

自動車の床下風音における音源の可視化

A Visualization of the Noise Sources of Automotive Wind Noise Under the Floor

小野謙二 日産自動車 総合研究所 〒238-0056横須賀市夏島町1, kj-ono@mail.nissan.co.jp

松本秀樹 NEC情報システムズ 〒213-0012 川崎市高津区坂戸3-2-1, matumoto@ssd.nis.nec.co.jp

姫野龍太郎 理化学研究所 情報環境室 〒351-0198和光市広沢2-1, himeno@postman.riken.go.jp

Kenji ONO, Nissan Research Center, 1, Natsushima-cho, Yokosuka-shi, 237-0056, Japan

Hideki MATSUMOTO, NEC Informatec Systems, 3-2-1, Sakato, Tkatsu-ku, Kawasaki-shi, 213-0012, Japan

Ryutaro HIMENO, RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, 351-0198, Japan

Noise sources under an automotive floor were investigated numerically to get the information of improving the wind noise. In this test case, the floor shape of the vehicle was simplified and approximated by the Cartesian mesh model. The computed flow structures were demonstrated by helicity and streamlines, and the distribution of the noise source was visualized by Powell's sound source term. Observing the generated MPEG movies, it was found that the vortex structure and shear layer around the front tire influenced the noise source under the floor. From these visualized results, the important information was obtained that the improvement of the flow around the front tire could be reducing the wind noise.

1. はじめに

自動車が走行中に発生する音は、エンジン吸排気音、ギアなどの機械騒音、ロードノイズ、タイヤのトレッドパターン音、非定常な空気力に起因する空力騒音などがある。近年、車のエンジンや駆動系からの騒音は次第に小さくなっているため相対的に空力騒音が顕在化してきている。空力騒音は速度の6乗に比例し、高速走行時には他より大きな音源になるので騒音低減の重要性は大きい。加えて、法規制対応や車室内における快適性向上の点においても空力騒音の低減が重要課題となっている。

自動車で問題となる空力騒音は、便宜上、車室内騒音と車外騒音とに分類できる。車室内騒音には前述のような様々な音源からの伝達を考える必要があり、対策には音源と伝達経路の同定が必要である。しかしながら、複雑な形状のボディパネルを伝わる音波の解析や支持具合によって大きく変わるガラスの透過特性を考慮して伝達関数を解析することは、現在でも非常に難しい問題である。

別の分類では、風音は大別して、エオルス音やキャビティ音などの狭帯域騒音とドアミラーやフロントピラー周辺で発生する広帯域騒音がある。狭帯域騒音は聴感に鋭く反応するので対策が必須で、製品出荷時には問題となることは少ない。本稿ではFig.1のような広帯域騒音を考える。広帯域騒音のうち、ピラー付近で発生する音は1kHz前後の音で、100～400Hz程度の風音は床下からの寄与が大きいことが実験的に知られている[1]。

これまでの研究で、低マッハ数の場合、円柱などの簡単な形状について遠距離場における音圧の予測方法がLighthillの音響学的類推を用いて検討されている[2]。

$$\frac{1}{c_0^2} p_{tt} - \nabla^2 p = r_0 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_k} v_i v_k \quad (1)$$

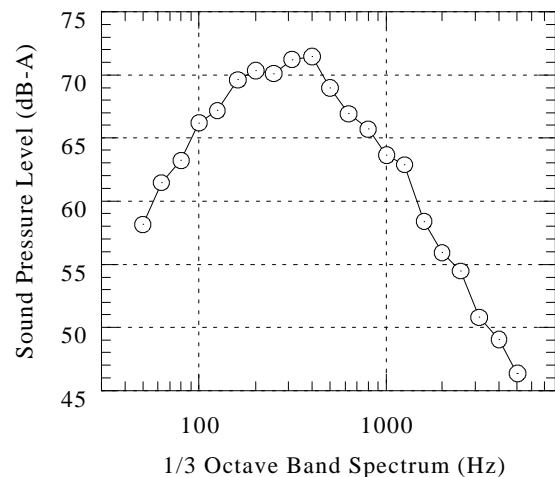


Fig. 1 A measured wind noise spectrum of a vehicle in a wind-tunnel. In this example, low frequency region is dominant rather than typical production cars.

