円柱からの渦放出における非対称はく離せん断層の影響*

中村 元^{*1}, 五十嵐 保^{*1}, 筒井 敬之^{*1}

Effects of Asymmetric Separated Shear Layers on the Vortex Shedding from a Circular Cylinder

Hajime NAKAMURA, Tamotsu IGARASHI and Takayuki TSUTSUI

Experimental studies have been carried out to clarify the flow around a circular cylinder accompanying asymmetric separated shear layers. To control the flow, one or two tripping wires were attached on the surface of the cylinder. Three flow patterns were employed, that is, the laminar separation, turbulent separation and direct separation types. The flow behind the circular cylinder is dominated by the both separated shear layers. The Strouhal number behind the cylinder, the base pressure and the drag force acting on the cylinder become the intermediate values between those of the upper and the lower side flow patterns. In the case of asymmetric shear layers, the correlation between the Strouhal number and the drag force is the same as that of the symmetric ones. In the case of the turbulent shear layer from one side of the cylinder, the lift force of $C_L=0.5\sim 0.8$ is generated. The wake Strouhal number $S_w^*=fd_w/U_{S(\text{mean})}$, defined by the mean velocity of the two shear layers $U_{S(\text{mean})}$ and the wake width at the position of vortex formation d_w , becomes almost a constant for various combinations of the flow patterns.

Key Words: Circular Cylinder, Vortex, Asymmetric Separated Shear Layers, Tripping Wire, Transition, Pressure Distribution, Fluid Force, Wake Strouhal Number

1. ま え が き

円柱に粗さや突起を付けると境界層が乱流遷移し、物体に働く抗力が軽減され、熱伝達が促進されることは古くから知られている^{(1)~(3)}。藤田ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は円柱まわりの流動と熱伝達に及ぼすトリッピングワイヤの効果を実験高さと位置を系統的に変えて調べ、圧力分布、熱伝達分布形状が3種類に大別されることを示した。また、五十嵐^{(6)~(8)}は突起としてボルテックスジェネレータまたはトリッピングワイヤを用い、突起高さと位置およびレイノルズ数を系統的に変化させ、円柱まわりの流動と熱伝達を調べた。その結果、四つのフローパターンA~Dが現れることを示した。突起が流れに影響を及ぼさない場合がパターンA、突起により境界層が乱流遷移する場合がパターンC、パターンAとCの遷移領域がパターンB、突起の位置ではく離が起こる場合がパターンDである。さらに、境界層の遷移およびはく離についての一般的な関係を明らかにした。以上の研究は、突起を円柱表面に対称に設置し、

対称なはく離せん断層が形成される場合である。

しかし、一般の流れ場は非対称な場合が多い。このような点から、物体からはく離に関し、非対称なはく離せん断層が形成された場合の特性を明らかにしておく必要がある。そこで本報では、円柱表面に突起としてトリッピングワイヤを設置し、非対称なはく離せん断層が形成されたときの円柱まわりの流れ特性を明らかにする。

記 号

$$C_D: \text{抗力係数} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_P \cos \phi d\phi$$

$$C_L: \text{揚力係数} = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_P \sin \phi d\phi$$

