

円柱後流渦のフィードバック制御

岡山大学環境理工学部 正員 比江島慎二
日本クニヤ(株) 正員 熊尾 友憲

1. はじめに

流体中の物体周辺に放出される周期渦は空力弾性振動や空力騒音などの問題を引き起こし、その制御は工学上極めて重要な課題である。われわれは以前、キャビティ内の流速変動のフィードバックにより制御攪乱を発生させ、その攪乱を剥離せん断層に付加することによってキャビティから放出される周期渦を効率的に抑制できることを示した¹⁾。本研究では、同様なフィードバック制御法を典型的な交番渦を発生する円柱周辺流れに適用し、その制御効果などについて数値流体解析により検討する。

2. 解析方法

2次元非圧縮 Navier - Stokes 方程式と連続の式を流速双線形、圧力一定の四辺形混合補間要素を用いて SUPG 法により離散化し、得られた有限要素方程式を Predictor - Corrector 法により時間積分して円柱周辺流れを解析した。図-1 に解析領域の境界条件と各諸元、図-2 に解析メッシュを示す。流入流速はレイノルズ数 $Re = U_0 D / \nu = 200$ ($U_0 = 26.5$ cm/s) の一様流速を与えた。流出境界はトラクションフリー、側方境界はスリップ条件、円柱表面はすべりなしとした。全要素数 4166 とし、キャビティ表面の最小要素厚さは $0.006D$ である。また、乱流モデルとして、渦粘性に Smagorinsky モデルを用いた LES を適用した。

制御攪乱は、円柱下流端から距離 s の下流位置における鉛直方向流速を監視点流速とし、それに時間遅れ τ および制御ゲイン G を与えて円柱表面上の2つの攪乱点にフィードバックすることにより発生する(図-3)。なお、一方の攪乱流速を v_{ex} とすると他方の攪乱流速は $-v_{ex}$ とすることにより、常に逆対称攪乱を発生させる。また、解析上は攪乱流速を物体表面上の流速境界条件として取り扱う。

3. 解析結果

制御ゲイン $G = 1.0$ 、監視点位置 $s = 0.5D$ のもとで、 τ を $0 \leq \tau \leq 0.9T_0$ (T_0 は攪乱がないときの渦放出周期で 0.23 sec) で変化させたときの揚力係数 rms 値について解析した結果を図-4 に示す。また、 $\alpha = 100^\circ$ で揚力変動の低減効果が最も高かった $\tau = 0.5T_0$ の場合と揚力変動が増幅してしまう $\tau = 0.8T_0$ の場合の攪乱付加開始直後からの揚力係数の時刻歴について、上側の攪乱点の攪乱流速の時刻歴とともに図-5 に示す。攪乱を付加する方向は、 $\alpha = 100^\circ, 70^\circ, 30^\circ$ のときは円柱中心から放射方向、 $\alpha = 0^\circ$ のときは円周方向としている。攪乱がないときの揚力係数 rms 値は 0.20 (変動振幅にして 0.29) である。 $\alpha = 100^\circ$ のときは τ による揚力係数 rms 値の変化が大きく、 $0.6T_0 \leq \tau \leq 0.9T_0$ の範囲では攪乱がない場合の3倍程度にまで増加するものの、最も低減効果の高い $\tau = 0.5T_0$ 付近では比較的短時間で攪乱がない場合の $1/6 \sim 1/7$ 程度にまで低減できている。この場合、 $\tau = 0.5T_0$ 付近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いくが、 $0.6T_0 \leq \tau \leq 0.9T_0$ 付近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フィードバック増幅機構が働いていると考えら

