

# 吹き出し・吸い込みによるエオルス音の制御

## Control of Aeolian Tones by Suction/Blowing

○ 森 正明、東北大学大学院工学研究科、〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

畠山望、東北大学流体科学研究所、〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, Email: hatakeyama@ifs.tohoku.ac.jp

井上 督、東北大学流体科学研究所、〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 Email: inoue@ifs.tohoku.ac.jp

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

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

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

Control of Aeolian tones generated by the flow past a circular cylinder at  $Re=150$  is studied by direct numerical simulation. The two-dimensional, unsteady, compressible Navier-Stokes equations are solved by a finite difference method. It is found that by imposing uniform or periodic suction/blowing on the cylinder surface at  $\theta = \pm 90^\circ$ , the directivity, amplitude and frequency of acoustic sound can be controlled in some degree.

### 1. 緒言

近年、輸送機械の高速化などにより空力騒音が大きな問題となってきた。空力騒音（または流体騒音）は流れと物体が干渉することにより生ずるものと純粋に流れから発生するものに分けることができる。前者の代表的なものとしてエオルス音が上げられる。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 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一様に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  $(x, y)$  を考える。x 軸の正の向きを一様流の向きとする。また、極座標系  $(r, \theta)$  を原点を中心にとり、角度  $\theta$  は上流から時計まわりにとる。円柱直径を  $D$ 、静止音速を  $c_\infty$ 、動粘性係数を  $\nu$ 、密度  $\rho_\infty$  で表し、一様流マッハ数を  $M = 0.2$ 、レイノルズ数を  $Re = Mc_\infty/\nu = 150$  とする。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  $v_r$  を円柱表面の  $\theta = \pm 90^\circ$  を中心に幅  $3.6^\circ$  で与え、吹き出し・吸い込みとする。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  $871(r$  方向)  $\times 503(\theta$  方向) = 44 万点である。

### 3. 吹き出し・吸い込みの制御関数

吹き出し・吸い込みは以下のパターンで与える。

Case I: 周期的な吹き出し・吸い込みを制御する関数は  $v_r = A \sin[2\pi f(t - t_s)]$  とする。振幅  $A = 0.25M, 0.5M, 1.0M$ 、周波数  $f = f_0 (= 0.0364)$  とする。ここで、 $f_0$  は  $Re = 150, M = 0.2$  でのカルマン渦列の放出周波数である。 $t$  は無次元時間、 $t_s$  は制御開始時間で円柱表面の渦が剥がれる時間  $t_s = 2012.2$  としている。

Case II: 一様吸い込み・吹き出しは  $v_r = |b|(t > t_s)$  とし、 $\theta = \pm 90^\circ$  に与える。 $b > 0$  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。

### 4. 計算結果

図 1 に周期的な吹き出し・吸い込みと揚力係数  $C_L$ 、抗力係数  $C_D$  の関係を示す。図 1 から判るように、抗力係数が一様流と吹き出し・吸い込みの干渉により吹き出し・吸い込みの周期と同期し、振幅も大きくなり、吹き出し時には抗力は増加し、吸い込み時には減少する。次に図 2(a) ~ (c) に周期的な吹き出し・吸い込みを加えた場合、図 2(d) ~ (f) に吹き出し・吸い込みが無い場合の音圧場を示す。静止圧力を  $p_\infty$  として、(a)、(d) は圧力場  $\Delta p (= p - p_\infty)$ 、(b)、(e) は平均場  $\Delta p_{mean}$ 、(c)、(f) は変動音圧場  $\Delta p - \Delta p_{mean}$  である。(c) と (f) 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。そこで、吹き出し・吸い込みが音圧場に与える影響を調べるために、一様流が無い場合の吹き出し・吸い込みのみで発生する音について調べる。図 3(a) が吹き出し時、(b) が吸い込み時である。図 3 から吹き出し時は正の音波、吸い込み時は負の音波が、局所的に吹き出し・吸い込みを加えたにも関わらず、単極成分として広がっていることがわかる。次に発生した音波の方向依存性を調べるために音波の多重極展開を試みる。ドップラー効果と平均場の影響を考慮した多重極展開 [1] は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \widetilde{\Delta p}(r^{(D)}, \theta, t) &= \frac{r}{r^{(D)}} A_0(r, t) \quad \text{単極} \\ &+ \frac{r}{r^{(D)}} [A_1(r) \cos(\theta) + B_1(r) \sin(\theta)] \quad \text{二重極} \\ &+ \frac{r}{r^{(D)}}^2 [A_2(r) \cos(2\theta) + B_2(r) \sin(2\theta)] \quad \text{四重極} \\ &+ \dots \\ r^{(D)} &= r(1 - M \cos \theta) \end{aligned}$$

