

矩形柱の流力特性に及ぼすレイノルズ数の影響

Fluid dynamic characteristics of a rectangular cylinder with various width-to-height-ratios in wide range of Reynolds number

岡島 厚* 木村 繁男** 片山 輝明*** 大津山 澄明**** 尾島 録*****
By Atsushi OKAJIMA, Shigeo KIMURA, Teruaki KATAYAMA, Sumiaki OHTSUYAMA
and Akira OJIMA

- * 工博 金沢大学教授 大学院自然科学研究科 (〒920 石川県金沢市小立野2丁目40番20号)
** Ph.D. 金沢大学教授 工学部機能機械工学科
*** 工修 住友重機械工業株式会社
**** 西日本旅客鉄道(株) 技術開発推進部
***** 金沢大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程

Measurements of base pressure coefficient and Strouhal number of rectangular cylinders are presented. The experiments were carried out in wind tunnels at Reynolds numbers from 500 to 3×10^4 and for rectangular cylinders with the width-to-height ratios of $B/H=0.4-1.0$, where B is the depth and H is the height of a cylinder. It is found that the base pressure coefficient of rectangular cylinders remarkably varies with Reynolds numbers, and when the width-to-height ratio is $B/H=0.6-0.7$, the flows have the flow-patterns with two different values of high and low base-pressure which alternately change at random in the range of Reynolds numbers over 1.5×10^3 . The results also confirm a finding reported by Ohya, that the abrupt change of the drag coefficient appears irregularly with a time for a $B/H=0.5$ cylinder. The values of Strouhal number of rectangular cylinders slightly decrease with increase of Reynolds numbers.

Key words : Reynolds number effects , Rectangular cylinder , Base-pressure , Strouhal number

1. 緒 言

一様流中に置かれた矩形柱周りの流れについては、矩形柱特有の空力特性を有することもあり、数多くの研究が成されている。中口ら¹⁾は矩形柱の抗力に及ぼす断面比 B/H の影響を調べ、抗力、背圧係数が $B/H=0.6$ 付近で極端に大きくなる中口ピークと呼ばれる現象を見出した。その後、この特異な流力現象については、Bearman & Trueman²⁾を始め、数多くの研究^{3)~6)}が成されてきたが、いずれも $Re \approx 10^4$ 程度の比較的高いレイノルズ数 (Re 数) を対象としたもので、 $Re \leq 10^4$ の低い Re 数域の挙動については殆ど知られていない。一般に、円柱などのブラフな物体においては、 $Re \approx 200$ 程度から後流の乱流への遷移が現れ、 $Re \approx 10^3$ を越えると剥離剪断層の遷移が生じることが知られている⁷⁾。

さらに矩形柱の場合には、剥離剪断層とアフター・ボディとの間の干渉に遷移現象が関係することにより、流れは Re 数によって複雑に変化すると考えられる。最近、Ohya⁸⁾は、断面比 $B/H=0.4 \sim 0.6$ の矩形柱で $Re=(0.67 \sim 6.7) \times 10^4$ の場合の風洞実験を行い、 $B/H=0.5$ 矩形柱周りの流れにおいて背圧係数 C_{pb} の回復する高圧モードと C_{pb} の低下する低圧モードの2種類の流れパターンが不規則に変化することを背圧測定とスモーク・ワイヤー法による可視化実験によって明らかにした。

そこで、本研究では、 $Re \approx 10^3$ の低 Re 数域を含む幅広い Re 数範囲において、断面比 0.6 の場合を中心とし、矩形断面比を $B/H=0.4 \sim 1.0$ の範囲で変え、矩形柱周りの剥離流れ、特に抗力係数と関係の深い背圧係数及びストローハル数に及ぼす Re 数の影響を風洞実験によって明らかにした。

2. 実験装置及び方法

2.1 風洞装置

実験は、金沢大学工学部機能機械工学科のエッフェル型風洞装置及び、ゲッチング型風洞装置を用いて行った。エッフェル型風洞装置は測定部断面寸法 $300 \times 1200\text{mm}$ 、流れ方向長さ 2m の測定洞を有し、試験風速は $0.5 \sim 30\text{m/s}$ であり、乱れ強さは 0.3% 以下、非一様性は 1.0% 以下である。ゲッチング型風洞装置は断面寸法 $167 \times 400\text{mm}$ 、流れ方向長さ 800mm の測定洞を有し、試験風速は $2 \sim 25\text{m/s}$ で、乱れ強さは 0.3% 以下である。本実験では、これらの風洞装置を用い、一様流速 U を $2 \sim 30\text{m/s}$ の範囲で変えた。

