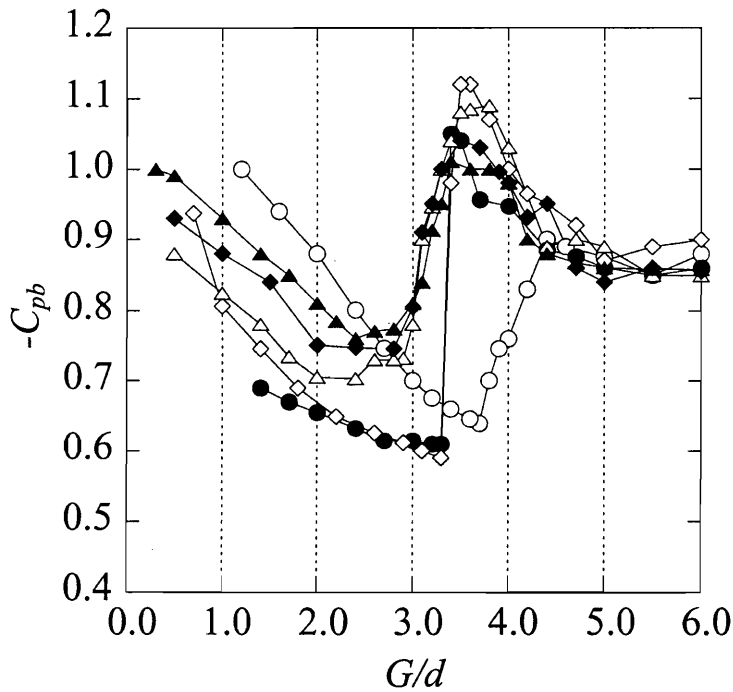
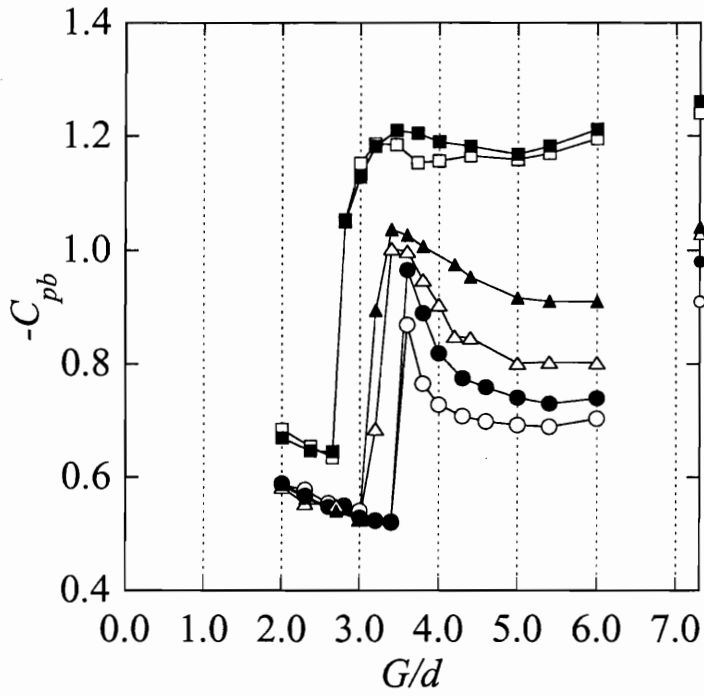
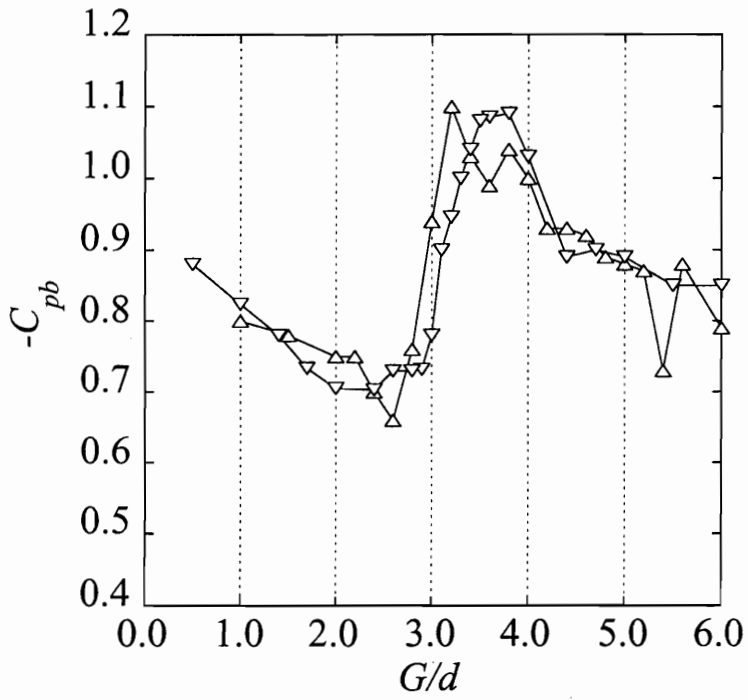


