

空間音源を用いた自動車空力騒音の予測

Prediction of aerodynamic noise radiated from an automobile by using spatial sound sources

- 飯田 明由, 豊橋技科大, 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, iida@me.tut.ac.jp
 - 宮澤 真史, 本田技研, 〒321-3393 芳賀町下高根沢 4630, masashi_miyazawa@n.t.rd.honda.co.jp
 - 横山 博史, 豊橋技科大, 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, h-yokoyama@me.tut.ac.jp
 - 加藤 千幸, 東大生研, 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, ckato@iis.u-tokyo.ac.jp
- Akiyoshi Iida, Toyohashi University of Technology. 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi
Masashi Miyazawa, Honda R&D Co., Ltd, 4630 Takanezawa, Houga, Houga
Hiroshi Yokoyama, Toyohashi University of Technology. 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi
Chisachi Kato, IIS, the University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo

In order to predict interior noise of automobiles caused by the flow around the car body, it is necessary to obtain the flow field around the vehicle and the generated sound fields. In this research, we attempted to predict aerodynamic noise around the vehicle using decomposition method with spatial source terms. It is found that the Lighthill sound source can be captured the sound field including the pseudo sound. It is suitable for revealing the mechanism of occurrence and the source region. On the other hand, the Ribner sound source that calculates only the sound field turned out to be convenient to separate the sound and the flow fields. This is thought to be useful in simulation of interior noise of automobiles.

1. はじめに

自動車の開発において流れから発生する音が問題となることが多い。流れから発生する音は渦の非定常運動に起因するため、自動車のような複雑な形状の場合、様々な部位から音が発生することになり、予測及び低減対策が難しいことが課題となっている。また、自動車の場合、外部に伝播する音だけでなく、ウィンドシールドや車体のパネルを通じて室内に伝播する騒音も問題となる。

著者らは、車体周りの流れ場の解析結果を外部加振力とみなして、車体の構造振動及びそれに伴って発生する室内音場の解析を行い、数値解析により自動車の車内騒音の予測が可能であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、この解析では、流れ場を非圧縮性解析により計算しているため、外部音の影響を考慮することができないという問題があった。一般に高周波数帯域の音はガラス等を透過しやすいため、周波数が高くなるほど、車内騒音に対する外部音の寄与が大きくなる。著者らの解析結果は、車体の構造振動解析を行っていることから低周波数域のモードも正確に計算しており、100 Hz から 1kHz 帯域の車内騒音を正確に予測することができているが、高周波数帯域では、解析結果は、実験結果よりも小さくなっている。これは外部音場の影響を無視したことによるものと考えられる。このため、自動車周りの流れに起因する車内騒音を予測するためには、外部音場を含めた圧力場を求める必要がある。圧縮性 NS 方程式を解くことにより流れ場と外部音を予測することは技術的には可能であるが、計算コストや精度の面から自動車全体に適用するためには課題も残されている。実際に自動車メーカーの開発では格子ボルツマン法を用いた解析や圧縮性流れ場を用いた車両周りの音場計算も行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、部品レベルであれば圧縮性 NS 方程式を用いた音場の予測も行われている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、低マッハ数、高レイノルズ数の流れ場において、音場と流れ場を同時に解析し、圧力レベルの小さな音場を精度よく解析することは難しいことから圧縮性 NS 方程式を用いて車外音を計算し、そこから車内騒音を予測することは不可能ではないが、日々の設計で利用するにはハードルが高い。また、設計者の立場からすると、ガラスの透過損失の影響、車体パネルのモードと加振力である圧力変動の関係、SEA(Statistical Energy Analysis)の適用などを考える場合、流れ場と音場を分けて考えることができると、騒音低減方法の検討や設計における対策手法を検討しやすくなる。

流れ場と音場を同時に解析する圧縮性 NS 方程式に基づく解法の場合、設計者が流れ場と音場を分離して騒音対策手法を検討しようとする場合、音場と流れ場を同時に解析していることが逆に欠点となり、改めて両者を分離する必要がある⁽⁷⁾。

そこで本研究では、流れ場と音場を別々に解析する分離解法によって自動車周りの空力騒音を解析することを試みた。音源項として Lighthill テンソル及び Ribner 音源を用い、車両周りの流れ場と発生する音の関係について検討した。

