

2点圧力フィードバックによる円柱周期渦制御

岡山大学大学院 学生員 ○渡邊 恭

岡山大学環境理工学部 正員 比江島 慎二

1. 背景・目的

風などにより構造物周辺の流れから発生する周期渦が空力弾性振動や空力騒音の問題を引き起こすことがある。われわれは、周期渦放出に伴う物体後流の流速変動のフィードバックにより、物体表面上から周期的な制御攪乱を発生させることで周期渦を効率的に抑制する手法を提案している¹⁾。円柱カルマン渦にこの手法を適用した結果、極めて高い制御効果が得られた。しかしながら、実際の構造物では、後流の流速変動を測定することが困難なケースもあると考えられることから、本研究では流速の代わりに物体表面の圧力変動のフィードバックにより制御攪乱を発生させる手法について検討した。

2. 解析方法

制御対象とする流れは $Re=200$ とし、有限要素法による2次元数値解析を行った。非圧縮の Navier-Stokes 方程式および連続条件式を基礎式とし、これらの式を流速双線形、圧力一定の四辺形混合補間要素を用いて SUPG 法により離散化する。得られた有限要素方程式は予測子・修正子法により時間積分を行った。なお、時間刻みは 2.0×10^{-4} sec とした。

図-1 に境界条件と解析領域の各諸元を示す。

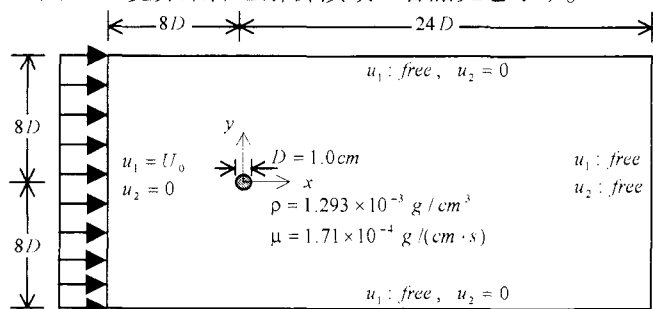


図-1 境界条件および各諸元

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、円柱表面上の2つの攪乱点から流速攪乱を発生させ、円柱周辺の剥離流れを刺激する（図-2）。監視点の取り方により2種類の方法について検討する。

1つ目は、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、時間遅れ τ および制御ゲ

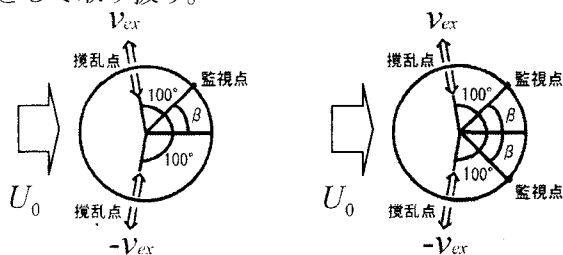
イン G を与えて攪乱点にフィードバックする方法である。 P_{mon} は定常圧力成分 P_{ave} を含んでいるため、これを取り除き、変動成分のみを制御攪乱にフィードバックする。なお、 P_{ave} は常に変化すると考えられるため、監視点圧力変動の1周期ごとに算定しなおす。このとき攪乱流速 v_{ex} は次式で与えられる。

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

2つ目は、監視点として、円柱側面上に対称に位置する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である。このような位置の2点の圧力は、ほぼ同程度の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るため、1つ目の方法のように定常成分を1周期ごとに算定しなおす必要がない。このとき攪乱流速 v_{ex} は次式で与えられる。

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

なお、いずれの方法においても、円柱表面上の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、常に逆対称攪乱を発生させる。また、解析において攪乱流速は物体表面節点上の流速境界条件として取り扱う。



(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-2 フィードバック攪乱

3. 解析結果

フィードバックゲイン $G=1.0$ に固定し、時間遅れ τ を $0.1T_l \leq \tau \leq 1.0 T_l$ の間で変化させたときの揚力係数の rms 値を図-3 に示す。なお T_l は時刻 t における監視点圧力変動の周期である。 T_l は常に変化するため、

1 周期ごとに監視点圧力時刻歴から算定している。

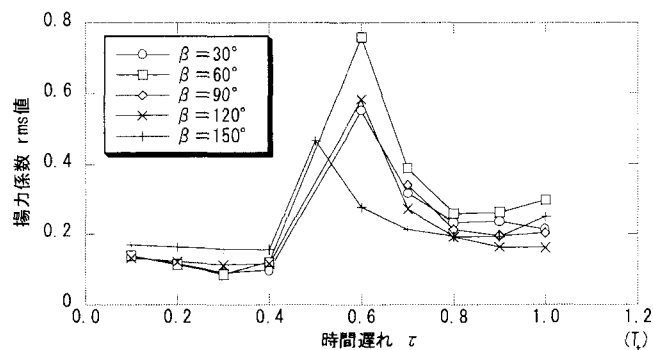


図-3 時間遅れの違いによる揚力係数 rms 値の変化
($G = 1.0$ に固定、2 点圧力フィードバック)

