流れのパッシブ制御による矩形断面柱の流体力の抑制*

(第1報, 正方形柱の場合)

坂本 弘 志^{*1}, 羽二生 博 之^{*1}
竹内 伸 行^{*2}, 小畑 芳 弘^{*1}

Suppression of Fluid Forces of Rectangular Cylinders by Passive Control of Flow (1st Report, In the Case of Square Prism)

Hiroshi SAKAMOTO, Hiroyuki HANIU,
Nobuyuki TAKEUCHI and Yoshihiro OBATA

The objective of the present study was to investigate the suppression of the fluid forces acting on a square prism by passive control of the flow around it. The flow control was established by introducing a fine flat plate upstream of the prism. Measurements were carried out by varying the position of the flat plate in the ranges of $S/W=0\sim3.0$ (S : distance between the flat plate and square prism, W : width of square prism) and width of the flat plate ranging from 2 to 8 mm. Then, the steady and unsteady fluid forces, vortex shedding frequency and flow pattern were systematically examined. As a result, it was found that the maximum reduction of the time-averaged drag was 75%, and maximum reduction in the fluctuating lift and drag were 95% and 80%, respectively, using the flat plate with the width of 4 mm, which is considerably smaller compared to the square prism with the width of 42 mm.

Key Words: Passive Control, Test Square Prism, Control Flat Plate, Time-Averaged Drag, Fluctuating Lift and Drag, Vortex Shedding, Flow Pattern, Jump Spacing, Mode-Switching Phenomenon

1. 緒 論

従来から工学的重要性の認識に立脚し、物体から流れがはく離する Bluff Body に作用する流体力を軽減するための数多くの手法が提案され、行われている⁽¹⁾。いずれの手法も、基本的には物体の流体力を支配するはく離せん断層を制御し、後方における渦の生成を抑制することによって、流体力の軽減を図っているものである。Bluff Body として最も基本的な形状である円柱の流体力の制御に関しては、数多くの研究がなされている。しかし同じく Bluff Body として代表的形状である矩形柱に関しては、比較的少ない。その中で矩形柱の背後にスプリットプレートを設置し、時間平均抗力の軽減を図った Bearman⁽²⁾、矩形柱の前縁あるいは後縁に丸みをつけて時間平均抗力の軽減を図った林ら⁽³⁾、さらには正方形柱の前方に小さなロッドを設置し、同じく時間平均抗力の軽減を図った Lesage-Cartshore⁽⁴⁾ および五十嵐・伊藤⁽⁵⁾の研究がある。特に五十嵐・伊藤は、ロッドの径および位置を種々

変化させ、正方形柱の抗力を詳細に調べ、ロッドの径 d/W (W : 正方形柱の一辺の幅) $=0.1\sim0.2$ において時間平均抗力は最大で 70% 程度軽減されることを示している。また著者らも小円柱あるいは小平板を用いて、正方形柱からはく離するせん断層を直接制御し、正方形柱の 1/10 程度の大きさのそれらによって、時間平均抗力は 30%、変動揚抗力は 90% 程度軽減できることを明らかにしている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしこれらの研究の大部分は、矩形柱に作用する時間平均抗力を取扱ったもので、変動流体力に関しては著者らの研究以外はほとんどない。さらには種々の断面比を有する矩形柱の流体力の制御を系統的に取扱った研究は著者らの知見のかぎりではない。特に変動流体力は各種構造物の空力不安定振動現象の発現の要因となるために、その発生の阻止は工学的に極めて重要となる。

本研究は、これまでの研究から制御物体として極めて有用であると考えられる小平板を矩形柱の前方に設置し、近寄り流れをパッシブ的に制御することによってはく離せん断層を間接的に制御し、流体力の軽減を図ろうとするものである。本報ではまず、矩形柱として最も基本的な形状である辺長比が 1 なる正方形柱を取り上げて、制御物体として用いた小平板の大きさならびに位置を系統的に変化させ、正方形柱に作用する

* 1994 年 8 月 18 日 第 72 期全国大会講演会において講演、原稿受付 1995 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町 165)。

^{*2} 学生員、北見工業大学大学院。

定常ならびに非定常流体力を詳細に調べるとともに、最も流体力が軽減される小平板の最適位置および大きさを明らかにしたものである。あわせて正方形柱周辺のフローパターンを観測し、制御されたはく離せん断層ならびに後流と流体力との関係を検討するとともに、種々の辺長比を有する矩形断面柱の流体力の制御方法を確立するための基礎資料を得ようとしたものである。