図 13: Variation of  $-C_{pb}$  with  $G/d$  for the two-cylinder case. The data were taken in the wind tunnel ( $Re=7.6 \times 10^3$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\diamond$ ,  $Z/d=0.75$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ ;  $\blacklozenge$ ,  $Z/d=1.25$ ;  $\blacktriangle$ ,  $Z/d=1.5$ .

低下する勾配はレイノルズ数が高くなるにつれ、ゆるやかになっている。さらに臨界ギャップの位置はレイノルズ数が大きくなるにつれて、 $G/d$ の小さい方へ移動することがわかる。 $Re=2.9 \times 10^4$ 以上では、臨界ギャップまではほぼ一定の値をとり、臨界ギャップ前の背圧の低下はわずかである。背圧は極小をとったのちも連続的に少し回復したのち、ある地点でやはり臨界的な回復が見られる。 $Re=5.0 \times 10^3 \sim 2.9 \times 10^4$ の範囲でレイノルズ数によって背圧の特性曲線は大きく変わりレイノルズ数効果があることが明らかになった。レイノルズ数効果を調べた実験では風洞を使用した。この結果が水槽実験でも成り立つかどうかを確認する必要がある。図 15 は、本論文の水槽実験と風洞実験の背圧の絶対値を比較するため、二円柱のケースでの  $Z/d=1.0$  のみの背圧の変化を示した。風洞と水槽の乱れ強度、アスペクト比、ブロックage比の違いにかかわらず、両者は比較的よく一致しており、レイノルズ数が同一なら両実験の間で特性は大差がないと思われる。



☒ 14: Variation of  $-C_{pb}$  with  $G/d$  for the two-cylinder case. The data were taken in the wind tunnel ( $Z/d=0.75$ ).  $\circ$ ,  $Re=5.0 \times 10^3$ ;  $\bullet$ ,  $Re=6.6 \times 10^3$ ;  $\triangle$ ,  $Re=7.4 \times 10^3$ ;  $\blacktriangle$ ,  $Re=9.0 \times 10^3$ ;  $\square$ ,  $Re=2.9 \times 10^4$ ;  $\blacksquare$ ,  $Re=4.5 \times 10^4$ . The symbols on the right side show values of the single cylinder case [20].



⊠ 15: A comparison between the wind tunnel experiment and the water tank experiment for the two-cylinder case ( $Z/d=1.0$ ).  $\Delta$ , Water tank experiment ( $Re=7.4\times 10^3$ );  $\nabla$ , Wind tunnel experiment ( $Re=7.6\times 10^3$ ).

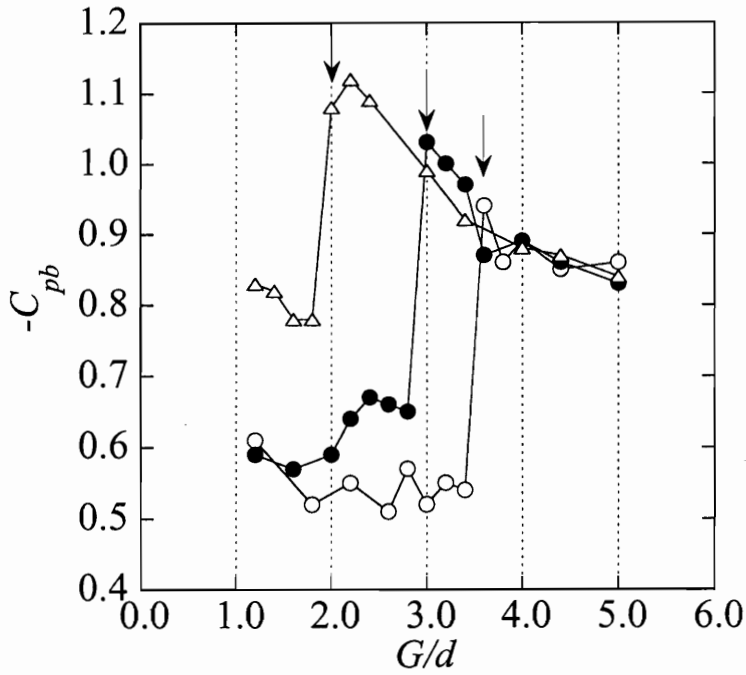
### 3.3 背圧 (仕切板のケース)

