

エオルス音の能動制御

Active Control of Aeolian Tones

○ 森 正明 (東北大工院), 畠山 望 (東北大流体研), 井上 督 (東北大流体研)

Masaaki Mori*, Nozomu Hatakeyama** and Osamu Inoue***

*Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

**Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

***Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

Active control of aeolian tones generated by the flow past a circular cylinder in a uniform flow of $Re=150$ and 160 is studied by direct numerical simulation. The two-dimensional, unsteady, compressible Navier-Stokes equations are solved by a finite difference method. Three types of forcing are considered; steady blowing/suction, periodic blowing/suction from the cylinder surface and steady rotation of the cylinder. It is found that the generation and propagation of the sound can be controlled in some degree by the methods.

1. 緒言

エオルス音はカルマン渦の発生と密接な関係があることが知られており、ごく最近DNS [直接数値計算] によりその発生と伝播メカニズムが明らかになってきた [1]。本研究では円柱まわりの流れから発生する音を制御する試みとして、円柱表面からの吹き出し・吸い込みを周期的または定常に加えた場合、および定常な回転を加えた場合に生ずる音場の変化をDNSを用いて調べた結果について報告する。

2. 数値計算方法

一様流中の静止円柱の中心を原点としたデカルト座標系 (x, y) を考え、 x 軸の正の向きを一様流の向きとする。また、極座標系 (r, θ) を原点を中心にとり、角度 θ は上流から時計まわりにとる。円柱直径を D 、一様流速を U_∞ 、静止音速を c_∞ 、動粘性係数を ν 、密度 ρ_∞ で表し、一様流マッハ数を $M = U_\infty/c_\infty = 0.1, 0.2, 0.3$ 、レイノルズ数を $Re = Mc_\infty/\nu = 150, 160$ とする。以下、 D 、 c_∞ 、 ρ_∞ で無次元化する。基礎方程式は二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、有限差分法を用いて解いた。空間微分は 6 次精度 Padé 型コンパクトスキーム (境界 4 次精度) [2] を用い、時間進行に 4 次精度の Runge-Kutta 法を用いる。円柱表面は断熱・すべりなしとするが、径方向速度 M_r を円柱表面の $\theta = \pm 90^\circ$ を中心に幅 3.6° で与えることにより吹き出し・吸い込みとし、また反時計まわりの周方向速度 M_θ を与えることにより定常回転とする。遠方境界は反射を取り除くために、Poinsot & Lele による無反射境界条件 [3] を課す。格子は、極座標非一様格子 (O 型格子) を用いる。格子点数は $871(r \text{ 方向}) \times 503(\theta \text{ 方向}) = 44$ 万点である。

3. 制御方法

エオルス音の制御は以下のパターンで行う。

Case I: 周期的な吹き出し・吸い込みによる制御

$M_r = A \sin[2\pi f[(t - t_s)]] - \beta]$ 振幅 $A = 0.25M, 0.5M, 1.0M$ 、周波数 $f = f_0$ とする。ここで、 f_0 は制御を加えない場合のカルマン渦列の放出周波数である。 t は無次元時間、 t_s は制御開始時間で制御を加えない場合に円柱表面の渦が剥がれる時間である。 β は位相であり、 $\beta = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ としている。

Case II: 定常吸い込み・吹き出しによる制御

$M_r = |b|(t > t_s)$ とする。 $b > 0$ は吹き出し、 $b < 0$ は吸い込みであり、 $|b| = 0.25M, 0.5M, 1.0M, 1.5M$ とする。