上式を用いて  $r = 50$  での変動音圧  $\Delta p$  から求めた多重極展開の結果を図 4 に示す。図 4 から判るように吹き出し・吸い込みなしでは揚力による二重極  $B_1$  の変動が支配的であるのに対して、周期的な吹き出し・吸い込みを加えた場合では  $B_1$  以外にも単極  $A_0$ 、抗力による二重極  $A_1$  の変動が大きいのに対し、抗力による二重極  $A_1$  は、円柱表面からの吹き出し・吸い込みが一様流と干渉することにより発生し、単極成分と同位相であるため、上流側に伝わる音波は強められる。このことは、図 1 で示したように、

抗力変動が吹き出し・吸い込みの周期と同位相であることと一致する。このため、下流側では抗力変動による二重極成分は、吹き出し・吸い込みによる単極成分とは逆位相になり、打ち消し合って下流側に伝わる音波は上流側に比べ弱くなる。

次に一様吹き出し・吸い込みを加えた場合について揚力係数と抗力係数の時間変化を図5示す。吹き出しを加えた場合、揚力係数と抗力係数の周期、振幅は増加し、抗力係数の平均値も増加する。吸い込みを加えた場合、これらは減少する。図6に吸い込みを加えた場合(a-c)と吹き出しを加えた場合(d-f)の圧力場を示す。(c)の変動音圧場から分かるように、一様吹き出し・吸い込みでは周期的な吹き出し・吸い込みの場合のように単極性の音を発生しないために、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、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。図7に $\theta = \pm 90^\circ, r = 50$ で測った音圧場の時系列を示す。音の周期は揚力変動の周期と一致する。

## 5. まとめ

- (1) 吹き出し・吸い込みを周期的または一様に加えた場合に生ずる音場の变化をDNSにより捉えた。
- (2) 一様流中に周期的な吹き出し・吸い込みを加えた場合、一様流と吹き出し・吸い込みとが干渉することにより吹き出し・吸い込みに同期した抗力変動と抗力による二重極成分、また吹き出し・吸い込みによる単極成分を生じさせる。
- (3) 単極成分と抗力による二重極成分により上流側に強い音波、下流側に弱い音波を生じさせる。
- (4) 一様な吹き出し・吸い込みを加えた場合、単極成分は発生せず、吹き出しでは発生する音は振幅、周期ともに増加し、吸い込みでは減少する。

## 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).

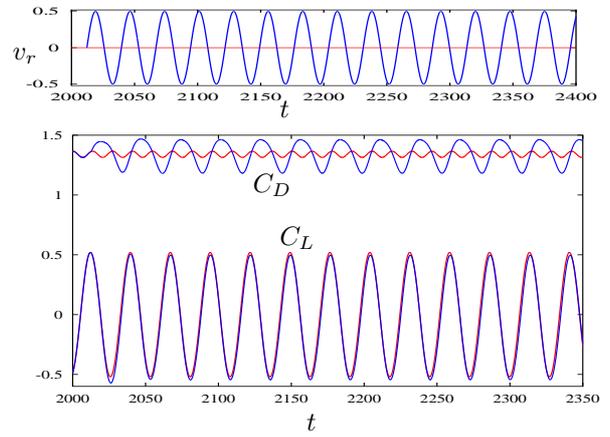


Fig. 1: Case I; suction/blowing. Lift coefficient ( $C_L$ ) and Drag coefficient ( $C_D$ ).  $A = 0.5M$   
—: (without control), —: (suction/blowing)

