

流速攪乱による円柱カルマン渦のフィードバック制御

Feedback Control of Karman Vortex Shedding behind a Circular Cylinder by Velocity Excitation

比江島慎二*, 渡邊恭**, 野村卓史***

Shinji HIEJIMA, Tadashi WATANABE and Takashi NOMURA

*正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1)

**学生会員 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1)

***正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

A feedback control technique of vortex shedding behind a circular cylinder is investigated through two-dimensional numerical simulations. In order to suppress the vortex shedding, periodic velocity excitation is applied from the cylinder surface to the separated shear flows with a time delay and feedback gain for the fluid velocity behind the cylinder or pressure on the cylinder surface. It is shown that the feedback excitation generated by the velocity feedback method can suppress the vortex shedding considerably with appropriate time delay and feedback gain. However, the control effect is lower if the sensor is located downstream of the formation region of the vortices behind the cylinder. And the control using the pressure feedback method cannot suppress the vortex shedding effectively because of the unsteadiness of the pressure fluctuation on the cylinder surface.

Key Words: feedback control, velocity excitation, circular cylinder, Karman vortices, CFD

1. はじめに

流体中に置かれた物体周辺の剥離せん断層ではカルマン渦などの周期渦が形成され、物体後流に周期的に放出される。このような周期渦は物体に周期的な変動力を与え、渦励振などの流体励起振動を引き起こす原因となる。また、強風時の橋梁高欄やビル屋上の手すりなどから、やはり周期渦が形成され、それらの圧力変動が音響となって、空力音^{1)~9)}と呼ばれる流体励起騒音が発生することもある。このような周期渦に起因する振動や騒音は、土木、建築、機械、航空などの様々な工学分野において、従来から、構造部材の疲労などによる重大な事故や公害問題の原因となってきた。また、近年では、風力発電の風車ブレードから発生する空力騒音など、新たな分野における問題も生じつつある。

これらの振動や騒音に対して、動吸振器などの減衰装置を付加したり、構造物の断面形状を改良して渦の発生を抑えるなどのパッシブな制御法が用いられることがある。一方、より有効かつ効率的な制御を目的として、振動・騒音の原因となる周期渦そのものを流体力学的手法にもとづいてアクティブに抑制する制御法も検討されている。特に、流れの状態を常にフィードバックしながら制御力を発生するクローズドループ型のアクティブ制御法は、制御により時々刻々と変化する流れの変化に応じて制御力もリアルタイムで変化させるため、小さな制御エネルギーで高い

制御効果が期待できる。音響による制御攪乱を用いた既往の風洞実験^{10),11)}では、円柱後流の周期渦に対するフィードバック制御法の高い制御効果が報告されている。

本研究では、そのようなフィードバック制御法の1つとして、円柱のカルマン渦放出に伴う流速変動あるいは圧力変動を円柱後流域や円柱表面上に設けた監視点でとらえ、それらを円柱表面上の攪乱点にフィードバックすることにより流速攪乱を発生させるという手法を検討した。カルマン渦の変動を常に監視しながら、それを打ち消すような位相の制御攪乱を剥離せん断層に送り込むことにより、カルマン渦の効率的な抑制を図る。円柱表面上から付加するフィードバック流速攪乱によるカルマン渦制御の可能性を探るとともに、各種制御パラメータや監視点位置の影響、制御攪乱とカルマン渦の相互作用や制御メカニズムについて数値流体解析により詳細に検討する。さらに、円柱後流の流速変動を制御攪乱にフィードバックする手法および円柱表面の圧力変動を制御攪乱にフィードバックする手法の2通りについて解析し、それぞれの制御効果などについて比較検討する。

2. 解析方法

2.1 円柱周辺流れの有限要素解析

定常的で強いカルマン渦が形成される $Re = 200$ を制御対象の流れとして解析した。 $Re = 200$ 付近の流れは一般に円

柱軸方向の3次元性が現れて乱流遷移が始まり、 St 数や背圧係数の不連続性などの複雑な現象を示すことが知られている¹²⁾。しかしながら、本制御法では2次元平面内での攪乱とカルマン渦の相互作用が制御機構における主体であると考えられること、それらの相互作用に関わる基本的な制御特性の把握を目的としていることなどから、2次元数値シミュレーションにより検討した。

数値シミュレーションは非圧縮の Navier-Stokes 方程式および連続条件式を基礎式とし、流速双線形、圧力一定の四辺形混合補間要素を用いて SUPG(Streamline Upwind/Petrov-Galerkin 法)により離散化する。得られた有限要素方程式は予測子・修正子(Predictor-Corrector)法¹³⁾により時間積分を行った。なお、時間積分刻みは 2.0×10^{-4} sec(無次元時間間隔 5.3×10^{-3})とした。

境界条件および解析領域の各諸元を図-1に示す。流入流速は一様流速($U_0 = 26.5$ cm/sec)、下流境界はトラクション・フリー、側面境界はスリップ条件、物体表面はすべりなしとした。図-2には解析メッシュを示している。解析メッシュは、限られた計算機容量のもとで渦放出周波数や流体力などの流れの基本特性が十分とらえられる程度のもので、物体表面上の最小メッシュ厚さ $0.006D$ 、全要素数は4166である。

