円柱の流体力制御とその効果の解明*

(小平板による制御)

坂本 弘 志^{*1}, 羽二生 博 之^{*1}
松原 忍^{*2}, 小畑 芳 弘^{*1}Optimum Suppression of Fluid Forces
Acting on a Circular Cylinder and Its Effectiveness
(Controlled by a Fine Flat Plate)Hiroshi SAKAMOTO, Hiroyuki HANIU,
Shinobu MATUBARA and Yoshihiro OBATA

The objective of the present study was to investigate the suppression of the fluid forces acting on a circular cylinder by controlling the flow around it. The flow control was established by introducing a fine flat plate in the neighbourhood of the main cylinder. Measurements were carried out to change systematically the position of the flat plate, and then the steady and unsteady fluid forces were examined to estimate the magnitude of the reduction themselves and to identify the optimum position of the control flat plate in order to reduce the fluid forces. Furthermore, such matters as the mechanism of the flow control, the structure of the controlled wake and the behaviour of the controlled boundary layer and the separated shear layer were discussed. Then the availability of the present method to reduce the fluid forces and suppress the vortex shedding was synthetically evaluated.

Key Words: Flow Control, Circular Cylinder, Time Mean Drag and Lift, Fluctuating Drag and Lift, Vortex Shedding Frequency, Flow Pattern

1. 緒 論

本研究は、円柱に比べ大きさがかなり小さな物体をその周辺に挿入するという極めて簡便な手法で、当該物体に作用する定常および非定常流体力の軽減を図っているものである。前報⁽¹⁾では、円柱の大きさに対して、 $a/d \approx 0.06$ (d : 円柱の径, a : 制御円柱の径)なる小円柱を用いることによって、時間平均抗力および変動流体力がそれぞれ最大で50%および85%程度軽減されることを明らかにした。しかしながら、最大の軽減率が生ずる $\alpha = 60^\circ$ および 120° 付近 (α : 円柱前方よどみ点から測った円周に沿う制御円柱の設置角度) に制御円柱が位置する場合、二つの流れが双安定あるいは不安定の形で発生するために、それにともなう流体力が不連続に変化し、安定した制御が損なわれるという問題が残された。かかる二つの流動パターンは、円柱と制御円柱との間を通過する流れの偏向による円柱表面上の境界層ならびに、はく離せん断層の間欠的再付着現象に基づいて発生することが明らかとなった。

本研究はかかる物体間のすきま流れの間欠的な偏向を防止することによって、二つの流動パターンの発生を阻止し、安定した状態で流体力の制御(軽減)を図ることを目的に、制御物体として小平板を採用し、流体力の制御を試みたものである。具体的には前報で報告した制御物体である小円柱において、制御の効果が最大となった $\alpha = 60^\circ$ および 120° 付近に小平板を設置し、その迎え角を種々変化した場合における定常および非定常流体力の変化の様子、二つの流動パターンの発生の有無、流体力の安定制御の様子、制御された流体力と後流構造との関係ならびに放出渦の抑制状態を調べ、制御物体としての小平板の有効性の詳細な検討を行ったものである。

2. 実験装置および方法

実験装置および方法は、前報⁽¹⁾と同一であるので以下にその概略のみを示す。使用した風洞は、断面 $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 、長さ 4 m の測定部を有する還流形風洞である。供試円柱は前報で用いたのと同じであり、アクティブならびにダミーシリンダによって構成された直径 d が 49 mm 、軸長は測定部の幅と同一の 400 mm の円柱で、その内部には流体力を検出するための2個のロードセルを内蔵している(具体的な構造と性

* 平成3年10月6日 北海道支部第32回講演会において講演、原稿受付 平成3年8月5日。

^{*1} 正員、北見工業大学(〒090 北見市公園町165)。

^{*2} 正員、沖電気工業(株)(〒105 東京都港区虎ノ門1-17-1)。

能は前報に詳しく記述してある)。制御物体としての小平板はステンレス製であり、その寸法は幅 b が 5 mm, 厚さ 0.2 mm のものを使用した。小平板は図 1 に示す構造を有する装置で固定した。すなわち、小平板を測定部両側面に設置した円盤上のスライダに取付けた中空ボルトおよびセットパーツで構成された装置で固定し、中空ボルトを回転させることによって十分な張力を与えて設定した。その結果、流れによる小平板自身の振動をほぼなくすことができた。また小平板の迎え角 β はスライダに取付けたセットパーツを回転させることによって精度 $\pm 1^\circ$ をもって与えることができる。