2. おもな記号

- C_D : 正方形柱の時間平均抗力係数
 $= D / (0.5 \rho U_0^2 W)$
- C_{Dr}, C_{Lf} : 正方形柱の変動抗力および揚力係数(rms 値)
 $= \sqrt{D_r^2}, \sqrt{L_r^2} / (0.5 \rho U_0^2 W)$
- C_{Dr} : 正方形柱と制御平板を合せた時間平均総抗力係数
 $= C_D + (h/W) C_{Dh}$
- C_{Dh} : 制御平板の時間平均抗力係数
- C_p : 正方形柱表面の時間平均圧力係数
 $= \Delta p / (0.5 \rho U_0^2)$
- C_{pb} : 正方形柱の時間平均背面圧力係数
 $= (p_b - p_0) / (0.5 \rho U_0^2)$
- C_{pr} : 正方形柱表面の変動圧力係数(rms 値)
 $= \sqrt{p_r^2} / (0.5 \rho U_0^2)$
- D : 正方形柱の時間平均抗力
- D_h : 制御平板の時間平均抗力
- D_0 : 無制御時の正方形柱の時間平均抗力
- D_T : 制御平板と正方形柱を合せた時間平均総抗力
- D_r, L_r : 正方形柱の変動抗力および揚力
- $f(X)$: 各流れモードの継続時間の確率密度
- h : 制御平板の幅
- p_b : 正方形柱背面の時間平均圧力
- p_r : 正方形柱表面の変動圧力
- p_0, U_0 : 主流の静圧および速度
- W : 正方形柱の一辺の幅
- x_s, y_s : 正方形柱表面の圧力孔の位置
- γ_1, γ_2 : 各流れモードの継続時間の割合

3. 実験装置および方法

実験に当たっては、断面 $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 、長さ 4 m の測定部を有する環流形風洞を用いた。角柱は一辺の幅 W が 42 mm の正方形柱で、軸長は測定部の幅と同一の 400 mm である。表面上の時間平均ならびに変動圧力は、半導体圧力変換器によって測定した。また時間平均抗力ならびに変動揚抗力の測定に用いた正方形柱は、アクティブ部ならびにダミー部によって構成され、その内部には力を検出するためのロードセルを内

図1 記号の定義および座標系

蔵している(基本的な構造と性能は既報⁽⁸⁾に詳しく記述してある)。近寄り流れの制御は、正方形柱前方の中心線上($y=0$)に小平板(以下制御平板とする)を設置することによって行った。制御平板はステンレス製であり、その寸法は厚さ 0.2 mm で、幅 h を $2, 3, 4, 5, 6 \text{ mm}$ および 8 mm と 6 とおりに変化させた。また制御平板は風洞測定部両側面に取付けた装置(既報⁽⁷⁾に詳しく記述してある)に十分な張力を与えて固定した。

実験は主流の速度 U_0 を 20 m/s と一定とし、制御平板の位置を図1に示すように正方形柱前方の中心線上に設定し、 $S/W=0 \sim 3.0$ (x 方向)の範囲で変化させた。さらに正方形柱周辺のフローパターンの観測は、スモークワイヤ法によって行った。この場合のレイノルズ数は 5.6×10^3 で、流体力測定時における $Re=5.6 \times 10^4$ に比べて1けた小さい。しかしレイノルズ数が 10^3 を超えるとストローハル数ならびにウェーク形状に大きな差異が認められないことから⁽⁹⁾、流れの定性的な評価を行ううえで支障はないものとして行った。なお本実験で使用したおもな記号および座標系の定義は図1に示すとおりである。

4. 結果および考察

4.1 時間平均流体力の制御 図2は、 $2, 3, 4, 5, 6 \text{ mm}$ および 8 mm なる 6 とおりの制御平板を正方形柱上流側の中心線上($y=0$)に沿って、 $S/W=0 \sim 3.0$ の範囲で変化させた場合における正方形柱の時間平均抗力係数 C_D の分布を示したものである。 C_D は制御平板と正方形柱との間隔 S/W が大きくなるにしたがって減少し、かつ制御平板の幅 h が大きいほど、その軽減量は増大する。またいずれの制御平板の大きさにおいても、 C_D が最小となるいわゆる制御平板の最適位置の存在が認められる。また図3は、 $h=5 \text{ mm}$ の制御平板を間隔 $S/W=1.90$ と一定とし、流れと直角方向(y 方向)に変化させた場合の C_D, C_{Dr} および C_{Lf} の分布を示したものである。いずれの流体力も $y=0$ な