図 16 は  $G/d$  に対する背圧の変化を示している。十分遠方から仕切板を円柱に近づけていくと、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すなわち臨界ギャップ (矢印で示した) がある。この場合、臨界ギャップは  $Z/d$  が大きくなるにつれ円柱に近づいていることが分かる。このときのレイノルズ数は  $Re=1.1 \times 10^4$  であり、臨界ギャップ前の背圧の有意な低下は、図 14 の傾向と一致している。

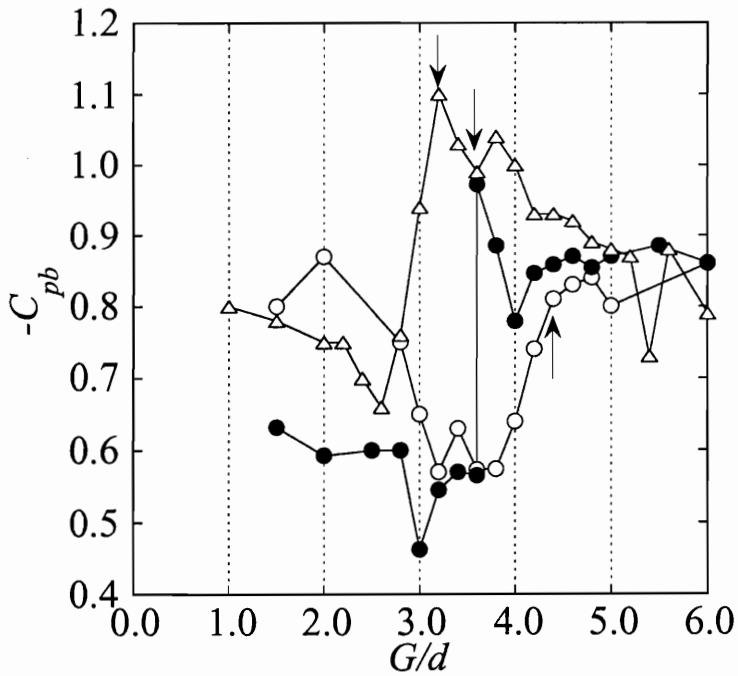
### 3.4 背圧 (二円柱のケース)

図 17 は  $G/d$  に対する背圧の変化を示している。仕切板のケースと同様に、 $Z/d=0.5$  と  $1.0$  では臨界ギャップ前に有意に  $C_{pb}$  の低下が見られ、ある  $G/d$  を越えて近づく時、背圧が急に回復する。 $Z/d=0$  の背圧の回復は、仕切板のケースとは異なり、それほど急ではない。しかし  $G/d \sim 4.3$  を越えて近づけると、背圧の大きな回復が見られることから、ここを臨界ギャップとした。仕切板のケースと同様に臨界ギャップは  $Z/d$  が大きくなるにつれて円柱側へと移動している。 $Z/d=0$  の  $G/d=3.6 \sim 4.3$  では、“剪断層が副円柱に再付着するモード” 図 18(a) と “それぞれが単独円柱のように渦放出するモード” 図 18(b) が混在しており、双安定であると考えられる [9]。双安定である範囲を斜線で示すと、図 18 のようになる。副円柱は主流直角方向に幅を持つ物体であり、仕切板との形状の違いがこのような特性に反映されている。

