音響加振による円柱に加わる流体力の 制御と流れの可視化*

藤沢 延行¹, 武田 玄太郎², 板橋 楽²

Visualization and Control of Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder by Internal Acoustic Excitation

Nobuyuki FUJISAWA, Gentaro TAKEDA and Gaku ITABASHI

ABSTRACT

The possible drag reduction and mechanism of flow management over a circular cylinder by internal acoustic excitation through a slit are studied by pressure measurements and flow visualizations. The drag and lift forces acting on the cylinder are evaluated by using the measured pressure distributions. The results indicate the drag reduction up to 30 percent by an optimum combination among the slit angle, the forcing Strouhal number and the velocity amplitude of the acoustic excitation. The mechanism of drag reduction was observed by visualizing the flow field using the smoke-wire method in air and the two-color dye injection method in water. Visualization results indicate that the correlation between vortices of shedding shear-layers is attenuated by the acoustic excitation. This is cause of modulation of the shedding frequency in the shear layers and the cancellation of the shedding vortices due to the vortices generated by the slit.

Keywords : Flow control, Flow visualization, Drag reduction, Vortex shedding, Acoustic excitation, Circular cylinder

1. 緒 言

流れの中に置かれた鈍頭物体の後方にはカルマン渦が広いレイノルズ数範囲に渡って観測されるが、この渦の発生は流体関連振動や騒音の発生原因になるため、渦制御に関する研究は工学上重要である¹⁾。このような渦制御に関する過去の研究としては、物体表面に様々な形状の突起物を設けることによって組織的渦構造を抑制するパッシブ制御²⁾が良く知られているが、適用範囲の広さから最近ではアクティブ制御に対する要求が高まっている。

アクティブ渦制御に関する研究としては、円柱の回転振動³⁾⁻⁶⁾、クロスフロー振動⁷⁾、外部音響加振⁸⁾などの制御法がしばしば基礎的研究課題として取り上げられ、この種の制御法の有効性が検証された。一方、内部音響加振による渦制御法は、制御のための駆動装置を物体内部に設置できるため、翼などの外部流に対しても適

用可能であり、より実用的な制御法といえる。Hsiao & Shyu⁹⁾は、内部音響加振を用いた円柱周りの流れの制御実験を行い、後流の速度測定より抗力の低減効果を示した。しかしながら、同時に計測した円柱表面の圧力分布から求めた抗力には低減効果は認められていないことや制御機構についての検討も十分には行っていないため、抗力低減についての疑問がある。したがって、内部音響加振による抗力低減効果についての詳細な実験が必要である。

本研究においては、一様流中に置かれた円柱内部から音響流を二次元スリットを通して円柱表面に供給する制御法の有効性を明らかにすることを目的として、円柱表面圧力分布の測定とそれに基づく流体力の評価を行う。さらに、制御時における円柱周りの流れをスモークワイヤ法ならびに2色染料による流れの可視化観察を行うことで、その制御機構を検討する。

2. 実験装置および方法

2.1 対象とする流れ場

本研究で実験の対象とする流れ場の概略を Fig. 1 に示す。流速 U の一様流中に直径 D の二次元スリット付き

* 原稿受付 2001 年 9 月 11 日

¹ 正会員 新潟大学 工学部 (〒 950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050, E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp)

² 新潟大学大学院 自然科学研究科大学院生

円柱が置かれている。このとき、円柱内部に音を供給すると、円柱表面のスリット出口には速度振幅 v 、周波数 f の速度変動が発生する。この速度変動は、主流によって下流側へ流下し、スリット下流側には周波数 f の渦が形成される。このような流れ場の支配パラメータは、加振ストロハル数 $S_f (= fD/U)$ 、主流に対する速度変動の速度振幅比 $V_r (= v/U)$ 、主流に対するスリット角度 β 、そしてレイノルズ数 $Re (= UD/\nu)$ である (ν : 流体の動粘度)。

