

楕円柱と渦の干渉により発生する音

Body/Vortex Interaction and Sound Generation

○ 庄司隼人, 東北大学流体科学研究所, 〒 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

Hayato SHOJI, 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

The generation mechanisms of sound radiated by the interaction between a vortex and an elliptic cylinder in a two-dimensional flow are investigated by direct solutions of the Navier-Stokes equations. The results show that sound pressure waves are generated in two steps. First, they are generated by the direct interaction between the vortex and the cylinder. Then, the interaction induces vortex shedding from the cylinder, which generates the secondary sound waves.

1. 緒言

ヘリコプタのブレードから発生する音やファンから発生する音などは、主に渦と物体が干渉することにより発生する。これまで一様流中の物体から発生する音の直接数値計算 (DNS) による解析は行われているが [1]、渦と物体の干渉により発生する音の DNS による解析は著者の知る限りない。ここでは、テ일러渦と二次元楕円柱が干渉する流れ場を取り上げ、音の発生と伝播のメカニズムについて考察した結果について報告する。

2. 計算方法

流れ場の模型を図 1 に示す。マッハ数 M の一様流中に、厚さ比 $b/a = 0.5$ の楕円柱を置き、さらに楕円柱の上流側に、渦マッハ数 $M_v = 0.25$ または 0.5 、渦核半径 $R_v = 0.5$ のテ일러渦を導入する場合を考える。渦の向きは時計まわりとする。渦を初期に $X_v = -10$ の位置に置き、その時間を $t = 0$ とする。観測点は原点からの距離 r と、上流からの時計まわりの角度 θ で定義する。流れの量は静止音速 c_∞ と楕円柱長軸径 $d \equiv 2a$ で規格化し、レイノルズ数 $Re \equiv Mc_\infty D/\mu = 150$ 、マッハ数 $M = 0.2$ である。

二次元非定常圧縮性 Navier-Stokes 方程式を有限差分法により解く。空間微分には六次精度の Padé 型コンパクトスキーム (境界三次精度) [2]、時間進行には四次精度の Runge-Kutta 法を用いた。境界条件として、楕円柱表面に断熱すべり無し条件、遠方境界に無反射境界条件 [3] を用い、非一様楕円型格子を採用した。

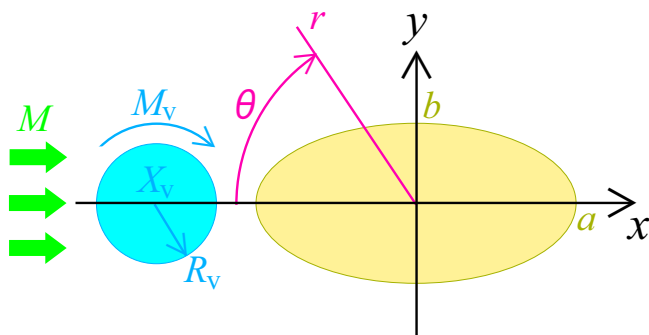


Fig. 1. Schematic diagram

3. 計算結果と考察

テ일러渦を導入する直前の瞬間渦度分布と圧力分布を、各々図 2 と図 3 に示す。図 2 においては、青線が時計回りの渦度、赤線が反時計回りの渦度を表している。また、図 3 においては、音圧を静圧 p_0 からのずれ $\Delta p = p - p_0$ で表し、青線が $\Delta p < 0$ 、赤線が $\Delta p > 0$ を表している。図 2 と図 3 より、楕円柱後流に上下対称の双子渦が形成され、音波は発生していないことがわかる。

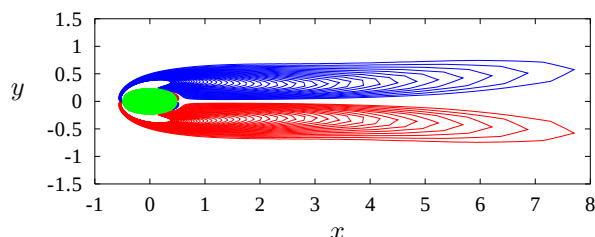


Fig. 2. Contours of vorticity. $t = 0$, Blue : $-1 < \omega < -0.08$, Red : $0.08 < \omega < 1$, $\omega_{\text{step}} = 0.02$.

