高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ*
(表面粗さの影響)安達 勤^{*1}, 小野 博基^{*2}, 松内 一雄^{*1}
河合 達雄^{*1}, 長 哲夫^{*3}Flow around a Circular Cylinder in the High Reynolds Number Range
(Effect of Surface Roughness)Tsutomu ADACHI, Hiroki ONO, Kazuo MATSUUCHI,
Tatsuo KAWAI, and Tetsuo CHO

Experimental investigations of the effect of the relative roughness on the transition of flow were examined in the Reynolds numbers range of $5 \times 10^4 \leq Re \leq 10^7$, using 8 cylinders with different relative surface roughnesses. Flow phenomena on the cylindrical surface are classified in four types irrespective of surface roughness. They are : subcritical, transitional, supercritical and transcritical regions. These regions are classified from the variations in the drag coefficient and Strouhal number with Reynolds number. The Reynolds number range at the interface of these flow regions, the variation procedure and the degree of variation, depend on the relative roughness. For example, the Reynolds number at the interface between the subcritical and transitional ranges can be properly determined as a transitional point of relation between the drag coefficient and the base pressure coefficient. With an increase in the surface roughness, the interface points shift into the lower Reynolds number range. The effect of the relative roughness on these flow phenomena is classified and discussions are also made.

Key Words: Flow Measurement, Fluid Vibration, High Reynolds Number Flow, Flow around a Cylinder, Drag Coefficient and Strouhal Number

1. 緒 言

著者らはさきに低温変圧風洞を使って表面粗さが滑面の円柱まわりの流れのレイノルズ数 $Re \cong 10^5 \sim 10^7$ の範囲について実験的研究を行い, その圧力分布, 後流中に発生する渦列の周波数などを測定し, 抗力係数, ストローハル数などとレイノルズ数 Re の関係に考察を加えた⁽¹⁾. 今回, 表面粗さが流れのせん移に及ぼす影響を調べるべく 8 種類の異なる表面粗さの円柱模型を使って広いレイノルズ数範囲について実験的研究を行い, 表面粗さによる抗力係数, 背圧係数, はく離点, ストローハル数など流れの違いにより起こるいろいろなパラメータの変化に考察を加えた.

主 な 記 号

Re : レイノルズ数 $= Ud/\nu$
 St : ストローハル数 $= nd/U$
 C_D : 抗力係数

C_p : 圧力係数 $= (P_\theta - P_\infty)/(\rho/2)U^2$

U : 流速

d : 直径

ν : 動粘性係数

P : 圧力

T : 温度

μ : 粘性係数

R : ガス定数

n : 渦発生周波数

θ : 前方岐点から周方向に測った角度

K_s/d : 相対粗さ

添 字

b : 下流側

θ : 角度 θ におけるもの

s : はく離点

min: 最小値

∞ : 無限遠方

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置 実験は低温変圧風洞(図1)を使って行った。この風洞は密閉風洞内に液体窒素を噴射・気化させて得られる低温・高圧の窒素気流を回流させるもので, 窒素気流の動粘性係数が小さいので比

* 昭和63年10月18日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年4月18日.

^{*1} 正員, 筑波大学構造工学系(〒305 つくば市天王台1-1-1).

^{*2} 准員, 石川島播磨重工業(株)(〒100 東京都千代田区大手町2-2-1 新大手ビル).

^{*3} 筑波大学構造工学系.

図 3 各円柱の表面粗さの模様 (周方向のみ)

た. $(P_\theta - P_0)$ を $\theta = 0$ におけるよどみ点圧力で割って圧力係数 C_p とした. 抗力係数 C_D は,

$$C_D = \int_0^{2\pi} C_p \cdot \cos \theta d\theta$$

により求めた.

(b) ストローハル数 円柱後流部(図5の位置)に熱線プローブを置き, 熱線流速計の出力の変動成分をスペクトル解析し, その卓越周波数からストローハル数を求めた. なお, 本論文で圧力係数および抗力係数を求める場合風洞閉塞比の影響を補正するために Allen-Vincenti の補正公式⁽²⁾を用いた.