表 1 各制御平板における C_D の最大軽減割合

Width of control flat plate h	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm
Size ratio of control plate and square prism h/w	0.048	0.071	0.095	0.119	0.143	0.191
Rate of maximum reduction in C_D	58 %	66 %	75 %	79 %	82 %	85 %

図 2 制御平板の位置 S/W および幅 h に対する C_D の変化 図 3 制御平板の位置 y/W に対する C_D , C_L および C_{Df} の変化 図 4 正方形柱表面上の時間平均圧力係数 C_D および変動圧力係数 C_{Df}

る中心線上に制御平板が位置するときに最も軽減され、 $y=0$ なる位置が制御平板の最適位置であることがわかる。

次に表 1 には C_D の最大軽減割合 $(C_{D0}-C_D)/C_{D0}$ (C_{D0} : 無制御時における C_D の値)を示してある。正方形柱の 1/10 程度の大きさを有する制御平板によって、 C_D は最大で 80% 程度軽減していることがわかる。著者らはこれまで小平板を用い、正方形柱からはく離するせん断層を直接制御することによって、流体力の軽減を行ってきた⁽⁷⁾。その中で正方形柱の 1/10 程度の平板を用いた場合には、 C_D は約 30% 程度軽減されることを明らかにしている。本結果から明らかなように、正方形の前縁からはく離したせん断層を直接制御するよりも、正方形柱の近寄り流れを変化させて、間接的にはく離せん断層を制御するほうが、抗力の軽減に対しては有効であることがわかる。また Lesage-Gartshore⁽⁴⁾ および五十嵐・伊藤⁽⁵⁾ は、正方形柱の前方にロッドを設置した場合の C_D の軽減割合をすでに調べており、その中でロッドの径 $d/W=0.2$ において、 C_D は最大で 70% 程度軽減されることを明らかにしている。本実験で採用した $h/W \approx 0.2$ の平板の場合には、 C_D は最大で 85% 程度軽減している。したがって、同一の大きさを有するロッドと平板を比較した場合には、平板のほうがより大きな C_D の軽減を生み出すこ

とがわかる。さらに図 2 に示す C_D の分布で注目されることは、いずれの大きさの制御平板においても S/W のある範囲で C_D が急激に変化する、いわゆる流れの Jump 現象が生ずることである。このような Jump 現象は同一の大きさを有する直列配列された二つの正方形柱においても発生することはすでに著者らによって明らかにされているが⁽¹⁰⁾、大きさの比が 1/10 以下でかつ形状が異なる直列配列された二つの物体においても発生することは非常に興味のある現象であるといえる。

また図 2 に示す S/W に対する C_D の変化のようすは、正方形柱表面上の圧力分布の測定結果からも理解できる。図 4 は $h=5$ mm の制御平板を採用し、その位置を四とおり変化させた場合の正方形柱表面の時間平均圧力係数 C_p ならびに変動圧力係数 C_{pfl} を示したものである。まず Jump 現象が発生する $S/W=1.95$ よりも小さな範囲では、制御平板からはく離した流れは正方形柱前面の両端付近に再付着し、二つの物体間に準定常渦領域が形成される。その結果正方形柱の前面はこの渦領域にさらされるために、前面圧は小さな値となり、 C_D は減少する。特に Jump 現象が発生する直前の $S/W=1.90$ 付近における前面の C_p ならびに C_{pfl} は最も小さな値となっている。しかし Jump Spacing を超えた $S/W=2.38$ では、制御平板の後流(後で詳し

表 2 各制御平板における C_{Lf} および C_{Df} の最大軽減割合

Width of control flat plate h	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm
Size ratio of control plate and square prism h/w	0.048	0.071	0.095	0.119	0.143	0.191
Rate of maximum reduction in C_{Lf}	90 %	93 %	95 %	97 %	98 %	98 %
Rate of maximum reduction in C_{Df}	68 %	76 %	78 %	82 %	83 %	83 %