2.2 供試模型

供試模型は黄銅またはアクリル製で、製作の際にできる

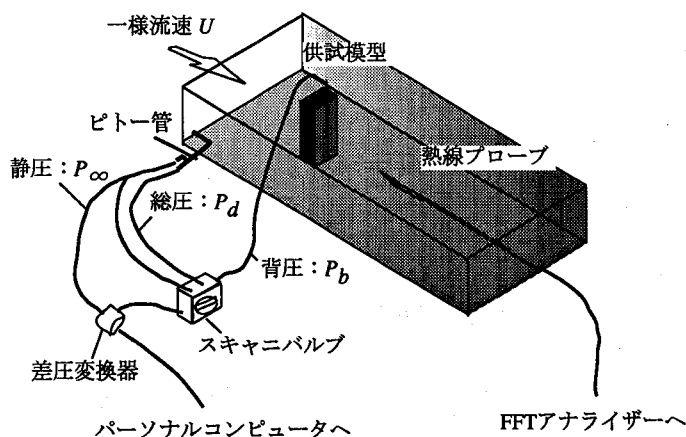


図1 実験装置図概略図

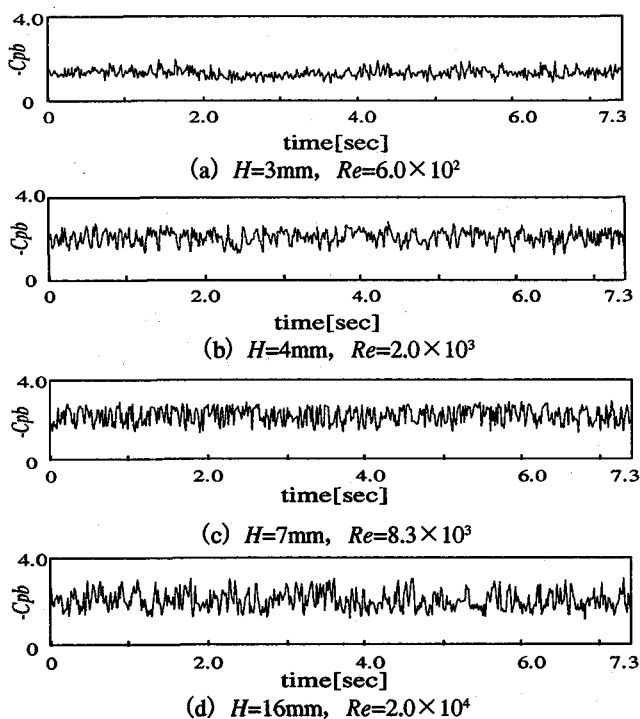


図2 背圧係数の変動波形 ($B/H=0.6$)

だけ角を鋭くし、表面は滑らかにした。また幅広い Re 数範囲で測定可能なように、供試模型の前面辺高さ H を $3 \sim 18\text{mm}$ の間で変えた。したがって、風洞測定部における模型のアスペクト比は $9.3 \sim 100$ の間で変化する。模型によるブロックージ比はいずれも 4.5% 以下である。背圧を測定するためには、それぞれの模型背面に内径 $\phi 1.2\text{mm}$ の導圧管を埋め込み、模型背面スパン中央部に直径 $\phi 0.5\text{mm}$ の静圧孔を設け、静圧孔はできる限り表面と垂直となるようにした。実験計測は図1に示す概略図のように、圧力は全て静圧を基準とし、総圧、背圧はスキヤニバルブを介して差圧変換器に導き、パーソナル・コンピュータでデータ解析(応答周波数 1kHz 以上)を行った。速度変動は熱線プローブで測定し、検出信号をFFTアナライザに取り込み、周波数解析を行った。後流中の渦形成領域に生じる下流域よどみ点の測定は、逆流領域をも測定できるタンデム型熱線プローブを用い、トラバース装置によって移動させて、中心軸速度の x 方向成分を測定することで得た。なお、 Re 数、ストローハル数 (St 数)、背圧係数 $-Cpb$ は、それぞれ $Re=UH/\nu$ (ν は空気動粘性係数)、 $St=fH/U$ (f は後流渦周波数)、 $Cpb=(P_b-P_\infty)/P_d$ (P_b は背圧、 P_∞ は一様流の静圧、 P_d はピトー管から得た動圧) である。

3. 結果及び考察

3.1 背圧係数の時間的变化

まず、図2, 3, 4に、実測された背圧係数 $-Cpb$ の経時変

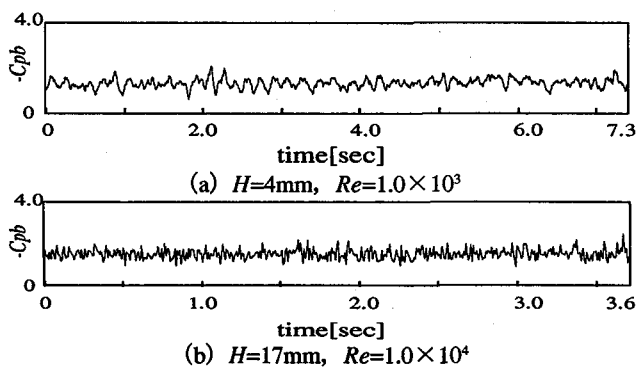


図3 背圧係数の変動波形 ($B/H=0.4$)

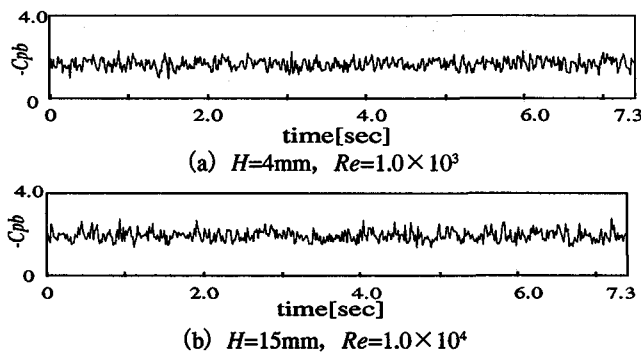


図4 背圧係数の変動波形 ($B/H=0.8$)