3. 実験の結果と考察

(a) 領域の分類 図6, 7に8種類の円柱について抗力係数, ストローハル数 St とレイノルズ数の関係を示す. これらの図において円柱Aを例にとって領域の分類を行う. Re 数の小さな領域で $C_D \sim 1.2$, $St \sim 0.2$ の領域及びその後 Re 数の増加とともに C_D が急減するが後述するようにその途中までの領域を亜臨界領域と呼ぶ. 次に Re 数の増加とともに C_D が最小になるまでの領域をせん移領域とする. その後 Re 数の増加とともに St 数が増す. この C_D 最小の点を臨界点と呼ぶ. 臨界点を超えて Re 数が増すと C_D が再び

図 4 8本の円柱の (K_s/d) の分布

図 5 円柱後流部の測定位置

徐々に上昇する. 一方, St 数には傾向が見られない. この領域を超臨界領域と呼ぶ. さらに Re 数が大きくなると C_D も St 数もある一定の値をとる領域になる. この領域を極超臨界領域と呼ぶ. これらの呼び方は Achenbach によるものと同じである⁽³⁾.

(b) 圧力分布 図8 A~Hに各円柱の表面圧力分布図を示す. 図中実線が亜臨界領域, 一点鎖線が臨界点, 二点鎖線が超臨界領域そして点線が極超臨界領域またはその少し手前の領域を示す. 亜臨界領域ではどの円柱もはく離点は約 80° で C_p の最小値は

図 6 抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re の関係 図 7 ストローハル数 St とレイノルズ数 Re の関係

図 8 円柱表面の圧力分布

-1.0 よりやや小さめになっている。臨界点では A~E の 5 本の円柱にははく離泡が確認できる。円柱 F でははく離泡こそ見られないものの圧力分布は特異な形状を示す。どの円柱でも圧力係数の最小値はすべてのレイノルズ数のうちで最も小さな値をとり、はく離点は最も下流側にきて背圧係数 C_{pb} が大きくなっている。それと同時に圧力係数が零になる角度 $\theta_{(p=0)}$ は小さくなっている。超臨界領域では圧力係数の最小値 $C_{p\min}$ は大きく、背圧係数は小さく、また、はく離点 θ_s は上流側に移動し、抗力係数は増すが、円柱 A~D についてはこの領域においてもはく離泡の存在が確認される。しかし、この領域では流れの条件によりはく離泡が存在することがある。極超臨界領域でははく離泡が消滅し、流れが安定している。最小圧力係数 $C_{p\min}$ 、背圧係数 C_{pb} およびはく離点 θ_s はこの領域では安定し、それぞれの円柱についてほぼ一定の値をとる。

(c) 抗力係数 各円柱について抗力係数 C_D の Re 数に対する変化をさきに図 6 に示した。円柱 A~D (相対粗さ 5×10^{-4} 以下) ではせん移領域がほぼ同一レイノルズ数領域にある。相対粗さがそれより大きくなるにつれてせん移領域はより小さい Re 数となる。これらのうち円柱 G 以外では亜臨界領域からせん移領域、臨界点までの範囲において急激な抗力係数の減少が確認できる。円柱 G についてのみ明確な臨界点を見出せない。これは表面粗さの不均一性のためである。Fage ら⁽⁴⁾は円柱の周方向一部に粗さを付けてそれが抗力に及ぼす影響を調べている。そして、 $\theta=37.5 \sim 100^\circ$ の間に粗さを付けたとき特に影響があると報告している。Fage らの研究における粗さの分布が円柱 G のものと非常に似ており、円柱 G の場合もこの理由によるものと考えられる。相対粗さが 1.16×10^{-3} より大きな範囲では相対粗さが大きいほど臨界点における抗力係数が大きくなる。一方、超臨界から極超臨界にかけての領域では円柱 B を除くと粗さが大きくなるほど抗力係数が大きくなる。超臨界領域において円柱 B の抗力係数が円柱 A のそれよりも小さくなることについては表 2 からわかるようにこの円柱では周方向に粗い V 形溝が付けられていてこれがはく離泡を安定に存続させているものと考えられる⁽⁵⁾。