2.2 風洞実験装置と供試円柱

Fig. 2 に実験装置の概略を示す。吹出し型風洞測定部 (断面寸法 500 mm × 500 mm) には、2 枚の亚克力製側壁が取り付けられており、それらに供試円柱の両側を固定する。ただし、風洞の上下は自由境界である。供試円柱は、直径 50 mm であり、それは風洞の上下方向の中央に固定した。また、円柱周り流れの二次元性を保つため、風洞側壁には円柱直径に比べて十分大きい端板¹⁰⁾ ($= 430 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$) が両側壁から各々 50 mm の位置に取り付けてある。したがって、本実験に用いた供試円柱のアスペクト比は 8 である。

供試円柱にはスパン方向 400 mm に渡り幅 0.4 mm のスリットが設けてあり、円柱両側に設けたスピーカから発生する音がスリットを通して円柱外部へ供給される。

Fig. 1 Schematic illustration of cylinder geometry.

Fig. 2 Wind-tunnel experiment and block diagram for flow control.

実験に使用した 2 個のスピーカは最大出力 300 W で、その駆動はコンピュータ内で生成した正弦波状信号を DA 変換した後、電力増幅することで行った。予備の実験において、1 個のスピーカによって形成される圧力分布を測定した結果、本実験の周波数範囲 ($f = 12 \sim 60 \text{ Hz}$) では円柱内部の圧力がスピーカからの距離と共に減少し、この効果が周波数の増大とともに強まる傾向が得られた。このため、本実験では円柱両側にスピーカを取り付け、圧力分布のスパン方向への一様性を改善した。その結果得られた圧力分布は、円柱中央部でスパン方向 300 mm の範囲に渡って $\pm 3\%$ の精度で一様であった。

円柱表面の円周方向の圧力分布は、孔径 0.6 mm の圧力孔 35 個をスリット位置を除く円柱中央断面付近に設け、その圧力をステンレス製導管 (内径 0.9 mm) で円柱外部に導き、ひずみゲージ式圧力変換器 (最大 50 Pa) で検出して測定した。また、このような円柱上の圧力分布を周方向に積分することによって、抗力係数 $C_d (= 2F_x/\rho U^2)$ 、揚力係数 $C_l (= 2F_y/\rho U^2)$ を算出した。ただし、 F_x 、 F_y は、主流ならびにそれに垂直方向の流体力、 ρ は流体の密度である。一方、スリット出口における速度変動は熱線流速計で測定し、その断面内最大速度 v を求め、速度振幅比 $V_r (= v/U)$ を算出した。本風洞実験は主流流速 $U = 2.6 \text{ m/s}$ で行った。すなわち、円柱直径を基準としたレイノルズ数は、 $Re = 9 \times 10^3$ である。

2.3 風洞での可視化実験

圧力測定と同一実験条件で、円柱周りの流れをスモークワイヤ法で可視化観察した。ただし、実験レイノルズ数は定量測定と同様に $Re = 9 \times 10^3$ である。ここに、ワイヤは線径 0.1 mm のニクロム線を亜鉛被覆したもので、円柱の上流 200 mm の位置から流れ場に十分量の煙を供給できるようにした。なお、その塗布液としては流動パラフィンを用いた。光源としては、Nd: YAG パルスレーザをシート状にして円柱下流側から照射し、円柱の中央断面付近における流れ場を可視化した。なお、その観測には、モノクロ CCD カメラを用いた。

2.4 水槽での可視化実験

スリットからの内部音響加振の効果を詳しく観測するため、流れの可視化実験を水流で行った。実験装置の概略を **Fig. 3** に示す。実験に用いた水槽の測定部は断面寸法 150 mm × 150 mm で、供試円柱は直径 30 mm の中空円筒に 0.5 mm 幅のスリットを設けたものである。なお、スリットからの振動流は、スピーカの駆動部に透明のピストン構造物を取り付けて実現した。ただし、速度振幅比 V_r はピストンの移動量を CCD カメラで画像計測し、スリットからの断面平均流速を求めた。一方、スリットを通過する二次元振動流の速度分布を汎用流れ計算コード (CFD2000) により数値計算し、最大速度基準の速度振幅比 V_r を算出した。

流れの可視化実験は、円柱の上流側に設置した櫛状ノズル (内径 0.6 mm の枝管が 5 mm 間隔で 16 本) から

Fig. 3 Water-tunnel experiment and block diagram for flow visualization.