2. 流れ場の解析手法

流れ場の解析には FrontFlow/blue(FFB)を使用した。FFB は大規模な乱流解析を行うのに適したコードであり、乱流境界層や等方性乱流などの基礎的な流れ場だけでなく、自動車などの複雑な形状の工業製品の開発にも利用されている。自動車周りの流れ解析としては、数 100 億要素の解析を行った事例もあり、車体周りの流れを詳細に解析できる。本研究では、車両周りの流れ場解析には約 50 億要素の格子を使用した。車体壁面から境界層高さ方向の第一格子点は 0.5 mm である。また、車体近傍の格子の平均的な大きさは流れ方向、幅方向ともに 1.2 mm 程度である。車体壁面の境界層厚さは 20 mm 以下であり、壁面摩擦速度は 1 m/s 程度と考えられる。このような規模で解析を行っても、第一格子点のメッシュサイズは $y^+ = 30 \sim 80$ 程度に相当し、車体表面の境界層を完全に解像することはできない。車両周りの渦構造を完全に計算するには、数百億から一千億規模の格子が必要となる。今回は計算リソースの問題もあり、50 億要素のメッシュを使用した。なお、大きさ 1 mm 程度の渦の周波数は、渦の移流速度を主流の 70% 程度として見積もった場合、3 kHz 程度である。1 mm の格子で 1 mm の渦を解像することはできないので、実際に解析可能な渦の周波数は高々 2 kHz 程度である。実際に同じ規模の解析データで車両表面の圧力変動スペクトルを実験と比較したところ、2 kHz 程度までは実験と解析の結果が良く一致した。しかし、このメッシュで数 kHz の渦を解像することは難しい。これらの点も解析結果を分析する際には考慮する必要がある(最近、格子スケールから推定すると解像することができないような周波数について議論している報告が多いように思われる。スペクトル解析をするとながしかのデータが出てくること、基本的にスペクトルデータは

対数スケールでグラフを作成しているため、見かけ上解析できていないように見える場合があることに注意する必要がある)。

図1に車両周りの流れ場を示す。図2は車体空力音の主たる騒音源であるドアミラー周りの渦構造を示したものである(速度勾配テンソルの第2不変量の等値面)。本解析ではメッシュの自動再分割機能を利用して大規模解析用のメッシュを生成している。(a)は、格子生成ソフト(PPOINTWISE)で生成したオリジナルの格子を用いた解析結果であり、解析規模は約8千万要素程度である。(b)はこのメッシュを2回リファインした(4分割)結果であり、要素数53億要素の計算格子を用いた結果である。音源であるドアミラー周りの渦構造がかなり異なることがわかる。音の解析には、これらの微細渦構造が重要であるため、解析規模が小さいと正しく音場を解析できない可能性がある。格子解像度により流れ場が異なることを考慮して分析を行う必要がある。

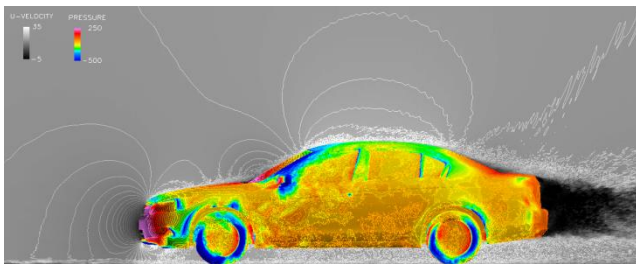
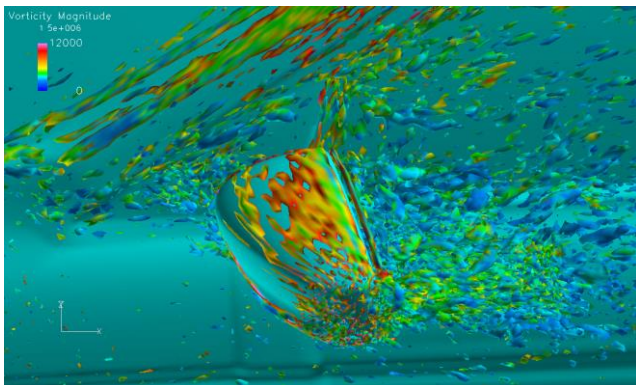
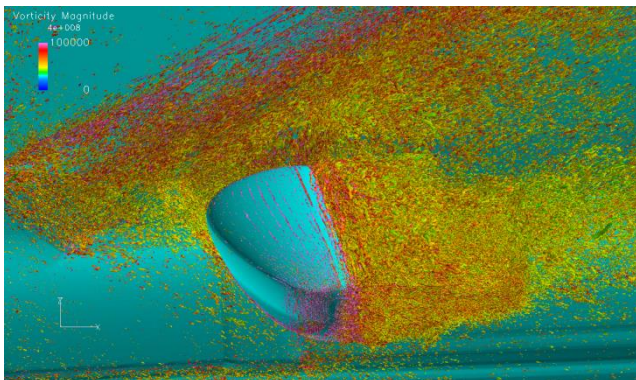


