E101

実験と数値計算による自動車空力騒音の可視化について

李暉[○], 農沢隆秀, 中村貴樹, 笠木直彦, 岡田義浩 (マツダ株式会社)

Visualization of Automobile Aerodynamic Noise Using Experiment and CFD

Ye Li, Takahide NOUZAWA, Takaki NAKAMURA, Naohiko KASAKI, Yoshihiro OKADA

ABSTRACT

Experiment and CFD have been performed to clarify the distribution of aerodynamic noise sources and its generation mechanism for a production vehicle. Three noise source identification techniques were applied to measure the noise sources from the outside and inside of vehicle. It is found that the noise sources show strong level in the regions of bonnet head, front underbody, side window, and rear window. In addition, CFD was performed to predict the noise sources and clarify its generation mechanism. The CFD results show good agreement with experiment in the region of side window and underbody. The noise source near side window is induced by the vortex variation, which is the strongest in the reattaching region on side window.

Keywords: Automobile, Aerodynamic Noise Source, Experiment, CFD.

1. 緒 論

近年、エンジン音やロードノイズ等の低減に伴い、高速時の風騒音が顕著になりつつある。風騒音は風漏れ音(Leak Noise)と空力騒音(Aerodynamic Noise)の二種類に分けることが出来る。この内、空力騒音は車体周りの複雑な非定常流れと密接に関連しているため、発生メカニズムの解明が非常に困難である。乗員に聞こえる風騒音を低減するためには、車室外における音源分布とキャビンへの伝達経路を明らかにする必要がある。自動車の場合、空力騒音の音源は主に車体周りの剥離により発生している。多くの研究⁽¹⁾⁽²⁾はフロントピラー(Aピラー)及びドアミラーでの剥離により強い空力騒音が生じることを示している。更に、車のアンダーフロアにも強い音源が存在することが指摘されている⁽³⁾。ただし、車体周り音源分布の全体像に関する知識がまだ不足であり、流れ場との関係についても十分に解明されていない。そこで、本研究では、まず音源探査装置を用いて、実車周りにおける空力騒音の音源分布を明確にした。次に、CFDにより音源を予測するとともに、音源と流れ場の関係について検討した。

2. 実験及び解析手法

本研究では、5ドアハッチバックの量産車 (Fig.1) を対象とし、鉄道総合技術研究所 (RTRI) の大型低騒音風洞にて実験を行った。車室外の音源探査装置として、PULSE Beamforming (直径 1m, マイク 66ch) を用いた。音源の空間分解能は 1KHz で 34cm であり、4 KHz で

は約 8cm である。車体周りの音源分布の全体像を捉えるために、Beamforming を車体の上部及びサイドの四箇所に置いて、音源計測を行った (Fig. 2)。また、音源探査装置 Noise Vision (Fig. 3) を用いて、車室内からも音源探査を行った。Noise Vision には、31 個のマイク及び 11 個の CCD カメラが搭載されている。CCD カメラで撮った画像と音源分布を重ね合わせると、音源の正確な位置を捉えることができる。更に、薄型のサーフェスマイクロフォン (B&K の 4948 型) をサイドウィンドウ (S/W) 表面に貼り付けて、S/W 表面の圧力変動を計測した (Fig. 4)。全ての計測条件を車速 140km/h、横風なしとしている。

シミュレーションでは、非圧縮性連続式及び非定常 Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とし、対流項に 3 次元風上差分 (K-K スキーム) を用いて、構造格子に基づく差分法を適用した。計算領域は 13L (流れ方向) × 10L (スパン方向) × 5L (垂直方向) (L は車両全長) とし、約一千万の格子点を用いた。

Fig. 1 Testing Model Used in Current Study.

(a) Beamforming Wheel Array

(b) Array's Position in The Upper Side

(c) Array's Position in The Lateral Side

Fig. 2 Beamforming Array And Its Measurement Positions.

3. 結果

Fig. 5 は Beamforming で計測した車体周りの音源分布を示している。ここで、各計測位置における車の写真と音源分布の図が同様な範囲を示しており、各周波数の音源分布図と車写真を重ねると、音源の位置がわかる。上部からの計測結果 (Fig. 5a) から、低周波数領域 (500Hz 及び 1kHz) においては、ボンネット先端 (A 領域) から発生する音源が支配的であることがわかる。周波数が高くなるにつれて、ボンネットからの音源が弱まり、A ピラー及びミラーから発生する音源 (B 領域) が強くなる。

Fig. 3 NoiseVision Was Used to Identify The Internal Noise Sources.