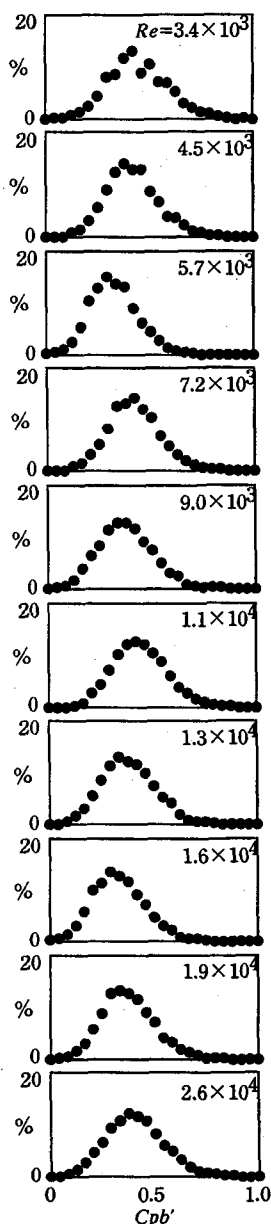
化を示す。図2は $B/H=0.6$ 矩形柱の種々な Re 数における $-Cpb$ の変動波形を示すが、図2(b), (c), (d)に示す $Re \geq 2.0 \times 10^3$ の場合、 Re 数の増加にともない、矩形波状に近い変化、すなわち $-Cpb$ の高い値と低い値の間を断続的に不規則に変化していることがわかる。一方、図3に示す $B/H=0.4$ 及び図4の $B/H=0.8$ の矩形柱の場合や図2(a)の低 Re 数 $Re=600$ の場合には、前述の $-Cpb$ の変動波形と異なり、 $-Cpb$ の平均値のまわりに比較的小さい振動振幅で変動している。

3. 2 背圧係数の頻度分布

図2, 3, 4で例示したような断続的不規則変化を含む背

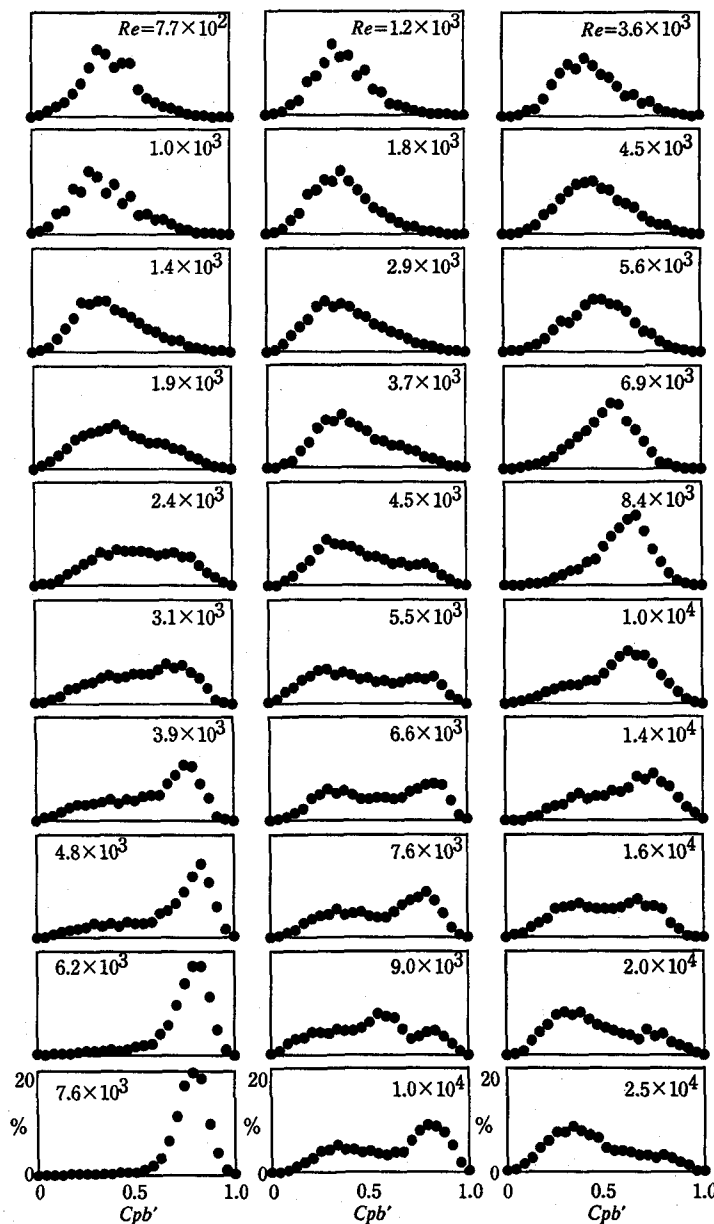
圧 Cpb の時間的変化を整理するに当たり、その最大・最小値の間を25等分し、その小分割領域における頻度分布を Cpb' に対して図5, 6, 7に示す。なお、 Cpb' は $Cpb' = (Cpb - Cpb_{min}) / (Cpb_{max} - Cpb_{min})$ で、 Cpb_{max} , Cpb_{min} はそれぞれ背圧係数の絶対値の最大・最小を示す。

図3の $B/H=0.4$, $H=17\text{mm}$ の場合、 $Re=(0.29 \sim 2.1) \times 10^4$ の Re 数範囲において、頻度分布は幾分、高圧側にピークをもつ形状であるが、 Re 数変化によってほとんど変化がみられない。 $B/H=0.4$ 矩形柱の場合には、模型の大きさの異なる $H=4, 5\text{mm}$ でも同様であり、 Re 数による流れのパターン変化はほとんどないものと考えられる。次に、図6(a), (b), (c)には、 $B/H=0.6$ で模型の大きさの異なる $H=5, 7, 16.5\text{mm}$



(a) $H=17\text{mm}$

図5 $-Cpb$ の頻度分布
($B/H=0.4$)

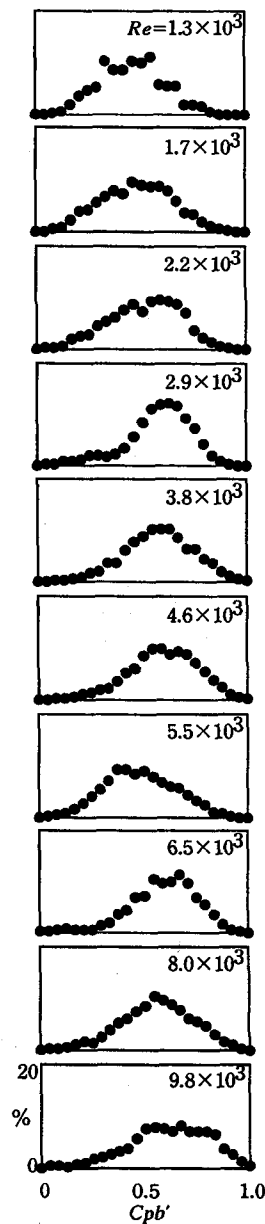


(a) $H=5\text{mm}$

(b) $H=7\text{mm}$

(c) $H=16.5\text{mm}$

図6 $-Cpb$ の頻度分布 ($B/H=0.6$)