Fig. 1 Flow field around an automobile



(a) Coarse mesh (82,000,000 Elements)



(b) Fine mesh (5,300,000,000 Elements)

Fig. 2 Distribution of Iso-surface of the second invariant of velocity gradients around a rearview mirror

3. 音場の解析手法

音場の解析には、流れと音を分離したいという要望より分離解法を用いた。分離解法には、Lighthill 方程式(音源項 Lighthill テ

ンソル)を用いる方法⁸⁾、流れ場の渦度変動を音源とする Powell の理論⁹⁾、圧力変動の時間微分を音源とする Ribner の摂動法理論¹⁰⁾など流れ場の空間データを音源とする理論と、Lighthill の理論¹¹⁾に対して、物体表面の効果を取り入れ、物体表面の物理量を音源とする Curle の理論¹²⁾などがある。流れ場と音との関連性を調べる場合、空間音源を用いたほうが、全体の見通しが良い。ただし、空間音源を用いて空力音を計算する場合、流れ場の空間データを時系列データとして保持する必要がある。例えば50億要素の解析において256点の時系列データを用いる場合、音源領域の計算には、速度の3成分と圧力の4つの物理量を持つ必要があり、(各データが単精度であっても)20Tバイトのデータを記録しておく必要がある。このデータ量は、実施に保持することが不可能なデータ量ではないが、日常的に扱うにはかなり大きなデータであるとも言える。また、データの統計量を求める場合は、さらに100倍規模のデータが必要となる。今回の解析では、流れ場の解析は50億要素を用いて詳細に行うが、音場解析用のデータは解析結果を元の8千万要素の格子にマッピングしたものを利用した。これによりデータサイズを200Gバイト程度とした(時間方向には128点)。データのサンプリング周波数は20kHz、FFT解析における周波数刻み幅は156Hzである。

空力音の解析には以下の Lighthill 方程式を用いた。

$$\left(\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) p' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

ここで p' は流れ場によって発生した音圧であり、 T_{ij} は Lighthill テンソルである。流れが非圧縮かつレイノルズ数が十分大きければ、Lighthill テンソルは以下のように簡略化される。

$$T_{ij} = \rho u_i u_j \quad (2)$$

音響解析の音源項に Lighthill テンソルを用いる場合、以下の点に注意する必要がある。Lighthill が空力音の理論を打ち立てた際に導入した Lighthill テンソルは式(2)に示したように、乱流場の運動量輸送項であるレイノルズ応力と密接に関連しており、レイノルズ応力が変化するというは流れ場に流体運動自身に起因する力が作用している。この応力は流れ場の非線形効果により生じるため、流れ場の解析精度が十分高くないと空力騒音の予測を行うことは難しい。しかし、現在の数値解析はレイノルズ応力分布を求めること自体は(精度はともかく)それほど大きな問題ではない。ここで問題となるのは、波動方程式右辺の音源項が Lighthill テンソルの空間2階微分であることである。数学的には得られたレイノルズ応力を2階微分するだけのことであるが、自動車などの工業製品の解析メッシュは非常に複雑であり、格子が立方体である場合ばかりではない。非構造格子を用いることも多く、このようなメッシュに対して空間微分操作を行うことによる誤差の問題が生じる場合がある。非圧縮性流れ解析の多くは空間2次精度で解析されていることも多く、音源項を数値誤差なく求めることが意外に難しい。FFBの場合、空間の離散化には2次精度の有限要素法を用いているため、空間1階微分については有限要素法の形状関数を用いた微分が可能であり、流れ場の解析精度と同等の精度で値を求めることができるが、これをさらにもう一回微分すると精度を保証することが難しくなる。そこでFFBの音源抽出プログラムでは発散定理を用いて、要素内の発散を数値積分により微分係数を求める方法を用いている。開発当初は単に要素ごとに数値積分を行っていたが、これでは十分な精度が得られないことがわかった。そこでガウス求積を用いて、各節点のデータ(レイノルズ応力の1階微分項)を[-1,-1,-1]~[1,1,1]の立方体に写像し、積分計算を行っている。ガウス求積は少ない計算点数で

