正方形柱に働く抗力の軽減に関する研究* (第2報, ストローハル数とフローパターン)

五十嵐

保*¹

Drag Reduction of a Square Prism (2nd Report, Strouhal Number and Flow Pattern)

Tamotsu IGARASHI

To control the flow around a square prism, a small rod was set upstream of the prism. The side of the prism, D , was 20 mm and the Reynolds number ranged from 5.3×10^3 to 3.2×10^4 . The effects of the diameter of the rod, d , the distance between the axes of the rod and prism, L , and the Reynolds number on the drag reduction of the prism were investigated. The value of the Strouhal number of the prism is classified into three groups. These groups correspond to the flow patterns around the prism, which are related to the behavior of vortex shedding from the rod. The maximum reduction of drag coefficient is 70% compared with that without the rod at $d/D=0.3$ and $L/D=2.5$.

Key Words: Fluid Force, Flow Control, Square Prism, Drag Coefficient, Pressure Distribution, Flow Visualization, Strouhal Number, Flow Pattern

1. ま え が き

著者は物体まわりの流れの制御に関し、円柱のはく離せん断層内に小円柱を設置し、せん断層を強制再附着させる方法^{(1)~(3)}を提案した。円柱に働く抗力は30%減少した。また坂本ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は同方法を正方形柱に適用したが、30%の抗力軽減が限界であった。

最近、著者は一様流中に置かれた物体の抵抗軽減と伝熱促進に関し画期的方法を見いだした。第1報⁽⁶⁾では小さなロッドを正方形柱の上流に設置し、レイノルズ数一定の条件で正方形柱まわりの流れを制御した。その結果、正方形柱に働く抗力がロッドのない場合に比べて、ロッドからの渦放出のある場合は50%、渦放出が停止し正方形柱前面に閉渦が形成される場合は70%も軽減された。本手法は円柱⁽⁷⁾にも適用され、円柱の抗力は半減した。前報⁽⁸⁾では正方形柱の抗力軽減と伝熱促進に関する実験を広範囲レイノルズ数で行った。正方形柱の抗力はロッドのない場合の抗力の25%まで軽減され、かつ平均熱伝達率は40%増加した。

本報では正方形柱の抗力に密接に関連したストロー

ハル数とフローパターンの関係およびレイノルズ数によるフローパターンの変化に着目し、これらの諸量の関係を明らかにする。

記 号

C_D, C_{DR} : 正方形柱およびロッドの抗力係数

C_{DR} : 総抗力係数 $= C_D + (d/D)C_{DR}$

C_p : 圧力係数

C_{pf}, C_{pb} : 前方岐点の圧力係数, 背圧係数

D, d : 正方形柱の辺長およびロッドの直径

f, f_R : 正方形柱およびロッドからの渦放出周波数

L : ロッドと正方形柱の軸中心間距離

Re, Re_d : レイノルズ数 $Re = UD/\nu$, $Re_d = Ud/\nu$

S, S_R : ストローハル数 $S = fD/U$, $S_R = fd/U$

U : 主流速度

ν : 流体の動粘性係数

2. 実験装置および方法

座標系と主要記号を図1に示す。実験は測定部断面400 mm×150 mm、長さ800 mmの二次元吹出し低速風洞で行った。正方形柱は辺長 $D=20$ mm、軸長150 mmである。一様流速度は $U=4\sim 24$ m/sの範囲で変化した。したがってレイノルズ数は $Re=5.3 \times 10^3$

* 平成5年8月21日 流体工学部門講演会において講演, 原稿受付 平成5年8月27日.

*¹ 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水1-10-20).

～ 3.2×10^4 である。また主流乱れはこの範囲内ではほぼ0.4%である。直径 $d=1 \sim 6$ mmのロッドを用意し、正方形柱の上流軸間距離 $L/D=2.0 \sim 4.5$ の位置に設置した。まずロッド径、ロッド位置、レイノルズ数を系統的に変化させて正方形柱後流のストローハル数を測定した。流れの概略を把握するため、煙風洞による正方形柱まわりの流れの可視化を一樣流速度 $U=6$ m/s,