(1) 式では音圧 p の伝搬が右边を既知の音源項とする波動方程式によって表現されている。ここで、 c_0 , ρ_0 , v はそれぞれ音速、基準密度、速度を表す。このLighthillの音源を利用してフロントピラーやドアミラーなどから発生する風音の予測について研究が報告されている[3, 4]。

他の音源表現では、Powellの音源が渦度と関連して提案されている[5, 6]。

$$\frac{1}{c_0^2} p_{tt} - \nabla^2 p = r_0 \text{div}(\mathbf{w} \times \mathbf{v}) \quad (2)$$

このPowellの音源は渦の運動と結びついた表現であるため、流れの構造と対比すると理解しやすい長所がある。(1)と(2)の式が与える遠距離場の音圧は音源のコンパクト性を仮定して

いるため、車のような大きな構造を持つ流れに直接適用することは疑問ではあるが、流れの構造と音源との関連という観点からは興味深く、有用な情報が引き出せると思われる。そこで本報では、Powell 音源を用いて音源の可視化を行い、床下を通過する流れの構造と比較した。これにより、流れのどの構造から風音が発生しているのかを調査した。

2. 計算・可視化方法

自動車の周りの流れは時速 120km/h でもマッハ数にして約 0.1 程度であり、非圧縮流の仮定が成り立つ。そこで流れの計算は 3 次元の非定常非圧縮の NS 方程式を有限体積法を用い、スタガード格子上で離散化して解いた[7]。対流項には空間二次精度の QUICK スキームを用い、Fractional Step 法に従って解いている。非定常項には Euler 陽解法を用いた。周波数解析などの詳細な検討には少なくとも二次精度以上の時間近似精度が必要と思われるが、今回は流れの大きな構造を対象とし定性的な議論を目的としているため致命的な問題とはならないと思われる。一様流の風速を $U_0=30(\text{m/s})$ とし、地面は移動するがタイヤは非回転の条件で計算した。壁面上では粘着条件と圧力のノイマン条件を与えている。計算は SX5(2CPU)で行い、14000stepの計算に後述の可視化も含め 10 時間(Elapsed time)かった。

低マッハ数での音源にはよく知られた三つの音源[8]があるが、ここでは床下の流れと関連づけて考えるため、過度で表現された Powell 音源を用いて音源を可視化する。対象とする周波数域は 100 ~ 400Hz を考える。空力音の特徴である

l/M のスケールから考えると、0.3 ~ 0.085m 程度のスケールの渦が対応する周波数の音源となっていると考えられる。そこで、この程度の渦を解像するために空間分解能を 0.02m にした直交格子を用いた。床下の形状は Fig. 2 のように簡略化した形状を用いた。可視化には NEC の可視化ライブラリ RVSLIB のボリュームレンダリングの機能を利用した[9, 10]。

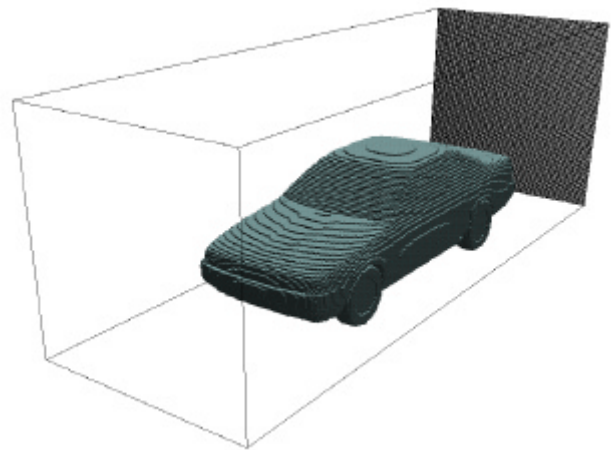
3. 可視化結果

まず最初に床下の特徴的な流れの様子をヘリシティによって Fig. 3 に表す。ヘリシティは以下で定義されるスカラー量で、青色と赤色は渦の回転方向とその強さを示す。