$$C_P: \text{圧力係数} = (p - p_0) / 0.5 \rho U^2$$

C_{pb}, C_{pm} : 背圧係数, 最小圧力係数

d : 円柱直径

d_w : 後流幅

d_0 : トリッピングワイヤ直径

f : 後流渦放出数

$$K: \text{背圧パラメータ} = \sqrt{1 - C_{pb}}$$

k : 突起高さ

p_0, p : 主流静圧, 壁面圧力

* 1998年3月31日 日本機械学会第75期通常総会講演会において講演, 原稿受付 1998年7月16日。

*1 正員, 防衛大学校 (☎ 239-0811 横須賀市走水 1-10-20)。

E-mail: nhajime@cc.nda.ac.jp

Re : レイノルズ数 $= Ud/\nu$

Re_k : 粗さレイノルズ数 $= U_\infty k/\nu$

S : ストローク数 $= fd/U$

S_w : ウェークストローク数 $= fd_w/U_s$

S_w^* : ウェークストローク数(非対称はく離せん断層) $= fd_w/U_{S(\text{mean})}$

U : 主流速度

U_∞ : 境界層外縁の速度

U_s : はく離せん断層の速度 $= KU$

$U_{S(\text{mean})}$: 両はく離せん断層の平均速度 $= (U_{S1} + U_{S2})/2$

α : 突起高さを表す角度 $= \cos^{-1}\left(\frac{1-d_0/d}{1+d_0/d}\right)$

β : トリップワイヤ設置角度

δ : 境界層厚さ

θ_R : 再付着点

θ_S : はく離点

ϕ : 円柱前方岐点からの角度

添 字

1, 2: 円柱上面, 下面

A, B, C, D, S: パターン A, B, C, D, S

2. 乱流遷移の条件

図1に、五十嵐⁽⁸⁾が実験的に明らかにしたフローパターンの一般的区分を示す。突起高さと境界層厚さとの比 k/δ , 突起の位置と高さを表す $\phi_R = \beta + \alpha$, および突起位置での境界層外縁の速度 U_∞ で定義される粗さレイノルズ数 $Re_k = U_\infty k/\nu$ の三つの無次元数により分類されている。トリップワイヤの場合, 突起高さ k はワイヤ径 d_0 である。角度 α は $\cos \alpha = (1 - d_0/d)/(1 + d_0/d)$ より与えられる。図1より以下のことがわかる。図1(a) $\phi_R < 70^\circ$ では $Re_k \geq 620$ で境界層の遷移が始まり(パターンB), $Re_k \geq 1220$ で乱流

Fig. 1 General classification of the flow patterns (Igarashi⁽⁸⁾)

遷移する(パターンC). 図1(b) $70^\circ < \phi_R \leq 76^\circ$ の範囲では, $Re_k > 600$ で乱流はく離のパターンCであるが, $Re_k < 600$ は複雑でパターンA, C, Dの中間的な不安定な領域である。図1(c) $\phi_R > 76^\circ$ では突起部から完全にはく離するパターンDである。五十嵐⁽⁸⁾によるパターンA, C, Dのトリッピングワイヤ前後の流れのスケッチを図2に示す。

3. 実験装置および方法

図3に座標系と記号を示す。供試円柱はアクリル製で直径は $d = 40$ mm である。トリッピングワイヤの設置位置は前方岐点から角度 β_1 (上面) および β_2 (下面) である。非対称はく離せん断層を形成するために、上面のみまたは異なる角度 β_1, β_2 にトリッピングワイヤを設置し、円柱の上面と下面で異なるフローパターンが現れるようにした。表1に本実験で扱った非対称モデルを示す。トリッピングワイヤを設置しない場合をパターンSとした。パターンAとパターンSでは境界層のはく離特性が本質的に変わらないことから、パ

Fig. 2 Flow around a tripping wire (Igarashi⁽⁸⁾)

Fig. 3 Coordinate system and symbols

Table 1 Asymmetric models

Model	d_0 (mm)	β_1	β_2	Pattern
1	1.0	50°	---	C - S
2	0.4	60°	---	C - S
3	1.0	60°	---	D - S
4	1.0	50°	60°	C - D

ターン A はすべてパターン S で代替した。おのこのフローパターンが現れる条件を前報⁽⁸⁾の結果より求め、トリッピングワイヤ径を $d_0=0.4, 1.0$ mm, その設置角度を $\beta=50, 60^\circ$ とした。例えば上面でパターン C, 下面でパターン D となる場合をパターン C-D と表記する。供試風洞は測定部断面 $400\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 長さ 800 mm の低速風洞で, 主流速度は $U=4 \sim 28\text{ m/s}$, レイノルズ数範囲は $Re=1.0 \times 10^4 \sim 7.2 \times 10^4$ である。主流乱れは本実験レイノルズ数範囲でほぼ 0.5% である。