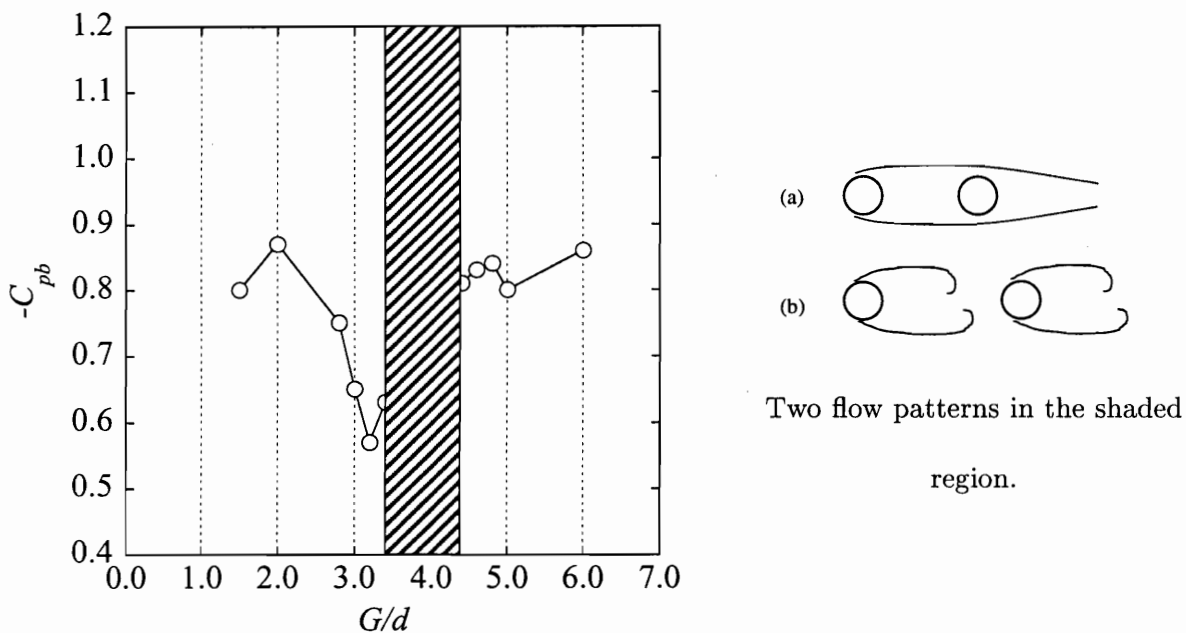
図 19 は二円柱のケースで風洞実験による比較的高いレイノルズ数 ( $Re=2.9 \times 10^4$ ) での  $G/d$  に対する背圧の変化を示す。図 17 の水槽実験による比較的低いレイノルズ数 ( $Re=7.4 \times 10^3$ ) と同様に、全てのレベルで臨界ギャップが見られ、レベルが大きくなるにつれて上流に移動する。 $Z/d=1.0$  の前後で傾向の違いが見られる。レベルが  $Z/d \geq 1.0$  程度中心線より離れると背圧特性は  $Z/d$  に鈍感になる。



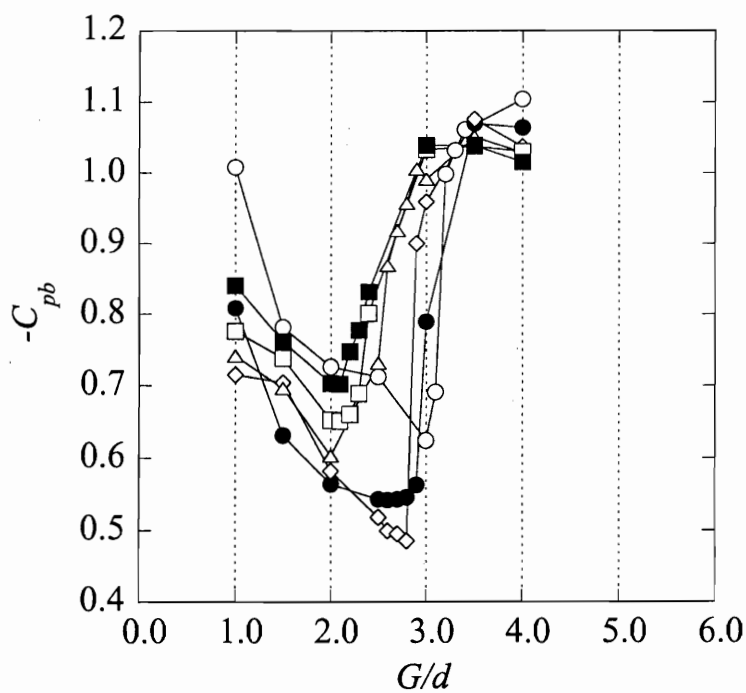
⊠ 16: Variation of  $-C_{pb}$  with  $G/d$  for the splitter-plate case in the water tank ( $Re=1.1 \times 10^4$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ . Arrows indicate the critical gaps.