積分を精度良く行う方法として知られており、ガウス求積を用いることにより計算精度は各段に向上する。FFB の標準ツールではガウス積分点を 4 点として補間を行い、非常に高い精度で積分値を得ることができる。低レイノルズ数の角柱周りの流れに対して、この処理方法を用いて音場を解析し、圧縮性流れ解析による計算結果と比較した結果、両者は渦の移流領域以外は非常に良く一致することを確認している。レイノルズ数が低い場合、乱流による影響が小さく、流れ場の空間的な変化が滑らかなため、音源項の算出誤差が小さいということもあるが、分離解法自体は有効であることがわかる。Lighthill テンソルを用いて音の計算をすると「解析結果が過大評価される、十分な精度で得られない」との話を聞くことがあるが、これらは音源項の微分処理の誤差に起因するものと考えられる。したがって、2 次精度の非圧縮性解析から Lighthill テンソルを求めて音場を計算する場合は、微分処理の精度に注意する必要がある。このことは自動車のような大規模解析を行う場合は、非常に重要な課題となる。解析規模が小規模な場合はガウス点を 4 として解析精度を上げることが比較的容易であるが、自動車解析のように規模が大きくなると計算時間という点で問題が生じる。ガウス点を 4 点用いて 3 次元空間で補間する場合、補間点数が 64 点となり、これを音源空間のメッシュ (8 千万要素) に対して 1 要素あたり 8 節点で計算するには、 10^{18} オーダーの演算が必要となる。したがって、何等かの対策が必要となる。

図 3 はガウス点を変えた場合の音源項の分布の一例である。ガウス求積を行わず単純に要素内データを積算しただけの場合、十分な精度が得られないことがわかる。ガウス点を 2 点とすれば、ガウス点を 4 点とした場合とほぼ一致する。このため、大規模解析ではガウス点を削減して解析を行った (ただし、解析精度という点では可能な限り補間点数を増やしたほうが良いと考えられる)。音源項の抽出時間を短縮するために、領域分割された解析データ上で音源項の計算を行い、音源項を計算した後で、全体のファイルに結合する処理も行った。この場合、スーパーコンピュータからデータを転送する必要もないため、後処理としての作業性は良くなる。ただし、領域毎にデータを処理すると分割面で微分係数が不連続になる場合がある。ここでは簡単に処理するため、領域分割面で微分係数が滑らかにつながるように補正した。

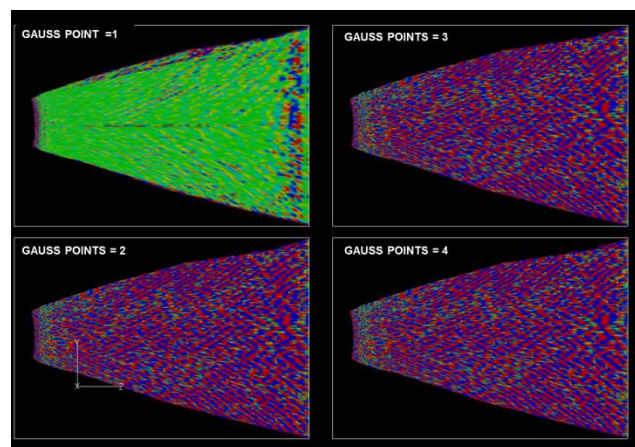


Fig. 3 Distribution of the source term of Lighthill equation
(The influence of Number of Gaussian point (Gaussian quadrature) on accuracy of sound source term calculation)

これらの処理を行うことにより音源項の抽出に必要な時間は約 2 時間程度となった。FFB のオリジナルツールを利用した場合、音源の抽出に 20 日必要であった。流れ場の解析は、例えば「京」コンピュータを用いれば今回の解析は予備解析を含めても 2 日程

度で処理可能である。音響解析は 1 周波数当たり 30 分程度できるため、音源の抽出に最も時間がかかっていた。Lighthill テンソルの 2 階微分の精度を確保することが難しいこと、音源項の抽出に時間がかかることが、車両等の車外空力騒音を予測する上で問題であったが、周辺プログラムを整理することにより現実的な時間で解析を行うことが可能となった。