本実験では円柱後流の渦放出数および円柱壁面の圧力分布を計測し, ストローハル数や圧力抵抗係数の変化を調べた。また, 煙風洞や油膜法による円柱まわりの流れの可視化を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 流れの可視化 図 4 にパターン S (滑面円柱), C, D, C-S, D-S, C-D のそれぞれの場合の長時間露出 (1 s) および瞬間の煙風洞写真を示す。パターン C では乱流遷移によりはく離点が後退し後流幅が狭くなる。また円柱上・下のせん断層が交差する位置が後退しており, 渦形成位置が著しく後退していることを示している。パターン D ではトリッピングワイヤ位置での直接はく離が起こり, 上・下面のせん断層が外側に広がり, 後流幅も拡大している。パターン C-S では上面のみ乱流遷移の特徴を示しており, 非対称なはく離せん断層が形成されている。このとき後流幅および渦形成位置は, パターン C とパターン S の中間である。パターン D-S では, 上面のみ直接はく離の特徴を示しており, 後流幅および渦形成位置はパターン D とパターン S の中間である。またパターン C-D では, 上面が乱流遷移の, 下面が直接はく離の特徴を示しており, 非対称が最も顕著に現れている。

図 5 に, 油膜法による円柱表面流れの可視化写真を非対称パターンの場合について示す。対称パターンの場合のはく離点は, 層流はく離となるパターン S (滑面円柱) では $\theta_s \approx 75^\circ$, 乱流はく離となるパターン C では $\theta_s \approx 95^\circ$, 直接はく離となるパターン D ($d_0=1.0$

Fig. 4 Visualization of flow around a circular cylinder ($Re=2.1 \times 10^4$)

mm, $\beta=60^\circ$) では $\theta_s \approx 50^\circ$ である。パターン C-S では, はく離点は $\theta_{s1}=95^\circ$, $\theta_{s2}=75^\circ$ であり, パターン D-S では $\theta_{s1}=50^\circ$, $\theta_{s2}=75^\circ$, パターン C-D では, $\theta_{s1}=95^\circ$, $\theta_{s2}=50^\circ$ である。以上より, 上・下面のはく離形態が異なる場合も, それぞれのはく離形態は互いに独立で, 他方の影響を受けないことがわかる。

4・2 円柱後流のストローハル数 図 6 にトリッピングワイヤ径 $d_0=1.0\text{ mm}$ を用いた円柱後流のストローハル数を示す。パターン S (滑面円柱) のストロー

Fig. 5 Visualization by oil-film method ($Re=5.1 \times 10^4$)

Fig. 6 Strouhal number of patterns C-S, D-S and C-D

ハル数は $S_s=0.20$, パターン C では $S_c=0.30$, パターン D では $S_D=0.17$ であり, 従来の実験結果⁽⁸⁾ と一致した. 上面のみ乱流遷移するパターン C-S のストローハル数 S_{CS} は, パターン C の値 S_c と滑面円柱の値 S_s の平均値 0.25 である. 同様にパターン D-S のストローハル数 S_{DS} は, パターン D と滑面円柱の値 S_D と S_s の平均値 0.185 である. また $S_{CD}=0.22$ は, パターン C とパターン D の値 S_c, S_D の中間値である. 以上より, 非対称せん断層の場合のストローハル数は, 両せん断層が対称時の値の中間値となる.