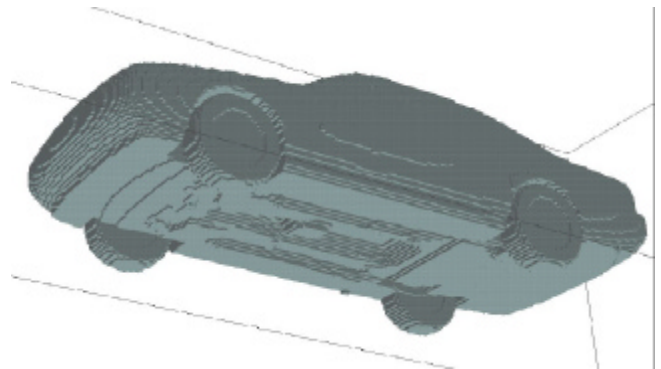
$$h = \mathbf{w} \cdot \mathbf{v} = \text{curl}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

これを見ると、フロントアンダーカバーのコーナー部に強い渦があり、前輪の外側へと続いている。前輪に着目すると、両輪の間で下流に向かって渦または剪断層が伸び、中央付近で干渉している様子が推測される。後輪周りにも同様の構造が見える。フロントエプロン下には流れ方向にたくさんの渦管が伸びている様子が分かる。ヘリシティで表される渦管の挙動を動画で観察すると、タイヤの周りに発生する渦の運動が特徴的である。特に、前輪後方の左右のタイヤの間において、タイヤの周囲から伸びている渦または剪断層どうしが干渉し、揺れ動いている様子が分かる。逆に、フロントアンダーカバーのコーナー部にある強い渦は変動は小さい。

次に、Fig. 4 に Powell の音源項である $\text{div}(\mathbf{x} \cdot \mathbf{v})$ の分布を示す。Fig 4(a)を見ると、強い音源となっている部分はタイヤ付近と車体中央部の干渉部分にあることが判る。ヘリシ



(a) Whole computational domain.



(b) Shape of the approximated under floor.

Fig. 2 Voxel model for the flow computation.
(Total voxel is 128x384x128 and 20mm in size)

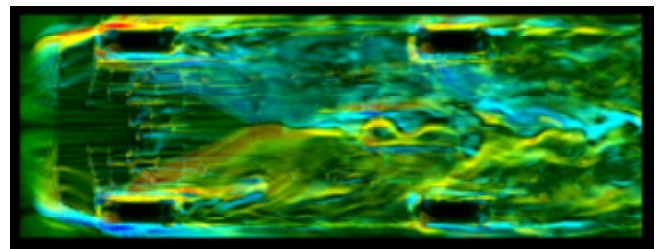
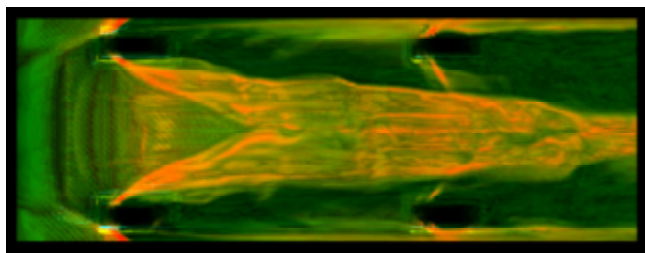
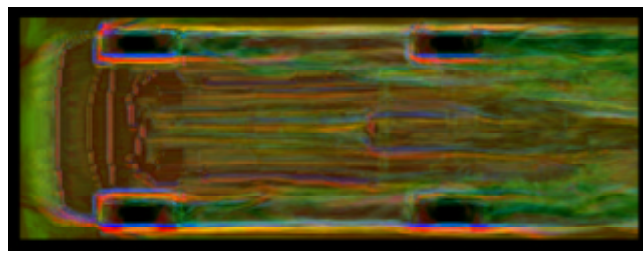


Fig. 3 Instantaneous helicity distribution of the space under the floor(Bottom view, left side is upwind direction). Click this figure, then you'll find MPEG movie.