ローダミン B の希薄溶液を筋状に流出させて行った。一方、スリット流にはフルオレセインソジウムを希薄溶液を加えることで、スリット流によって発生する渦構造を可視化した。照明としては、ストロボ光をシリンドリカルレンズでシート光にして用いた。また、流れ場の可視化観察には、カラー CCD カメラを用いた。ただし、本可視化実験は、主流速度 $U = 0.067$ m/s, $Re = 2,000$ の条件下で行った。このとき、流れの時間スケール D/U は、気流の場合に比べ約 23 倍と大きく、円柱後流構造の時間的な変化ならびにスリットから放出する渦の構造を明瞭に観察することができる。

3. 結果および考察

3.1 円柱表面の圧力分布

Fig. 4 (a), (b) は、それぞれ、内部音響加振時の円柱表面の圧力係数 $C_p = (2(p - p_\infty)/\rho U^2)$ の測定結果の一例として、加振ストロハル数 S_f が無制御時のストロハル数 $S_{f0} (= 0.23)$ と一致する場合 (a) と $S_f = 4S_{f0}$ の場合 (b) を示した。ここに、 p は円柱表面の圧力、 p_∞ は円柱の十分上流における圧力である。ただし、速度振幅比は $V_r = 1$ である。ここでは、スリット角度を $\beta = 75^\circ \sim 105^\circ$ の範囲で変化させたときの圧力分布を示したが、 $\beta = 60^\circ$ と 120° における圧力分布は無制御時（同一レイノルズ数における静止円柱）とほぼ一致することを確認してある。Fig. 4 (a) によると、加振ストロハル数 S_{f0} で加振したときの圧力分布は、スリット角度 $\beta = 75^\circ \sim 90^\circ$ において、スリット側円柱背後の圧力係数にわずかに低下の傾向が見られるが、スリット反対側の圧力分布は無制御時と良く一致する。このことは、渦放出周波数での加振効果は、スリット付近の流れ場だけに影響を与え、円柱表面に非対象な圧力分布を生じさせることを示す。Fig. 4 (b) は、円柱から発達するはく離せん断層の不安定周波数付近 $S_f = 4S_{f0}$ で加振したときの圧力分布である。ただし、その不安定周波数は、はく離せん断層位置付近で得られる熱線流速計の出力信号を周波数分析した結果から判断した。 $S_f = S_{f0}$ の場合 (a) と同様に、ス

(a) $S_f = S_{f0}$

(b) $S_f = 4S_{f0}$

Fig. 4 Pressure distribution over a circular cylinder for various slit angles under acoustic excitation at $V_r = 1$.
(— : without control)

リット角度 $\beta = 75^\circ \sim 82.5^\circ$ ではスリット側円柱表面でわずかに圧力減少効果が観測される。一方、 $\beta = 90^\circ$ の結果を見ると、円柱背後で圧力係数分布の急激な上昇が見られ、他のスリット角度の結果との相違を示す。この現象は、音響加振のあるスリット側だけでなく、円柱背後全域に渡って強く生じており、単一のスリットによって円柱背後のかなり広い領域の流れ場を制御可能であることを示唆する。

3.2 流体力に及ぼすスリット角度の影響

Fig. 5 は、内部音響加振を加えた場合の円柱表面の圧力分布の測定結果から抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l を算出し、それらがスリット角度 β によって変化する関係を示した。ただし、加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}, 2S_{f0}, 4S_{f0}$ の 3 種とし、速度振幅比は $V_r = 1$ である。いずれの S_f においても、 $\beta = 90^\circ$ 付近で C_d, C_l の値が大きく変化する様子が認められる。ここに、無制御時の場合には、スリット角度にあまり依存せず $C_d = 1.2, C_l = 0$ の結果が得られており、同一レイノルズにおける円柱に対する過去の結果²⁾ と一致する。抗力係数 C_d の結果を見ると、加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}, 2S_{f0}$ では、いずれのスリットの角度においても無制御時より大きい C_d 値が得られており、加振周波数が渦放出周波数あるいはその 2 倍の周波