実験は主流の速度 U_0 を 20 m/s と一定とし、制御平板(以下小平板を制御平板と呼ぶ)の迎え角 β を $\beta = 0 \sim 180^\circ$ の範囲で種々変化させて行った。この場合、制御平板の位置は前報で報告した小円柱において、最大の制御効果が得られた位置を考慮し、円柱と制御平板とのすきま G を 6 mm とし、 α を $50 \sim 65^\circ$ (4 とおり) および $115 \sim 125^\circ$ (3 とおり) の範囲でそれぞれ 5° 間隔で変化させた。また円柱周辺のフローパターンの観測は、流動パラフィンミスト法によって行った。この場合の主流の速度は、レイノルズ数が 10^4 を超えると C_D がほぼ一定となることから、明りょうな可視化

図 1 供試円柱および制御平板設置装置

図 2 定義図および座標系

観測結果を得るうえで 10 m/s と一定とした。なお本実験で使用した主な記号および座標系の定義は図 2 に示すとおりである。

3. 結果および考察

3.1 時間平均流体力の制御 図 3 (a) および図 3 (b) ならびに図 4 (a) および図 4 (b) は制御平板と円柱との間隔 $G=6$ mm と一定とし(法線方向に設置された場合の間隔), 制御平板を $\alpha=60^\circ$ および 120° 付近に設置した場合の円柱の時間平均抗力係数 $C_D (= D / \frac{1}{2} \rho U_0^2 A : A$ は円柱の投影面積) および時間平均揚力係数 $C_L (= L / \frac{1}{2} \rho U_0^2 A)$ をそれぞれ示したものである。図 3, 4 中の横軸は制御平板が法線方向に位置する場合を基準とした迎え角 β を示してある。これらの結果から明らかなように、迎え角 β によって C_D が減少する場合と逆に増大する場合との 2 とおりが存在し、迎え角 β は流体力を制御するうえで重要なパラメ

(a) $\alpha=60^\circ$ 付近

(b) $\alpha=120^\circ$ 付近

図 3 制御平板の迎え角 β に対する時間平均抗力係数 C_D の変化

ータであることがわかる。また設置角 $\alpha=60^\circ$ 付近のいわゆる円柱表面上の境界層が制御される場合では $\alpha=50^\circ$ 、設置角 $\alpha=120^\circ$ 付近でのいわゆる円柱からはく離れたせん断層が制御される場合では $\alpha=120^\circ$ に、それぞれ制御平板が位置する場合に C_D の軽減率が最も大きくなる。具体的には $\alpha=50^\circ$ の場合における C_D の最大の軽減率は60%(迎え角 β の 70° 付近)、 $\alpha=120^\circ$ の場合のそれは30%(迎え角 β の 100° 付近)となっており、最大軽減率は前報⁽¹⁾で報告した小円柱を用いた場合の軽減率50%よりも大きくなることわかる。また C_L はいずれの場合も C_D が減少する β の領域で発生し、 $\alpha=50^\circ$ および 120° のいずれも最大で $C_L=1.2$ 程度の値を示している。このような C_D の減少あるいは C_L の発生は、図5に示す流れの制御パターンに基づくものと考えられる。すなわち $\alpha=60^\circ$ 付近に制御平板が設置された場合の流体力の制御は、図5(a)に示す境界層のはく離点が後退する場合と、図5(b)に示すはく離れたせん断層が乱流拡散する場合との二つの流動パターンに基づく。前者の流動パターンでは、 C_D の減少と C_L の発生が生じ、後者のそれでは C_L の発生はほとんどなく、 C_D のみが減少する。つぎに $\alpha=120^\circ$ 付近に制御平板がある場合、同じく図5

(c)および図5(d)に示すはく離せん断層が円柱に再付着する場合と、せん断層が制御平板の後流との干渉によって乱流拡散する場合である。図5(c)および図5(d)のいずれの流動パターンにおいても C_D は制御されるが、 C_L の変化の傾向から明らかなように大部分は図5(c)に示す流れの制御パターンによって行われる。また $\alpha=60^\circ$ および 120° 付近に制御平板が位置するいずれの場合も、図3および図4の図中に示してあるように、ある限定された β の範囲で二つの流動パターンが発生する。この二つの流動パターン、図5に示す各流動パターンおよび C_D が増加する領域での、はく離せん断層の巻上りが強化される流動パターンの中のいずれかの二つの流動パターンの組合せで発生する。しかしながら、二つの流動パターンの発生する領域いわゆる制御が不安定となる領域は、迎え角 β のごく小さな限られた範囲であり、流体力が最も軽減される領域では生じない。したがって、小平板は流体力の制御を安定した状態で行うことができるといううえで、小円柱に比べかなりすぐれた制御物体であるといえる。