攪乱を付加しないときの揚力係数の rms 値は 0.20 であるが、いずれの監視点のケースでも $\tau = 0.3 T_l$, $0.4 T_l$ 付近で最も揚力係数を低減できており、監視点による違いはほとんど見られない。これは円柱表面上の位置に関わらず、各監視点圧力の位相がほぼ同じであるためと考えられる。同様な傾向は 1 点圧力フィードバックでも見られることを別途確認している。

監視点ごとに時間遅れを $\tau = 0.3 T_l$ 、あるいは $0.4 T_l$ で固定し、ゲイン G を変化させたときの揚力係数 rms 値を図-4 に示す。

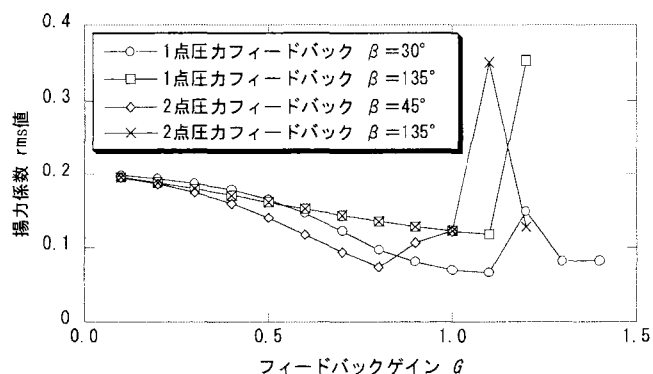


図-4 ゲインの違いによる揚力係数 rms 値の変化

いずれの監視点においても揚力係数の rms 値が最も小さくなる最適ゲイン G が存在するが、最適 G より 0.1 大きくなると rms 値が急激に大きくなり、揚力係数が増幅する。以前行った流速フィードバック¹⁾の場合には、 G を大きくすることでほぼ完全にカルマン渦を抑制することができたが、圧力フィードバックの場合にはそのような高い制御効果は得られなかった。流速フィードバックと圧力フィードバックの攪乱の時刻歴などを比較すると、圧力フィードバックの場合には非常に不規則な変動となっていることが明らかとなっている。不規則な変動は監視点圧力に反映され、それが攪乱点にフィードバックされてさらに不規則な攪乱

を生成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こと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_l 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を有する攪乱を発生できなくなることが増幅を生じる原因である。

各監視点ケースで最も制御効果が高い τ 、 G を与えたときの揚力係数の rms 値を図-5 に示す。比較的下流側にある監視点のケースの方が制御効果が高いことが分かる。これは制御攪乱による流れの変化をよりの確にとらえられたためと考えられる。また、1 点圧力フィードバックと 2 点圧力フィードバックでは、制御効果の違いはほとんどないことも明らかとなった。ただし、1 点圧力フィードバックでは定常圧力成分 P_{ave} を差し引く操作において、 P_{ave} を 1 周期ごとに更新するため、更新時に攪乱の波形が不連続となり、2 点圧力フィードバックに比べて多少不安定になる傾向が見られた。

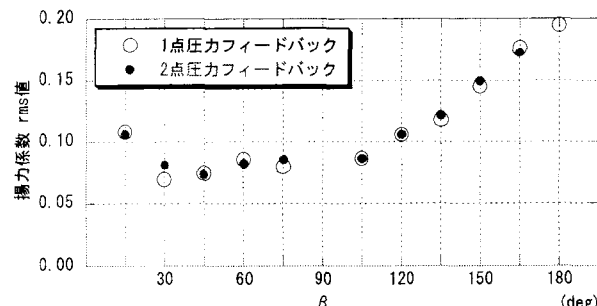


図-5 各監視点で最も制御効果が高かったときの揚力係数 rms 値の変化

4. 結論

1 点圧力フィードバック、2 点圧力フィードバックともに、ある程度の制御効果は得られたものの、流速フィードバック¹⁾ほどの高い制御効果を得ることは出来なかった。

これは円柱後流中の流速変動に比べ、円柱表面上の圧力変動は非常に不規則であること、また、さらに G を大きくすると監視点圧力変動はより非定常性が強くなり、適切な時間遅れあるいは位相を有する攪乱を発生できなくなることなどが原因である。

謝辞: 本研究の一部は平成 14 年度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) 比江島他: 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