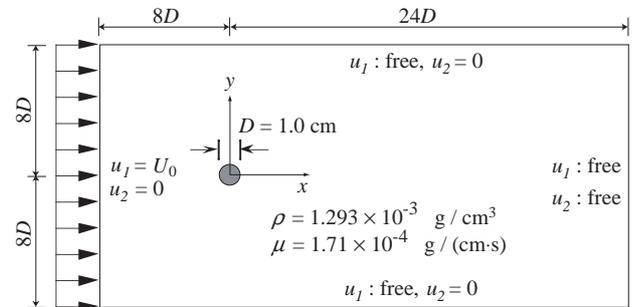


図-1 境界条件および各諸元

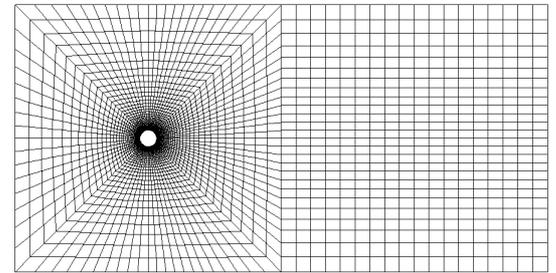


図-2 有限要素メッシュ

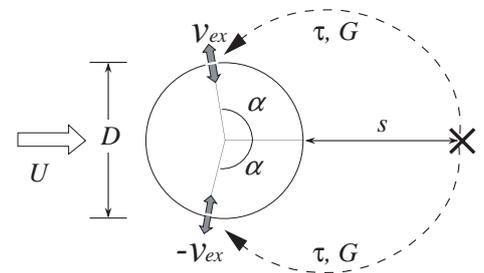


図-3 フィードバック攪乱

キーワード：フィードバック制御，流速攪乱，円柱，周期渦，数値流体解析

連絡先：岡山市津島中 3-1-1 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 電話 086-251-8869 hiejima@cc.okayama-u.ac.jp

れる．攪乱点が $\alpha = 100^\circ$ 以外の場合には， α が小さいほど攪乱が揚力変動に与える影響が小さくなっている．これは， $\alpha = 100^\circ$ の攪乱位置は，外乱に対して剥離せん断層が最も敏感である剥離点に近いので剥離せん断層に効率的に変動成分を送り込めるのに対し，それ以外の攪乱位置では， α が小さいほど剥離せん断層からの距離が離れ，攪乱の影響が剥離せん断層に及ばなくなるのが原因と考えられる．

次に，図-4で制御効果の高かった $\alpha = 100^\circ$ ， $\tau = 0.5T_0$ のもとで制御ゲイン G を様々に変化させて解析したところ， $G \leq 1.2$ では G の増加とともに制御効果も高まるが， $G = 1.2$ を越えたあたりから効果が鈍り， $G = 2.0$ で急にフィードバック増幅を生じるようになることが明らかになった（図-6の）．このとき周期渦の放出周期を調べたところ， G の増加によって周期渦が抑制されるに伴い，放出周期が増加していることが分かった．すなわち，渦放出周期が変化するにもかかわらず， τ は常に攪乱がないときの渦放出周期 T_0 にもとづいた一定値のままであり，渦放出周期の変化が小さいうちは攪乱と後流振動が互いに打ち消し合う位相関係にあるものの， G の増加によって渦放出周期の変化が大きくなり位相関係のずれが広がると互いに打ち消し合うことができなくなったと考えられる．そこで，監視点流速が負から正にな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で渦放出周期 T_i を新たに定義し， τ の基準となる渦放出周期をリアルタイムで更新した． $\tau = 0.5T_i$ とした場合の結果を図-6に示す． $\tau = 0.5T_0$ に比べ， $\tau = 0.5T_i$ の場合は G の増加とともに揚力変動が単調に減少し続け， $G = 2.0$ ではほぼ完全に揚力変動を制御できている．

4. まとめ

フィードバック制御にもとづく剥離せん断層への流速攪乱付加により，円柱後流の周期渦に対して高い制御効果が得られることが分かった．ただし，周期渦抑制に伴い渦放出周期が変化するため，監視点流速に対する時間遅れが一定の攪乱を用いると，攪乱と後流振動の位相関係が最適値から徐々にずれて制御効果が低下してしまう．そのため，時々刻々と変化する渦放出周期をリアルタイムで求め，その周期にもとづく時間遅れを攪乱に与える必要がある．なお，監視点位置が円柱から離れるほど制御効果が低下すること，3次元流れでも高い制御効果が得られることなども別途明らかになっている．

謝辞：本研究の一部は（財）サウンド技術振興財団研究助成および（財）岡山工学振興会研究助成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) 比江島他：微小流速攪乱によるキャビティ空力音のフィードバック制御，応用力学論文集，Vol.4, pp.683-690, 2001.