4・3 圧力分布 図 7 にトリッピングワイヤ径 d_0

(a) pattern C-S

(b) pattern D-S

(c) pattern C-D

Fig. 7 Pressure distribution ($Re=5.1 \times 10^4$)

$=1.0\text{ mm}$ を用いた, $Re=5.1\times 10^4$ の円柱まわりの圧力分布を示す。なお, トリップワイヤが対称設置の場合は $0\sim 180^\circ$ または $-180\sim 0^\circ$ までの片側の分布を示している。図 7(a) はパターン C-S の場合である。圧力係数分布は円柱上面 ($0\sim 180^\circ$) では対称設置のパターン C に, 円柱下面 ($-180\sim 0^\circ$) では滑面円柱のパターン S に類似している。上・下面とも円柱前面では圧力係数がほぼ等しいが, 背面では対称設置のパターン C と滑面円柱のパターン S との中間値になっている。これは, 円柱前面のはく離前の境界層流れは反対側のはく離せん断層の影響を受けないが, 背面のはく離領域は両はく離せん断層の巻込みに支配されるためである。図 7(b) はパターン D-S の場合である。圧力係数は円柱上面では対称設置 (パターン D) の場合, 円柱下面では滑面円柱 (パターン S) の場合とほぼ一致している。一方, 背面では滑面円柱 (S) と対称設置 (D) の中間値になっている。図 7(c) はパターン C-D の場合である。圧力係数は円柱上面ではパターン C, 下面ではパターン D の分布と類似である。背面では両パターン C, D の中間値であり, ややパターン C 寄りの値になっている。

以上をまとめると次のようにいえる。はく離せん断層が非対称な場合, 上・下面の圧力分布形状はそれぞれのフローパターンの特徴を維持する。また, 円柱上・下面の境界層流れは, それぞれがほぼ独立に振る舞っている。しかし, はく離領域においては両はく離せん断層の巻込みの影響を強く受け, ストローハル数や背圧係数はそれぞれのフローパターンの中間値となる。

Fig. 8 Relation between Strouhal number and drag coefficient

る。

4.4 ストローハル数と抗力係数の関係 図 8 に非対称パターン C-S, D-S, C-D のストローハル数と抗力係数の関係を示す。図 8 中の実線は五十嵐⁽⁸⁾が, 与えた実験式である。

$$S = 0.22 / C_D^{0.514} \quad \dots\dots\dots (1)$$

白抜き記号が対称せん断層の場合を, 黒塗りの記号が非対称せん断層の場合を示している。非対称せん断層の場合にも式 (1) が成り立つ。

4.5 抗力係数および揚力係数 図 9 に各パターンの抗力係数 C_D と揚力係数 C_L を示す。パターン S (滑面円柱) の場合は抗力係数が $C_{DS}=1.3$ であるのに対し, 乱流遷移が起こるパターン C では $C_{DC}=0.5\sim 0.7$ に減少し, パターン D では $C_{DD}=1.6\sim 1.7$ に増大している⁽⁸⁾。はく離せん断層が非対称のパターン C-S, D-S, C-D の抗力係数 $C_{DCS}=0.8\sim 0.9$, $C_{DDs}=1.4\sim 1.5$, $C_{DCD}\approx 1.0$ は, 上・下面それぞれのパターンの抗力係数の中間値となる。またパターン C-S, C-D の場合には揚力が発生し, 揚力係数は $C_{LCS}\approx 0.5$, $C_{LCD}=0.6\sim 0.8$ である。一方パターン D-S の場合には揚力はほとんど発生しない。すなわち非対称せん断層では, 片側が乱流はく離の場合に限り揚力が発生する。

4.6 ウェークストローハル数 任意の物体についてのウェークストローハル数 S_w が Roshko⁽⁹⁾ や Bearman⁽¹⁰⁾ により次式のように定義されている。

$$S_w = f d_w / U_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで U_s ははく離せん断層の速度, d_w は後流幅である。本報では非対称はく離せん断層を扱っており上・下のはく離せん断層の速度が異なり, 式 (2) の定義をそのまま適用することができない。そのため新たなウェークストローハル数 S_w^* を次式で定義する。

$$S_w^* = f d_w / U_{s(\text{mean})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 9 Drag and lift coefficient