(d) 背圧係数 図 9 に背圧係数 C_{pb} の Re 数に対する変化を示す。抗力係数 C_D の場合とは異なり背圧係数は亜臨界領域からせん移領域、臨界点まで増加する。臨界点を越えて Re 数が増すとき背圧係数は小さくなっていく。本来背圧係数が小さいとき抗力係数が大きくなるはずであるが、超臨界および極超臨界領域における抗力係数と背圧係数の相対的關係がよく

似ている。

(e) 抗力係数と背圧係数の関係 抗力係数と背圧係数の関係を図 10 に示す。図からわかるように粗さの違いにかかわらず関係は大局的には 2 本の直線上に並ぶ。亜臨界領域では Re 数が増すにつれて図中の実線を抗力係数 C_D が減少する方向に移動し、せん移領域に入ると点線の直線上に移り、臨界点において C_D の値が最小になった後 Re 数の増加とともに点線の直線上を C_D が増加する方向に移動する。この実線から点線への転移点を亜臨界領域とせん移領域の境界と考えるのが妥当である。その境界は表 3 のようになっている。また、実線と点線の関係式はそれぞれ

$$\text{実線: } C_D = 0.38 - 0.68 \times C_{pb}$$

$$\text{点線: } C_D = -0.096 - 1.10 \times C_{pb}$$

である。

(f) はく離点 図 11 にははく離点の位置 θ_s と Re 数の関係を示す。亜臨界領域では $\theta_s = 80 \sim 85^\circ$ の付近にある。せん移領域から臨界点にかけてはく離点は円柱の下流側に移り、臨界点において最も下流にくる。その値は円柱 G, H 以外の場合に $\theta_s = 130^\circ$ 前後に

図 9 背圧係数 C_{pb} とレイノルズ数 Re の関係

図 10 抗力係数 C_D と背圧係数 C_{pb} の関係

なる。超臨界領域では Re 数の増加とともにせん移点は再び上流側にきて、極超臨界領域においては $\theta_s = 100 \sim 110^\circ$ ではほぼ一定値をとり表面粗さが粗いほど上流側にくる。 θ_s と Re 数の対応関係は抗力係数 C_D のそれと一致している。また、円柱 B の臨界点より高い Re 数の領域に着目するとはく離点の上流側への移動が他の円柱の場合に比べて遅れている。この場合データの上限は $Re = 1.98 \times 10^6$ までであるがこの Re 数においてもはく離泡が存在していることがわかる。

(g) 最小圧力係数 図 12 に最小圧力係数 $C_{p\min}$ の Re 数に対する変化を示す。亜臨界領域では (−1) よりやや小さい数値で一定で、それから次第に増加する。せん移領域から臨界点にかけて急激に減少する。超臨界領域では再び増加し、極超臨界領域で一定値をとる。表面粗さが大きいほど $C_{p\min}$ は大きな値となっている。

(h) 圧力係数が最小になる角度 図 13 に圧力係数が最小になる角度 $\theta(C_{p\min})$ と Re 数の関係を示す。亜臨界領域ではその角度は 70° より少し小さい程度である。せん移領域、臨界点において下流側に移動し、超臨界領域では造柱 G, H を除くと 90° 程度となる。超臨界領域において Re 数の増加とともに再び上流側に移動し、極超臨界領域において表面粗さのみによってきまる一定値となり、表面粗さが大きいほどこの角

度は小さい。

(i) 圧力係数が零になる角度 各円柱の圧力係数が零になる角度 $\theta[C_p=0]$ と Re 数の関係を図 14 に示す。亜臨界領域からせん移領域にかけて下流側に移動し、せん移領域では亜臨界領域における位置より上流側に移動し、極超臨界領域では粗さのみによってきまる一定の値をとる。

(j) せん移に伴う圧力分布の変化 亜臨界領域からせん移領域にかけては圧力係数が零になる位置が下流側に移り、圧力係数の最小値がやや増加するが、その位置は変わらない。はく離の位置も変化せず背圧係数 C_{pb} が大きくなり、抗力係数 C_D は次第に減少する。

せん移領域では圧力係数が零になる位置 $\theta[C_p=0]$ が急激に上流側に移り臨界点において最も上流側になる。はく離点は下流側に移る。圧力係数の最小値は急激に減少し、その角度位置も 90° 程度になる。はく離点は下流側に移り、背圧係数が増加し、臨界点において最も大きくなる。また、圧力分布曲線の対称性が失われることが多い。