3・2 変動流体力の制御 図6(a)および図6(b)ならびに図7(a)および図7(b)は、同じく制御平板を $\alpha=60^\circ$ および 120° 付近に設置した場合の変動揚力係数 $C_{Lr} (= \sqrt{L_r^2} / \frac{1}{2} \rho U_0^2 A)$ および変動抗力係数 $C_{Dr} (= \sqrt{D_r^2} / \frac{1}{2} \rho U_0^2 A)$ のrms値をそれぞれ示したものである。まず境界層が制御される $\alpha=60^\circ$ 付近に制御平板が位置する場合、いずれの設置角 α においても C_{Lr} の最大軽減率は90%、 C_{Dr} のそれは80%程度となっており、変動流体力の発生はほぼ阻止されること

(a) $\alpha=60^\circ$ 付近 (b) $\alpha=120^\circ$ 付近図4 制御平板の迎角 β に対する時間平均揚力係数 C_L の変化

図5 流れの制御パターン

(a) $\alpha = 60^\circ$ 付近 (b) $\alpha = 120^\circ$ 付近図 6 制御平板の迎角 β に対する変動揚力係数 C_{Lf} の変化

がわかる。とくに $\alpha = 50^\circ$ あるいは 55° に制御平板が位置する場合、 $70^\circ < \beta < 130^\circ$ なる以外のどの迎え角 β においてもほぼ同程度の軽減率を得ることができることが注目される。実際に流体力の制御を行おうとするとき、最適制御(二つの流動パターンが発生せず、安定した状態で流体力が制御される場合を最適制御とした)が得られる制御物体の設置位置がある限定された狭い領域であるならば、制御は難しい。しかしながら制御平板においては、最適制御が行われるその設置角 β の範囲は図 6 に示すようにかなり大きいために、設定は容易となる。したがって、具体的な工学的応用面からも、小平板は極めてすぐれた制御物体であるといえる。

つぎにはく離せん断層が制御される $\alpha = 120^\circ$ 付近に制御平板がある場合、設置角 α によっていくぶん異なるが、 C_{Lf} は 80~90%、 C_{Df} は 70~80% 程度軽減されることがわかる。しかし制御平板が $\alpha = 60^\circ$ 付近に位置する場合の境界層制御に比べ、最適制御が行われる迎え角 β の範囲は狭く、かつ C_{Lf} および C_{Df} の軽減率もいくぶん小さい。したがって、変動流体力を制御する場合、はく離せん断層を制御するよりも境界層を制御するほうが制御も容易で、かつ高い効果が得ら

(a) $\alpha = 60^\circ$ 付近 (b) $\alpha = 120^\circ$ 付近図 7 制御平板の迎角 β に対する変動抗力係数 C_{Df} の変化 (a) $\alpha = 50^\circ$ (b) $\alpha = 120^\circ$

図 8 変動速度のパワースペクトル

れることがわかる。

3・3 渦放出の制御 図8(a)および図8(b)は、設置角 $\alpha=50^\circ$ および 120° に制御平板を設置した場合の円柱後方の変動速度のスペクトル分布を示したものである(プローブを $x/\alpha=2.5$, $y/\alpha=1.25$ の位置に設置)。まず設置角 $\alpha=50^\circ$ に制御平板が位置する場合、図8(a)の図中に示す(b)は円柱の片側のはく離点が大幅に後退する制御パターンの場合であり[図5(a)に示す流動パターンで、円柱上下面の圧力分布の不均衡による C_L の発生から判断される]、スペクトルピーク値 f_p は認められない。したがって、この流動パターンにおいては、交互に発生する渦はほぼ抑制されているものと考えられる。つぎに図8(a)中の(c)は、はく離せん断層が乱流拡散する流動パターンであり[図5(b)に示すパターンで、円柱上下面の圧力がほぼ対称になるために C_L の発生がほとんどないことから判断される]、同じくスペクトルピークは認められない。この場合もまた、はく離せん断層が一連の孤立した渦となって後方に流出するために、交互に発生する渦はほぼ抑制されているものと判断される。一方図8(a)中の(d)は、変動揚力が逆に増大する場合の例を示したものである。スペクトルピークのエネルギーレベルは、図8(a)中の(a)に示す無制御の場合のそれよりも大きく、かつ周波数が小さくなっている。したがって、放出される渦の強さならびにウェークの変動幅はかなり増大しているものと考えられる。さらに図8(a)中の(e)は迎え角 β が大きい領域で、再び C_{Lf} が抑制される場合の例を示したものである。この場合は(b)と同じくはく離点が後退する流動パターンであるが、わずかではあるがピーク値の存在からウェークは交互に変動しながら流出しているものと考えられる。