Fig. 4 Surface Microphones Were Mounted on The Side Window to Measure The Surface Pressure Fluctuation

車のサイドから計測した音源 (Fig. 5b) を分析すると、車のアンダーフロアから非常に強い音源 (C 領域) が生じているがわかる。これらの結果をまとめると、車体周りの空力騒音は主にボンネット、A ピラー、ミラー及びアンダーフロアから発生していることがわかる。

車両周りで発生した空力騒音がどのように車室内に伝わっているかを調べる為に、Fig. 6 は Noise Vision で計測した車室内から見た音源の分布を示している。周波数に関らず、A ピラー及びミラー近傍に強い音源が存在している。この結果から、車室外で発生した S/W 周りの空力騒音 (Fig. 5 の B 領域) が A ピラー及び S/W ガラスを通して、車室内に伝わっていることがわかる。車室内の風騒音を低減するには、車室外の空力騒音を抑制し、A ピラー及び S/W 周りの防音性能を強化することが重要である。

Lighthill-Curle の音響アナロジー⁽⁴⁾⁽⁵⁾から、物体表面における圧力変動の時間変化が空力騒音の発生に重要な役割を果たしていることがわかる。Fig. 7 は S/W 表面圧力変動の分布を表している。ここで、500Hz から 8KHz までの圧力変動の Overall 値を示している。A ピラー及びミラー後方の領域で圧力変動が大きく、これらの領域から強い空力騒音が発生していることが分かる。これらの音源と流れ場の関係を明らかにするために、CFD より流れ場の解析を行った。

(a) Noise Sources Measured From Upper Side

(b) Noise Sources Measured From Lateral Side

Fig. 5 Distribution of Aerodynamic Noise Sources Measured by Beamforming.

Fig. 6 Internal Wind Noise Sources Measured by NoiseVision.

Fig. 7 Surface Pressure Fluctuation on Side Window.

Fig. 8 Iso-surface of Lighthill-Curle's Acoustic Source .

Fig. 9 Powell's Acoustic Source Near Side Window.

Fig. 10 Distribution of Flow Field And Powell's Acoustic Source on The A-pillar And Mirror Section.

Fig. 8 は CFD の結果から計算した Lighthill-Curle の音源項 dp/dt (圧力の時間微分) の等値面を示している。音源の強い領域が S/W 近傍及びアンダーフロアに存在していることが観測できる。これは Beamforming による実験結果と定性的に一致している。ただし、ボンネット先端において、実験では強い音源が観測されているが、シミュレーションでは音源が弱い。この予実差は CFD のモデルでボンネット周囲の隙間及びエンジン冷却開口等の形状が再現されていないためと考えられる。

流れの剥離と音源発生との関係をより詳しく調べるために、Powell の音響アナロジー⁽⁶⁾を用いて、音源解析を

行った。Fig. 9 は S/W 近傍における Powell 音源項 $\nabla \cdot (\omega \times u)$ (ω : 渦度; u : 速度) の分布を示している。この音源項は渦度の時間的な変動、及び渦度空間分布の不均一により音が発生することを表している。A ピラー及びミラーの後方領域においては、Powell の音源項は強く、S/W 表面圧力変動 (Fig. 7) も大きい。これは S/W 表面の圧力変動が S/W 近傍で起っている渦の変動によって生じていることを示唆している。更に、S/W 近傍における流れ場 (速度ベクトルと渦度) 及び Powell の音源項分布を Fig. 10 に示している。A ピラー断面 (a) の結果から、主流と A ピラー剥離領域の境界で強い Shear が発生し、この Shear 領域における渦度及び音源が強くなっていることがわかる。一方、ミラー近傍 (断面 b) において、A ピラーとミラーから発生する剥離渦が干渉しあって、より強い渦度及び音源が観測されている。これらの結果は S/W 近傍の音源が A ピラー及びミラーで生じる剥離渦の変動及び干渉によって発生することを示している。

4. まとめ

本研究では、実験及び数値計算を用いて、自動車における空力騒音の可視化、及び発生メカニズムの解明を行った。大型低騒音風洞において、音源探査装置 Beamforming、及び NoiseVision により、車両の外部と内部から空力騒音の音源を計測し、更に Surface Microphone を使って、空力騒音の発生源となる車両表面の圧力変動を測定した。これらの結果から、サイドウィンドウ近傍、ボンネット先端、ルーフ後端及びアンダーフロアに強い音源が存在することを明らかにした。また、CFD の結果を用いて、Lighthill 及び Powell の音響アナロジーにより車体周りの音源を予測し、音源発生メカニズムの解明を行った。サイドウィンドウ近傍では、フロントピラー及びドアミラーから発生する剥離渦の変動及び干渉により強い音源が発生することを解明した。

参考文献

- 1) Li Y. et. al., "Evaluation of Aerodynamic Noise Generated in Production Vehicle Using Experiment and Numerical Simulation", SAE 2003-01-1314;
- 2) Kumarasamy S. et. al., "Aeroacoustics of an Automobile A-Pillar Rain Gutter: Computational and Experimental Study", SAE 1999-01-1128.
- 3) Coney W. B. et. al., "Experimental Evaluation of Wind Noise source: A Case Study", SAE 1999-01-1812
- 4) Lighthill M. J., "On sound generated aerodynamically: I. General theory", Proc. R. Soc. Lond. A 211, 564-587, 1952.
- 5) Curle N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamics sound", Proc. R. Soc. Lond. A 231, 504-514, 1955.
- 6) Powell A., "Theory of vortex sound", J. Acoust. Soc. Am. 33, 177-195, 1964.