Case III: 定常回転による制御

$M_\theta = \alpha(t > t_s)$ とし、

$\alpha = 0.5M, 1.0M, 1.5M, 2.0M, 2.15M, 2.25M, 2.5M$ としている。

4. 計算結果

図 1(a) に吹き出し・吸い込みが無い場合、図 1(b), (c) に周期的な吹き出し・吸い込みを加えた場合の変動音圧場 $\Delta\bar{p}(= \Delta p - \Delta p_{mean})$ を示す。ここで $\Delta p (= p - p_\infty)$ は圧力、 Δp_{mean} は平均圧力であり、 p_∞ は静止圧力を示す。図 1(a) と図 1(b) を比較すると、吹き出し・吸い込みが無い場合では揚力変動による二重極性の音が発生している [1] のに対し、吹き出し・吸い込みを与えた場合は揚力変動による二重極性以外の音も発生していることがわかる。図 1(b), 図 1(c) を比較すると、与える吹き出し・吸い込みの位相の違いにより音のピークの伝播方向が異なっており、図 1(d), (e), (f) に示す二乗平均 (RMS) 音圧の指向特性からも明らかである。次に定常な吹き出し・吸い込みを加えた場合について (a) 吸い込みを加えた場合と (b) 吹き出しを加えた場合の二乗平均音圧の指向特性を図 2 に示す。図 2 から分かるように、吹き出し・吸い込みを加えない場合と同様に二重極性の音が発生しており、音の振幅は吹き出し・吸い込みなしに比べ、吹き出しでは強く、吸い込みでは弱くなっている。最後に定常な回転を加えた場合について二乗平均音圧の指向特性を図 3 に示す。揚力による二重極性の音以外に抗力による二重極性の音が発生していることがわかるが、図 4 に示す渦度場からわかるように、回転速度が $M_\theta > 2.0M$ になると渦放出が起きない [4] ため音は発生しない。

5. まとめ

- (1) 吹き出し・吸い込みを周期的または定常に加えた場合、および定常回転を加えた場合に生ずる音場の変化をDNSにより捉えた。
- (2) 周期的な吹き出し・吸い込みの位相を変えることにより、音波のピークの伝播方向を制御できる。
- (3) 定常な吹き出し・吸い込みを加えた場合、音波のピークの伝播方向は変化せず、吹き出しでは発生する音の振幅は増加し、吸い込みでは減少する。
- (4) 定常な回転を加えた場合、揚力による二重極以外に抗力による二重極も発生し、回転速度 $M_\theta > 2.0M$ で渦放出が起きなくなるため音は発生しない。

6. 参考文献

- (1) Inoue, O., Hatakeyama, N., Hosoya, H. and Shoji, H., "Direct Numerical Simulation of Aeolian Tones," *AIAA Paper 2001-2132*. (2001).
- (2) S.K. Lele, *J. Comp.Phys.* 103, 16-42. (1992).
- (3) T.J. Poinso, & S.K. Lele., *J. Comp.Phys.* 101, 104-129. (1992).
- (4) S. Kang, H. Choi, & S. Lee., *Phys. Fluids.* 101, 104-129. (1999).

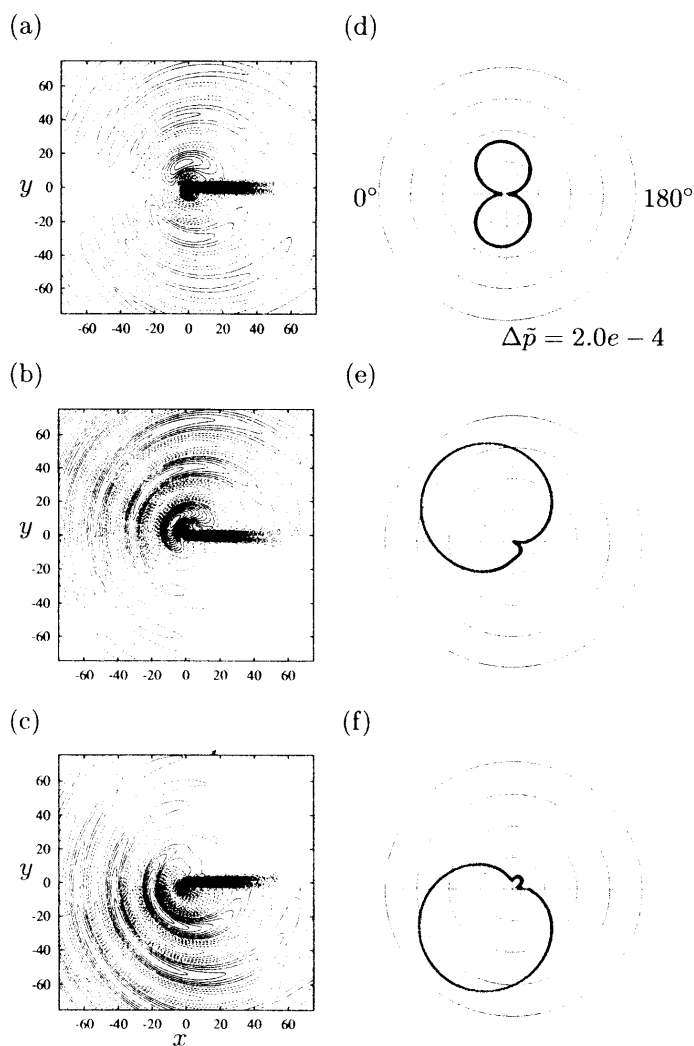


Fig. 1: Sound pressure field [left] and directivity of $\Delta\bar{p}$ (RMS) [right] . (Case I). $A = 0.5M$.