一方、図8(b)に示す設置角 $\alpha=120^\circ$ に制御平板が位置する場合、変動揚力がかなり軽減される図8(b)中の(b), (c)および(e)に示すそれぞれの迎え角 β におけるスペクトル分布において、わずかであるがピーク値が認められる。この場合の流動パターンは、いずれもはく離せん断層が再付着する図5(c)に示すパターンであるが、ウェークは明りょうなカルマン渦とはならないが、交互に変動しながら流出しているものと考えられる。以上の結果から $\alpha=60^\circ$ および 120° 付近に制御平板が位置する場合のいずれにおいても、 C_{Lf} の発生がほぼ抑制される場合には、交互に放出されるカルマン渦の発生はほぼ抑制されているものと判断される。

つぎに図9は、(a)無制御の場合、(b)せん断層が

乱流拡散する場合、および(c)はく離点が後退する場合について、円柱近傍後流における変動速度のrms値の分布を等値線図として示したものである。この場合図9(b)および図9(c)のいずれも $\alpha=60^\circ$ に制御平板が設置されている。有江ら⁽²⁾および若ら⁽³⁾によれば、後流領域の物体中心線付近における変動速度のrms値が極大となる位置をせん断層の最初に巻き上がる位置であるとしている。図9(a)に示す無制御の場合、円柱中心線の後方 $x/d=1.37$ (●印)付近に明らかに極大値が存在しており、せん断層の巻上りが生じていることがわかる。しかしせん断層が乱流拡散する場合、図9(b)に示すようにrms値の極大値を示す位置は存在せず、かつ乱れ度の大きい領域が後方に伸長する形で存在している。したがって、カルマン渦を形成す

(a) 無制御の場合

(b) せん断層が乱流拡散する場合 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=60^\circ$)

(c) はく離点が後退する場合 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=55^\circ$)

図9 変動速度の等値線図

るためのせん断層の巻上りは、ほぼ阻止されていることがわかる。ここで注目されることは、円柱の片側の流れのみが制御されているにもかかわらず、円柱上下における等乱れ線図がほぼ対称になっていることである。このことから片側の流れを制御することによって、もう一方側の流れが間接的に制御されることがわかる。さらにはく離点が後退する場合、図9(c)に示すようにrms値の極大値は存在せず、同じくカルマン渦を形成するためのせん断層の巻上りが生じていないことがわかる。以上述べた乱れ分布の測定からも明らかのように、変動流体力の発生がほぼ抑制される場合には交互に発生するカルマン渦はほとんど形成されていないものと判断される。

3・4 制御の安定性と最適制御 3・1節で述べたように制御平板の迎え角 β のある特定の範囲で二つの流動パターンが発生し、制御が不安定となる。図10は制御平板の迎え角 β の相違によって発生する3種類の変動揚力の波形を示したものである。図10(a)は一つの流動パターンのみが発生し、安定した状態で制御が行われる場合、図10(b)は二つの流動パターンが双安定の状態が発生する場合、そして図10(c)は二つの流動パターンが不安定な状態で発生する場合の変動揚力の波形である。図10(a)のパターンは C_D ならびに C_L が軽減あるいは増大する領域で発生し、図10(b)および図10(c)のパターンは、それらの減少領域から増大あるいは増大領域から減少し始める図3および図4に示すある限定された領域のみで発生する。

図11は、制御平板の各設置角 α において流体力が制御され、かつ二つの流動パターンが発生しない、いわゆる最適制御が行われる迎え角 β の範囲を示したものである。いずれの設置角 α においても、最適制御

図10 変動揚力の波形

が行われる迎え角 β の範囲はかなり広いことがわかる。とくに制御平板が $\alpha=120^\circ$ 付近(せん断層制御)に位置する場合に比べ、 $\alpha=60^\circ$ 付近(境界層制御)に位置するほうが最適制御が行える β の範囲は広く、とくに $\alpha=50^\circ$ に制御平板が位置するとき、 β が $70\sim 130^\circ$ 以外のいずれの位置においても流体力が安定した状態で制御できる。したがって、 $\alpha=120^\circ$ 付近に制御平板が位置する場合に比べ、 $\alpha=60^\circ$ 付近に位置するほうが流体力の軽減率が大きいことを考えると、せん断層を制御するよりも境界層を制御するほうがより有効であると結論できる。