事前の予備解析により、円柱の両側の剥離せん断層からカルマン渦が交互に放出されることを確認している。渦放出周波数などの流れの基本特性にはメッシュ依存性があると思われるが、円柱周辺部のせん断領域を十分に細かく分割することにより、ストローハル数 $St = 0.164$ 、定常抗力係数 $C_D = 1.235$ が得られ、既往の実験¹²⁾などに近い値となっている。なお、風により発生する空力音や構造物の渦励振は、物体両側の剥離せん断層から交互に放出される周期渦に起因する流れ直角方向の変動空気力(変動揚力)が主な原因である。よって、周期渦の制御指標として揚力変動に着目し、揚力係数を次式で与える。

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 D} \quad (1)$$

ここで、 L は揚力、 ρ は流体密度、 U_0 は流入流速、 D は円柱直径である。

2.2 フィードバック攪乱

図-3に示すように監視点で得られた流れの情報を常にフィードバックしながら、一方の攪乱点の流速を v_{ex} 、他方の攪乱点の流速は $-v_{ex}$ とすることにより、円柱表面上の2つの攪乱点から逆対称の流速攪乱を発生させ、円柱周辺の剥離流れを刺激する。攪乱点は剥離点に近いと思われる、円柱下流端からの角度 100° の位置に置き、円柱中心から放射方向に攪乱を発生する。なお、解析において攪乱は物体表面節点上の流速境界条件として取り扱う。さらに以下のように、監視点の取り方により3種類の攪乱発生方法について検討する。

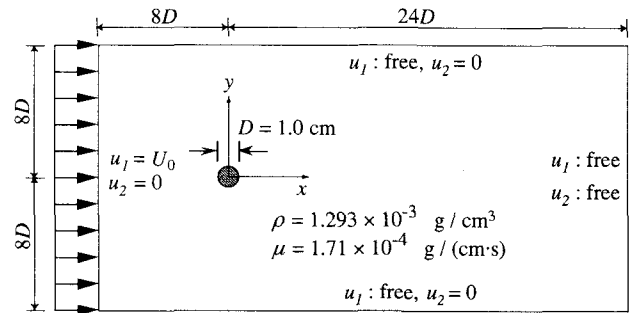


図-1 境界条件および各諸元

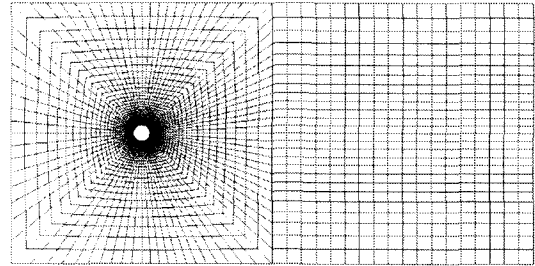
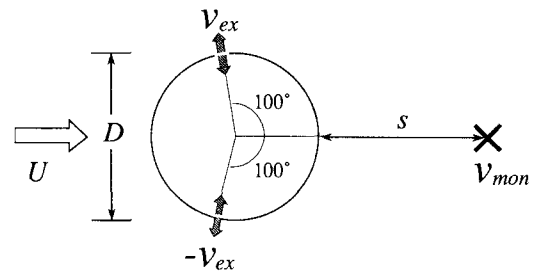
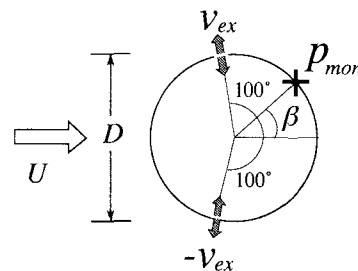


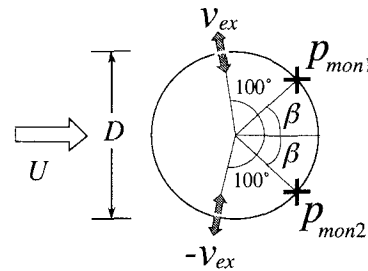
図-2 解析メッシュ



(a) 流速フィードバック制御



(b) 1点圧力フィードバック制御



(c) 2点圧力フィードバック制御

図-3 フィードバック攪乱の発生方法

1つは、円柱下流端から下流方向へ距離 s の位置に1つの監視点を設け、監視点における鉛直方向流速 v_{mon} に時間遅れ τ および制御ゲイン G を与えて攪乱点にフィードバックする方法（流速フィードバック制御）である。このとき攪乱流速 v_{ex} は次式で表される。

$$v_{ex}(t) = Gv_{mon}(t-\tau) \quad (2)$$

2つ目は、円柱下流端からの角度 β 位置の円柱表面上の1点における監視点圧力 p_{mon} を流速の次元に変換し、同じく時間遅れ τ および制御ゲイン G を与えて攪乱点にフィードバックする方法（1点圧力フィードバック制御）である。監視点圧力は定常圧力成分 p_{ave} を含んでいるため、これを取り除き、変動成分のみを制御攪乱にフィードバックする。なお、 p_{ave} は常に一定とは限らないため、監視点圧力変動の1周期ごとに算定する。このとき攪乱流速 v_{ex} は次式で与えられる。

$$v_{ex}(t) = GU_0 \frac{p_{mon}(t-\tau) - p_{ave}(t)}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (3)$$