(a) $H=8\text{mm}$

図7 $-Cpb$ の頻度分布
($B/H=0.7$)

の場合を示す。この場合、図2の実測波形で示したごとく、 Re 数によって Cpb 値の経時変化の様相が異なる。したがって $-Cpb$ の頻度分布は、いずれの模型の場合にも、 $Re=(0.2 \sim 3.0) \times 10^4$ の間では $-Cpb$ の頻度分布形状が変化したり、2つのピークが現れたり、あるいは広帯域に分布する形状を示し、 $-Cpb$ 値は一定せず、不規則に流れパターンが変化することがわかる。なお、この場合、同じ Re 数でも模型の大きさにより、頻度分布形状が必ずしも同一ではない。背圧の回復する高圧モードや低圧モードの流れパターンが生ずる頻度は模型のアスペクト比、一様流中の乱れスケールの相違などに強く依存するものと考えられる。

3.3 背圧係数ピーク及び St 数

図5, 6, 7の度数分布に示したピークにおける圧力値を背圧係数ピーク $(-Cpb)_p$ と定義し、 $B/H=0.4 \sim 1.0$ のそれぞれの場合における $(-Cpb)_p$ 値の Re 数に対する変化を図8~13に示す。また、同時に後流渦のストローハル数も示す。

(1) $B/H=0.4$ 模型： 図8に示すように比較的薄い $B/H=0.4$ 模型の場合、 Re 数の増加とともに $(-Cpb)_p$ 値は増加し、 $Re=(0.2 \sim 1.0) \times 10^4$ でほぼ一定値、 $(-Cpb)_p=1.4$ となる。この場合、モード変化はほとんど認められず、模型による大きな値の変化はない。一方、 St 数は $Re=3.0 \times 10^3$ まで若干減少し、その後 $St=0.14$ でほぼ一定となる。この場合、模型高さ

$H=4, 5, 17\text{mm}$ の3種類を使用した、重複する Re 数範囲では、 $(-Cpb)_p$ 値は比較的良好に一致している。

(2) $B/H=0.6$ 模型： 臨界断面比に近い $B/H=0.6$ 模型の場合、 $(-Cpb)_p$ 値は高圧・低圧の2つのモードに変化する。したがって、 $Re \geq 2.0 \times 10^3$ では、 $(-Cpb)_p \approx 1.7$ (高圧モード) と2.6 (低圧モード) のそれぞれ異なる背圧値をもつ2種類の流れパターンが現れることが図9(b)から明らかである。そこで、背圧係数 $-Cpb$ の高圧・低圧の2つのモードが経時的に不規則に変わる流れについて詳細に調べる。 $H=3$ 及び4mmの模型では低 Re 数域において低圧モードが支配的で、 $Re=600$ で高圧モードが卓越し、 Re 数増加に伴い、 $(-Cpb)_p$ 値は漸増し、 $Re \geq 1.5 \times 10^3$ 付近で再度低圧モードに変化する。一方、 $H=7\text{mm}$ の模型においては、 $Re=(1.0 \sim 4.0) \times 10^3$ で高圧モードとなった後、2ndピークを生じ、 $Re=7.0 \times 10^3$ で1stピークと2ndピークが入れ替わり、1stピークは高圧モード、2ndピークは低圧モードである。さらに、 $H=16.5\text{mm}$ では $Re=(3.7 \sim 5.6) \times 10^3$ で高圧モード、その後低圧モードが卓越し、 $Re=1.7 \times 10^4$ で1stピークが高圧モードに、2ndピークが低圧モードになる。このように $B/H=0.6$ の模型では、高圧及び低圧の背圧係数に分類される2つのモードが生ずる。そして模型の大きさによって、いずれかの $-Cpb$ 値に対応する流れの持続時間が異なるため、図6に示したようにその $-Cpb$ の頻度分布形状が若干異なってくる。模型の大きさの

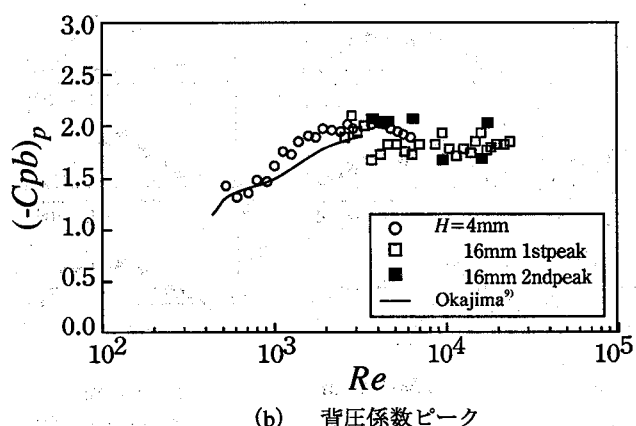
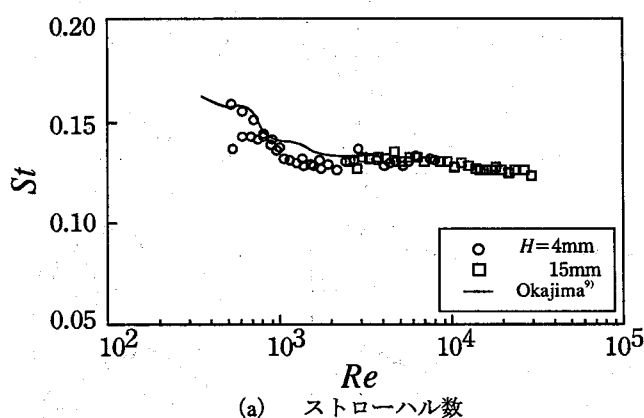