⊠ 17: Variation of  $-C_{pb}$  with  $G/d$  for the two-cylinder case in the water tank ( $Re=7.4 \times 10^3$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ .



☒ 18: Correspondence  $-C_{pb}$  and flow patterns for the two-cylinder case on  $Z/d=0$ .



☒ 19: Variation of  $-C_{pb}$  with  $G/d$  for the two-cylinder case in the wind tunnel ( $Re=2.9 \times 10^4$ ).

○,  $Z/d=0$ ; ●,  $Z/d=0.5$ ; ◇,  $Z/d=0.75$ ; △,  $Z/d=1.0$ ; □,  $Z/d=1.25$ ; ■,  $Z/d=1.5$ .

### 3.5 ストローハル数 (仕切板のケース)

図 20 に仕切板のケースにおける  $G/d$  に対するストローハル数の変化を示す。矢印は臨界ギャップを示す。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。 $Z/d=0,0.5$  では、臨界ギャップ後に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、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見られた。Ozono による短い仕切板を干渉要素に用いた場合でも、あるレベル以上のトラバースでストローハル数が上昇し、本研究の長い仕切板を用いた場合と同様な傾向が見られた [8]。図中点線で示したストローハル数の変化は小さいので、この変化は連続的と見なしやすい。しかし後述する流れパターンはこの前後で明らかに一変しており、この変化は有意に不連続であるとする。これについては後の PIV による流れパターンの節で詳述する。

図 21 は  $G/d$  に対するパワースペクトルのピーク値  $S_{peak}$  の変化を示す。各  $Z/d$  ともピーク値は臨界ギャップと同じ位置において急に低下し、渦の巻き込みが弱くなることを示唆している。 $Z/d=1.0$  では  $S_{peak}$  はいったん臨界ギャップで低下した後、仕切板をさらに近づけていくと再び増加する傾向があり、これによって有意なストローハル数が得られた。

### 3.6 ストローハル数 (二円柱のケース)

図 22 は二円柱のケースにおける  $G/d$  に対するストローハル数の変化を示す。矢印は  $Z/d=0.5$  と  $1.0$  の臨界ギャップを示す。参考のため、図 22 に Ishigai[22] による  $Z/d=1.0$  と、Moriya[23] により副円柱上流側表面に作用する圧力変動から求めた  $Z/d=0,1.0$  でのストローハル数を示す。これらのデータは、 $Z/d=1.0$  では本論文のストローハル数とほぼ等しくなった。臨界ギャップよりも主円柱に近づけると、ストローハル数は二つのグループに分かれ、一方は単独円柱のストローハル数~0.18 よりも 2~3 倍ほど大きい値をとり、他方は単独円柱のストローハル数の約 40% の値である。図 23 に  $Z/d=1.5$  の  $G/d=2.0$  の流れの概念図



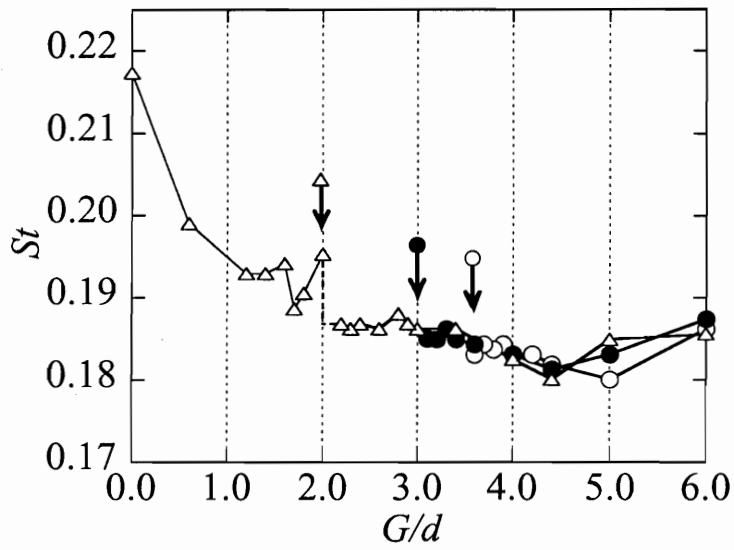


Figure 20: Variation of  $St$  with  $G/d$  for the splitter-plate case in the water tank ( $Re=1.1 \times 10^4$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ .

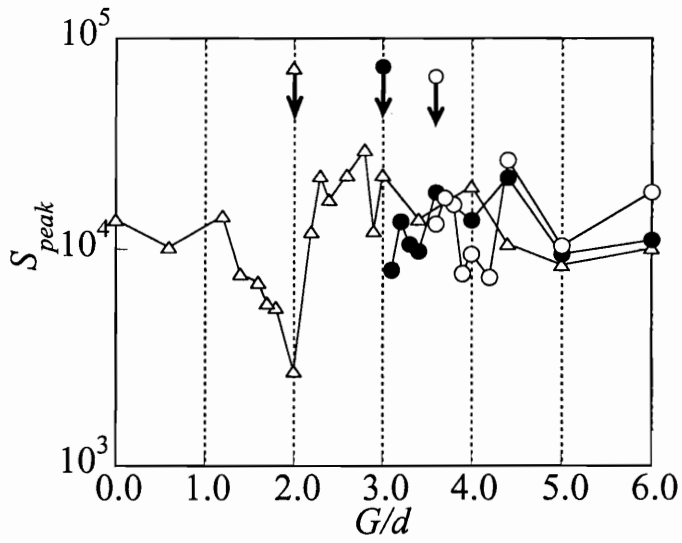


Figure 21: Variation of peak with  $G/d$  for the splitter-plate case in the water tank ( $Re=1.1 \times 10^4$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ .

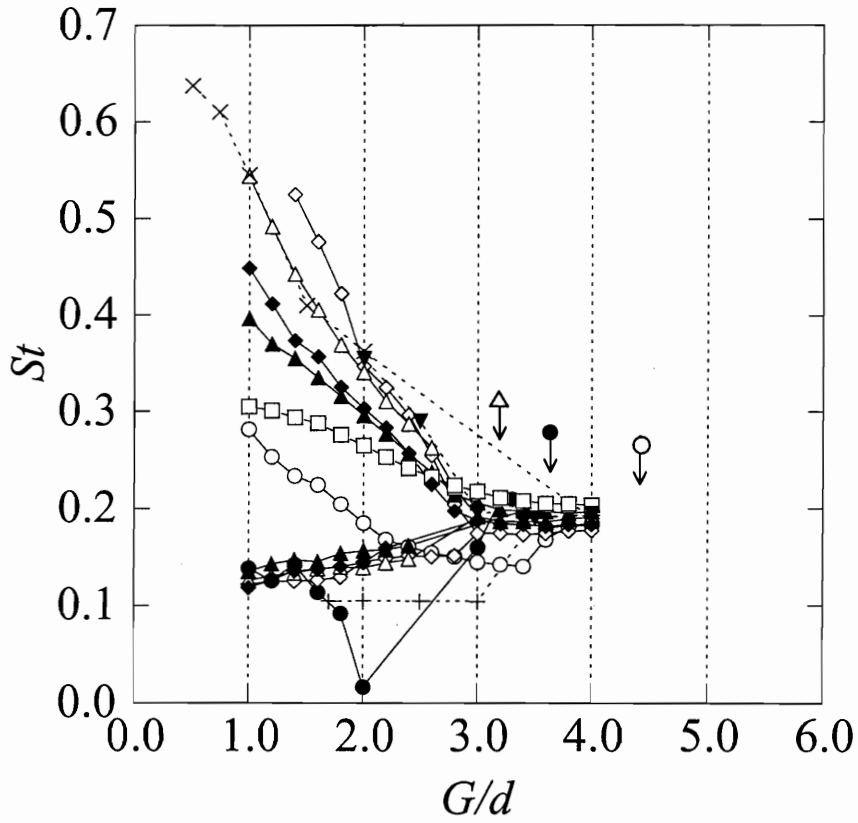


Figure 22: Variation of  $St$  with  $G/d$  for the two-cylinder case. The data were taken in the water tank ( $Re=7.4 \times 10^3$ ).  $\circ$ ,  $Z/d=0$ ;  $\bullet$ ,  $Z/d=0.5$ ;  $\diamond$ ,  $Z/d=0.75$ ;  $\triangle$ ,  $Z/d=1.0$ ;  $\blacklozenge$ ,  $Z/d=1.25$ ;  $\blacktriangle$ ,  $Z/d=1.5$ ;  $\square$ ,  $Z/d=2.0$ ;  $\times$ ,  $Z/d=1.0$  from Ishigai [22];  $\blacktriangledown$ ,  $Z/d=1.0$  from Moriya [23];  $+$ ,  $Z/d=0$  from Moriya [23].