図11 最適制御が行われる領域

図12 フローパターンの分類と流れの観測

3・5 制御された流れのパターンの分類 図12は、今まで述べたところの制御平板の迎え角 β の相違に基づいて発生する各フローパターンの観測結果ならびにそれに基づく模式図を示したものである。まずType Aは円柱からはく離する片側のせん断層が制御平板の後流との干渉によって乱流拡散するために、二つのせん断層の交互の巻上りが抑制されて、一連の孤立した渦となって流出するパターンである。このパターンの大部分は図3および図4の図中に示した二つの流動パターンが発生する領域で、つぎに述べるType BまたはType C($\alpha=60^\circ$ 付近に制御平板が位置する場合)あるいはType D($\alpha=120^\circ$ 付近にある場合)と組合された形で、双安定あるいは不安定状態で間欠的に交互に発生する。Type Bは、はく離せん断層が制御平板の後流($\alpha=60^\circ$ 付近に位置する場合)あるいは平板自身($\alpha=120^\circ$ 付近に位置する場合)によって強制的に曲げられるために、その巻上り位置が円柱に近づく流動パターンである。この流動パターンの大部分は、流体力が逆に増大する領域で発生するものである。Type Cは、円柱表面上の片側の境界層のはく離点がかなり後退し、かつ交互の渦放出がほとんど抑制される流動パターンである。この流動パターンは、制御平板が $\alpha=60^\circ$ 付近に位置する場合の C_D , C_{Lr} および C_{Dr} が減少し、かつ大きな C_L が生ずる領域で発生する。最後にType Dは、制御平板によって曲げられたせん断層が円柱表面上に再付着し、 $\theta=180^\circ$ 付近まで表面に沿って流れるパターンである。この流動パターンは制御平板が $\alpha=120^\circ$ 付近に位置する場合の同じく C_D , C_{Lr} および C_{Dr} が減少し、かつ大きな C_L が発生する領域で発生するものである。なおType B, CおよびDは単独で発生する場合が大部分ではあるが、図3および図4の図中に示す二つの流動パターンが発生する領域で、これらおよびType Aとお互いに組合された形で双安定あるいは不安定の形で間欠的に交互に発生する場合もある。

4. 結 論

本研究は、供試円柱に比べかなり小さな平板をその

近傍に挿入するという極めて簡便な手法によって、流体力の軽減を試みたもので以下の結論を得た。

(1) 小平板による最大の軽減率は C_D では60%, C_{Lr} では90%および C_{Dr} では80%となり、 C_D および C_{Lr} の軽減量は前報⁽¹⁾で報告した小円柱の場合よりもさらに大きくなることがわかった。

(2) 制御平板が $\alpha=60^\circ$ 付近に位置する場合は(境界層の制御)、 $\alpha=120^\circ$ 付近に位置する場合(はく離せん断層制御)に比べ、最適制御が行える平板の迎え角 β の範囲ならびに流体力の軽減量が大きくなることがわかった。その結果、境界層を制御するほうがせん断層を制御するよりも流体力を制御するうえで有効であることが判明した。

(3) 制御平板の迎え角 β の相違によって流体力の増減が生じ、迎え角 β は流体力を制御するうえで重要なパラメータとなることがわかった。また流体力を最適制御できる制御平板の各設置角 α における迎え角 β の範囲を明らかにすることができた。

(4) 小平板においても、小円柱の場合と同様にいずれの設置角 α においても、二つの流動パターンが双安定あるいは不安定の形で発生することが認められた。しかしそれらが発生する迎え角 β の領域は極めて狭く、かつ流体力が最も制御される迎え角 β の範囲では発生せず、安定した状態で流体力の最適制御が行えることがわかった。

(5) 制御平板が $\alpha=60^\circ$ および 120° 付近のいずれに位置する場合も、迎え角 β によっていくつかのフローパターンが発生することが判明した。またこれら各フローパターンの発生領域ならびに各フローパターンにおける流体力の制御機構を明らかにすることができた。

文 献

- (1) 坂本・ほか2名, 機論, 57-535, B(1991), 882.
- (2) 有江・ほか4名, 機論, 46-408, B(1980), 1427.
- (3) 若・ほか2名, 機論, 56-521, B(1990), 11.