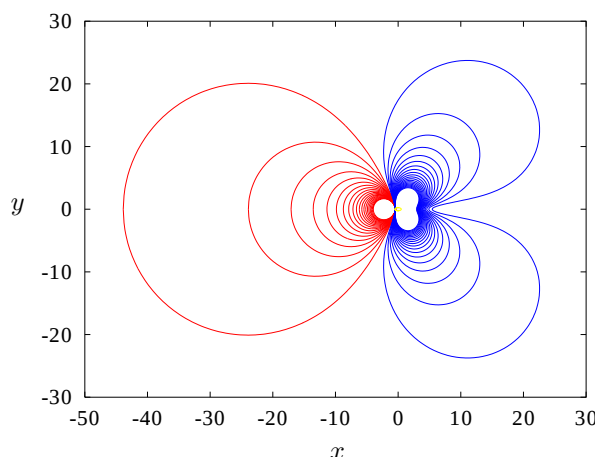


Fig. 3. Contours of sound pressure. $t = 0$, Blue : $-1.0 \times 10^{-3} < \Delta p < -1.0 \times 10^{-5}$, Red : $1.0 \times 10^{-5} < \Delta p < 1.0 \times 10^{-3}$, $\Delta p_{\text{step}} = 5.0 \times 10^{-5}$.

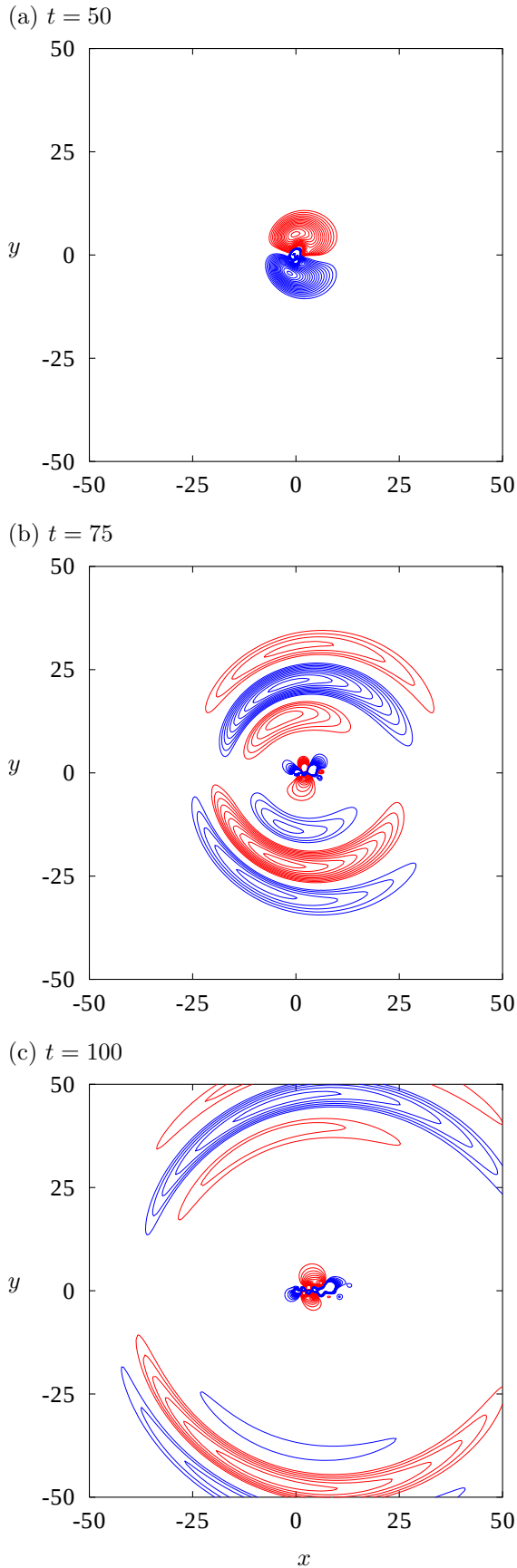


Fig. 4. Counters of sound pressure. Blue : $-1.0 \times 10^{-3} < \Delta \tilde{p} < -1.5 \times 10^{-4}$, Red : $1.5 \times 10^{-4} < \Delta \tilde{p} < 1.0 \times 10^{-3}$, $\Delta \tilde{p}_{\text{step}} = 5.0 \times 10^{-5}$.

