自動車のドアミラーまわりから発生する風切り音の数値計算

A Numerical Simulation of Wind Noise around an Automobile Rear-view Mirror

○正 加藤由博 (豊田中研)

Yoshihiro Kato, Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi, 480-1192 JAPAN

A method for computational aeroacoustics, in which the acoustic field is split from the flow field, is applied to the flow around automobile rear-view mirror placed on a large solid plane. In this study, the pressure fluctuations on the solid plane are investigated with a high-pass filter at 500Hz. The calculated results show that the flow fluctuations are dominantly generated by the stay of the mirror body, whereas the acoustic fluctuations are affected by the mirror body. The fluctuation levels of the acoustics exceed those of the flow at almost equal distance of the mirror length from the object except the wake region.

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

1. はじめに

自動車が行走する際、A ピラーやドアミラーまわりから風切り音と呼ばれる空力騒音が発生する。自動車まわりの流れは低マッハ数流れであり、非圧縮性流れと見なされることが多い。このため、風切り音を数値予測する方法として、非圧縮性流れの計算結果から音場を計算する分離方法が広く用いられている。この際、遠方で観察される音場の予測には、Lighthill 方程式の近似解がしばしば適用される。ただし、自動車においては、乗員への伝達音が問題となるため、近傍場の車体表面に加わる圧力変動を予測する必要がある。この場合、非圧縮性流れにおける圧力変動に加え、音による変動も少なからず乗員への騒音に影響をすることが予想される。分離方法を用いて計算をした場合、この近傍における音を予測する方法が課題となる。

この課題に対し、著者は、圧縮性流れ方程式と非圧縮性方程式の差を音場モデルとして計算する方法を検討している。これまでの検討⁽¹⁾⁽²⁾では、音場モデルに対し、距離減衰特性や計算精度を調べ、さらに、ドアミラーからの音の放射を可視化し、風切り音発生現象の解明を試みている。

ここでは、平板に設置したドアミラーに対して、平板上に作用する流れと音の圧力変動に着目し、それぞれの分布特性を調べる。

2. 計算方法

2-1 基礎方程式 流れ場の速度 u_i 、圧力 p は非圧縮性流れ方程式を計算して得られるものとする。この流れ場の結果を以下の方程式に代入して、音場の変量、速度 u'_i 、圧力 p' 、密度 ρ' を計算する。

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

$$f_j = (1 + \rho_i + \rho') u'_j + \rho' u_{ij},$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{\partial h_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{D_i \rho_i u_{ij}}{Dt}, \quad (2)$$

$$h_{ij} = f_i(u_j + u'_j) + (1 + \rho_i) u_i u'_j + \rho' \delta_{ij}.$$

方程式の各量は、遠方量により無次元化されている。 ρ_i は、流れ場の圧力 p_i に伴う密度であり、 $\rho_i = M_i^2 p_i$ の関

係から与える。 M_i は遠方におけるマッハ数である。また、式(1)(2)における D_i / Dt は、 u_i による実質微分である。音場における粘性項の影響は無視しており、音場は等エントロピー変化と仮定し、 p_i と ρ_i に基づく音速 c_i を用いた関係式 $p' = c_i^2 \rho'$ を用いる。

2-2 数値解法 流れ場、音場ともに基礎方程式を一般座標系に変換し、離散化して計算する。流れ場の計算には、稲垣⁽⁴⁾の混合時間スケールSGSモデルによるLESを用いる。音場の計算には、4次精度のWENOスキームによる有限体積法を用いる。音場の外部境界には、無反射境界条件のため、PML (Perfectly Matched Layer)⁽⁵⁾を適用する。音場の時間進行方法は、陽解法である2段階のルンゲ・クッタ法である。

音場計算において、クーラン数の緩和と、遠方での1波長あたりの格子点数を確保するため、流れ場と異なった格子を用いる。図1に、流れ場および音場の格子を示す。流れ場の格子では、壁から1格子点目までの距離は、概ね0.2mmであり、音場の格子では、1.5mmである。計算格子が異なるため、流れ場の変数を音場の計算格子に線形補間して計算を進める。また、時間方向にも、データを補間し、時間刻みを変更する。本解析では、流れ場を1時間ステップ計算する毎に、音場を4時間ステップ計算する。格子点数は、流れ場、音場それぞれ542万点、400万点である。