図12 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=0.8$)

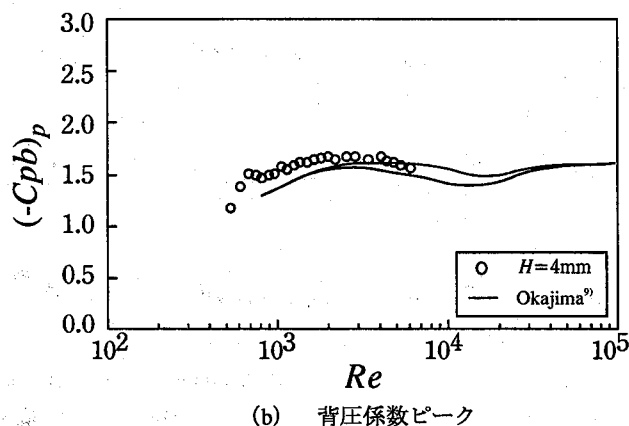
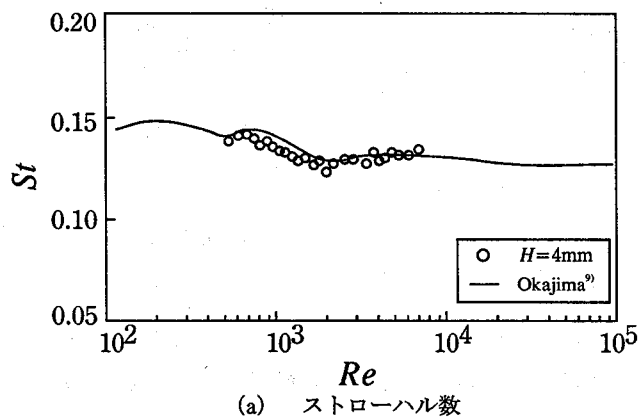
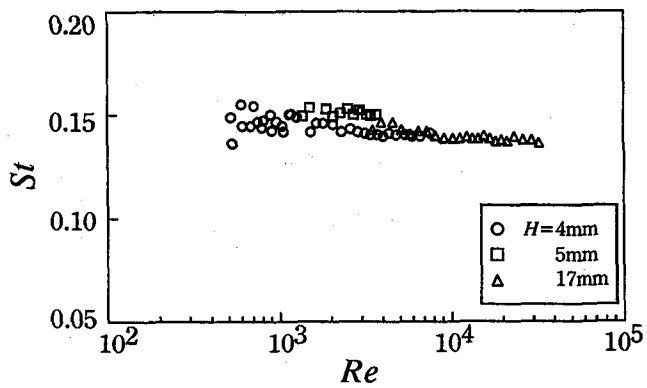
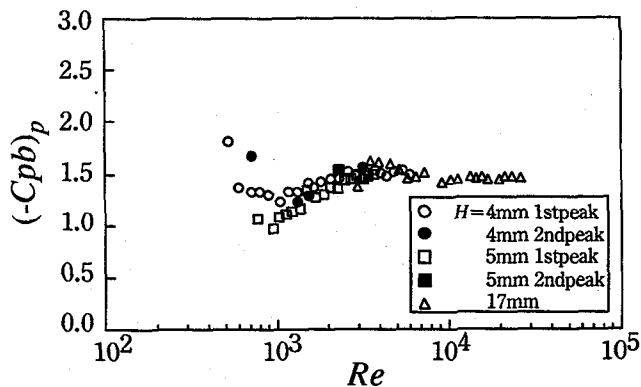


図13 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=1.0$)

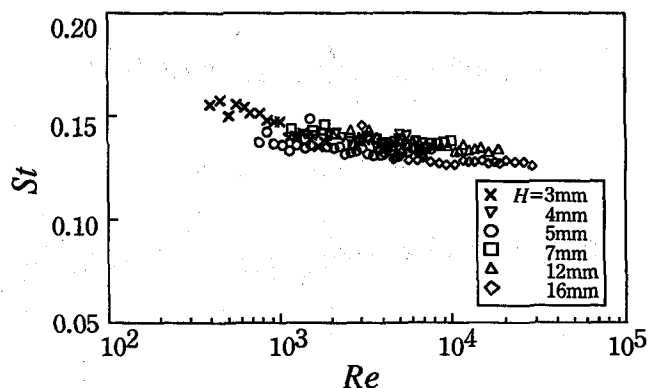


(a) ストローハル数

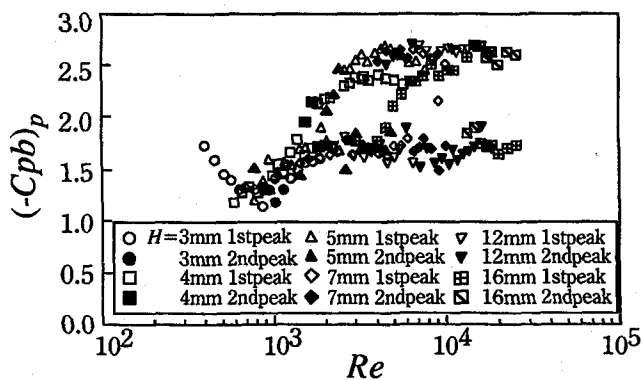


(b) 背圧係数ピーク

図8 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=0.4$)

