

3731 地面板上の物体から発生する空力音の計算

Aeroacoustic Simulation around an Object on the Ground Surface

○正 加藤由博 (豊田中研)
正 中村佳朗 (名大)

Yoshihiro KATO, Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi
Igor MEN'SHOV, Nagoya University
Yoshiaki NAKAMURA, Nagoya University

A method for performing aeroacoustic simulation, where the acoustic field is computed by the equations split from the flow field, is applied to the acoustic field of an object on the large flat surface. The acoustic field is obtained by the equations defined by the difference between the compressible and the incompressible flow equations. The acoustic equations are solved by the finite volume method with the fourth order WENO scheme. A rectangular cylinder with the limited width and an automobile rear-view mirror are calculated and the acoustic fields are investigated. The aspects in the near fields are different, while the emission patterns in the far fields are similar. The result of the rear-view mirror shows that the fluctuations of the regions with low acoustic density located downstream both outside and inside the mirror cause the acoustic emission.

Key Words : Wave, Aerodynamic Noise, Computational Fluid Dynamics, Numerical Simulation

1. 緒 言

低マッハ数流れにおいては、流れと音を分離して空力音を計算する方法が有効な場合が多く、分離された音場方程式を用いて任意の物体まわりの音の伝播を計算することができる。

ここでは、Slimon ら⁽¹⁾のマッハ数展開による分離音場方程式を用い、WENO スキーム⁽²⁾による有限体積法によって音場を計算する⁽³⁾。物体付近での音の放射の様子を観察するために、圧縮性流れ方程式と非圧縮性流れ方程式の差を音場方程式とし、近傍場にも適用できる方程式を用いる。

この計算方法を地面板上の有限長さの角柱と代表的な自動車のドアミラー形状に適用する。これらの結果より、地面板上の3次元物体から音が発生する様子を観察する。

2. 計 算 方 法

圧縮性流れ場 (u_i, p, ρ) を流れ場 (u_{*i}, p_*, ρ_*) と音場 (u'_i, p'_i, ρ'_i) に分離した方程式により計算する。ここでは、以下の音場方程式を用いる。

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial f_j}{\partial x_j} = -\frac{D_* \rho_*}{Dt}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{\partial h_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{D_* \rho_* u_{*i}}{Dt}, \quad (2)$$

$$f_j = (1 + \rho_*) u'_j + \rho' u_{*j},$$

$$h_j = f_i (u_{*i} + u'_j) + (1 + \rho_*) u_{*i} u'_j + p' \delta_{ij}.$$

(u_{*i}, p_*) は非圧縮性流れ方程式を計算することにより得られる。 ρ_* は、非圧縮性流れにおける圧力変化に伴う密度変化であり、エネルギー保存式を分離した関係式から得られる。しかし、ここでは、簡略化して $\rho_* = M_*^2 p_*$ とする。

ここで、 D_* / Dt は、 u_{*i} による実質微分である。また、音場における粘性項の影響は小さいとして無視し、音場は等エンントロピ変化すると仮定する。流れ場と音場のそれぞれの密度、圧力は、遠方値を基準にしている。

音場の計算法は、4次精度 WENO スキームによる有限体

積法である。時間積分法は、2段階ルンゲ・クッタ法である。また、遠方境界条件は、PML による無反射境界条件⁽⁴⁾である。流れ場の計算には、稻垣ら⁽⁵⁾の混合時間スケール SGS モデルによる LES を用いる。著者らによる角柱の計算と実験結果との比較⁽⁶⁾によると、周波数帯によって 2~5dB 大きく音を予測するものの、音の発生現象を正しく予測できるものと判断されている。

3. 結果および考察

図 1(a)の角柱と(b)のドアミラーを広い平板にそれぞれ設置し、一様流中に置いた場合の計算をする。流速は、角柱は 44.7m/s、ドアミラーは 38.9m/s である。

計算格子は、流れ場と音場でそれぞれ適切な格子が異なるため、別々の格子を用い、流れ場の計算結果を音場格子に線形補間する。格子点数は、おおよそ、角柱の流れ場と音場がそれぞれ、130 万点、114 万点で、ドアミラーは、702 万点と 696 万点である。また、ドアミラーの場合は、流れ場と音場で異なった時間刻みを用い、時間方向にも結果を音場方程式に補間して与える。補間には 3 次関数を用いる。音場では代表速度が音速であり、流速を代表速度とした場合よりも小さい時間刻みが必要である。このため、時間方向補間により流れ場の時間刻みを大きくし、計算時間の短縮を図る。流れ場の時間刻みは音場の 4 倍である。

図 2、図 3 に角柱の計算結果を示す。図 2 はある時刻での音場の様子であり、図 3 は音響インテンシティベクトル、

$$I_i = \overline{(p' - p'_i)(u'_i - u'_i)}, \quad (3)$$

から算出した音響流線である。これにより、音の伝播経路が可視化できる。

同様に、図 4~6 にドアミラーの計算結果を示す。ただし、図 5 は、周波数フィルタを施したものである。式(1)(2)の解を「音」と称しているが、物体付近は波動による変動だけでなく、対流による変動を含む。後流における現象をよく観察するために、この対流による変動を周波数フィルタでカットする。