3つ目は、円柱表面上の監視点として、流れ方向に対して対称に位置する2点を設定し、2点の監視点圧力 p_{mon1} 、 p_{mon2} の差をフィードバックする方法（2点圧力フィードバック制御）である。このような位置の2点の圧力は、ほぼ同じ定常成分を有するとともに、定常成分を中心にほぼ逆位相の変動となる。したがって、それらの差をとることで定常成分は除去され、2番目の方法のように定常成分を1周期ごとに算定する必要がない。このとき攪乱流速 v_{ex} は次式のようになる。

$$v_{ex}(t) = GU_0 \frac{\frac{1}{2}(p_{mon1}(t-\tau) - p_{mon2}(t-\tau))}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (4)$$

時間遅れ τ は監視点流速あるいは監視点圧力の時刻 t における周期 T_i を基準にして $0 \leq \tau \leq 0.9T_i$ の範囲で変化させる。 T_i はほぼ渦放出周期に等しい値をとり、攪乱付加に伴うカルマン渦の放出周期の変化¹⁾に応じて常に変化するため、1周期ごとに T_i を算定し、 τ を更新する必要がある。具体的には、式(1)の制御法では、監視点流速が負から正に変わる瞬間の時刻を基点時刻とし、現時刻に最も近い過去の基点時刻とさらにもう1つ前の基点時刻との差を現時刻の周期 T_i として算定する。式(2)の制御法では監視点圧力が p_{ave} を超える瞬間、式(3)では2点の監視点圧力の差が負から正に変わる瞬間を基点時刻として同様に算定する。

3. 流速フィードバック制御の解析結果

3.1 時間遅れと制御ゲインの影響

流速フィードバック制御において、 $G = 1.0$ 、 $s = 0.5D$ のもとで時間遅れ τ をさまざまに変化させたときの制御効果について、揚力係数 C_L の rms 値を図4に示す。いずれ

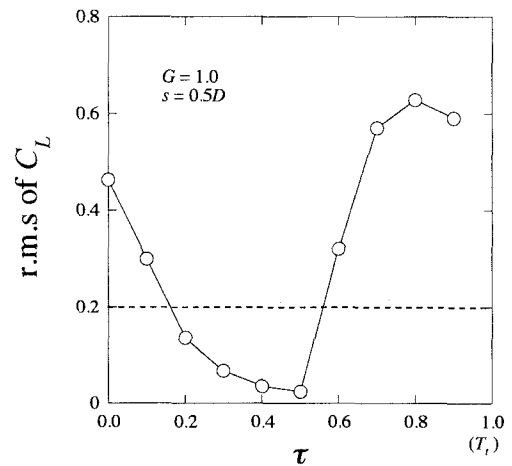


図4 揚力変動に及ぼす時間遅れ τ の影響（流速フィードバック）

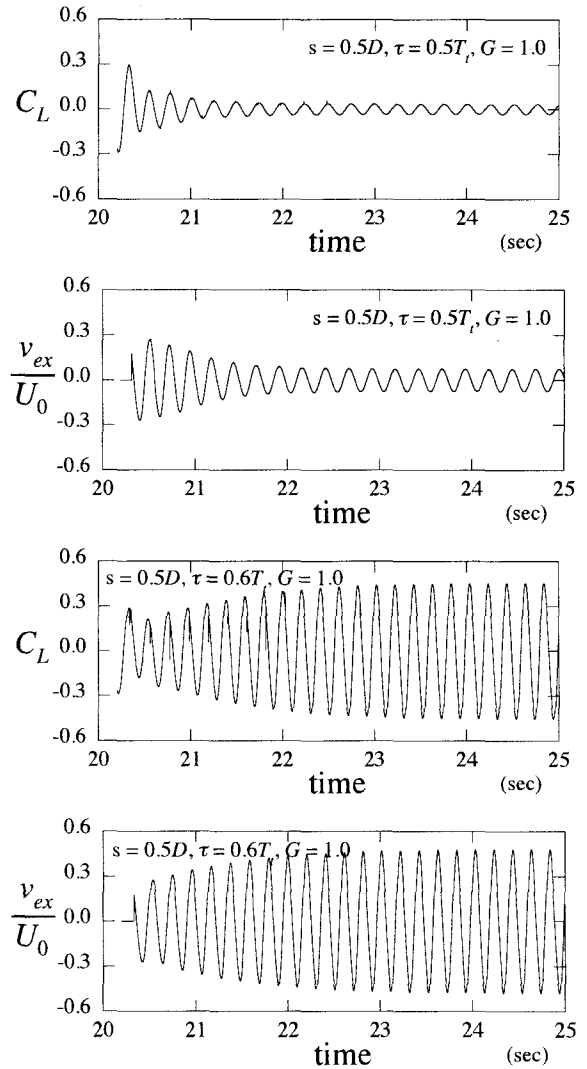


図5 揚力係数と攪乱の時刻歴の例（流速フィードバック）

の rms 値も攪乱付加開始から十分時間が経過した後の 2.0 sec 間の C_L の時刻歴から求めている。攪乱がないときの C_L の rms 値は 0.20（変動振幅にして 0.29）であるが、 $\tau = 0.8T_i$ 付近の攪乱付加時には、その3倍程度にまで揚力変動が増加している。一方、最も低減効果の高い $\tau = 0.5T_i$ 付近では