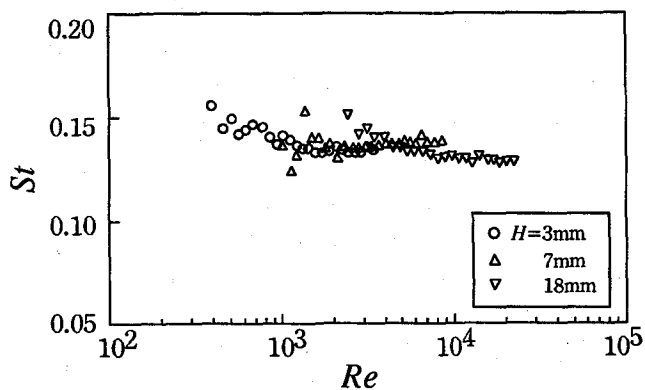


(a) ストローハル数

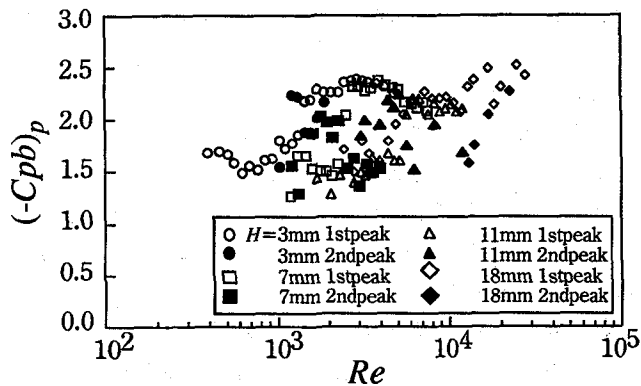


(b) 背圧係数ピーク

図9 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=0.6$)

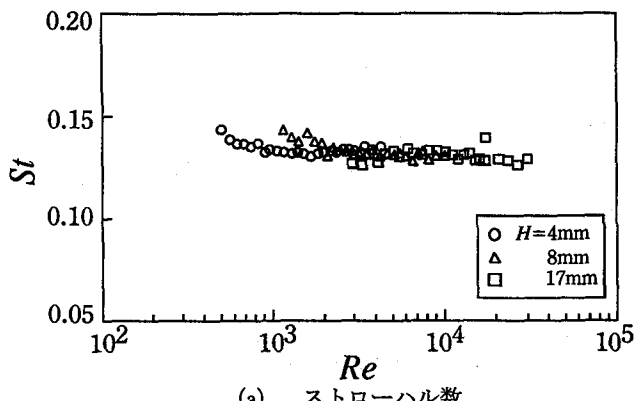


(a) ストローハル数

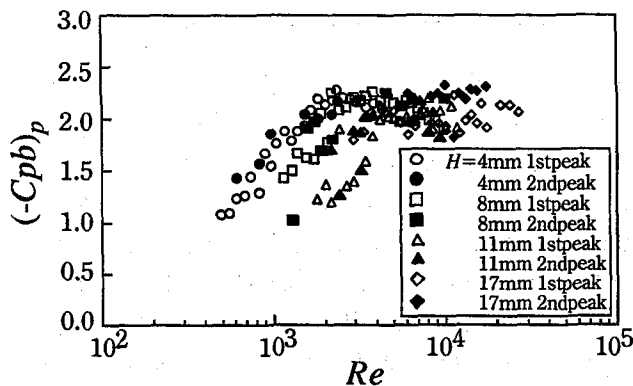


(b) 背圧係数ピーク

図10 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=0.65$)



(a) ストローハル数



(b) 背圧係数ピーク

図11 St 数及び $(-Cpb)_p$ の Re 数に対する変化($B/H=0.7$)

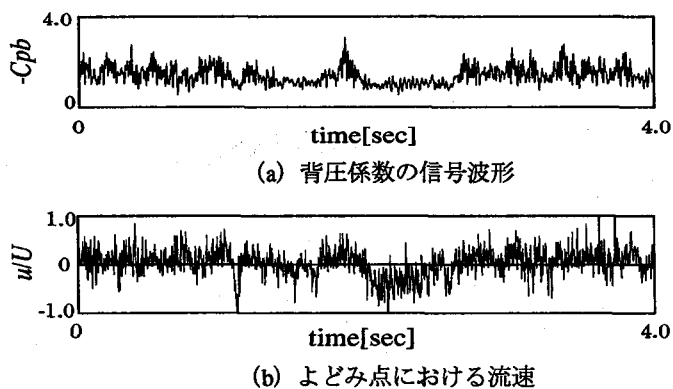


図14 背圧とよどみ点の流速変動波形
($B/H=0.65$, $H=18\text{mm}$, $Re=5.4 \times 10^3$)

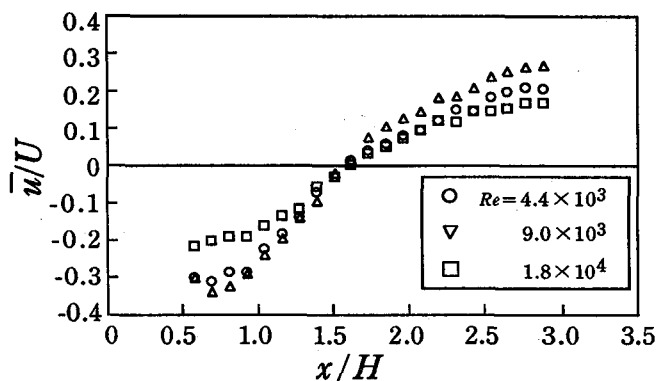


図15(a) 中心軸の x 方向平均速度分布 ($B/H=0.4$)