図1 座標系と記号

(a) $L/D=2.0$ (c) $L/D=3.0$ (b) $L/D=2.5$ (d) $L/D=4.0$

図2 ストローハル数：レイノルズ数の影響

レイノルズ数 $Re=8 \times 10^3$ で行った。次に正方形柱の表面圧力分布を軸方向中心断面に設けた $\phi 0.6$ mmの圧力孔で測定し、抗力係数を求めた。さらにロッドの表面圧力分布を $\phi 0.5$ mmの圧力孔で測定し、ロッドの抗力を考慮した総抗力係数を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 ストローハル数 正方形柱後流のストローハル数を図2(a)～(d)に示す。軸間距離 $L/D=2.0, 2.5$ ではストローハル数はロッド径が小さいときはレイノルズ数によらずほぼ一定で、その値はロッドがない場合の値 $S_0=0.133$ より小さい。これは第1報⁽⁶⁾でパターンAとしたロッドからの渦放出のある場合である。しかしロッド径が大きくなるとストローハル数

は著しく増大し $S \geq 0.20$ である。これは軸間距離が臨界間隔以下になり、ロッドからの渦放出が停止したパターン B の場合である。またパターン A, B の中間のロッド径において、レイノルズ数の増大によりストローハル数が激減し、パターンは B から A に変化している。この変化はごく狭いレイノルズ数範囲で起こっている。このときの両者の値を臨界ロッド径および臨界レイノルズ数と呼ぶ。 $L/D=3.0$ では、どのロッドでも実験レイノルズ数範囲でパターン B を保持できない。ストローハル数の激減は二とおりある。すなわち、 $S=0.20$ 前後から S_0 以下および S_0 以上の場合である。 $S=0.15$ 前後をパターン C とする。なお第1報⁽⁶⁾では $Re=3.2 \times 10^4$, $d/D \leq 0.2$, $L/D \leq 4.0$ のためパターン C は見いだされなかった。 $L/D=4.0$ ではパターン B はない。ロッド径が大きい場合、ストローハル数は $S=0.16$ 前後の値から S_0 以下に減少している。図3は一定レイノルズ数におけるストローハル数に及ぼすロ

ッド径の影響を示す。ロッド径が大きいほど臨界間隔は大きく、臨界レイノルズ数は大きい。ストローハル数の値の範囲がほぼ三つの領域、すなわち3パターンに区分される。

ロッドなし $S_0=0.133$

パターン A $S=0.11 \sim 0.13$

パターン B $S=0.18 \sim 0.23$

パターン C $S=0.14 \sim 0.16$

3.2 フローパターン 先述の三つのフローパターンを煙風洞により可視化した。図4(a)~(d)の左側、右側にそれぞれの長時間(1s)露出、瞬間写真を示す。パターン A ではロッドからの渦放出が認められ、正方形柱後流の渦形成領域がロッドのない場合に比べて著しく後退している。パターン B はロッドからの渦放出が停止した場合である。ロッドからはく離れた両せん断層が正方形柱前縁に再付着し、ロッドと正方形柱間に準定常渦が形成されている。正方形柱の渦形成領域はさらに後退し、後流幅が狭くなっている。パターン C は今回見いだされたパターンである。パターン A と同様ロッドからの渦放出があるが、可視化から観察される両者の差異は次のとおりである。パターン C ではロッドからの両せん断層が合体し、双子渦を形成している。この双子渦の後端から渦放出している。正方形柱の渦形成領域はパターン B よりもさらに後退している。

上述の三つのフローパターンの出現条件を L/D - d/D マップ上に図示したのが図5である。領域 A, B, C はそれぞれ実験レイノルズ数範囲でパターン A, B, C であることを示している。領域 BA はレイノルズ数が増加するとパターン B からパターン A に変化することを示している。領域 BC, CA も同様である。なお領域 B と BA の境界は $d/D \leq 0.2$ において次式で与えられ、第1報⁽⁶⁾の結果と一致している。

$$L/D - 1.5 = 5(d/D) \dots\dots\dots (1)$$

また領域 A と BA の境界は $d/D < 0.2$ において次式で与えられる。

$$L/D - 1.5 = 10(d/D) \dots\dots\dots (2)$$

3.3 圧力分布 図2(b)のストローハル数とレイノルズ数の関係においてステップ状の変化を示した $L/D=2.5$, $d=3$ mm の場合の圧力分布を図6に示す。 $Re \leq 1.6 \times 10^4$ はロッドからの渦放出が停止し、正方形柱の前面領域に準定常渦が形成されるパターン B である。圧力係数は前面では零近くに低下し、側面および背面では上昇している。 $Re \geq 1.8 \times 10^4$ はロッドからの渦放出のあるパターン A である。前面の圧力係数はパターン B ほど低下しないが、ロッドのない場合に比