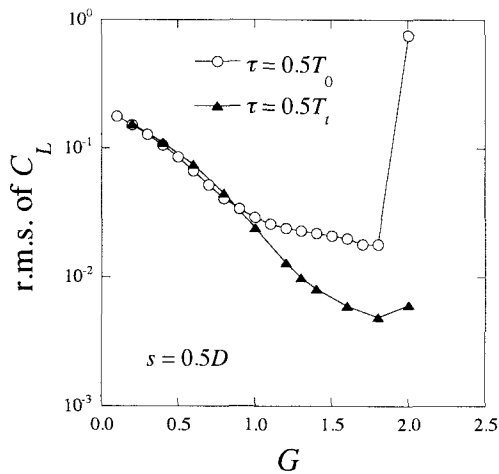


図6 揚力変動に及ぼす制御ゲイン G の影響 (流速フィードバック)

攪乱がない場合の $1/8$ 程度にまで低減できている。

攪乱付加開始直後 (攪乱付加開始時刻は 20.2 sec) からの C_L と攪乱流速 v_{ex} の時刻歴の例を図-5 に示す。 $\tau = 0.5T_t$ では周期渦と攪乱が互いに打ち消し合いながら低減しており、高い制御効果が得られている。一方、 $\tau = 0.6T_t$ では攪乱が周期渦を強め、強められた周期渦の変動成分が監視点から攪乱にフィードバックされてさらに強い攪乱を発生するという、エッジトーンやキャビティトーンで見られるようなフィードバック増幅機構が働いているのが分かる。

さらに、図4 で制御効果の高かった時間遅れ $\tau = 0.5T_t$ のもとで、ゲイン G を変化させたときの効果を図-6 に示す。 G の増大とともに C_L の rms 値は減少し、 $G = 2.0$ 程度でほぼ完全にカルマン渦を抑制できている。なお、図中には、 $\tau = 0.5T_t$ の代わりに $\tau = 0.5T_0$ (T_0 は攪乱がないときの渦放出周期で 0.23 sec) としたときの結果も示している。この場合、攪乱による渦制御の進展に伴う渦放出周期の変化^{13), 14)} に関わらず、常に一定の時間遅れで攪乱を付加することになる。ゲインが小さく渦の抑制効果が比較的小さいときは、 T_t と T_0 はいずれも渦放出周期とほぼ一致し、両者の制御効果に大きな違いが見られない。ところが、ゲインが大きくなり渦が徐々に抑制されると、渦放出が長周期化するため、実際の渦放出周期と T_0 との差が大きくなってしまい、 $\tau = 0.5T_0$ の攪乱のもとでは攪乱と渦放出変動とが互いに打ち消しあう位相関係を保てなくなる。その結果、 $\tau = 0.5T_0$ では $G = 1.2$ 付近から低減効果が弱まり始め、 $G = 2.0$ では逆に増幅に転じてしまうのである。

3.2 監視点位置の影響

監視点位置を A 点 ($s = 0.5D$)、B 点 ($s = 1.4D$)、C 点 ($s = 2.9D$)、D 点 ($s = 5.3D$)、E 点 ($s = 7.5D$) の 5 通りに変化させたときの制御効果について解析した。図-7 は各ケースにおいて、揚力変動をほぼ完全に抑制できるか、あるいは最も低減効果が高いと思われる時間遅れ τ の攪乱