以下に $M_v = 0.25$ の場合について結果を示す。時刻 $t = 50, 75, 100$ における瞬間圧力分布 $\Delta \tilde{p} (= \Delta p - \Delta p_{\text{mean}})$ を図 4(a)-(c) に示す。 Δp_{mean} は圧力の時間平均を示す。図 4 から、渦が楕円柱に衝突する $t = 50$ 前後に楕円柱の上下に 各々三つのピークを持つ音波が発生していることがわかる。図 5 は、観測点 $r_{\text{obs}} = 50$, $\theta_{\text{obs}} = 90^\circ$ における、音圧時系列である。図 5 より、図 4 に示される三つの比較的大きな音圧ピークと、その後が続いて発生している比較的小さい音圧ピークを観察することが出来る。音波は音速で伝播するので、図 5 の音圧ピークの時間から音波の発生すると思われる時間が求められることができ、第一音波から第四音波まで求めると、それぞれ $t = 44.5, 53.0, 61.0, 71.0$ となる。

上記四つの音波が発生すると思われる時刻の楕円柱まわりの瞬間渦度分布を図 6 に、同時刻の楕円柱近傍の瞬間圧力分布 $\Delta \tilde{p}$ を図 7 に示す。図 6(a) より、導入された渦が楕円柱の前縁近傍にあり、渦と楕円柱の干渉が始まることにより音波が発生し始めることが判る。導入された渦は時計方向周りであるので、最初に発生する音波は楕円柱の上部で正圧 ($\tilde{p} > 0$)、下部で負圧 ($\tilde{p} < 0$) となり (図 7(a))、下向きの揚力の発生を示している。図 6(b) からは導入された渦が楕円柱により上下に分割されている様子が判る。この時発生する音波 (第 2 音波) は楕円柱の上部で負圧、下部で正圧となり、上向きの揚力の発生を示している。第 3 の音波が発生する時刻には、楕円柱により上下に分割された渦が楕円柱を通り過ぎた位置にあり (図 6(c))、以後導入された渦は下流に流されて行く (図 6(d))。一方図 6(c), 6(d) は楕円柱下流にカルマン渦が発生することを示しており、また図 7(c), 7(d) はこのカルマン渦の発生に伴って下流に移動する圧力波の発生を示している。従って、少なくとも図 5 に示される第 4 音波以降の音波は、カルマン渦の発生に伴って発生するものと考えられるが、今後のより詳細な検討が必要である。

更に時間が経過した後の楕円柱まわりの渦度分布を図 8、図 9 に示す。図 8 は時刻 $t = 150$ の瞬間渦度分布で、図 6 と比較してより明確にカルマン渦列の形成を示している。図 9 は時刻 $t = 1000$ での瞬間渦度分布で、導入された渦と楕円柱の干渉により誘起されたカルマン渦の形成が、時間の経過とともに減衰し、干渉を開始する前の状態 (図 2) に回復することが判る。この渦形成の減衰に合わせて、音波の発生も減衰する (図 5)。

以上の結果から、楕円柱と渦の干渉による音波の発生には 2 段階あることが判る。即ち、まず楕円柱と渦が直接干渉することにより音波が発生する。次いで楕円柱と渦が干渉することによりカルマン渦の形成が誘起され、それに伴って音波が発生する。