(a) $Re=8 \times 10^3$

(b) $Re=2.1 \times 10^4$

図3 ストローハル数：ロッド径の影響

図4 煙風洞による流れの可視化($D=20$ mm, $U=6$ m/s)

図5 フローパターンの分類

べて60%程度低下している。ロッドによる抗力軽減はレイノルズ数が低いほど有効であることを示している。

図7はレイノルズ数 $Re=2.1 \times 10^4$ における圧力分布に及ぼすロッド径の影響を軸間距離に対して示している。 $L/D=2.0$ はパターン B の場合であるが、ロッド

図6 正方形柱まわりの圧力分布
(その1:レイノルズ数の影響)

径が大きいほど圧力係数は前面で低下し、上・下側面および背面で上昇している。特に大きなロッド径では、前面の圧力係数は負の値である。 $L/D=2.5$ の場合は d

図7 正方形柱まわりの圧力分布
(その2: ロッド径の影響)

≤ 3 mm がパターン A, $d \geq 4$ mm がパターン B である。一方 $L/D=3.0$ の場合は $d \leq 4$ mm がパターン A, $d \geq 5$ mm がパターン C で, 両パターンはロッドからの渦放出のある場合である。パターン C の圧力係数はパターン A に比べ前面で低下し, 背面で上昇している。パターン C のほうが抗力軽減に有効であることを示している。

3・4 抗力係数 フローパターンの変化する $L/D-d$ の組合せに対するレイノルズ数による抗力係数の変化を図 8(a) に示す。レイノルズ数が増加するとパターン B から C へ, またはパターン B から A へ変化する。換言すれば, ロッドはレイノルズ数が低いほど抗力の軽減に有効である。パターン別では, パターン A, B, C の順に抗力係数は低下

図8 抗力係数

する。図8(b)に $Re=2.1 \times 10^4$ におけるロッド位置、ロッド径と抗力係数の関係を示す。抗力係数はロッド径が大きく、軸間距離が短いほど減少している。特にロッド $d=5, 6 \text{ mm}$ では軸間距離によりパターンは B, C, A と変化するが、抗力係数はロッドがない場合に比べて半減している。最小抗力係数はロッド径 $d/D=0.25, 0.30$, ロッド位置 $L/D=2.5$ のときに得られ、ロッドがない場合の値の 22% に軽減されている。

3・5 フローパターンと流れ特性 正方形柱に働く抗力は前面と背面の抗力の和である。この両者を代表する物理量は前方・後方岐点の圧力係数 C_{pf}, C_{pb} である。第1報⁽⁶⁾と同様、その差 $\Delta C_p (=C_{pf}-C_{pb})$ と抗力係数の関係を図9に示した。抗力係数はフローパターンに無関係に次式で与えられる。

$$C_D = 0.88 \Delta C_p + 0.11 \dots\dots\dots (3)$$

図9 抗力係数と前方・後方岐点の圧力差との関係

図10 抗力係数とストローハル数の関係

前方岐点と後方岐点の圧力差 ΔC_p を測定すれば、抗力係数は式(3)より求めることができる。

3・4節までに、正方形柱後流のストローハル数および抗力係数がフローパターンと密接な関係にあることが明らかになった。そこで、ストローハル数と抗力係数の関係を図10に示した。フローパターン A, B, C のグループで見ると、ストローハル数の大きなパターン順に抗力係数は低下している。しかし、個々のパターンごとに見ると、パターン A は逆の傾向を示しストローハル数が低下するほど抗力係数も低下している。特にパターン A では両者は一定の関係にあり、ストローハル数から抗力係数を予測することができる。一方パターン B, C ではデータのばらつきが大きく、ストローハル数から抗力係数を精度高く予測できない。

3・6 総抗力係数 ロッドの付加抗力を考慮した総抗力係数について検討する。前報^{(2),(7)}によれば、ロッド ($d=2 \text{ mm}$) 単独の抗力係数はレイノルズ数範囲 $Re_d=2 \times 10^3 \sim 10^4$ でほぼ 1.0 で、従来の結果とよく一致している。下流側に正方形柱がある場合のロッドの