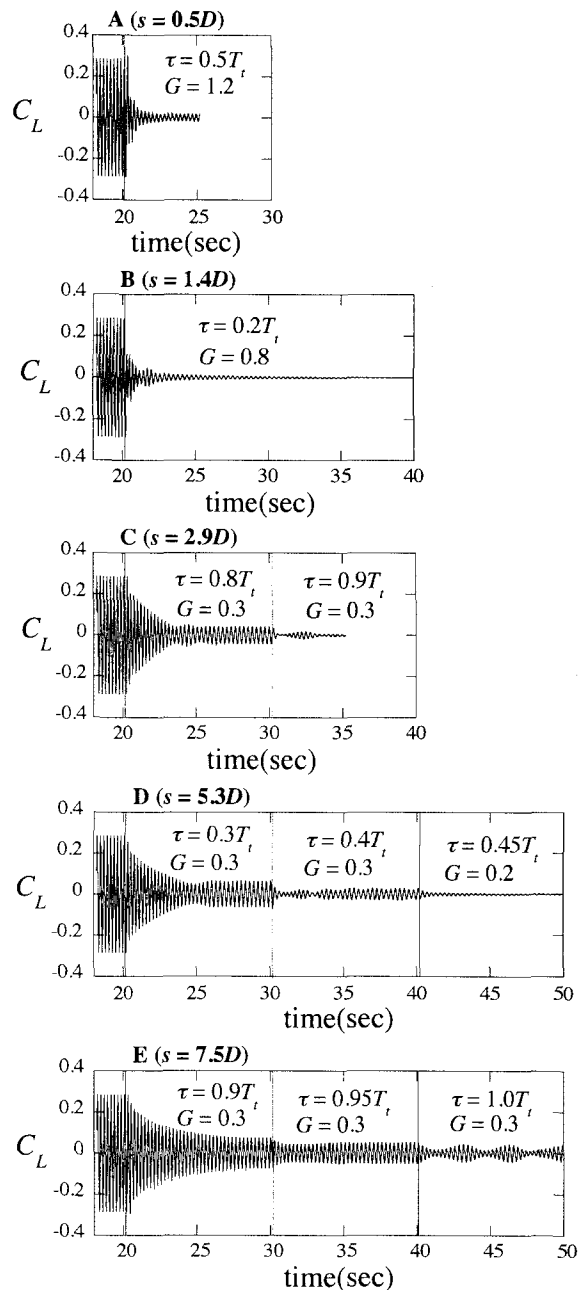


図-7 後流中の監視点位置による制御効果の違い

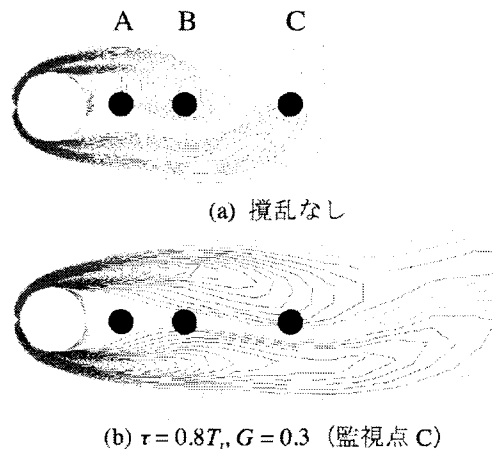


図-8 渦の巻き込み位置の比較

を付加したときの揚力係数時刻歴（攪乱付加開始時刻 20.2 sec）である。

A, B点の場合には、ほぼ完全に揚力変動を制御できているのが分かる。これらのケースでは、最適な τ のもとで制御ゲイン G を大きくするほど制御効果が高くなることも別途明らかになっている。一方、A, B点よりも円柱から離れたC, D, E点を監視点とした場合には、ある程度の低減効果は得られるものの、完全に変動を抑制できるような τ は見つからなかった。また、C, D, E点の場合には、 G を大きくしすぎると逆に変動が増幅してしまうことも判明した。

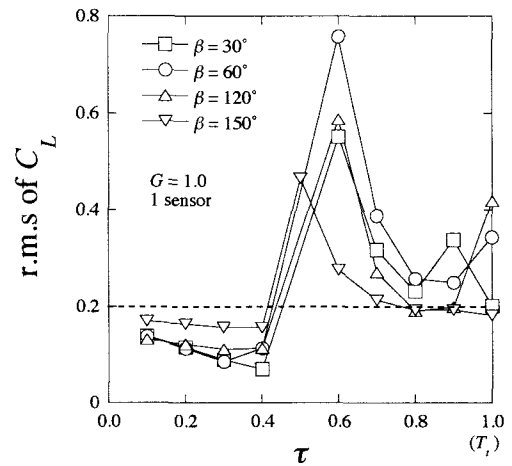
ところが、図-7のC, D, E点の場合の後半部に示すように、最初の攪乱付加で振幅がある程度低減した状態からさらに τ/T_i の値を段階的に変化させて時間遅れを設定したところ（ τ/T_i 変更時刻 30.2 sec），より高い低減効果が得られ、D, E点の場合にはさらにもう1段階ほど変化（ τ/T_i 変更時刻 40.2 sec）させることでほぼ完全に渦を抑制することができた。このことは、C, D, E点のように円柱から離れた位置を監視点とした場合には、周期渦の抑制に伴い τ/T_i の最適値が徐々に変化することを示している。なお、既往のフィードバック制御に関する風洞実験¹⁰では、 $Re = 65$ で他の条件も本解析とは多少異なるため定量的な比較はできないものの、やはり円柱近くの限られた領域に監視点を設けたときのみ高い制御効果が得られており、本解析と定性的に類似する結果が報告されている。また、この実験では、円柱中心から監視点までの距離が $9D$ を超えると制御効果がほとんど得られなくなるとされている。

3.3 監視点位置による制御効果の変化の要因

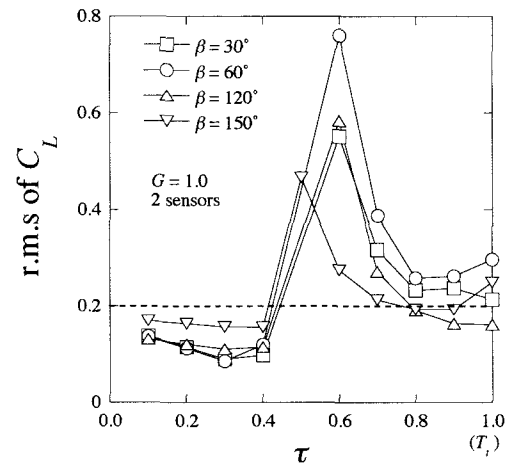
τ/T_i は攪乱と監視点流速の位相関係を表しており、前節の監視点C, D, Eの結果は、攪乱と監視点流速の位相関係を渦抑制の進展とともに変化させなければ、攪乱と渦放出変動が互いに打ち消しあう位相関係を維持できないことを意味する。すなわち、このことは監視点流速と渦放出変動の位相関係が、渦抑制の進展とともに変化していることを示すものである。