—: positive, - - -: negative. $r_{obs} = 75(1 - M \cos \theta)$.

(a), (d) without control, (b), (e) $\beta = 3\pi/4$, (c), (f) $\beta = 7\pi/4$

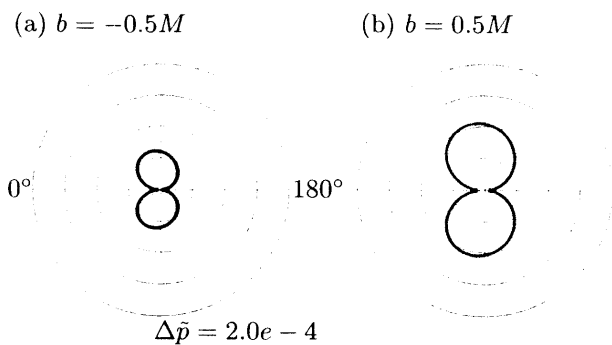


Fig. 2: Directivity of sound pressure $\Delta\bar{p}$ (RMS). (Case II). $r_{obs} = 75(1 - M \cos \theta)$.

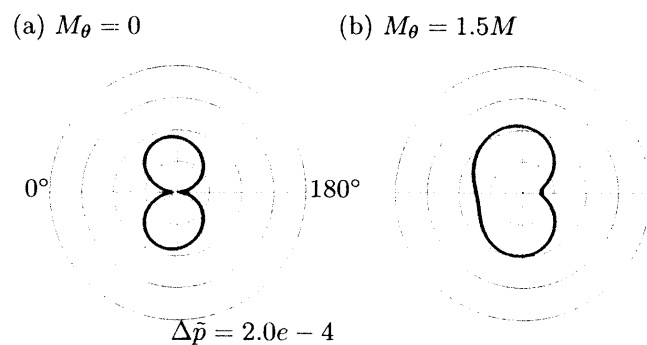


Fig. 3: Directivity of sound pressure $\Delta\bar{p}$ (RMS). (Case III). $Re = 160$. $r_{obs} = 75(1 - M \cos \theta)$.

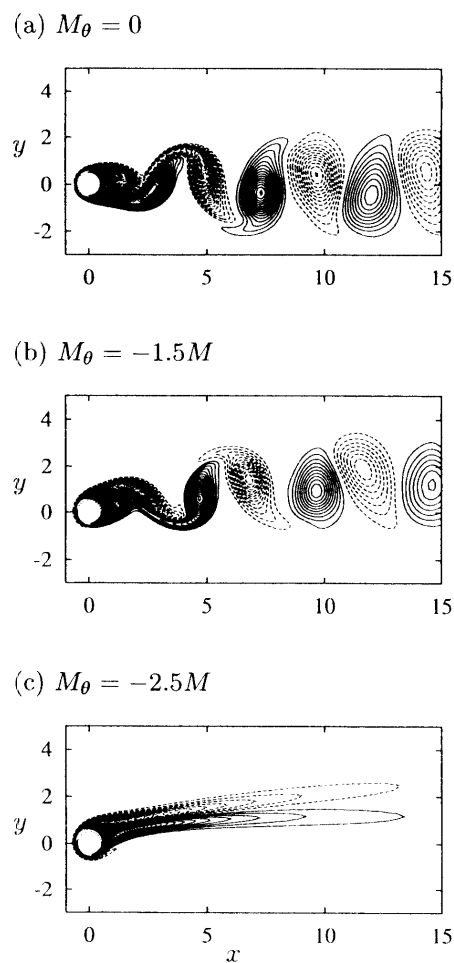


Fig. 4: Vorticity field. (Case III). $Re = 160$