ティの分布を考慮して観察すると、時間的な変化が大きいところが音源として強くなっている。これは Powell 音源項の定義からも明らかである。また、同図の符号について見てみると、ほとんどの部分で正の符号を持つ値になっていて、負の値はタイヤの外側のほんの一部分だけである。飯田らによる円柱や翼まわりの Powell 音源項の分布は正負の値が交互に現れている[11]が、この場合は正の値が卓越している。可視化する値の範囲を変えてみると、Fig. 4(b)に示すように正負の領域がほぼ交互に現れる。正の値が卓越している理由はいくつかあるが、自由空間ではなく地面と車の床下に挟まれた空間であることに起因しているかもしれない。動画の観

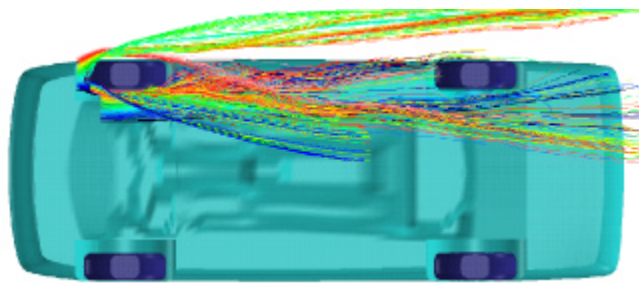


(a) Range from -6000 to +6000. Click this figure, then you'll find MPEG movie.

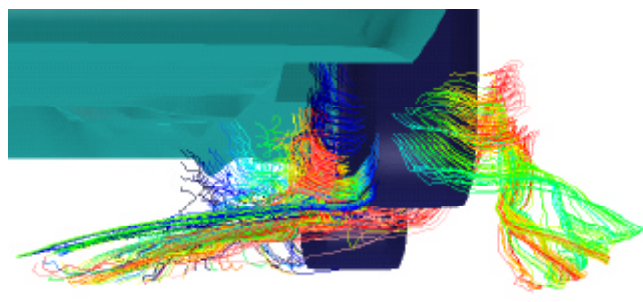


(b) Range from -1000 to +1000.

Fig. 4 Instantaneous distribution of Powell's noise source term $\text{div}(\mathbf{u} \times \mathbf{v})$.



(a) Bottom view.



(b) A horse-shoe vortex around the front tire.

Fig. 5 Streamlines around the front tire.

察によると、ヘリシティの値の変動の大きなところが音源となり、ヘリシティの変動と関連していることが判る。

今度はタイヤに関して、流れの様子を流線で可視化した。Fig. 5(a)を見ると、タイヤの周りには外側に伸びる渦、外側から内側に巻き込まれる渦、乱れた後流、車体の中心側へ伸びる流れが見える。別の角度から見ると(Fig. 5(b))、タイヤの周りには馬蹄形渦に似た形の渦があることが判る。また、車体の中心側に向かって流れている流れは地面上を這うように伸びていることが判った。タイヤの周りにはある渦構造はFig. 6に示すような平板上に置かれた物体で生じる馬蹄形渦と基本的な構造は同じと考えられる[12]。床下の空間は上方を車の床下で塞がれた空間となっているため、この馬蹄形渦が変形した形になっていると考えられる。Fig. 5とFig. 4を見比べてみると、車輪の外側で音源となっている部分は馬蹄形渦に関連していると推察できる。一方、車体中心側に向かう流れは地面に沿っており、この部分の剪断層の変動が音源になっているのではないかと考えられる。