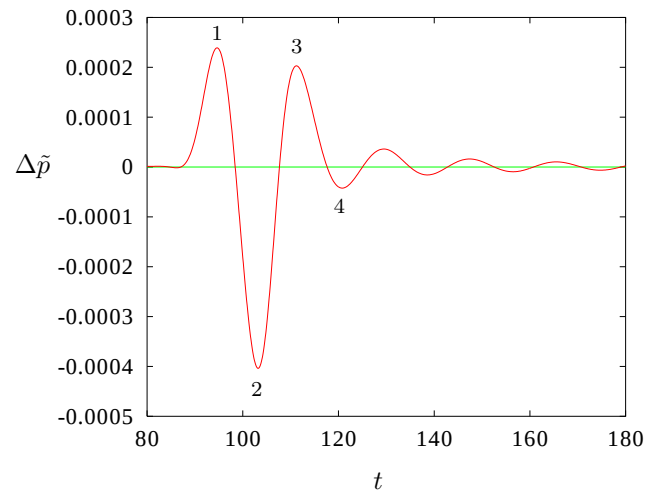


Fig. 5. Time history of sound pressure $\Delta \tilde{p}$. $r_{\text{obs}} = 50$, $\theta_{\text{obs}} = 90^\circ$.

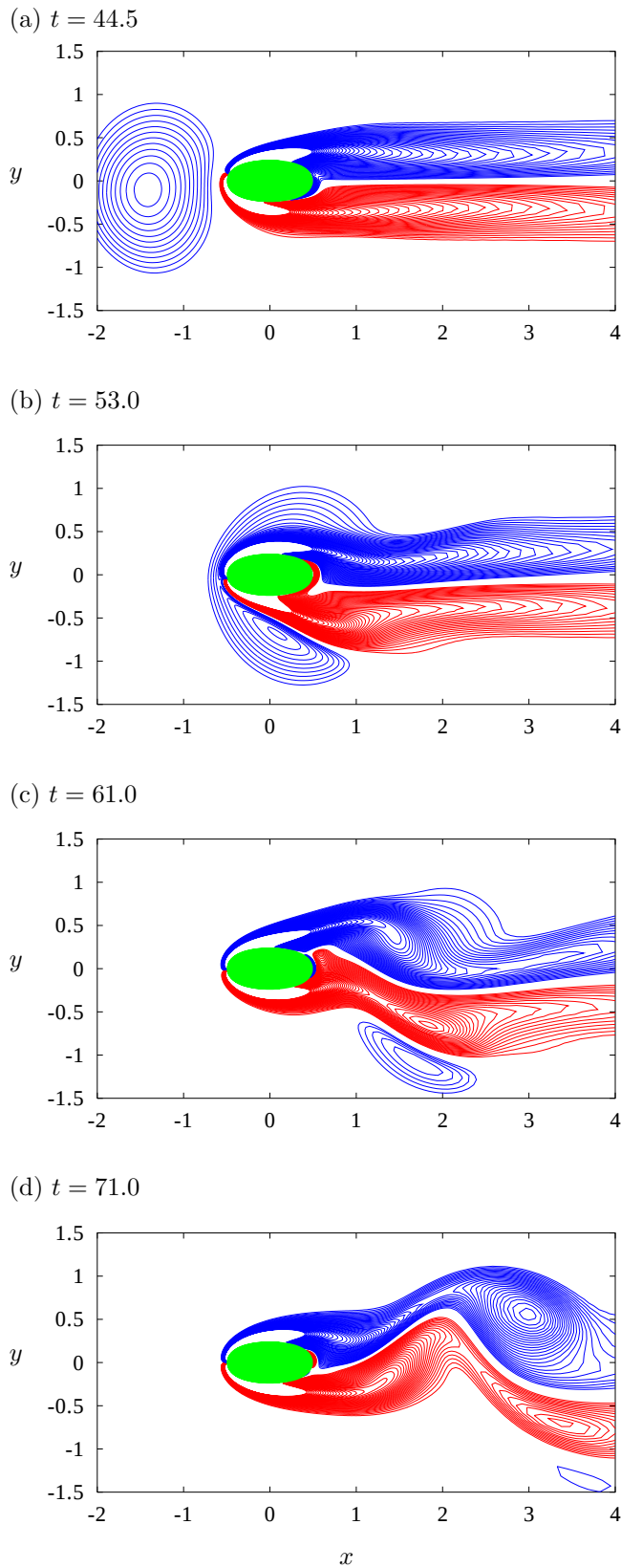


Fig. 6. Contours of vorticity. Blue : $-1 < \omega < -0.08$, Red : $0.08 < \omega < 1$, $\omega_{\text{step}} = 0.02$.