4. 解析結果

図 4 に車体周りの Lighthill 音源項の分布を示す (468 Hz)。Lighthill 音源は、流れ場の渦の非定常運動に起因するため、非常に小さな構造を持つことがわかる。車体表面でのスケールは乱流場の渦スケールと同様に小さくまた無秩序に分布しているように見える。図 5 に車体周りの音圧分布を示す。発生した音波は車体から十分離れた位置では波長スケールの大きな波として伝播する。ただし、車体近傍の流れ場の境界層領域、ドアミラーのはく離領域には、音として遠くまで伝播する波動成分以外の圧力変動が観察される。これらは疑似音波であり、遠方まで伝わらずに急速に減衰する。図 6 に圧力変動の減衰特性を示す。車体近傍では圧力が大きく変化するが、車体から 1 波長程度離れた領域では、ほぼ自由音場の減衰特性を示す。このように Lighthill 音源を用いて解析することにより車両近傍における圧力場の性質を議論することが可能となる。ここで疑似音波の扱いについて考える必要がある。

まず Lighthill 理論は音源から十分離れた位置における空力音を予測する理論であり、音源領域については音の波動性を定義しているわけではない。波動方程式の右辺に音源項として組み込まれた流れ場の非定常運動は、音の発生原因、回折、屈折、散乱、吸収などの効果を含めて波動を解析するが、音源領域そのものが音波の性質を持つとしているわけではない。このような領域を含めて波動方程式を解くため、実際に得られた解の一部は音速で伝播する音波ではなく、途中で減衰してしまう。音源から十分離れた領域における音場については Lighthill 方程式の解を用いて議論することができるが、音源の近傍 (今回の場合は車体近傍) では、音として議論することは必ずしも適切ではない。この点については、故石井克哉名古屋大学教授が自動車の空力音解析において注意すべき点であることを再三述べられていたが、この点をあまりまじめに考えていない人が多いように思われる。著者らは石井先生のお考えに賛同しており、もう少し近傍場、渦領域についてきちっと考えるべきであると考えている。そもそも音源である渦領域において音場と流れ場を分離することは非物理的な考え方であり、音場の流れ場も連続体の仮定の範囲内で、圧力勾配、粘性せん断力、外力のつり合いに対応して流体が加速運動した際の結果に過ぎない。音場はそこで等エントロピーを仮定し、圧力場と密度場が音速を媒介変数として結びつけられたものであり、これらを分離することは実際にはできないというのが著者らの見解である。この立場に立った場合、渦領域における音の評価の否定することになるので、本論文の趣旨と真向から反対になるのではないかと受け止められ方もいるかと思われる。それでは、何故このような研究をしているのかという点、実際の設計では流れ場と音を分離できたほうが、扱いやすいためである。そもそも分離できないものを分離する研究に意味があるのかという点になるのであるが、実際には分離できないとしても、設計の見地からは分離できると役立つことがあるということを踏まえて、便宜的に分離したらどんな不具合や問題があるかを検討しているのである。著者としては、物理学的にはどこまで正しく考えるべきかを理解した上で、実際の設計にはどのようにモデル化として組み込めばよいのか、モデルの限界を含めて知りたいということである。

将来的に圧縮性 NS 方程式で音場を直接計算できるようになるとしても、人間がものごとを考える場合、現象をいくつかの要素

に分けて考えることが多く、この場合は、音と流れという二つの物理量を分けて考えるほうがわかりやすい場合がありうる。厳密には分離できないものを分離してモデル化した場合、実際の実験値とどれくらいのかい離があるのか、設計の許容範囲内であるのかなどを今後明らかにしていきたい。現在、実車風洞を用いて実験を進めており、実験データと比較することにより、これらの課題を検討していきたい。