Fig. 5 Drag and lift coefficient versus slit angle at $V_r = 1$.
(— : without control)

数に同期したことによる抗力の増加を示唆する。しかしながら、 $S_f = 4S_{f0}$ の結果によると、 $\beta = 90^\circ$ 付近で C_d 値の顕著な減少が見られる。これは、円柱背後の圧力分布が上昇した結果生じたものである。一方、揚力係数 C_l の算出結果によると、いずれの加振ストロハル数においても $\beta = 80^\circ \sim 90^\circ$ で C_l の増大が認められる。これは、スリット付近の圧力分布が減少し、圧力分布が非対象になるためである。ただし、 C_l のピークは $S_f = S_{f0}$, $2S_{f0}$ では $\beta = 90^\circ$ 付近にあるが、 $S_f = 4S_{f0}$ ではより小さな β 側へ移動しており、 V_r の影響を示唆する。以上の実験結果から、スリット角度 $\beta = 90^\circ$ 付近において抗力減少効果が強く現れることがわかる。

3.3 流体力に及ぼす加振ストロハル数の影響

Fig. 6 は、円柱の抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l が加振ストロハル数 S_f によって変化する関係である。ただし、スリット角度 $\beta = 90^\circ$ 、速度振幅比 $V_r = 1$ の場合の結果である。加振ストロハル数 S_f が増加すると、抗力係数 C_d は、無制御時 ($S_f = 0$) の結果より徐々に増加し、 $S_f = (1 \sim 2)S_{f0}$ 付近で最大値に到達した後緩やかな減少傾向に転じ、 $S_f = 4S_{f0}$ 付近で本実験の最小値を示す。このことは、小さな加振ストロハル数 $S_f = (1 \sim 2)S_{f0}$ では、同

Fig. 6 Drag and lift coefficient versus forcing Strouhal numbers at $V_r = 1$. ($\beta = 90^\circ$)

期現象の発生による抗力増大効果を示すのに対し、大きい加振ストロハル数 $S_f \geq 4S_{f0}$ ではこれとは反対に抗力減少効果を示すことに対応する。したがって、抗力減少に対する加振ストロハル数の最適値は、大きい加振ストロハル数 $S_f \geq 4S_{f0}$ で生じる。一方、揚力係数 C_l の分布を見ると、小さい加振ストロハル数では S_f とともに増加傾向を示すが、大きい加振ストロハル数では C_l は減少し、ほぼ一定値に落ち着く。したがって、流体力の抑制効果は、大きい加振ストロハル数領域 $S_f \geq 4S_{f0}$ で生じるといえる。なお、このような流体力特性に及ぼす加振ストロハル数の影響は、本実験の範囲では他の速度振幅比 V_r においても同様に見られた。一方、同様な加振ストロハル数増加に伴う抗力係数の減少効果は、Hsiao & Shyu⁹⁾ の実験結果にも認められており、両結果は内部音響加振による抵抗減少効果を支持する。

3.4 流体力に及ぼす速度振幅比の影響

Fig. 7 は、代表的な加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}$ と $S_f = 4S_{f0}$ における抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l の値が速度振幅比 V_r によって変化する関係である。ただし、このときのスリット角度は、抗力減少が強く現れた $\beta = 90^\circ$ である。抗力係数 C_d は、 $S_f = S_{f0}$ では V_r とともに増大する傾向にあるが、 $S_f = 4S_{f0}$ では反対に減少傾向にある。しかしながら、 C_d の減少傾向は過大な V_r では飽和の傾向にあることがわかる。なお、本実験で得られた最大抗力減少率は、 $V_r = 1.5$ で生じており、その値は 30% 程度である。一方、揚力係数 C_l は、いずれの S_f においても、 V_r とともに増加する傾向にある。ただし、その増加割合は、 $S_f = S_{f0}$ の場合にはほぼ一定であるが、 $S_f = 4S_{f0}$ では $V_r = 0 \sim 1.5$ で小さく、 $V_r \geq 1.5$ で急に大きくなる。このような V_r の大きい領域における C_l の急激な増加は、スリット付近の圧力の急激な低下によるものである。