このことに関連して、図-8は円柱後流部で上側剥離せん断層から渦が巻き込みを生じる瞬間の流れについて、攪乱がないときの状態(a)とC点を監視点として $\tau/T_i = 0.8, G = 0.3$ の攪乱付加により周期渦がある程度制御された状態(b)の等渦度図を比較している。(a)では上側剥離せん断層からの渦の巻き込みがB点付近で生じているのに対し、渦抑制が進展した状態の(b)では、渦列の波長が長くなり、渦の巻き込み位置がC点付近まで伸びているのが分かる。このような渦抑制に伴う渦列波長の伸長により、C, D, E点などの監視点位置に対して渦列の渦配置が変化するため、監視点流速と渦放出変動との位相関係が変化することになるのである。

これに対し、A, B点のように常に渦の巻き込み位置よりも上流側（円柱側）に監視点がある場合には、渦放出変



(a) 1点圧力フィードバック



(b) 2点圧力フィードバック

図-9 揚力変動に及ぼす時間遅れ τ の影響 (圧力フィードバック)

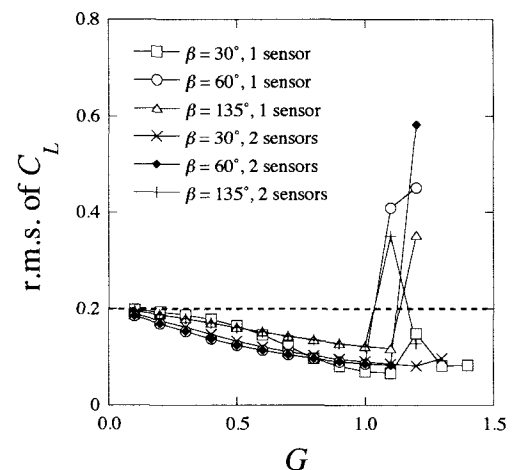


図-10 揚力変動に及ぼす制御ゲイン G の影響 (圧力フィードバック)

動の源であり、制御対象でもある円柱背部のせん断層の振動を直接的にとらえられるため、渦抑制に伴う渦配置の変化の影響をほとんど受けず、監視点流速と渦放出変動との位相関係はほとんど変化しないと考えられる。したがって、 τ/T_i の値を段階的に変化させることなく、高い制御効果が得られるのである。なお、このような渦抑制に伴う渦列波

長の伸長は、既往の数値解析¹⁵⁾などでも確認できる。

また、渦の巻き込み位置よりも上流側にある監視点では、攪乱による流れの変化の影響が円柱背部の渦の巻き込み時にすぐに監視点流速に反映されるのに対し、巻き込み位置よりも下流側にある監視点では、渦が剥離せん断層から剥がれて流下してきた時点でやっと監視点流速に反映されることになる。そのため、円柱から下流に離れた監視点ほど上流側の監視点に比べ古い時刻の流れ情報しか得られず、古い流れ情報にもとづいたフィードバック制御が行われることになる。このような流れ情報伝搬の遅れによる円柱近傍流れの予測精度の低下も、フィードバック制御の効率が低下する原因の1つと考えられる¹¹⁾。

4. 圧力フィードバック制御の解析結果

4.1 時間遅れと制御ゲインの影響

圧力フィードバック制御において、 $G=1.0$ のもとで時間遅れ τ をさまざまに変化させたときの揚力係数 C_L の rms 値の変化を図-9 に示す。いずれの rms 値も攪乱付加開始から十分時間が経過した後の 2.0 sec 間の C_L の時刻歴から求めており、攪乱がないときの C_L の rms 値は 0.20 (変動振幅にして 0.29) である。流速フィードバック制御の場合と同様、揚力変動を最も低減できるような τ が存在し、いずれの監視点位置 β のケースでも $\tau = 0.3T_f$ 、 $0.4T_f$ 付近が最適値となっている。カルマン渦放出に伴う圧力変動は、円柱表面上の位置に関わらずほぼ同位相であるため、 β によらず τ の最適値もほぼ同じになったと考えられる。また、やはりフィードバック増幅を生じる τ も存在し、 $\tau = 0.5T_f$ 、 $0.6T_f$ 付近で増幅が生じている。なお、 $\beta = 30^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ の各ケースで $\tau = 0.5T_f$ のデータが示されていないのは、フィードバック増幅に伴う大きな変動により、数値的に解が発散してしまったためである。なお、1点圧力フィードバックと2点圧力フィードバックについては、両者の結果に大きな違いは見られなかった。

次に、各 β について、制御効果が高かった $\tau = 0.3T_f$ あるいは $\tau = 0.4T_f$ のもとで、制御ゲイン G を変化させたときの効果を図-10 に示す。 G の増加とともに制御効果も高まるが、 $G=1.0$ 付近で逆に増幅する傾向が見られる。図-6 の流速フィードバック制御では、 G を大きくすることでほぼ完全に渦放出を抑えられたのに対し、圧力フィードバック制御では、いずれのケースでも攪乱がないときの C_L の rms 値 0.20 の高々 3-4 割程度までしか変動を抑えられていない。なお、1点圧力フィードバックと2点圧力フィードバックについては、やはり両者の傾向にあまり大きな違いは見られない。

図-11 は、各 β において τ および G の最適値を与えたときの C_L の rms 値をプロットしている。攪乱点よりも下流側に相当する $\beta < 100^\circ$ の監視点ケースでは、上流側に監視点を置いた $\beta > 100^\circ$ のケースよりも高い制御効果が得られている。一方、 $\beta > 100^\circ$ のケースでは、より上流側のケー