表 3 亜臨界とせん移領域の境界

	Ks/d	Re num.
A	4.54×10^{-5}	3.1×10^5
B	8.57×10^{-5}	3.0×10^5
C	2.54×10^{-4}	3.1×10^5
D	5.00×10^{-4}	3.1×10^5
E	1.16×10^{-3}	2.8×10^5
F	1.60×10^{-3}	1.7×10^5
G	1.81×10^{-3}	1.4×10^5
H	2.54×10^{-3}	7.5×10^4

図 11 はく離点の位置 θ_s とレイノルズ数 Re の関係

図 12 最小圧力係数 $C_{p\min}$ とレイノルズ数 Re の関係

図 13 圧力係数が最小になる角度 $\theta(C_{p\min})$ とレイノルズ数 Re の関係

図 14 圧力係数が零になる角度 $\theta[C_p=0]$ とレイノルズ数 Re の関係

超臨界領域では圧力係数が零になる位置 $\theta[C_p=0]$ が再び下流側に移り、最小圧力係数 $C_{p\min}$ は大きくなり、その位置 $\theta[C_{p\min}]$ も上流側に移動するとともに離点も上流側に移る。また、抗力係数 C_D が増す。この領域では離泡が現れたり消えたりしている。Achenbach⁽³⁾は層流境界層から乱流境界層にせん移する位置が Re 数の増加とともに次第に上流側に移ると述べている。

極超臨界領域では上述のすべてのパラメータのうち背圧係数 C_{pb} 以外は一定になる。背圧係数が少しずつ減少しているので抗力係数もわずかながら増加する。

(k) 円柱下流側の流れに及ぼす影響 図7にストローハル数 St の Re 数に対する変化を示した。亜臨界領域では St は表面粗さに関係なく 0.2 程度でほぼ一定である。せん移領域では臨界点の付近で急激に増す。表面粗さの大きな円柱 G, H を除くと、臨界点付近で最大になった後、速度変動のスペクトルの中にピーク値が見出せなくなる。極超臨界レイノルズ数領域では再び規則的な渦列が発生する。この領域では St 数は粗さのみによってきまる一定値をとり、表面粗さが小さいほど St 数が大きくなる。表面相対粗さの大きな円柱 G, H では臨界点付近における St 数の増加はあまり急激でない。

4. 結 論

$5 \times 10^4 \leq Re \leq 1 \times 10^7$ のレイノルズ数領域で円柱表面粗さの流れのせん移に及ぼす影響を調べるべく低温変圧風洞を使い、8種類の異なる表面粗さの円柱を使

って実験を行い、結論として次のことがわかった。

(1) 円柱まわりの流れの模様は表面粗さに関係なく4種類に区別できる。それらはレイノルズ数の小さいほうから亜臨界領域、せん移領域、超臨界領域および極超臨界領域である。

(2) これらの領域は主に抗力係数、ストローハル数のレイノルズ数に対する変化から区別でき、全領域を通じた変化割合は相対粗さが大きいほど小さくなるが類似の規則性を保って変化する。

(3) 亜臨界領域とせん移領域の境界は抗力係数の背圧係数に対する変化傾向のせん移点から決定するのが妥当である。また、せん移領域と超臨界領域の境界点を臨界点と呼び、ここで抗力係数は最小値、ストローハル数は最大値をとる。超臨界領域と極超臨界領域の区別を明確に決定するのは難しいが、ストローハル数が一定になり始めるレイノルズ数を境界とするのが望ましい。

(4) 表面相対粗さは各領域が存在するレイノルズ数領域に影響する。亜臨界領域では粗さに関係なく抗力係数 ~ 1.2 、ストローハル数 ~ 0.2 である。相対粗さが大きくなると上記4領域の境界点が低いレイノルズ数に移る。超臨界領域、極超臨界領域において抗力係数がより大きくなる。また、ストローハル数について、臨界点におけるピーク値および極超臨界領域における値は小さくなる。表面相対粗さが大きくなるにつれて離泡が発生しにくくなり、せん移に伴う圧力分布の形状の変化がより単純になる。