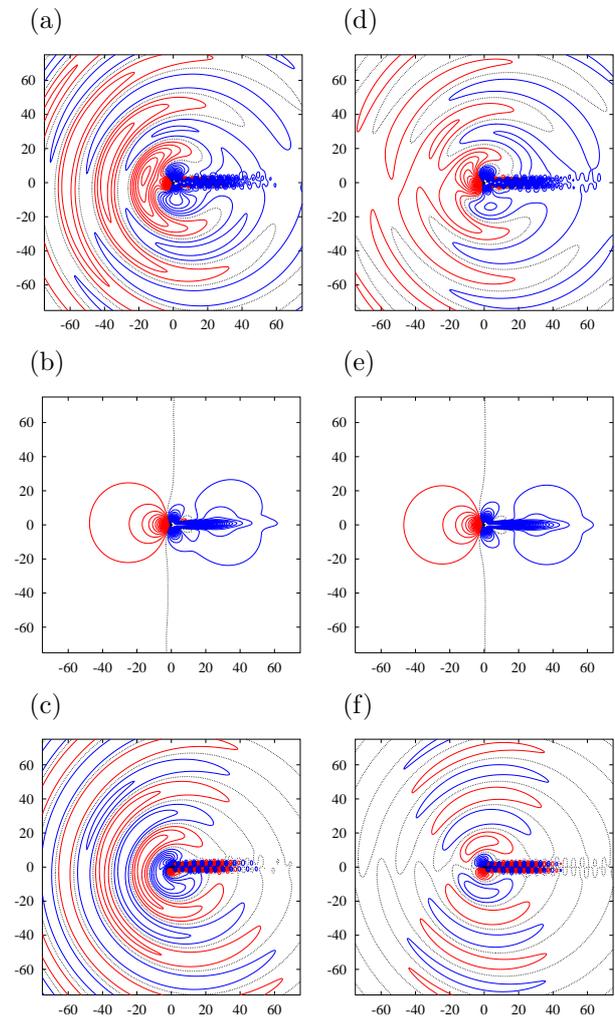


Fig. 2: Sound pressure field. (Case I).  $A = 0.5M$ .  
—: positive, —: negative.

- (a)  $\Delta p$  (controlled), (b)  $\Delta p_{mean}$  (controlled),  
(c)  $\Delta p - \Delta p_{mean}$  (controlled),  
(d)  $\Delta p$ , (e)  $\Delta p_{mean}$ , (f)  $\Delta p - \Delta p_{mean}$

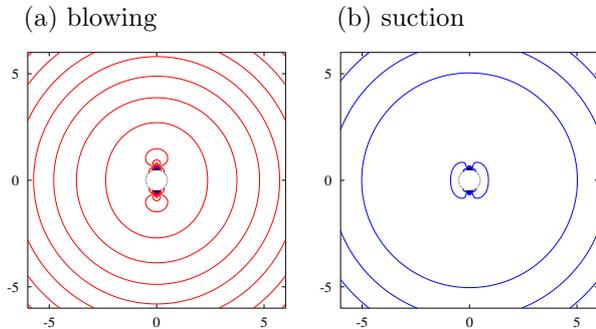


Fig. 3: Sound generation by suction/blowing without uniform flow. —: positive, —: negative.

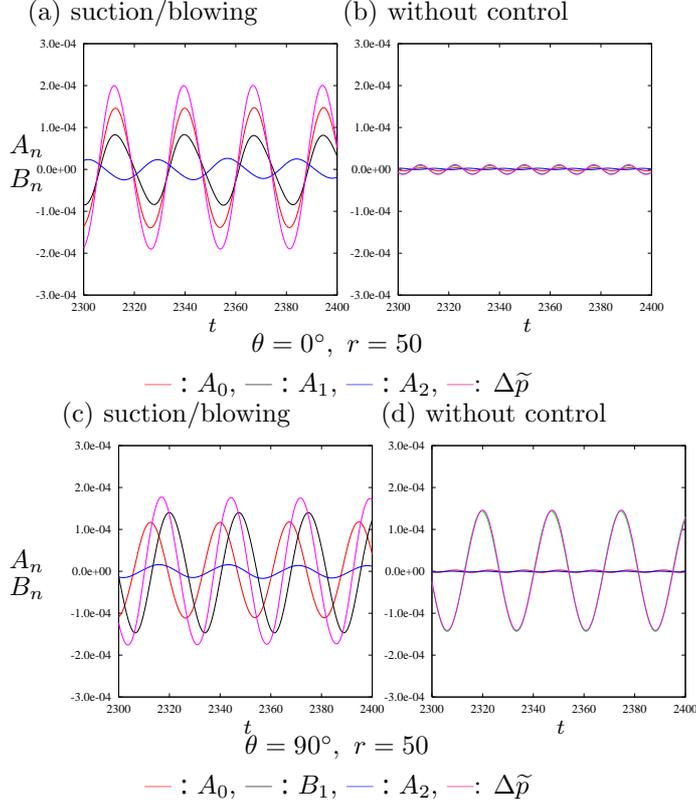


Fig. 4: Multipole expansion of sound pressure. (Case I)  $A = 0.5M$ .

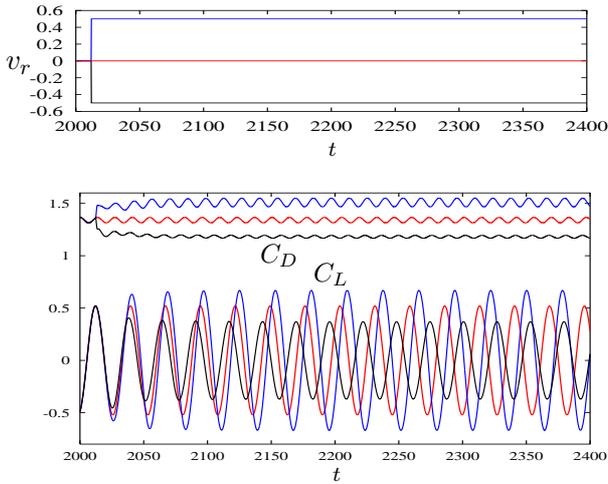


Fig. 5: Case II; Lift and Drag coefficients.