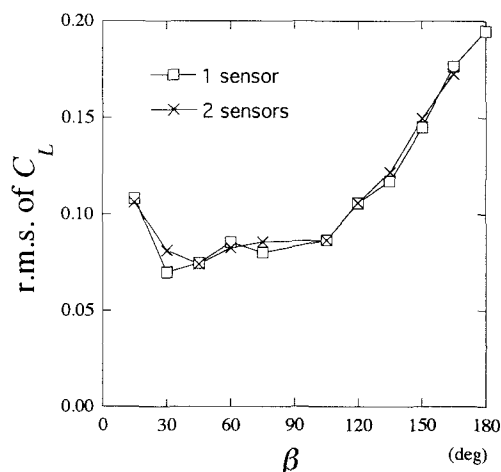


図-11 円柱上の監視点位置による制御効果の違い

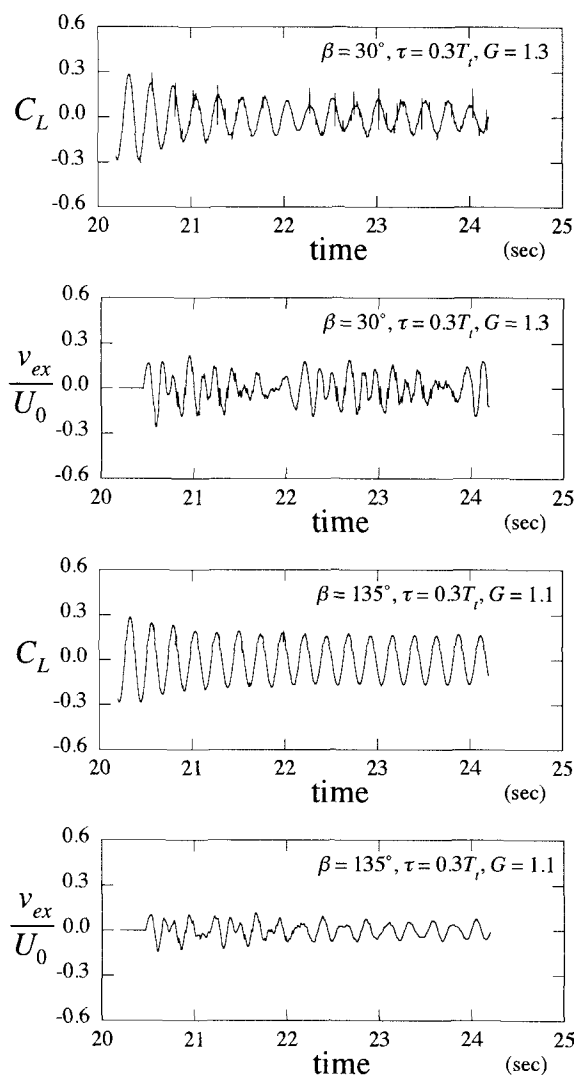


図-12 揚力係数と攪乱の時刻歴の例 (圧力フィードバック)

スほど制御効果が低下する傾向が見られる。これは、攪乱点よりも下流側の方が、制御対象であるカルマン渦による変動成分や攪乱の変動成分、あるいはそれらの相互作用に

よる円柱背部付近の流れの複雑な挙動をよりの確に捉えることができ、フィードバック制御にそれらの情報をより適切に反映できることなどが原因と考えられる。

4.2 流速フィードバックよりも制御効果が低下する要因

前節で述べたように、圧力フィードバック制御では、カルマン渦に対して流速フィードバック制御ほどの高い制御効果が得られなかった。その原因に関して、2点圧力フィードバック制御時の揚力係数 C_L と攪乱流速 v_{ex} の攪乱付加開始直後からの時刻歴の例を図-12 に示す。図-5 の流速フィードバック制御時の例と比較すると、 v_{ex} の変動が非常に不規則となっている。このような複雑な変動は、単一剥離せん断層の移流不安定性¹⁶⁾により生じた成分、攪乱とカルマン渦放出に伴う変動との干渉による成分、あるいは数値的な不安定成分などが原因と考えられる。円柱表面近傍の複雑な変動は円柱表面上の監視点圧力に直接的に反映されるため、それが攪乱点にフィードバックされれば、さらに不規則な変動を励起するという悪循環によって、徐々に安定した制御が行えなくなるのが制御効果低下の要因と考えられる。 G が大きくなると不規則性はさらに強まり、 T_f の値も複雑に変動するため、カルマン渦を打ち消すような適切な時間遅れあるいは位相遅れを有する攪乱を発生できなくなることによって、図-10 で見られたような増幅を生じるのである。

このように、円柱表面上の監視点圧力は、円柱表面近傍の複雑な流れに起因した不規則な変動成分の影響を直接的に受けやすいのに対し、円柱後流に置かれた監視点の流速変動には、ある種のフィルターがかかることによって、このような不規則な変動成分が取り除かれて作用していると考えられる。すなわち、円柱後流中では円柱背部の流れの絶対不安定性によるカルマン渦放出周波数付近の成分のみが支配的となり、それ以外の不規則な成分は減衰することによって、後流中にあまり影響しないというものである。