また、ここで解析メッシュのサイズと解析可能な周波数の関係について示す。今回の解析では流れ場の解析には 50 億要素のメッシュを使用しているため、格子サイズは 1 mm 程度であり、2 kHz 程度の周波数まで解析可能であると考えられる。市販ソフトを用いた研究発表で同様の規模の解析で 10 kHz 以上の周波数帯域まで議論されていることがあるが、格子サイズ以下のスケールを計算していることになり、実際にはそのような渦を解像することはできないので注意する必要がある。音響解析については流れ場と同じ格子を利用しているため、格子サイズとしては、非常に高い周波数まで解析することが可能であるが、音源が解像できていなくては、空力音の解析できない。特に Lighthill 音源の場合、微細渦構造の空間的な構造が解析精度に影響を与える。データとしては 10 kHz までの音源データを取得しているが、波動方程式の解が収束し、正しい音場が得られたのは 1100 Hz までであった。流れ場の解析としては 2 kHz の解析が可能であっても音源を粗い格子にマッピングしている影響や微分演算の影響もあり、実際に音場を計算できるのは、このメッシュ解像度では 1100 Hz 程度であった。このため、車内騒音の予測を行うには、音響解析も含めて 50 億要素規模の解析が必要であると考えられる。また、空間微分演算を含むことが Lighthill 音源を用いる際の大きな欠点となっていると考えられる。

繰り返しになるが、自動車の開発においては、音場と流れ場を分離して考えたいという設計者が多い。おそらく航空機であっても、空力音予測、低減技術の開発を進めていく上分離解法が必要となっており、ドイツ等の自動車開発先進国においても分離解法の開発が進められている。代表的なものとして、圧力場を平均圧力場、非圧縮性解析から求められた変動圧力場、音場に分離して解析する Acoustic Perturbation Equation (APE) ⁽¹²⁾ が広く利用されている。

$$p = \bar{p} + p^{inc} + p^a \quad (3)$$

ここで \bar{p} は時間平均値、 p^{inc} は非圧縮性流れ解析から得られた圧力変動、 p^a は音波である。APE にはいくつかのバージョンや派生モデルがあるが、式を Lighthill 方程式に代入すると

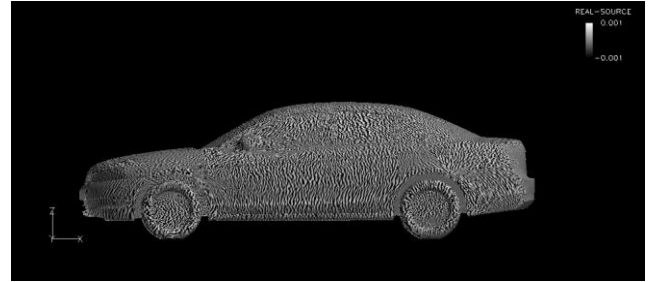
$$\left(\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) p^a = - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p^{inc}}{\partial t^2} - \frac{2(\bar{u}\nabla)}{c_0^2} \frac{\partial p^{inc}}{\partial t} + \frac{(\bar{u}\nabla)}{c_0^2} \nabla \bar{u} p^{inc} + \frac{2(\bar{u}\nabla)}{c_0^2} \frac{\partial p^a}{\partial t} - \frac{(\bar{u}\nabla)}{c_0^2} \nabla \bar{u} p^a \quad (4)$$

が得られる。ここでマッハ数が小さいこと、流れ場が非圧縮性であると仮定すると

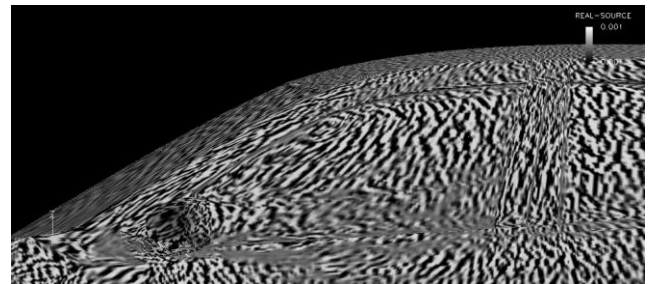
$$\left(\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) p^a = - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p^{inc}}{\partial t^2} \quad (5)$$

が得られる。これは非圧縮性流れ場の圧力変動の時間 2 階微分を音源項とする Ribner の理論と一致する。厳密には APE と呼ばれているものは、音源を非圧縮性の圧力場とせず、非圧縮性圧力場のラプラシアンと音源が比例関係にあるとしたモデルを構築しているが、実際の計算では圧力変動の 2 階微分を扱うほうが簡便なこともあり、Ribner 音源の形式で計算されることが多い。Ribner

の理論は遠方場では Lighthill 理論と一致するが、疑似音波成分は含まれない定式化⁽¹³⁾であり、音源領域では Lighthill 理論と一致しない。また、方程式の簡略化において渦の対流を省略するため、渦自身の移動に伴う音源領域の複雑な挙動が表せないという批判もあり、例えば Ristorcelli⁽¹⁴⁾の 1995 年の報告に Ribner 音源のモデルの問題点が指摘されている。ただし、これらの問題は基本的に音源領域近傍についてであり、遠方場においては音場を正しく予測すると考えられる。