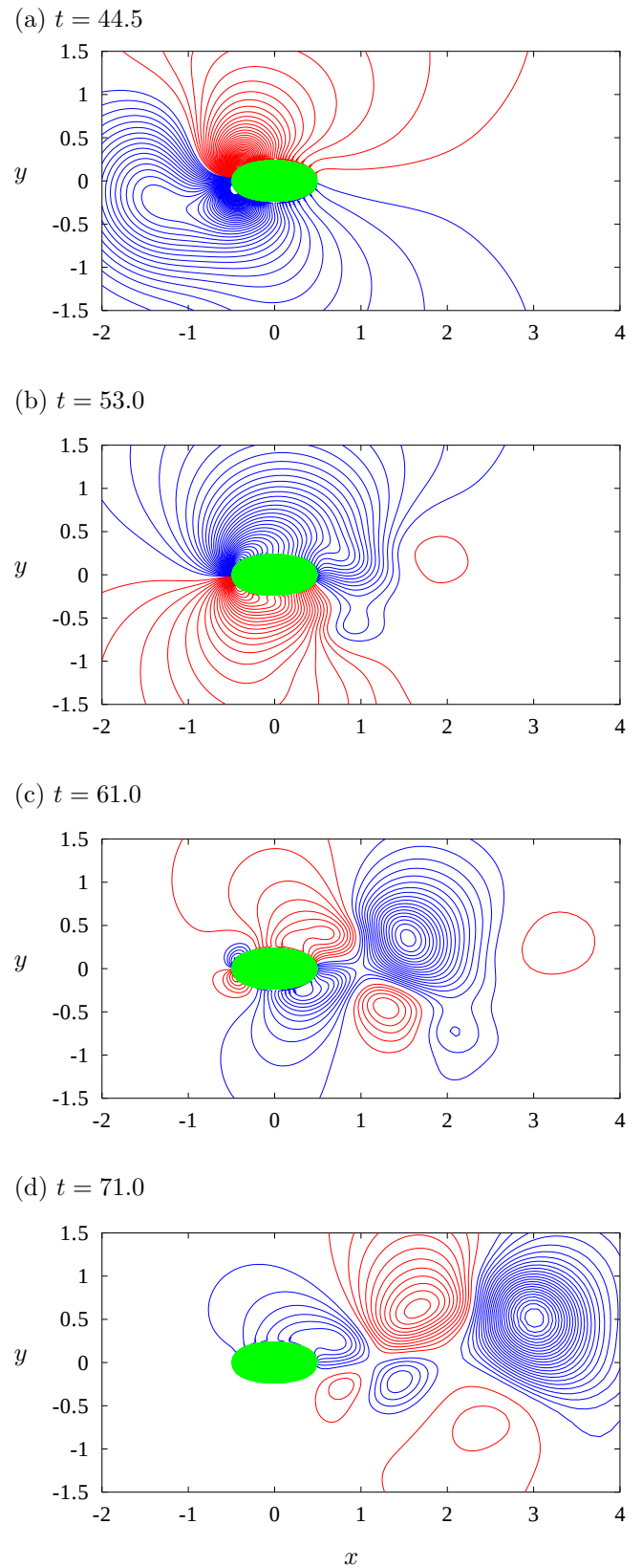


Fig. 7. Counters of sound pressure $\Delta\tilde{p}$. Blue : $-2.5 \times 10^{-2} < \Delta\tilde{p} < -5.0 \times 10^{-4}$, Red : $5.0 \times 10^{-4} < \Delta\tilde{p} < 2.5 \times 10^{-2}$, $\Delta\tilde{p}_{\text{step}} = 5.0 \times 10^{-4}$.