また、図 7 に、図 2、4 と同一面上の、地面板上のある原点からある一定距離線上における音圧を示す。角柱は、距離

0.4m, ドアミラーは 1.6m の線上である。角柱は高さ 0.03m の 13.3 倍、ドアミラーは高さ 0.231m の 6.9 倍の距離であり、おおよそ遠方場を示していると考えられる。

図 7 では、両ケースとも類似したパターンが見られ、前方へ放射される音が強い。ただし、ドアミラーの方が y 方向に扁平であり、 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ に見られるピークの位置も異なる。

角柱の場合は、上端で発生する渦による変動が前面と背面で疎密場の変動を誘起し、音を放射させている様子が見られる。ドアミラーの場合は、先端部と付け根後方で低密度部(白い部分)が形成され、この低密度部の変動に伴い、図 5 の矢印のように高密度部(黒い部分)から波が放射されている。

音響流線を見ると、前方へは両ケースとも前面から放射されており、前面の高密度部から音が放射されると音が強いことがわかる。ドアミラーは後方に傾斜しており、高密度部分が前面先端付近で弱いため、図 7(b)は(a)よりも扁平な形状になるものと考えられる。また、ドアミラーは、付け根に隙間があり、かつ、先端より下流で渦が発生するため、物体近傍では角柱と異なった流線のパターンが見られる。

後方斜め上方向へは、物体後流を通過して音が放射されているが、後流では音場は波動的挙動だけではないため、音響流線は湾曲している。

4. 結 言

分離音場方程式の計算により、地面板上の有限長さ角柱と

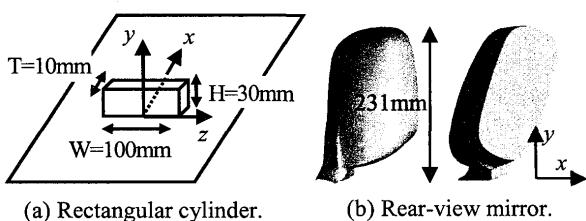


Fig.1 Objects.



Fig.2 Acoustic field around the rectangular cylinder on the x - y plane (side view).

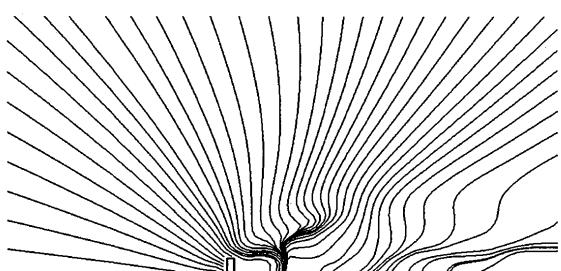


Fig.3 Acoustic stream lines around the rectangular cylinder.

ドアミラーの空力音が発生する様子を調べた。

角柱、ドアミラーとともに前後、特に前方向に強い音が放射されており、遠方では、同様な放射パターンが見られる。ただし、近傍の様子に相違が見られる。ドアミラーの音場では、広い低密度部が変動し、高密度部から音が放射されている様子が観察された。また、音響流線により、それぞれの音の伝播経路を可視化することができた。

文 献

- (1) Slimon, S. A. et al., *J. Comput. Phys.* 159 (2000).
- (2) Liu, X.-D. et al., *J. Comput. Phys.*, 115 (1994).
- (3) Kato, Y. et al., *Trans. JSME,B*, 71-711 (2005).
- (4) Hu, F. Q., *AIAA paper*, 96-1664 (1996).
- (5) Inagaki, M. et al., *J. Fluids Eng.*, 127 (2005).
- (6) Kato, Y. et al., *Trans. JSME,B*, 72-716 (2006).



Fig.4 Acoustic field around the rear-view mirror.



Fig.5 Acoustic field around the rear-view mirror with a filter between 1kHz and 2kHz.

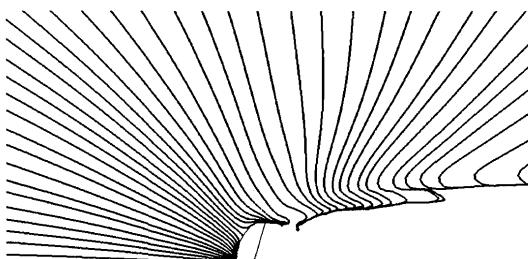
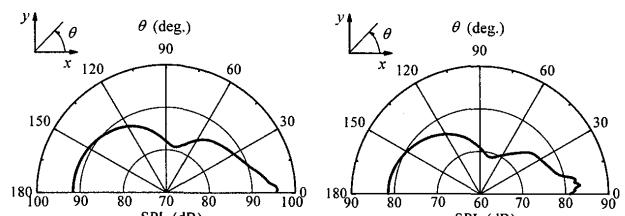


Fig.6 Acoustic stream lines around the rear-view mirror.



(a) Rectangular cylinder. (b) Rear-view mirror.

Fig.7 Directivity.