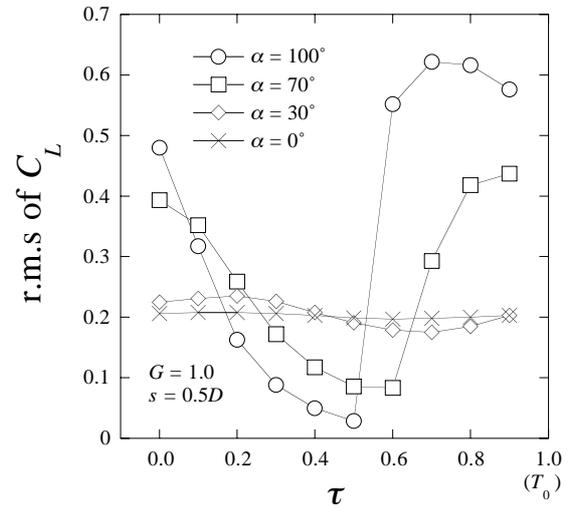


図-4 変動揚力に与える時間遅れの影響

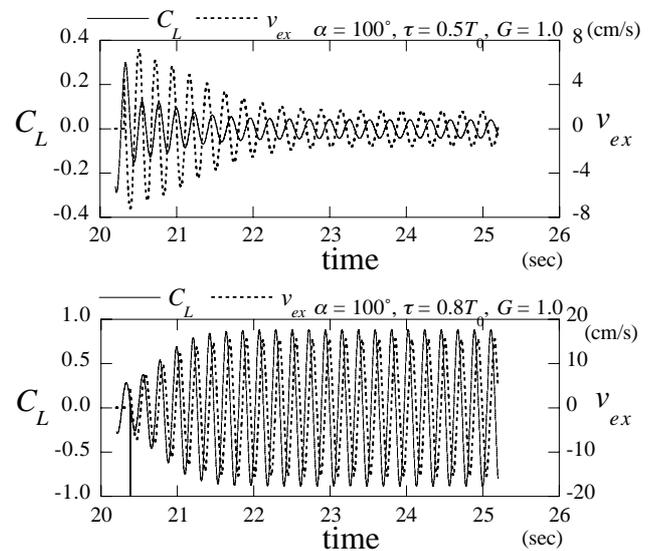


図-5 揚力係数の時刻歴 ($\alpha = 100^\circ$)

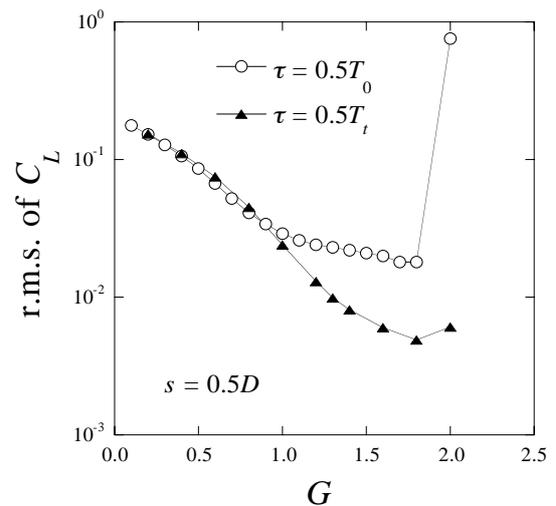


図-6 変動揚力に与える制御ゲインの影響