図 5 制御平板の位置 S/W および幅 h に対する C_{Lf} の変化

図 6 制御平板の位置 S/W および幅 h に対する C_{Df} の変化

く述べるがカルマン渦を形成)の影響を受けるために C_p は無制御のそれに比べてかなり小さいが、中心で最大となる形状に復帰し、 C_D は回復し始めている。また背面においても、前縁からはく離れたせん断層は側面前縁付近に再付着し、かつ後縁からの巻上がりも弱いためにいずれの S/W においても背圧はかなり小さなものとなっている。特に Jump 現象が発生する直前での C_{pb} は最小となっている。Jump Spacing を超えるとはく離せん断層の側面への再付着位置は後退し、後縁からの巻上がりもまた強まるために背圧は大きくなり、 C_D は回復し始める。

4.2 変動流体力の制御 図 5 および図 6 は、六とおりの大きさの制御平板を $y=0$ なる中心線上に設置し、間隔 S/W を変化させた場合における正方形柱の変動揚力係数 C_{Lf} および抗力係数 C_{Df} を示したものである。あわせて表 2 には各制御平板における正方形柱の C_{Lf} および C_{Df} の最大軽減割合を示してある。 C_{Lf} の最大軽減割合は $h=2$ mm なる正方形柱の 1/20 程度の制御平板で 90%，そして 1/10 ($h=4$ mm) を超えると 95%以上となっている。また C_{Df} も $h=4$ mm を超えると 80%程度軽減され、 C_{Lf} を含めた変動流体力は正方形柱の 1/10 程度の大きさの制御平板によってほぼその発生を抑制することができることとなる。

このような変動流体力の発生は、以下の流動

パターンの生成に基づくものと考えられる。すなわち制御平板からはく離れた流れは、正方形柱の前面の両端付近に付着し、一部は物体間に流入して準定常渦領域を形成し、他は再び正方形柱の前縁からはく離して側面に沿って流下する。このときのとはく離せん断層によって輸送される渦塊は、制御平板の後流との干渉によって輸送途中で拡散し、大規模渦(カルマン渦)へと成長することなく後方へ流出する。その結果正方形柱の後方には規則性のあるカルマン渦は形成されず、変動流体力の発生が阻止されることになるものと考えられる。著者らは、正方形柱からはく離れたせん断層内に小平板を直接挿入することによって、その発達を阻止する方法で変動流体力の制御を試み、正方形柱の 1/10 程度の大きさの制御平板によって、 C_{Lf} を本結果と同じの 95%軽減できることを明らかにしている⁽⁷⁾。これもまたとはく離せん断層内の渦塊を平板で直接拡散させて、その成長を阻害したものである。したがって変動流体力の制御は、とはく離せん断層内の渦塊を拡散させて、大規模渦への成長を阻害することが最も有効であると考えられる。

また、変動流体力が最小となる、いわゆる制御平板の最適設置位置 S/W は、制御平板の幅 h が大きくなるにしたがって拡大し、例えば $h=8$ mm の場合には $S/W=1.0\sim 2.4$ なる広い範囲で C_{Lf} は最小となって

いる。このように S/W の広い範囲のいずれの位置に制御平板を設置しても、 C_{Lf} あるいは C_{Df} の発生を阻止できることは、その設置が容易であることから工学的応用を考えた場合には非常に有効な制御方法であるといえる。さらに Jump Spacing を超えると C_{Lf} および C_{Df} は回復し始めるが、制御平板が大きくなるにしたがって、その回復割合は小さなものとなっている。例えば $h=8\text{ mm}$ の場合の $S/W=3.0$ 付近での C_{Lf} の軽減割合は 90% となっており、制御平板が大きい場合には Jump Spacing を超えても C_{Lf} の発生はほぼ阻止されている。

次に図 7 は、制御時における正方形柱の変動揚力係数 C_{Lf} とそれを支配する側面の変動圧力係数 C_{pf} (側面中心 $x/w=0.5$ における値を採用) との関係を示したものである。図 7 から C_{Lf} と C_{pf} との間には

$$C_{Lf}=2.31 \times C_{pf}-0.23 \cdots \cdots (1)$$

なる関係式が成立し、上式を用いることによって無制御時の場合も含め、側面中心位置の変動圧力のみでの測定結果から変動揚力を算出できることとなる。したがって、種々の辺長比を有する矩形柱においても、側面中心の C_{pf} のみの測定から C_{Lf} の評価が可能となり、今後の研究遂行上極めて貴重な資料となる。また、図 7 に示す結果で側面変動圧力が $C_{pf}=0.1$ なる値を有しているが、 C_{Lf} は零となっている。これは側面の各位置における C_{pf} はある値を有してはいるが、位相差のある不規則な変動成分であるために側面全体の積分値である C_{Lf} は結果的に零になるものと考えられる。