以上のように、流れの構造と音源分布の可視化により、車の床下においては、タイヤ周りの流れが一つの音源を作り出している可能性が高いことが判った。これより、タイヤ周りの流れの最適化により、風音を低減できる可能性もある。実験により音源分布を可視化することは非常に難しいため現象の検証は行っていないが、この計算結果は風音低減の有効な検討材料となるだろう。

4. まとめ

車の床下流れの様子を直交格子法を用いて計算し、ヘリシ

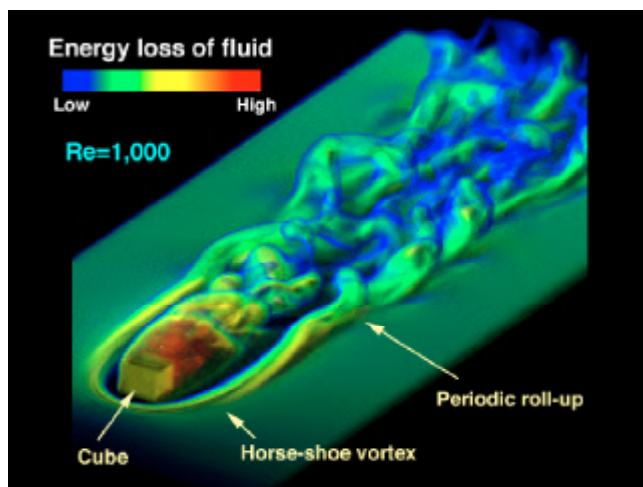


Fig. 6 A flow around a cube on a flat plate[10]. A horse-shoe vortex is visualized by the volume rendering method.

ティと流線により流れの構造を可視化した。その後、Powell音源の分布を可視化し、動画によって非定常な流れの振る舞いを観察した。その結果、床下風音の音源にはタイヤ周りの馬蹄形渦の構造が重要な役割を果たしていると考えられる。この部分に着目して形状変更を行えば、風音を低減できる可能性があると思われる。

参考文献

[1]各務, "車室内騒音に占める空力騒音とその評価," 自動

車技術会 空力騒音シンポジウム 9536593(1995).

[2]加藤ほか、" LES による流体音の予測 (第 1 報、二次元円柱からの放射音の予測) ," 機械学会論文集, B, 60-569 (1994)126-132.

[3]Bergamini, P., et. al., " Computational Prediction of Vehicle Aerodynamic Noise by Integration of a CFD Technique with Lighthill 's Acoustic Analogy, " SAE paper 970401(1997).

[4]Ono, K., et. al., " Prediction of Wind Noise Radiated from Passenger Cars and Its Evaluation Based on Auralization, " Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81(1999)403-419.

[5]Howe, H.S., " Contributions to the theory of aerodynamic sound, " J. Fluid Mech. 71(1975)625-673.

[6]Powell, A., " Theory of vortex sound, " J. Acoust. Soc. Am. 36(1964)177-195.

[7]Ono, K. et al., "Applications of CFD using voxel modeling to vehicle development," Proc. of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-7323 (1999).

[8]神部、" 流れと音 ," 流体力学の展望 4、日本流体力学会、東京(1983).

[9]杉原ほか、" 大規模シミュレーション向けのリアルタイム可視化システム RVSLIB, " 第 13 回数値流体力学シンポジウム (1999)234.

[10]小野ほか、" ポリウムレンダリング法の車室内空調設計への適用 ," 第 14 回数値流体力学シンポジウム D01-3 (2000).

[11]飯田ほか、" 二次元翼から発生する空力音の数値解析、" 日本流体力学会年会 2000 講演論文集、(2000)47-48.

[12]小野ほか、" 平板上に置かれた立方体周りの流れの可視化、" 日経サイエンス第 26 巻第 12 号別冊、第 2 回 Computer Visualization Contest(1996)A10-11.