しかし、レイノルズ数が高くなるなどして、後流中にも乱れた成分が含まれるようになると、流速フィードバックでも制御効果が低下することが予想される。これらの不規則な変動に対しては、監視点の流速や圧力へのローパスフィルターの適用などが有効と考えられる。

5. まとめ

フィードバック制御にもとづいた流速攪乱の付加により、円柱後流の周期渦を制御する手法について数値流体解析により検討した。円柱後流の監視点での鉛直方向流速変動をフィードバックする手法と円柱表面の監視点での圧力変動をフィードバックする手法の2手法について検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 流速フィードバックの場合、適切な時間遅れと制御

ゲインを攪乱に与えれば、周期渦をほぼ完全に抑制することができた。

(2) カルマン渦の巻き込み位置よりも下流に監視点を設けた場合には、渦抑制に伴う渦配置の変化に起因して監視点流速と渦放出変動の位相関係が徐々に変化する。そのため、その変化に応じて攪乱の位相遅れも変化させなければ、攪乱と渦放出変動が互いに打ち消しあう位相関係を維持できなくなり、高い制御効果を得ることができない。一方、監視点位置をカルマン渦の巻き込み位置よりも上流に設定すれば、渦抑制に伴う渦配置の変化の影響をほとんど受けられないため、攪乱の位相遅れが一定のままでも高い制御効果が得られる。

(3) 圧力フィードバックの場合、流速フィードバックと同様、適切な時間遅れと制御ゲインを攪乱に与えることにより渦放出変動を低減できるものの、流速フィードバックほどの高い制御効果は得られなかった。なお、監視点数が1点と2点の場合では、制御効果にほとんど違いがなかった。

(4) 圧力フィードバックの制御効果が低いのは、単一剥離せん断層の移流不安定性、攪乱とカルマン渦放出変動の相互作用、数値的な不安定などに起因する不規則な成分が攪乱や監視点圧力に含まれ、フィードバックの繰り返しにより、それらの不規則成分が徐々に強まることによって、攪乱と渦放出変動とが打ち消しあう位相関係を定常的に維持できなくなることが原因である。

(5) 圧力フィードバックにおいて、最も高い制御効果が得られる攪乱の時間遅れは円柱表面上の監視点位置によらずほぼ一定であるが、制御効果は攪乱点よりも下流側の監視点のケースが上流側のケースよりも高い。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（萌芽研究 No.14655169）により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Kimura, K., Fujino, Y. and Hiejima, S.: An experimental study on aerodynamic sound generated from handrails of flat plate cascades, US-Japan Bridge Workshop, Tsukuba, Japan, 1993.
- 2) 嶋田隆一, 比江島慎二, 木村吉郎, 藤野陽三, 野村卓史: 風による平板列からの騒音発生に関する実験的研究, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 第1部, pp.796-797, 1993.
- 3) 比江島慎二, 嶋田隆一, 木村吉郎, 藤野陽三, 野村卓史: 平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究, 日本風工学会誌, 第55号, pp.111-112, 1993.
- 4) 藤野陽三, 木村吉郎, 比江島慎二: 平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 平成8年度, pp.173-176, 1993.
- 5) 比江島慎二, 近藤敏治, 谷口健男: 矩形断面まわりの流れにおける空力音の発生源の特性に関する数値流体

- 解析, 応用力学論文集, Vol.2, pp.573-581, 1999.
- 6) 比江島慎二, 松尾綾子, 谷口健男: 矩形周辺流れから発生する空力音および物体表面上の音源特性に関する数値流体解析, 応用力学論文集, Vol.3, pp.697-706, 2000.
 - 7) 比江島慎二, 松尾綾子, 谷口健男: 矩形表面上の空力音音源特性に関する数値流体解析, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.161-166, 2000.
 - 8) 望月修, 丸田芳幸: 流体音工学入門 — ゆたかな音環境を求めて —, 朝倉書店, 1996.
 - 9) 二井義則, 五反田哲郎: 風力発電システムで観察された強い空力離散周波数音, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 635 号, pp.2325-2332, 1999.
 - 10) Ffowcs Williams, J. E. and Zhao, B. C.: The active control of vortex shedding, *J. Fluids and Structures*, Vol.3, pp.115-122, 1989.
 - 11) Roussopoulos, K.: Feedback control of vortex shedding at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, Vol.248, pp.267-296, 1993.
 - 12) M. M. Zdravkovich: *Flow around Circular Cylinder*, Oxford University Press, New York, 1997.
 - 13) 野村卓史: ALE 有限要素法による流れ・構造連成解析への予測子・修正子法の適用と計算過程に関する技法, 土木学会論文集, No.455/I-21, pp.55-63, 1992.
 - 14) 比江島慎二, 熊尾友憲, 谷口健男: 流速攪乱を用いた円柱後流渦のフィードバック制御, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.427-432, 2002.
 - 15) Park, D. M. et al.: Feedback control of von Karman vortex shedding behind a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Phys. Fluids*, Vol.6, No.7, pp.2390-2405, 1994.
 - 16) 比江島慎二, 野村卓史: 円柱周辺剥離流れの不安定性に関する線形安定性解析, 土木学会論文集, No.661/I-53, pp.151-161, 2000.

(2004 年 4 月 16 日 受付)