4.3 放出渦の制御とフローパターンの検討

図 8 は $h=3\text{ mm}$ の制御平板に関して、その位置 S/W を変化させた場合の正方形柱に作用する変動揚力 C_{Lf} の波形ならびにスペクトル分布を示したものである。

図 7 変動揚力係数 C_{Lf} と側面変動圧力係数 C_{pf} との関係

間隔 S/W の増加とともに C_{Lf} の発生は阻止され始め、Jump Spacing 付近では、明りょうなスペクトルピーク値はまったく認められない。変動揚力は物体の後方に形成されるカルマン渦に起因するものであるから、Jump Spacing 直前では正方形柱からの規則性のある渦放出は完全に抑制されているものと考えられる。また、図 8 に示す結果で注目されることは、同一の $S/W=1.55$ において二とりの C_{Lf} の発生、いわゆる渦放出がある場合とない場合のパターンが存在することである。これは同一の大きさの直列配列された二つの物体においてつねに認められる現象であるが、前述したように二つの物体の形状と大きさが異なっても生ずることは、流れの不安定現象に関連して興味のあることである。

また、図 9 は、正方形柱後流近傍における変動速度の rms 値 $\sqrt{u'^2}/U_0$ の分布を等値線図として示したものである。若ら⁽¹¹⁾ は、後流領域の物体中心付近における変動速度の rms 値が極大となる位置が、はく離せん断層の最初に巻き上がる位置であると指摘している。図 9 (a) に示す無制御の場合には、中心線上 ($y=0$)

図 8 変動揚力の波形とパワースペクトル分布

(a) 無制御の場合

(b) 流体力が最も制御される場合

図9 正方形柱後流の等変動速度線図

の $x/W=2.0$ 付近に rms 値の極大値が存在し、明らかに渦形成が行われていることがわかる。しかし図9(b)に示す場合には無制御の場合のように中心線上付近に rms 値の極大値は認められず、かつ後流内の rms 値は全体的に小さなものとなっている。また、 $y/W=0.6$ 付近に下流に沿って rms 値の比較的大きい領域が存在している。この領域に沿って、正方形柱からはく離れたせん断層は巻き上がることなく、一連の孤立した渦となって流出しているものと考えられる。したがって流体力が最も制御される Jump Spacing 付近では、はく離せん断層は制御平板の後流との干渉によって乱流拡散し、交互の渦放出は完全に阻止されていることが、この結果からも結論できる。

つぎに図10は、制御平板の設置位置の相違に基づいて発生するフローパターンの模式図を示したものである。 S/W の変化に基づくフローパターンは、図10に示すように大略的に三とおりに分類することができる。まず Pattern A は、 $S/W=0$ 付近からカルマン渦の放出が阻止し始める範囲までにおいて生ずるものである。制御平板のはく離せん断層は正方形柱前面に付着し、一部は物体間に巻き込んで準定常渦領域を形成し、他のそれは正方形柱前縁からはく離して後方にカルマン渦を形成する。しかしこの場合、正方形柱の前縁からはく離れた流れは乱流拡散を起こすために後方での巻き上がりは弱くかつ位置もかなり後退するために

(a) Pattern A

(b) Pattern B

(c) Pattern C

図10 制御されたフローパターンの分類

(a) 無制御

(d) $S/W=1.67$

(b) $S/W=0.71$

(e) $S/W=1.67$

(c) $S/W=1.43$

(f) $S/W=2.38$

図11 フローパターンの可視化観測結果

形成されるカルマン渦は弱いものとなっている。次に Pattern B は、Jump Spacing 直前付近の渦放出が完全に阻止されている S/W の範囲で発生するものである。このパターンにおいても、同じく物体間に準定常渦領域が形成されるが、正方形柱の前縁からはく離れた流れの乱流拡散は最も促進されるために後方で巻き上がることなく流出し、交互の渦放出は完全に阻止されたものとなる。さらに Pattern C は、Jump Spacing を超えた S/W の領域で発生するもので、制御平板および正方形柱のいずれからも規則性のあるカルマン渦が放出される。しかし正方形柱からはく離せん断層は、依然として制御平板の後流の影響を受けて乱流拡散するために、その巻き上がりは弱く、かつ位置もかなり後退したものとなる。