以上の実験結果によると、流体力の抑制効果を強く示す制御パラメータの組み合わせは、スリット角度 $\beta = 90^\circ$ 付近、大きい加振ストロハル数領域 $S_f \geq 4S_{f0}$ 、そして速度振幅比 $V_r = 1.5$ 付近であることが言える。

Fig. 7 Drag and lift coefficient versus velocity amplitude. ($\beta = 90^\circ$)

3.5 スモークワイヤ法による流れの可視化

Fig. 8 は、内部音響加振を加えた場合の円柱周りの流れ場を、スモークワイヤ法によって可視化観察した結果である。ここでは、加振周波数の影響を調べるため、加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}$ (a), $S_f = 2S_{f0}$ (b), $S_f = 4S_{f0}$ (c) の結果を無制御時の結果 (d) と比較して示した。ただし、スリット角度は $\beta = 90^\circ$ 、速度振幅比は $V_r = 1$ である。抗力増大効果の認められた小さい加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}$ と $2S_{f0}$ の流れ場には、円柱背後に強い巻き込みが見られ、円柱下流側には周期的渦放出現象が顕著に認められる。一方、抗力低減効果の見られた大きい加振ストロハル数 $S_f = 4S_{f0}$ の流れ場では、円柱後方に直線的にはく離せん断層が発達し、渦巻き込み効果の減少が見られる。このような抑制効果は、可視化結果に見られるように、円柱の下流しばらくは続くが、より下流側では再びせん断層間の巻き込みが生じる。

Fig. 9 は、抗力減少効果が強く現れた加振ストロハル数 $S_f = 4S_{f0}$ において、速度振幅比 V_r を種々変化させたときの流れの可視化結果である。ただし、スリット角度は $\beta = 90^\circ$ である。速度比 V_r が 0.5 から 1 に増加すると、円柱背後の渦巻き込みは弱まり、渦放出に抑制効果が見られる。しかしながら、速度比 V_r が 1 から 1.5 に増加した場合には、流れパターンの変化は少なく、良好な制御状態を示すが、 $V_r = 2$ では再び渦巻き込みに増加の傾向が見られる。このような気流流れ場の可視化結果は、先に示した圧力分布、抗力、揚力の測定結果と定性的に一致する。

3.6 2色染料による流れの可視化

Fig. 10 は、2色染料を用いた水流の可視化実験において観測された円柱の周りの流れ場の可視化結果である。ただし、加振ストロハル数 $S_f = S_{f0}$ (a), $2S_{f0}$ (b), $4S_{f0}$

(c) の結果を無制御の結果 (d) と比較して示した。ただし、水槽実験では、無制御時のストロハル数は $S_{f0} = 0.25$ である。本実験結果によると、 $S_f = S_{f0}$ と $2S_{f0}$ では無制御時の場合と比べ円柱からの渦放出現象は強まるが、 $S_f = 4S_{f0}$ の結果では渦放出がスリット流によって弱まるのがわかる。このような水流における音響加振の可視化結果 ($Re = 2 \times 10^3$) は、先に示した気流の可視化結果 ($Re = 9 \times 10^3$) と流れパターンが定性的に一致しており、本制御効果に及ぼすレイノルズ数の影響が加振ストロハル数の影響に比べ小さいことを示唆する。また、本可視化結果によると、スリットから流出するフルオレセインソジウム溶液の示す黄緑の流脈線は、円柱後流中で強い混合を示しており、スリット流の影響は円柱後流の制御に強く関与することを示す。