Fig. 10 Definition of U_{s1} , U_{s2} and d_w

図10に上・下のせん断層の速度 U_{s1} , U_{s2} と後流幅 d_w の定義を示す。上・下のせん断層が交差する位置を渦形成開始位置とみなし、 d_w はこの位置での両はく離せん断層の幅と定義した。渦形成開始位置は煙風洞の高速度ビデオ映像から、 d_w は長時間露出写真より求めた。また、 $U_{s(\text{mean})}$ は上・下面のはく離せん断層速度の平均値 $(U_{s1} + U_{s2})/2$ とし、おのおののせん断層速度は圧力分布の極小値 C_{pm1} , C_{pm2} を用いて次式から求めた。

$$U_{s1} = U\sqrt{1 - C_{pm1}}, \quad U_{s2} = U\sqrt{1 - C_{pm2}} \quad \dots\dots (4)$$

図11に背圧パラメータ K と両ストローハル数 S , S_w^* の関係を示す。 S_w^* の値には d_w の読取り誤差を考慮しエラーバーを付加した。ストローハル数 S はフローパターンの変化により 0.17~0.30 の幅で変化するが、ウェークストローハル数 S_w^* はフローパターンや流れの対称、非対称によらずほぼ 0.21 の一定値である。

5. 結 論

亜臨界レイノルズ数 $Re = 1.0 \times 10^4 \sim 7.2 \times 10^4$ において、円柱上・下面のはく離せん断層が非対称となる円柱まわりの流れを調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 円柱のはく離領域の流れは、両はく離せん断層の巻込みの影響を強く受け、ストローハル数、背圧係数、抗力係数は、上・下面それぞれのフローパターンの中間値となる。

(2) 非対称はく離せん断層の場合も、ストローハル数と抗力係数の間には対称はく離せん断層と同じ関係式(1)が成り立つ。

(3) 円柱の片側のみで乱流遷移が起こるフローパ

Fig. 11 Wake Strouhal number

ターンの場合、乱流遷移側に $C_L = 0.5 \sim 0.8$ の揚力が発生する。

(4) 両はく離せん断層の平均速度 $U_{s(\text{mean})}$ および渦形成開始位置での両はく離せん断層の幅 d_w で定義したウェークストローハル数 $S_w^* = f d_w / U_{s(\text{mean})}$ は、フローパターンによらず一定値になる。

おわりに本実験にご協力いただいた当時本学学生の矢ヶ崎貴浩君に謝意を表す。

文 献

- (1) Kestin, J. and Maeder, P. F., *NACA Tech. Note*, No. 4018(1957).
- (2) Joubert, P. N. and Hoffmann, E. R., *J. R. Aeronaut. Soc.*, (1962), 456.
- (3) Johnson, T. R. and Joubert, P. N., *Trans. ASME, Ser. C*, **91** 1(1969), 91.
- (4) 藤田秀臣・高浜平七郎・川合忠雄, 円柱表面からの熱伝達に及ぼすトリップワイヤの効果(第1報, 円柱まわりの圧力分布および抗力係数), *機論*, **50** 453, B(1984), 1275-1284.
- (5) 藤田秀臣・高浜平七郎・川合忠雄, 円柱表面からの熱伝達に及ぼすトリップワイヤの効果(第2報, 熱伝達特性), *機論*, **51** 464, B(1985), 1334-1341.
- (6) 五十嵐保, ボルテックスジェネレータのある円柱まわりの流れ, *機論*, **50** 454, B(1984), 1531-1538.
- (7) 五十嵐保・飯田恭久, ボルテックスジェネレータのある円柱まわりの流動と熱伝達, *機論*, **51** 467, B(1985), 2420-2427.
- (8) 五十嵐保, 円柱まわりの流れに及ぼすトリッピングワイヤの効果, *機論*, **52** 473, B(1986), 358-366.
- (9) Roshko, A., On the Drag and Shedding Frequency of Two Dimensional Bluff Bodies, *NACA Tech. Note*, No. 3169(1954).
- (10) Bearman, P. W., On Vortex Street Wakes, *J. Fluid Mech.*, **28** 4(1967), 625-641.