次に図 11 は、図 10 に示した各フローパターンを確認するうえで行った流れの可視化観測結果を示したものである。この場合のレイノルズ数は、流体力測定の場合のそれに比べて 1 けた小さいが、流れの定性的な評価を行ううえで支障はないものとして行った。まず図 10(b) に示すものは Pattern A であり、制御平板のはく離せん断層は正方形柱の前面に付着し、かつ前面はかなりの領域にわたって制御平板の後流にさらされていることがわかる。また、正方形柱の前縁からはく離れた流れの後方での巻上がりの位置は後退し、かつウェークの変動幅も図 11(a) に示す無制御のそれに比べてかなり小さい。次に図 11(c) に示すものは Pattern B であり、正方形柱の後方での交互の渦放出は完全に阻止されているものとなっている。さらに図 11(f) は Jump Spacing を超えた領域で発生する Pattern C を示したものである。正方形柱および制御平板のいずれからも交互の渦放出が行われている。また図 11(d) および図 11(e) に示す結果は、Jump Spacing 内 (Re 数が異なるために流体力の測定の場合のそれとは若干異なっている) で発生するフローパターンを示したものである。同一の S/W において、渦放出がない Pattern B とそれがある Pattern C との二通りのパターンが出現していることがわかる。

4.4 Jump Spacing における流れの検討 図 12(a) は、 $h=3\text{ mm}$ なる制御平板を用いたときの Jump Spacing における正方形柱側面の変動圧力係数 C_p の波形を示したものである。変動圧力の振幅に大小二通りの値が明確に表れており、この領域で流れモードのスイッチング現象が出現していることがわか

(a) 変動圧力波形

(b) 流れモードの継続時間の確率密度分布

図 12 Jump Spacing で発生する流れモードスイッチング現象

る。この場合の振幅が小さいものは渦放出が行われない Pattern B で、振幅が大きいものは渦放出が行われる Pattern C である。Kim-Durbin⁽¹²⁾ は、このような二つの流れが交互に発生するいわゆるモードスイッチング現象の統計的な性質を調べ、各流れモードの継続時間の確立密度は Gamma 分布に従うことを明らかにしている。同じく本研究でも認められた Jump Spacing で発生する二つの流れモードの継続時間の確立密度を調べたものが図 12(b) に示すものである。図 12(b) に示す結果は、Pattern B の継続時間の確立密度を示したもので、横軸の X 、縦軸の $f(X)$ はそれぞれ次式で表されるものである。

$$X = \frac{t}{t_{\text{Mean}}}, \quad f(X) = \frac{N_X}{N_{\text{Total}} \cdot C_X} \dots\dots\dots (2)$$

ここで t は継続時間、 t_{Mean} はその平均、 C_X は階級の幅、そして N_X はデータの数である。図 12 から明らかにように本研究で認められた二つの流れモードの継続

図 13 各流れモードの出現回数割合

図 14 Jump 現象が発生し始める間隔 S_c

図 15 総抗力とその軽減割合

図 16 流体力が最も軽減する制御平板の最適設置位置

時間は、Gamma 分布に従うことがわかる。また図 13 は、各モードの出現回数割合 γ_1 および γ_2 を示したものである (γ_1 : Pattern B の出現回数割合, γ_2 : Pattern C のそれである)。流れのスイッチング現象が発生し始める Jump Spacing の下限付近では、大部分の流れモードは渦放出が行われない Pattern B となっている。また間隔 S が大きくなるにしたがって、Pattern B の出現割合は減少し、Jump Spacing の中間付近では $\gamma_1=0.5$ で、上限付近での流れモードの大部分は Pattern C となっている。

次に図 14 は、各制御平板の大きさに対する Jump 現象を開始する間隔 S_c を示したものである。図 14 から明らかなように、Jump 現象を開始する間隔 S_c は $S_c/h = W/h + 8.0$ (3) なる関係式で表されることがわかる。また図 14 中には五十嵐・伊藤⁵⁾の制御物体としてロッドを用いた場合の Jump 現象開始位置をあわせて示している。本結果の S_c は、ロッドのそれよりも大きいことがわかる。こ