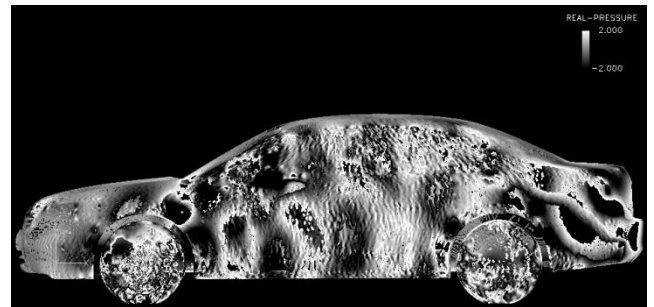


(a) Side View

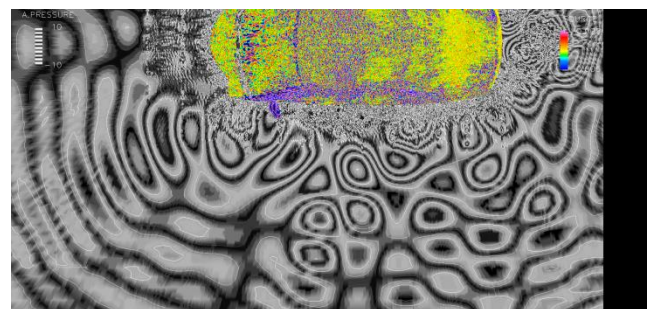


(b) Closed up around a side shield

Fig.4 Distribution of the Lighthill sound source terms on the body surface (468 Hz)



(a) Sound pressure amplitude on the body surface



(b) Sound pressure field around an automobile

Fig.5 Distribution of the aerodynamic sound pressure around automobile calculated by Lighthill equation (468 Hz)

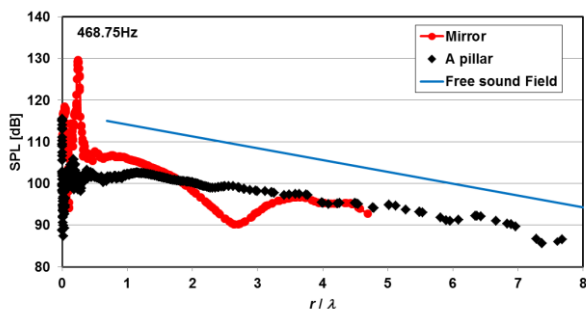
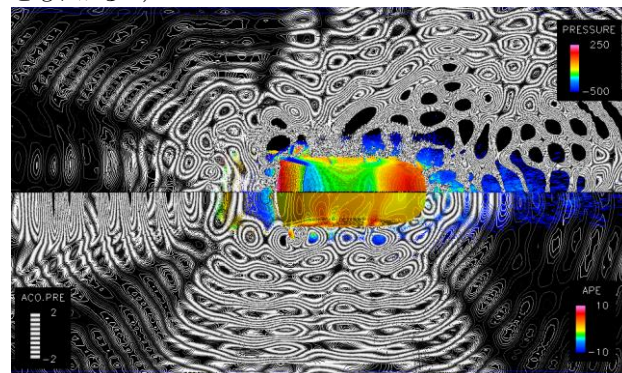


Fig.6 Distance attenuation properties of aerodynamic sound from noise source region (around the vehicle body surface)