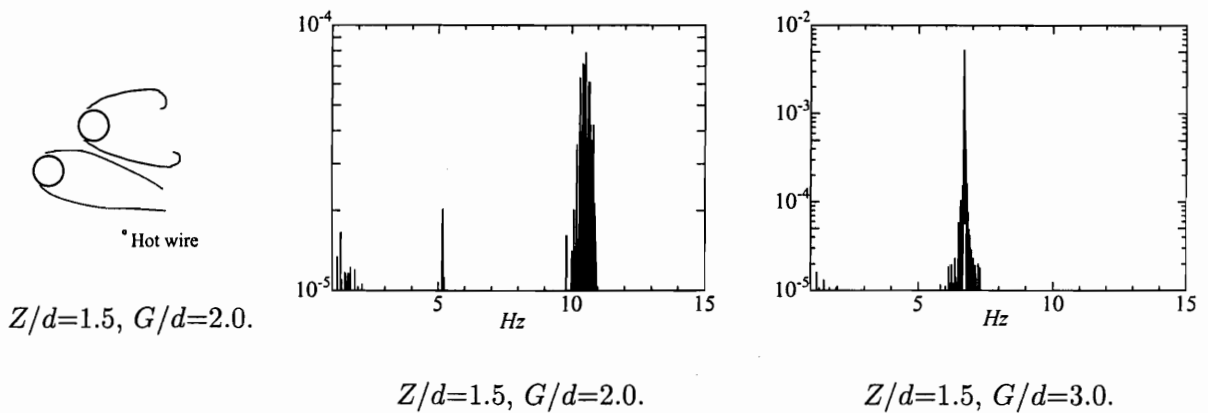


Figure 23: Power spectra for  $Z/d=1.5$ .

と分岐前後のパワースペクトルを示す。分岐前の  $G/d=3.0$  ではピークは約 6.7Hz に一つある。分岐後の  $G/d=2.0$  では約 5.1Hz と約 10.5Hz にピークがみられ、どちらも  $G/d=3.0$  のピークより低い。主円柱に関係するとみられる約 10.5Hz のピークは、流れの概念図のように後流幅が狭められることから  $G/d=3.0$  の約 6.7Hz よりも周波数は上がると考えられる。 $Z/d \geq 0.75$  の大きなストローハル数成分は、仕切板の  $Z/d=1.0$  と同じ傾向である。過去の研究でもこのストローハル数の二分岐は指摘されている。例えば、Moriya[23] の研究では  $Z/d=0.735$  で分岐が確認されている。Summer *et al.*[11] は、ストローハル数の高い成分は主円柱からの二つの剥離剪断層と副円柱の剪断層 B' (図 8) に関係し、低い成分は副円柱の剪断層 T' に関係すると述べている。いずれにせよ、これらの分岐は二つの近接後流のサイズの違いを反映していることは間違いない。副円柱は仕切板とは異なり主流直角方向に幅を持つので、熱線プローブはその後流の渦を検出しやすい。

$Z/d=0.5$  の臨界ギャップ以後はスペクトルピークの検出が困難となり渦の消失を示す。副円柱後流渦の影響と思われる比較的小さなストローハル数の挙動は、レベル  $Z$  の変化に鈍感である。

$Z/d=0$  は、臨界ギャップ  $G/d=4.4$  より主円柱に近づいた  $G/d=3.6$  でストローハル数が 10%ほど低下する。図 18 で示したように  $G/d=3.6 \sim 4.3$  の範囲で双安定 [9] であることが原因と考えられる。

図 24 は風洞実験による  $G/d$  に対するストローハル数の変化を示す。風洞実験では臨界ギャップ以後はスペクトルピークがノイズに埋もれてピークの同定が困難であり、その傾向は複雑である。 $Z/d \geq 0.75$  で  $G/d$  が臨界ギャップより小さい時、 $G/d$  のある範囲で単独円柱のストローハル数 ( $\sim 0.17$ ) より大きくなる。水槽実験で見られたようなストローハル数の二成分への分岐は  $0.75 \leq Z/d \leq 1.25$  で見られる。仕切板が上流に近づく時、曲線 A は連続的に上昇するが、曲線 B は  $G/d \sim 3.0$  で低い値に分岐する。