れは平板とロッドにおける後流の特性の相違によるものと思われる。

4.5 制御平板の最適幅とその設定位置 4.1 節および 4.2 節で述べたように、制御平板の幅 h が大きくなるにしたがって流体力特に時間平均抗力の軽減率は増大する。しかし制御平板の抗力 D_h と正方形柱のそれとを合せたいわゆる総抗力 D_T を考えた場合、正方形柱の抗力の軽減量に比べて制御平板に生ずる抗力が大きくなると、結果的に総抗力では軽減されないことになる。図 15 は時間平均抗力に注目し(変動流体力の中で揚力は制御平板に生じないので時間平均抗力のみ注目した)、各制御平板における C_D および C_{DT} の最小値を示したものである。図 15 に示す C_{DT} は総抗力係数で次に示すものである。

$$C_{DT} = (D + D_h) / (0.5 \rho U^2 W) = C_D + C_{Dh}(h/W) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また D_0 は無制御における正方形柱の抗力、 D_T は制御時における総抗力であり、 $(D_0 - D_T)/D_0$ は総抗力の軽減率である。図 15 から明らかなように総抗力の軽減率は、 $h/W=0.12$ ($h=5$ mm) を超えるとほぼ 75% と一定となり、それ以上の軽減率は得られない。また変動揚力は制御平板が $h/W=0.1$ より大きくなるとその発生がほぼ抑制されることから、制御平板の最適幅は正方形柱の大きさの 1/10 程度であると結論される。

次に図 16 は、図 5 に示す変動揚力の変化に注目し、 C_{Lf} が最も軽減する制御平板の設置位置いわゆる最適位置を示したものである。図 16 に示すように最適位置は、 h/W が大きくなるにしたがって拡大し、例えば $h/W=0.12$ ($h=5$ mm) の場合には $S/W=1.3 \sim 2.0$ とかなり広い範囲となっている。

5. 結 論

本研究は、正方形柱の前方に小さな平板を設置して、近寄り流れをパッシブ制御することによって流体力の軽減を図ったもので、以下の結論を得た。

(1) 正方形柱の 1/10 程度の小平板によって正方形柱と制御平板との抗力を合せた総抗力で 75%、変動揚力で 95% そして変動抗力で 80% 程度軽減され、特に変動流体力の発生はほぼ抑制できる。

(2) 正方形柱からはく離するせん断層を間接的に制御した本手法は、これまでの研究で報告したはく離せん断層を直接制御するよりも時間平均流体力の軽減に対しては効果が大きい。

(3) 制御された流動パターンは、制御平板の設置位置の相違によって 3 種類に分類され、その中での正方形柱のはく離せん断層が乱流拡散し、後方で巻き上

がることなく流出するパターンの場合に時間平均抗力, 変動揚抗力そして渦放出が最も制御される。

(4) 制御平板と正方形柱とのある特定の間隔で二つの流れモードが交互に表れるスイッチング現象が発生し, 流れの制御が不安定となる。またその現象を統計的に取扱った結果, 直列あるいは並列配列された円柱あるいは角柱の場合のそれと同一の特性を有する。

(5) 本研究で得られた結果は, 種々の辺長比を有する矩形断面柱の流体力の制御方法を確立するうえで貴重な基礎資料を与える。

文 献

- (1) Zdravkovich, M. M.; *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 7-2

- (1981), 145.
 (2) Bearman, P. W., *J. Fluid Mech.*, 21-2(1965), 241.
 (3) 林・ほか3名, 九大工集報, 50-6(1977), 767.
 (4) Lesage, F. and Gartshore, I. S., *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 25-2(1987), 229.
 (5) 五十嵐・伊藤, 機論, 59-568, B(1993), 3701.
 (6) 坂本・ほか2名, 機論, 55-520, B(1989), 3622.
 (7) 坂本・ほか3名, 機論, 60-573, B(1994), 1575.
 (8) 坂本・ほか3名, 機論, 57-475, B(1986), 1175.
 (9) Okajima, A., *J. Fluid Mech.*, 123(1982), 379.
 (10) Sakamoto, H. and Haniu, H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 110-2(1988), 140.
 (11) 若・ほか2名, 機論, 56-521, B(1990), 11.
 (12) Kim, H. J. and Durbin, P. A., *J. Fluid Mech.*, 196(1986), 431.