文 献

- (1) 安達・ほか3名, 高レイノルズ数における円柱まわりの流れと抵抗, 機論, 51-461, B (昭60), 295.
- (2) Allen, H. J. and Vincenti, W. G., Wall Interference in a Two-dimensional Flow Wind Tunnel with Consideration of the Effect of Compressibility, *Nat. Adv. Comm. Aero. Wash.*, Rep. 782 (1944), 155.
- (3) Achenbach E., Influence of Surface Roughness on the Cross-flow around a Circular Cylinder, *J. Fluid Mech.*, 46-2 (1971), 321.
- (4) Fage A., The Effect of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of a Circular Cylinder, *Reports and Memoranda*, No. 1283 (1929), 1.
- (5) KO, N. W. M., Leung Y. C. and Chen J. J. J., Flow Past V-Croove Circular Cylinders, *AIAA J.*, 25-6 (1987), 806.

討 論

〔質問〕 岡 島 厚〔金沢大学工学部〕

貴論文で種々な表面粗さによる高レイノルズ数域の興味深い実験を行っておられるが、貴論文で引用されている文献のほかにも、例えば Szechenyi (付1), Güven ら (付2), Nakamura ら (付3) の表面粗さのある円柱の実験があり、表面粗さレイノルズ数⁽¹⁾や表面粗さとレイノルズ数を考慮したパラメータと抗力係数との間の関係を明らかにしている。貴実験結果は、表面粗さの影響を系統的に表現することはいかがか。

〔回答〕 表面粗さを考慮したパラメータと抗力係数などの系統的關係については現在投稿中の論文に取扱っている (付4)。付図1はその図の中にご教示していただいた論文中的数据も加えたものである。Jones (付5) の結果の表面粗さの数値はよくわからないが、この結果以外の範囲では表面粗さの抗力係数に及ぼす影響を見ることができる。付図2には抗力係数と粗さレイノルズ数 ($Re = Uk_s/\nu$) の関係を示す。超臨界以上の領域において Szechenyi の結果をハッチして示す (付1)。円柱 A, B 以外の結果はよく一致している。また、付図3には $C_{pb} - C_{pmin}$ と $Re \cdot (k_s/d)^{0.6}$ の関係を示す (付3)。これも超臨界以上の領域においてよく一致している。

〔質問〕 小 山 隆 行〔鹿児島大学工学部〕

表面粗さ k_s と円柱前面の層流境界層の厚さ δ との関係により、層流境界層の乱流へのせん移点が変わり、亜臨界領域とせん移領域の境界点の移ることが考えられる。 k_s と δ との関係について検討しておればご教示願いたい。

〔回答〕 図6に抗力係数とレイノルズ数の関係を示している。相対粗さ (k_s/d) $\geq 5.00 \times 10^{-4}$ の範囲、すなわち円柱 A~D ではせん移領域および臨界点に対応するレイノルズ数や臨界点に対応する抗力係数がほとんど変化せず、また、これより (k_s/d) が大きくなると臨界点に対応するレイノルズ数が低下し、抗力係数の最小値も大きくなっている。このように相対粗さが臨界点に影響を及ぼす限界値があり、これを超えた範囲ではせん移点の位置が変化することがわかる。これらのことは図8, 9, 11 などから裏付けることができる。

付図1 円柱の抗力係数に及ぼす表面粗さの影響

付図2 抗力係数と粗さレイノルズ数 ($Re = Uk_s/\nu$) の関係

付図3 $C_{pb} - C_{pmin}$ と $Re \cdot (k_s/d)^{0.6}$ の関係

(付1) Szechenyi, O., *J. Fluid Mech.*, 70, (1975), 529.

(付2) Güven, O., Farrell, C. and Patel, V. C. J. *J. Fluid Mech.*, 98, (1980), 673.

(付3) Nakamura, Y. and Tomonari, Y., *J. Fluid Mech.*, 123, (1982), 363-378.

(付4) 安達・ほか4名, 高レイノルズ数領域における円柱の抵抗と発生うず列, 日本機械学会論文集(投稿中).

(付5) Jones, G. W., ほか2名, Aerodynamic Forces on A Stationary And Oscillating Circular Cylinder At High Reynolds Numbers, NASA Tech Rep., R-300 (1969).