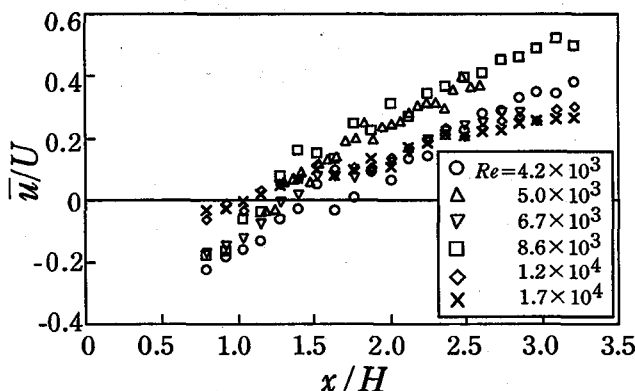


図15(b) 中心軸の x 方向平均速度分布 ($B/H=0.6$)

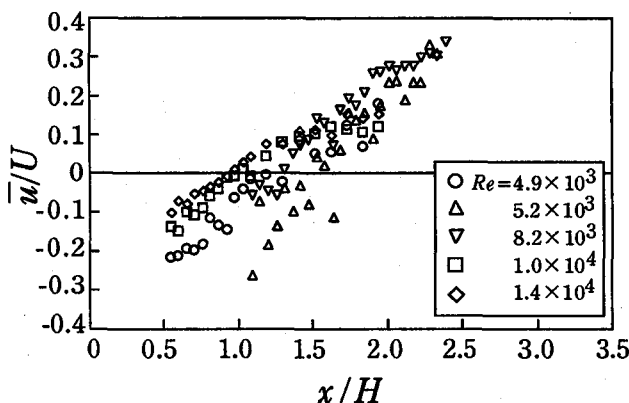


図15(c) 中心軸の x 方向平均速度分布 ($B/H=0.65$)

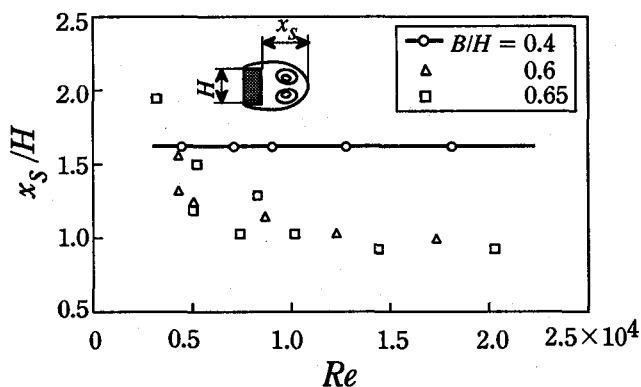


図16 Re 数に対するよどみ点の変化

相違による模型アスペクト比の相違、また一様流の乱れのスケールの影響に起因するものと推定される。一方、図9(a)に示す St 数値は Re 増加に伴って全体的に減少傾向にあるが、図9(b)の $(-Cpb)_p$ に現れた大きな値の変化は St 数値の変化には認め難い。本実験の St 数値は、後流速度変動の長時間にわたるスペクトル密度分布解析から算出したので、 $(-Cpb)_p$ 変化に伴う St 数値の微妙な変化は現れ難いことも考えられる。今後、条件付きサンプリングなどの精密な計測・解析が望まれる。

(3) $B/H=0.65$ 模型: $B/H=0.6$ の場合と同様、 $(-Cpb)_p$ は高

圧 (約 -1.6) と低圧 (約 -2.4) の2つの $(-Cpb)_p$ 値の間を変化する。 $H=3\text{mm}$ の模型では、 $Re=500 \sim 700$ で高圧モード、その後、低圧モードが支配的となる。 $H=7\text{mm}$ の場合は $Re=(1.0 \sim 2.0) \times 10^3$ で高圧モードに、 $Re=1.7 \times 10^4$ から低圧モードが現れる。 $H=11\text{mm}$ では、低圧モードが生じた後 $Re \geq 2.7 \times 10^3$ で2種類の $(-Cpb)_p$ 値の間を交互に変動する。また $H=18\text{mm}$ については、 $Re=7.2 \times 10^3$ までは高圧モードが支配的であるが、 $Re=(0.7 \sim 1.7) \times 10^4$ で2つのモード間を交互に変動し、 $Re \geq 2.0 \times 10^4$ では低圧モードが支配的となる。

(4) $B/H=0.7$ 模型: アフター・ボディが大きくなると、次第に低圧モードが卓越し、流れのモード変化が安定する。むしろ、 $Re \approx (1.0 \sim 2.0) \times 10^3$ の低 Re 数域で流れのモード変化が顕著である。まず $H=4\text{mm}$ で低 Re 数域で高圧モードが卓越するが、 Re 数の増加とともに $(-Cpb)_p$ 値は増加し、高・低2つのピークが現れ、次第に低圧モードが卓越する。 $H=8\text{mm}$ の模型も同様に低圧モード・高圧モードの両者が現れ、 Re 数の増加とともに低圧モードが卓越する。 $H=17\text{mm}$ は、 $Re \geq 1.0 \times 10^4$ において $(-Cpb)_p \approx 2.0$ で一定となる。 St 数は大きな変化はみられず、 Re 数の増加とともに若干減少するものの、その後 $St=0.130$ でほぼ一定値となる。

(5) $B/H=0.8$ 模型: Re 数の増加とともに $(-Cpb)_p$ 値は増加し、 $Re=(0.6 \sim 3.0) \times 10^4$ で $(-Cpb)_p=1.8$ でほぼ一定値とな

る。モード変化はほとんど認められず、模型による大きな値の変化もない。実線で示す岡島⁹⁾の実験より $Re=(1.0 \sim 2.0) \times 10^3$ の範囲では一様に低圧である。 St 数は Re 数の増加とともに $Re=1.0 \times 10^3$ までは低下するが、その後 $St=0.135$ でほぼ一定値を示し、ほぼ岡島⁹⁾の実験と一致している。 St 数値も、異なる模型の大きさに対し、極端に大きな相違は認められない。

