音響フィードバックによる円柱からの渦放出の制御に関する研究

○板橋 楽, 藤沢 延行

Control of Vortex Shedding from a Circular Cylinder by Acoustic Feedback

Gaku ITABASHI and Nobuyuki FUJISAWA

Dept. Mechanical and Production Engineering, Niigata University

8050 Ikarashi-2, Niigata, 950-2181

Key Words: Flow control, Feedback control, Circular cylinder, Vortex shedding, Slit flow

1. 緒 言

一様流中に置かれた円柱下流に周期的渦放出が発生し、その渦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が過去より活発に行われてきた。最近、その渦制御法としてアクティブ制御⁽¹⁾が注目されており、その性能評価もなされている。一方、著者ら⁽²⁾は、円柱表面にスリットを通して音響を供給することで、渦放出現象の抑制効果⁽³⁾を確認した。さらに、円柱表面の圧力計測から円柱に加わる流体力を算出した結果、最大30%程度の抗力減少効果が得られることを明らかにした。ただし、この制御はフィードフォワード制御であるため、制御パラメータである音響周波数とスリット流と主流の速度比などを予め実験条件ごとに設定する必要がある。

本研究は、この音響による流れ制御にフィードバック制御を導入し、渦制御の適用範囲を拡張することを目的とする。すなわち、円柱表面の圧力変動をフィードバック信号として用い、その信号に基づく音響をスリットから供給することにより、円柱周りの流れを制御する。また、円柱の抗力低減に及ぼす最適フィードバック係数及び位相、スリット位置を求め、それらの影響について考察する。

Fig.1 Schematic illustration of flow geometry

Fig.2 Schematic illustration of feedback loop

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 本研究で実験の対象とする流れ場の概略図を Fig.1 に示す。吹出し型風洞を用いて一様流 ($U=2.6$ m/s) 中に供試円柱 (直径50mm) を置き実験を行った。その供試円柱にはスパン方向400mmに渡り幅0.4mm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圧によりスリットを通して円柱外部へ音響流を供給できるようになっている。円柱表面には円周方向に圧力孔35個を円柱中央断面付近に中心角で 10° ごとに設けた。ここに、スリット角度を θ_s 、主流に対する圧力孔の角度を θ_p とした。円柱の円周方向の圧力分布の測定結果を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。なお、実験装置の詳細は文献(3)に詳しい。

2.2 制御機構 フィードバック制御機構の概略図を Fig.2 に示す。予備実験として、円柱表面の圧力変動を円柱周り全域において $\theta_p=0^\circ$ から 30 度おきに計測した結果、カルマン渦の周波数($f=11.9$ Hz)における圧力変動は 90° 及び 270° 付近で最も大きかった。そのため、スリットの反対側になる 270° の圧力変動をフィードバック信号とした。この信号をカルマン渦周波数に対するバンドパスフィルターを通した後コンピューターに取り込み、既報⁽²⁾と同様に制御パラメータとなるフィードバック係数 α 及び位相 ϕ ($^\circ$)を与え、円柱内部からスリットを通して音響を供給した。

3. 実験結果及び考察

3.1 制御パラメータの特定 円柱背後の圧力分布が抗力を決定することが予期される。このため、その代表位置として円柱後方($\theta_p=180^\circ$)で検出した圧力を用いてフィードバック制御の性能評価を行った。Fig.3は4種類のゲイン α を用い、位相 ϕ をおよそ $300 \sim 1100^\circ$ の範囲で変えた時の円柱後方位置の圧力係数 C_p の変化を示した結果である。ただし、スリット角度 $\theta_s=90^\circ$ であり、位相 ϕ は圧力変換器、スピーカ等の遅れを補正して示した。無制御時の場合には位相に関係なく一定であるが、制御パラメータである位相遅れとゲインの変化により圧力係数に変化が生じることがわかる。本実験結果によると、いずれのゲインにおいても位相遅れが 600° 付近(最適位相)で圧力係数が極大となり、特に、ゲインの比較的小さい0.37で最大となる。なお、このような圧力係数の極大は、位相が一周遅れた位置においても認められるが、その圧力係数値は、第一ピークより小さい。

さらに詳しくゲイン α 及び位相 ϕ を変え、円柱後方の C_p

Fig.3 Pressure distributions versus phase lags ϕ ($\theta_p=180^\circ$)

値を計測することにより最適位相及びゲインを求めた。Fig. 4はスリット角度 $\theta_s=90^\circ$ のときのゲイン $\alpha=0\sim3$ 、位相 $\phi=325\sim700^\circ$ の範囲での円柱後方の圧力係数(C_p)分布図である。この分布図からスリット角度 $\theta_s=90^\circ$ の最適位相($\phi=600^\circ$)及びゲイン($\alpha=0.37$)を求めた。なお、反対に円柱後方の圧力係数が最小となる条件は、 $\phi=430^\circ$ 、 $\alpha=0.54$ である。

3.2 スリット角度 θ_s について Fig. 5は、種々のスリット角度 θ_s において最適制御を行った時の速度振幅比 $V_r (=v/U)$ と $-\Delta C_p$ 分布図である。ただし、 ΔC_p は制御時の円柱後方($\theta_p=180^\circ$)の圧力結果から無制御時の圧力を引いた圧力係数値であり、 $-\Delta C_p$ 値が負の時抗力減少および正の時増大する。この分布図の最適制御結果から $-\Delta C_p$ 値の変化量はほぼ等しいのに対し $\theta_s=90^\circ$ のとき供給した速度振幅比 $V_r (=0.13)$ は最も小さく、逆位相制御結果も同様に $\theta_s=90^\circ$ の時最も小さい。このことから最適なスリット角度 $\theta_s=90^\circ$ 付近と考えられる。

3.3 円柱表面圧力分布 Fig. 6は最適及び逆位相制御と $\phi=430^\circ$ 、 $\alpha=0.37$ での制御パラメータを用いて制御を行った際の円柱表面の圧力係数分布図である。また、制御パラメータ($\phi=430^\circ$ 、 $\alpha=0.37$)での制御は逆位相制御と等しい位相である。無制御時の分布と比べるとFig. 4で求めた最適パラメータを用い制御した場合、円柱背後全域に渡り負圧は減少している。逆位相制御の場合、円柱後方の負圧は増大しており、フィードバック係数を大きくするにつれスリット付近の負圧は増大する傾向がある。また、制御パラメータ($\phi=430^\circ$ 、 $\alpha=0.37$)を用い制御した結果、円柱上側(スリット側)と下側で圧力分布が対称となり、揚力はほとんど生じないことがわかる。

4. 結 言

音響フィードバックによる円柱からの渦放出の制御を実験的に検討した結果、わずかな音響流の放出で抗力を8%程度減少させることができた。

文 献

- (1) 藤沢延行・川路泰司、機論B, 61-585、C(1995)、1832。
- (2) Huang, X.Y., Exp. Fluids, 20(1996), 218。
- (3) 板橋・藤沢、日本機械学会北陸信越支部第37期総会・講演会講演論文集、2000. 3.7 (315-316)

Fig.4 Pressure distributions at various control parameters ($\theta_p=180^\circ$)

Fig.5 Amplitude of slit velocities V_r and $-\Delta C_p$ ($\theta_p=180^\circ$) versus slit angles θ_s

Fig.6 Pressure distributions over a circular cylinder at various control parameters ($\theta_s=90^\circ$)