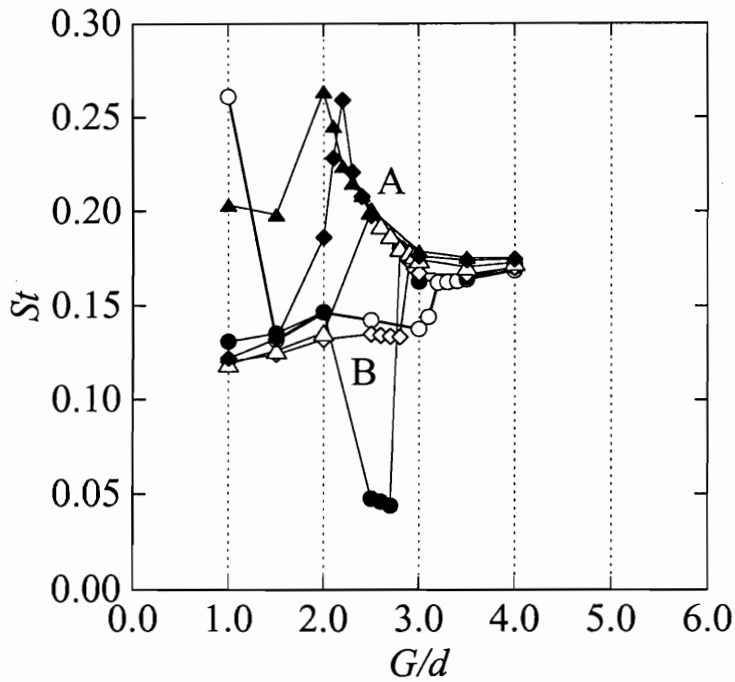


図 24: Variation of  $St$  with  $G/d$  for the two-cylinder case in the wind tunnel ( $Re=2.9 \times 10^4$ ). ○,  $Z/d=0$ ; ●,  $Z/d=0.5$ ; ◇,  $Z/d=0.75$ ; △,  $Z/d=1.0$ ; ◆,  $Z/d=1.25$ ; ▲,  $Z/d=1.5$ .

### 3.7 むすび

仕切板のケースと二円柱のケースにおいて、干渉要素を各レベルで主円柱に近づけていく時、主円柱の背圧とストローハル数を計測し、以下の結果を得た。

1. 風洞実験による二円柱のケースの背圧を測定し、副円柱が臨界ギャップに近づくととき、レイノルズ数が比較的低い範囲 ( $Re=5.0 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^3$ ) で臨界ギャップ前に  $C_{pb}$  の低下が見られ、低下の大きさ、勾配などがレイノルズ数とともに大きく変化した。レイノルズ数 ( $Re=2.9 \times 10^4$  以上) が大きくなるにつれて  $C_{pb}$  はほぼ一定となり、その特性は飽和した。すなわち  $C_{pb}$  の  $G/d$  にともなう変化は  $Re=5.0 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^4$  でレイノルズ数に依存する。
2. 水槽実験による両ケースの背圧から、各  $Z/d$  で干渉要素を上流へ移動させるにつれて、ある  $G/d$  で臨界的な背圧の回復がみられる。臨界ギャップは干渉要素のレベル  $Z$  が大きくなるにつれて主円柱に近づく。二円柱のケースの  $Z/d=0$  では、臨界ギャップ

付近で双安定になるため、背圧の回復はそれほど急ではない。

3. 仕切板のケースのストローハル数は、臨界ギャップまでは単独円柱のストローハル数 $\sim 0.19$ を示す。 $Z/d=0, 0.5$ では臨界ギャップ後は渦放出を示すピークが同定できないほど渦が弱くなる。 $Z/d=1.0$ では臨界ギャップ後、さらに仕切板が円柱に近づくにつれて、ストローハル数が上昇する傾向が見られる。
4. 二円柱のケースのストローハル数は、臨界ギャップ前まで単独円柱のストローハル数を示す。臨界ギャップ後は二つのグループに分岐する。水槽実験では、一方は単独円柱のストローハル数 $\sim 0.2$ よりも約2~3倍大きい値をとり、他方は単独円柱のストローハル数より40%くらい小さい値をとる。 $Z/d \geq 0.75$ の高いストローハル数成分は仕切板の $Z/d=1.0$ と同じ傾向を持つ。

次章では臨界ギャップ前後でPIV計測を行ない、背圧およびストローハル数と流れパターンを対応させ、仕切板のケースと二円柱のケースでの主円柱後流渦の臨界的挙動について議論する。