—:  $b = 0.0$ , —:  $b = 0.5M$ , —:  $b = -0.5M$

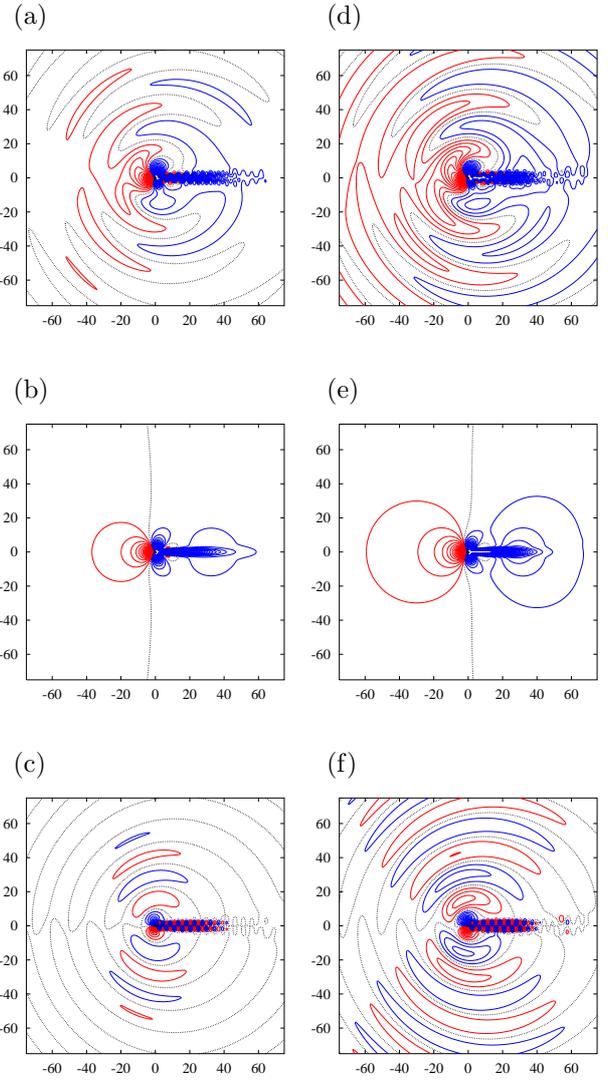
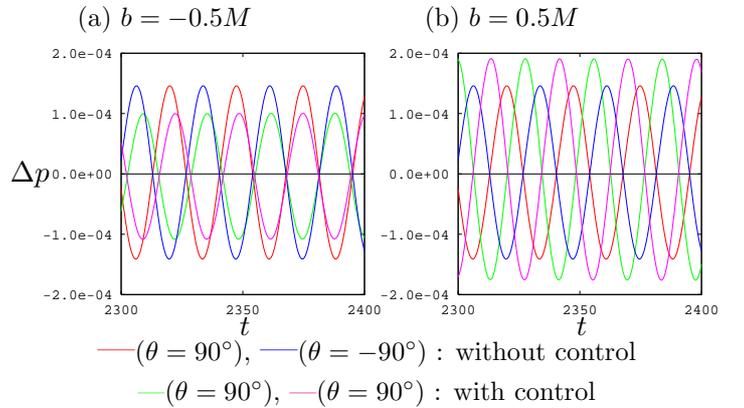


Fig. 6: Sound pressure fields. (Case II)

—: positive, —: negative.

(a)  $\Delta p$  ( $b = -0.5M$ ), (b)  $\Delta p_{mean}$  ( $b = -0.5M$ ),  
(c)  $\Delta p - \Delta p_{mean}$  ( $b = -0.5M$ ), (d)  $\Delta p$  ( $b = 0.5M$ ),  
(e)  $\Delta p_{mean}$  ( $b = 0.5M$ ), (f)  $\Delta p - \Delta p_{mean}$  ( $b = 0.5M$ )



— ( $\theta = 90^\circ$ ), — ( $\theta = -90^\circ$ ): without control  
— ( $\theta = 90^\circ$ ), — ( $\theta = -90^\circ$ ): with control

Fig. 7: Time history of sound pressure. (Case II)  $\theta = \pm 90^\circ, r = 50$