3. 計算対象および計算結果

図1のように平板に設置したドアミラーを計算対象とする。これを一様流38.9m/s中に設置して計算する。

図2に計算から得られた音場の様子を示す。図2は、格子各点における物理量の時間履歴から周波数フィルタによって500Hz以上の変動のみを抽出した結果であり、ある瞬時場の様子である。周波数フィルタを用いる理由は、人の聴覚は数百Hzより大きな周波数の音に敏感であり、評価対象としない低い周波数成分を取り除くためである。

図2によると、ミラー前方へ放射される音は付け根付近から伝播している様子が見られる。ここで定義されている音場には遠方に伝播しない擬音が含まれるため、後流域では、波にならない圧力場が見られる。ただし、斜め後ろ上方へは、明確な音波の放射が見られ、後流域には、伝播特性の異なる圧力場が混在していることがわかる。

4. ドアミラーを設置した平板上の圧力変動

非圧縮性流れと音のそれぞれについて、平板に作用する圧力変動を比較する。図3に、流れと音の計算結果から得られた500Hz以上の周波数帯におけるそれぞれの圧力変動の実効値(Root Mean Square)を示す。図は、平板の下側を視点として、平板上の分布を可視化したものである。

図3(a)によると、流れ場では、ミラーのステー(支持のための首部)の後流変動が強く、ほぼ上下対称の分布となっている。一方、図3(b)では、上方での圧力変動が大きく、ミラー本体の影響を受けて指向性が生じていることがわかる。つまり、本体の形状による平板上への圧力変動への影響は、流れ場よりも音場によって強く現れることがわかる。

図3をより詳しく調べるため、図4(a)に示した座標系を用いて、図4(b)~(d)のように各方向における圧力変動を比較した。これらも、500Hz以上の周波数帯における圧力変動の実効値である。図4(b)~(d)によると、ステーの後流方向の図4(b)以外では、音は流れの圧力と比較して距離減衰が小さく、ある距離以上になると流れの圧力変動より大きくなっている。音による変動の方が大きくなる距離 r を調べると、 $\theta=135^\circ$ (図4(c))では $r=0.02\text{m}$ 、 $\theta=315^\circ$ (図4(d))で $r=0.18\text{m}$ 程度である。このように、前方では非常に近傍で、後流域以外の後方では、ミラー長さスケールほど離れば音による変動の方が卓越する。

5. まとめ

平板に設置したドアミラーまわりの流れ場と音場を分離手法に基づき計算し、平板上加わる500Hz以上の周波数帯の圧力変動を比較した。流れ場の圧力変動はステーの影響が支配的であるのに対し、音による変動には、本体の影響による指向性が見られた。また、変動の大きさに関しては、後流域以外では、ミラー長さスケール程度離れば、流れによる変動よりも音による変動が卓越した。乗員伝達音の予測には、構造物の要件が必要であり、流れと音のそれぞれの影響度はここでは明確にできないが、本解析により、壁面に作用する加振力への音の影響の一例を示した。

謝辞

本研究には、(独)海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用した。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- (1) 加藤他, 非圧縮性流れ場と音場に分離された方程式による円柱まわりの空力音の計算, 機論B, Vol.71, No.711 (2005), pp.2694-2701.
- (2) 加藤他, 地面板上の角柱から発生する空力音の計算, 機論B, Vol.72, No.716 (2006), pp.956-963.
- (3) 加藤他, 自動車のドアミラーから発生する空力音の計算, 機論B, Vol.72, No.722 (2006), pp.72-79.
- (4) Inagaki, M. et al., A Mixed-time-scale SGS Model with Fixed Model-parameters for Practical LES, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.127 (2005), pp.1-13.
- (5) Hu, F. Q., On Perfectly Matched Layer As An Absorbing Boundary Condition, *Proceedings of the 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA paper No.96-1664 (1996).

(a) Flow field.

(b) Acoustic field.

Fig. 1 Computational grids

Fig. 2 Instantaneous p' with a high-pass filter at 500Hz (-0.001 to 0.001 by 16 lines).

(a) RMS of p .

(b) RMS of p' .

Fig. 3 Pressure fluctuations on the flat plate with a high-pass filter at 500Hz (0 to 0.02 by 16 lines).

(a)

(b) $\theta = 0^\circ$.

(c) $\theta = 135^\circ$.

(d) $\theta = 315^\circ$.

Fig. 4 Pressure fluctuations in each direction on the flat plate with a high-pass filter at 500Hz.