本実験で抵抗減少効果が強く認められた制御パラメータ ($S_f = 4S_{f0}$, $V_r = 1.5$, $\beta = 90^\circ$) における流れ場の時系列的変化を調べるため、撮影した可視化画像を 0.3 秒ごとに表示した。その結果を **Fig. 11** に示す。円柱のスリット側 (図の上側) から内部音響加振によって励起された周期的渦形成が見られる。この渦の支配的周波数は $4S_{f0}$ であるが、スリットの反対側では無制御時の渦放出周波数 S_{f0} が観測される。このとき、両せん断層間の干渉効果は小さくなることが予想される。**Fig. 11** (a) でスリットから放出した渦 (図中の上側の矢印) は、時間経過と共に流下し、**Fig. 11** (b), (c) では図中の上側矢印の位置に進む。**Fig. 11** (d) では、この渦はスリット反対側からの放出渦 (図の下側の矢印) と合体する様子が見られる。この際、互いの渦の回転方向は逆であり、渦度を弱め合う効果が期待される。このように、一様流中に置かれた円柱からの渦放出現象は、スリットから放出される渦列の効果によって強く抑制されることになる。

Fig. 8 Smoke-wire visualization of wake of a circular cylinder ($Re = 9 \times 10^3$, $\beta = 90^\circ$, $V_r = 1$).

Fig. 9 Smoke-wire visualization of flow around a circular cylinder ($Re = 9 \times 10^3$, $\beta = 90^\circ$, $S_f = 4S_{f0}$).

Fig. 10 Visualization of cylinder wake by the two-color dye injection technique in water ($Re = 2 \times 10^3$, $\beta = 90^\circ$, $V_r = 1$).

Fig. 11 Time-series visualization of cylinder wake under an optimum control in water ($Re = 2 \times 10^3$, $\beta = 90^\circ$, $S_f = 4S_{f0}$, $V_r = 1.5$).

4. 結 論

一様流中に置かれた円柱からの渦放出現象に及ぼす内部音響加振の影響を明らかにするため、円柱表面の圧力分布の測定と2種の流れの可視化実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 円柱に加わる流体力が音響加振の制御パラメータ（スリット角度、加振ストロハル数、速度振幅比）によって変化する関係を示した。また、これらの制御パラメータを最適化することによって抗力減少率として最大約30%を得た。
- (2) 定量実験と同一条件下で、円柱周りの流れ場をスモークワイヤ法によって可視化観察した。抗力減少が得られた制御パラメータの組み合わせ時には、渦放出現象が強く抑制されることが分かった。
- (3) 2色染料注入法を用いて、水流での流れの可視化実験を行った。その結果によると、スリット側せん断層の励起現象に伴って円柱後流のせん断層間の干渉効果の弱まりならびに渦度の打ち消し効果が認められ、制御により流れ場全体の変動が抑制される機構を示した。

参 考 文 献

- 1) Griffin, M. and Hall, M.S.: Review; Vortex shedding lock-in and flow control in bluff body wakes, ASME J. Fluids Eng., Vol. 113 (1991) pp. 526–537.
- 2) Blevins, R.D.: Flow-induced vibration, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold (1990) pp. 43–103.
- 3) Tokumaru, P.T. and Dimotakis, P.E.: Rotary oscillation control of a cylinder wake, J. Fluid Mech., Vol. 224 (1991) pp. 77–90.
- 4) Filler, J.R. et al.: Response of the shear layers separating from a circular cylinder to small-amplitude rotational oscillations, J. Fluid Mech., Vol. 231 (1991) pp. 481–499.
- 5) Fujisawa, N. et al.: Vortex shedding resonance from a rotationally oscillating cylinder, J. Fluids Struct., Vol. 12 (1998) pp. 1041–1053.
- 6) Fujisawa, N. et al.: Feedback Control of vortex shedding from a circular cylinder by rotational oscillations, J. Fluids Struct., Vol. 15 (2001) pp. 23–37.
- 7) Fujisawa, N. and Warui, H.M.: Feedback control of vortex shedding from a circular cylinder by cross-flow cylinder oscillations, Exp. Fluids, Vol. 21 (1996) pp. 49–56.
- 8) Ffowcs Williams, J.E. and Zhao, B.C.: The active control of vortex shedding, J. Fluids Struct., Vol. 3 (1989) pp. 115–122.
- 9) Hsiao, F.B. and Shyu, J.Y.: Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder, J. Fluids Struct., Vol. 5 (1991) pp. 427–442.
- 10) Szepessy, S. and Bearman, P.W.: Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 234 (1992) pp. 191–217.