(6) $B/H=1.0$ の場合: $(-C_{pb})_p$ 値は Re 数の増加とともに若干増加するものの、モード変化は見られない。図には、比較のため、岡島⁹⁾の実験結果を示すが、この場合も $Re=(0.8 \sim 2.0) \times 10^3$ では一様に低圧であるが、他の Re 数範囲でほぼよい一致を示し、 $Re \geq 600$ の領域では $(-C_{pb})_p=1.6$ でほぼ一定である。 St 数は Re 数の増加とともに減少するが、その後 $St=0.125$ でほぼ一定値を示し、岡島⁹⁾の値と一致している。

3.3 よどみ点の変化

図14に、下流側の渦形成領域におけるよどみ点位置近における x 方向速度成分変動を $-C_{pb}$ の経時変化と同時計測した波形を示す。タンデム型熱線流速計により検出されたよどみ点における x 方向速度成分が(+)であることは、よどみ点位置 x_s が矩形柱背面に近づくことを意味し、 $-C_{pb}$ の増加と時間的にも極めてよく対応していることがわかる。そこで、(a) $B/H=0.4$ 、(b) 0.6 、(c) 0.65 の3種の矩形柱に対し、下流側よどみ点位置の Re 数に対する変化を図15に示す。図は下流側背面からの距離 x/H の各点における x 方向速度成分の平均流速 $\bar{u}/U$ の変化を示すが、 $\bar{u}/U=0$ となる位置をよどみ点位置 x_s/H と定義すると、(a) $B/H=0.4$ の場合、 $Re=(0.4 \sim 1.8) \times 10^4$ で x/H に対する $\bar{u}/U$ の変化は一定しており、よどみ点位置 $x_s/H=1.62$ でほとんど変化しないのに対し、(b) $B/H=0.6$ 及び(c) $B/H=0.65$ の場合には、既に述べたごとく、複数の流れパターンが不規則に生ずることに対応し、 x/H に対する $\bar{u}/U$ の分布は滑らかでない場合も多い。しかし、 Re 数の増加に伴い、 x_s/H の位置は概略的には背面に近づいていることがわかる。そこで、図16には、 $B/H=0.4 \sim 0.65$ 矩形柱に対し、上述のようにして求めたよどみ点の平均位置 x_s/H を、 $Re=(0.4 \sim 2.1) \times 10^4$ の範囲でまとめて示す。いずれの模型においても Re 数に対する $-C_{pb}$ の平均的变化と x_s/H の変化がよく対応していることがわかる。すなわち、 $B/H=0.4$ の場合には、 Re 数が変化してもよどみ点の位置は一定であり、この場合、図8(b)に示した $(-C_{pb})_p$ 値の変化に対応している。一方、 $B/H=0.6$ 、 0.65 の場合、 Re 数変化に対し、よどみ点位置は滑らかには変化せず、ばらつきが認められる。しかし、 Re 数の増加とともによどみ点の位置は、模型背面に近づき、結果として図9(b)、10(b)に示したごとく、 $(-C_{pb})_p$ 値は大きくなることに対応している。

4. 結 言

風洞実験により臨界断面の $B/H=0.6$ を中心として、 $B/H=0.4 \sim 1.0$ の矩形柱断面柱の背圧係数及びピストンハル数を、 $Re=(0.05 \sim 3.0) \times 10^4$ の範囲で測定し、以下の結論を得た。

(1) 背圧係数はレイノルズ数に強く依存して変わり、特に、断面比 $B/H=0.6 \sim 0.7$ 矩形柱周りの流れでは、 $Re=(0.2 \sim 2.0) \times 10^4$ でその背圧係数が高圧および低圧となる2つのモードの間を、経時的に不規則に変化する。

(2) レイノルズ数の増加に伴い、背圧係数の高圧または低圧となる2つのモードの持続時間、頻度分布が変化し、高レイノルズ数になる程、低圧モードが卓越する。

(3) 背圧係数の経時変化と下流側よどみ点位置の移動との間には時間的にも良い対応を見出した。

(4) 後流の速度変動の平均スペクトル分布から求めたストローハル数値には、レイノルズ数による大きな変化はない。

参考文献

- 1) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面柱の抗力に関する一実験, 航空学会誌, 第16巻, 第168号, pp.1-5, 1968.
- 2) Bearman, P.W. and Trueman, D.M.: An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, Aeronautical Quarterly, Vol.23, pp.229-237, 1972-9.
- 3) Gartshore, I. S.: Some effects of upstern turbulence on the unsteady lift forces imposed on prismatic two dimensional bodies, ASME, J. of Fluids Engineering, Vol. 106, pp. 418-424, 1984
- 4) 林正徳, 桜井晃, 大屋裕二: 一様流中に置かれた二次元矩形柱の変動特性, 九大工学集報, 第54巻, 第2号, pp.137-144, 1981.
- 5) Laneville, A. & Yong, L. Z.: Mean flow patterns around two-dimensional rectangular cylinders and their interpretation, J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 14, pp. 387-398, 1983.
- 6) Nakamura, Y. & Ohya, Y.: The effects of turbulence on the mean flow past two-dimensional rectangular cylinders, J. of Fluid Mechanics, Vol. 149, pp. 255-273, 1984.
- 7) Zdravkovich, M.M.: Flow Around Circular Cylinders, vol.1 Oxford University Press, 1997.
- 8) Ohya, Y.: Note on a discontinuous change in wake pattern for a rectangular cylinder, J. Fluids & Structures, 8, pp.325-330, 1994.
- 9) 岡島厚: 種々な断面比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 第17号, pp. 1-19, 1983.

(1997年9月26日受付)