図11 ロッドまわりの圧力分布

図12 ロッドの抗力係数

図 13 総抗力係数

圧力係数および抗力係数 C_{DR} を図 11, 12 に示す。図 11 には直径 $d=2, 4$ mm のロッド単独の圧力分布も載せてある。ロッド径に比べ測定孔が大きいのが、比較的精度よい結果が得られている。下流側に正方形柱があると、ロッドの背圧が上昇し、ロッドの抗力が減少することがわかる。ロッドの抗力は軸間距離が小さくなると減少し、 $L/D=2.0$ のパターン B のとき最小値 $C_{DR}=0.5$ である。また直径 $d=6$ mm, すなわち $d/D=0.3$ のロッドの抗力が軸間距離によらず最小である。次式で定義される総抗力係数 $C_{DT}=C_D+(d/D)C_{DR}$ を、 $Re=2.1 \times 10^4$ に対し図 13 に示す。軸間距離 $L/D=2.5$, ロッド径 $d/D=0.3$ のとき、総抗力係数は最小値 $C_{DT}=0.606$ である。なおこの系では、レイノルズ数によらずパターン B である。結局、総抗力係数でもロッドのない場合の正方形柱の抗力係数の 30% 以下である。

4. 結 論

正方形柱の上流側に小さなロッドを設置し、正方形柱の抗力軽減を達成した。抗力に及ぼすレイノルズ数 ($Re=5.3 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^4$) の影響とフローパターンとの関連に関し、以下の結論を得た。

- (1) ロッドおよび正方形柱からの渦放出に関連し、ロッド位置 L/D , ロッド径 d/D , レイノルズ数範囲により三つのフローパターンが現れる。
- (2) 正方形柱のストローハル数はフローパターンと対応している。ロッドからの渦放出がある $S=0.11 \sim 0.13$ のパターン A, $S=0.14 \sim 0.16$ のパターン C,

渦放出が停止する $S=0.18 \sim 0.23$ のパターン B である。

- (3) フローパターンの出現条件を $L/D-d/D$ マップ上に図示した。レイノルズ数に無関係にフローパターンが保持される場合、レイノルズ数が増加するとパターン B から A に遷移する $B \rightarrow A$ タイプ、同様に $B \rightarrow C$ タイプ, $C \rightarrow A$ タイプに区分される。

- (4) パターン B と BA およびパターン A と BA の境界は次式で与えられる。

$$L/D - 1.5 = 5d/D \quad (B \rightarrow BA)$$

$$L/D - 1.5 = 10d/D \quad (BA \rightarrow A)$$

- (5) 正方形柱の抗力係数は前方・後方岐点の圧力差と普遍的関係があり、次式で与えられる。

$$C_D = 0.88(C_{pf} - C_{pb}) + 0.11$$

- (6) 正方形柱の抗力係数はパターン A, C, B の順に減少する。特に、パターン A ではストローハル数が低いほど抗力係数が小さい。

- (7) 抗力軽減にはパターン B が最適である。特に、 $L/D=2.5$, $d/D=0.3$ のとき総抗力係数は最小となり、ロッドのない場合の抗力の 30% 以下に減少する。

終わりに、本研究の遂行にあたり実験およびまとめにご協力いただいた当時本学学生 兼本貢祐, 吉田隆充両君および本学 筒井敬之助手に謝意を表する。

文 献

- (1) 五十嵐・筒井, 小円柱による円柱まわりの流れの制御に関する研究(第1報, はく離せん断層の強制再付着), 機論, 55-511, B(1989), 701.
- (2) 五十嵐・筒井, 小円柱による円柱まわりの流れの制御に関する研究(第2報, 円柱に働く流体力), 機論, 55-511, B(1989), 708.
- (3) 五十嵐・筒井, 小円柱による円柱まわりの流れの制御に関する研究(第3報, 付着噴流の性質), 機論, 57-533, B(1991), 8.
- (4) 坂本・羽二生・小畑, はく離せん断層制御による流体力の最適抑制(正方形柱の片側せん断層制御), 機論, 55-520, B(1989), 3622.
- (5) 坂本・丹・羽二生・小畑, はく離せん断層制御による流体力の最適抑制(正方形柱の両側せん断層制御), 機論, 57-534, B(1991), 434.
- (6) 五十嵐・伊藤, 正方形柱に働く抗力の軽減に関する研究(第1報, 小さな渦発生体による流れの制御), 機論, 59-568, B(1993), 3701.
- (7) 五十嵐・筒井・神戸, 円柱に働く抗力の軽減に関する研究(第1報, 小さなロッドによる流れの制御), 機論, 60-573, B(1994), 1554.
- (8) 五十嵐, 一様流中の正方形柱の伝熱促進と抵抗軽減, 30 回日本伝熱シンポジウム講義集, (1993-5), 766.