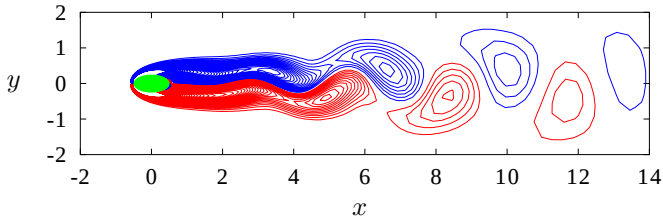


Fig. 8. Contours of vorticity. $t = 150$, Blue : $-1.0 < \omega < -0.02$, Red : $0.02 < \omega < 1.0$, $\omega_{\text{step}} = 0.02$.

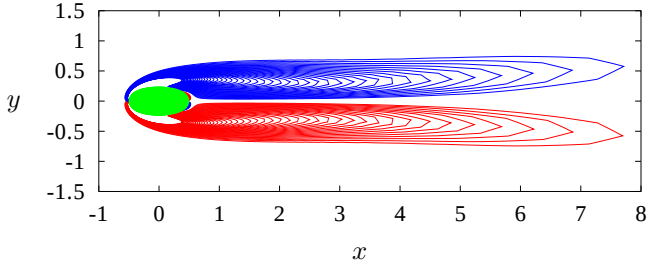


Fig. 9. Contours of vorticity. $t = 1000$, Blue : $-1.0 < \omega < -0.08$, Red : $0.08 < \omega < 1.0$, $\omega_{\text{step}} = 0.02$.

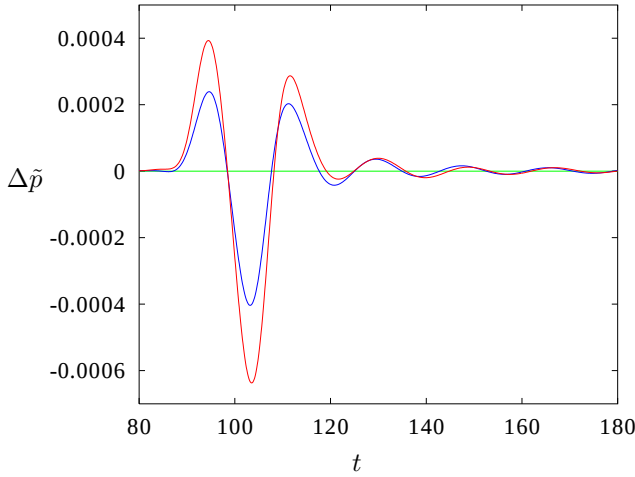


Fig. 10. Time histories of sound pressure $\Delta\tilde{p}$. $r_{\text{obs}} = 50$, $\theta_{\text{obs}} = 90^\circ$, Blue : $M_v = 0.25$, Red : $M_v = 0.5$.

最後にマッハ数の効果について調べた結果を示す。図 10 は渦マッハ数 M_v が 0.25 及び 0.5 の場合の、観測点 $r_{\text{obs}} = 50$, $\theta_{\text{obs}} = 90^\circ$ における音圧時系列を示す。青線が $M_v = 0.25$ 、赤線が $M_v = 0.5$ の場合である。図 10 より、音圧のピーク値に定量的な差異が見られるが、音波の発生機構には定性的な相違がないことがわかる。

4. 結言

- (1) 楕円柱と渦の干渉により発生する音波を、直接数値計算によって捉えることができた。
- (2) 音の発生は、(i) 導入された渦と楕円柱の直接の干渉による音波の発生と、(ii) 干渉により誘起されるカルマン渦の発生に伴う音波の発生、の二つの異なった機構によることが判った。
- (3) 渦マッハ数が大きくなると音圧のピーク値も大きくなるが、音波の発生機構には渦マッハ数の違いによる定性的な差異は見られなかった。

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. Lele, S. K., "Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution," *J. Comput. Phys.* **103** 16-42, (1992).
3. Poinso, T. J. and Lele, S. K., "Boundary Condition for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows," *J. Comput. Phys.* **101** 104-129, (1992).