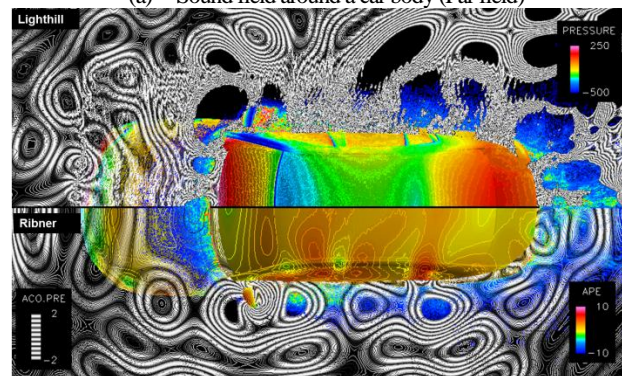
これまで議論してきたように自動車の車内騒音予測では、基本的に流れ場と音場を分離したい。車体近傍の渦領域での分離の可否(石井教授の指摘)、Ribner 音源に対する指摘を踏まえ、一定の限界があることを認識した上で、Ribner 音源から求めた音場と車両周りの非圧縮性流れ場による圧力場が車内騒音の加振源になっていると仮定すると流れ場と音を分離して考える場合は、Ribner 音源は非常に都合が良い。実は Lighthill 方程式を用いた解析結果の場合、疑似音場が含まれることが問題となる。疑似音場は音の発生に寄与する微細渦構造まで取り込んでいるので、音の発生原因を調べるという点では非常に優れているが、微細渦構造の圧力変動が含まれるため、Lighthill 音源により計算された圧力場に流れ場の圧力場を加算すると 2 重カウントされる成分が出る可能性がある。もし、Lighthill 音源により計算された疑似音場と音場成分だけで車内騒音が計算できるのであれば、大きな問題はないが、疑似音波成分以外の成分も寄与する場合は、モデル化が難しくなる。このような観点からすると方程式上で疑似音波成分をフィルタリングし、伝播成分のみをモデル化している Ribner 音源(もしくは APE)は、車内騒音の計算には適しているともいえる。また、音源項の計算に利用される圧力変動の時間 2 階微分は Lighthill テンソルの空間 2 階微分と比べて、微分演算の誤差が小さい。圧力変動自体も速度場、渦場の変動に比べて滑らかであることが多く、遠方では変動がかなり小さくなるので、音源領域を指定する領域を小さくすることもできる。一般に波動方程式の計算は、周波数領域で行われるので、音源項も周波数領域で求める。この場合、時微分はフーリエ級数に角周波数を微分の回数だけ掛けるだけであり、微分による精度の劣化はない。時間領域で微分する場合も流体解析の場合、時間方向の刻み幅は(渦の時間スケールに比べて)小さいことが多いため、空間微分のような演算に伴う誤差はほとんどない。解析領域全体で FFT 処理を行うことで音源項が得られるので、音源項の抽出時間は並列処理などを行わなくとも 1 時間程度で済む。

これらのことから自動車の車外騒音及び車内騒音を予測する場合、Ribner 音源(もしくは APE)を用いることが解析時間等を考慮すると適切である可能性がある。なお、音源項が変わっても波動方程式の解析時間に大きな差はなく、音源自体の構造が小さく空間的な分布が複雑な Lighthill 音源よりも計算は若干速く終了する。図 7 に Ribner 音源による解析結果と Lighthill 音源による解析結果の比較を示す。(a)の全体像の解析結果から遠方場になると次第に両者が近づいていくことがわかる。(b)(c)は音源であるドアミラー近傍の解析結果である。Lighthill 音源の場合、音源の微細構造に伴う細かなスケールの場と伝播する音場が組み合わさっている。一方、Ribner 音源の場合、ドアミラーを中心として音場が形成されていることがわかる。Ribner 音源が渦の移流項の影響を取り除いた伝播成分だけが求められていることがわかる。図 8 に流れ場の流体圧力変動の RMS 値、Lighthill 音源、Ribner 音

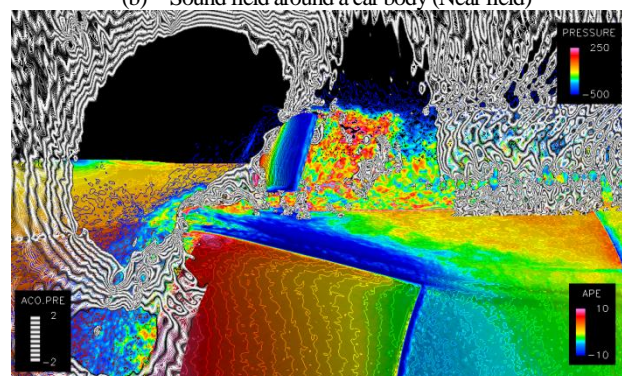
源による解析結果の比較結果を示す。流体力学的な圧力変動は 50 Pa 程度の変動値なのに対して、Lighthill 音源と Ribner 音源はかなり小さいことがわかる(ただし、流れ場は全周波数成分なのに対して、音場は周波数分析結果のため、直接比較することはできないが、圧力分布が集中している領域が流れ場と音場では異なることもわかる。)



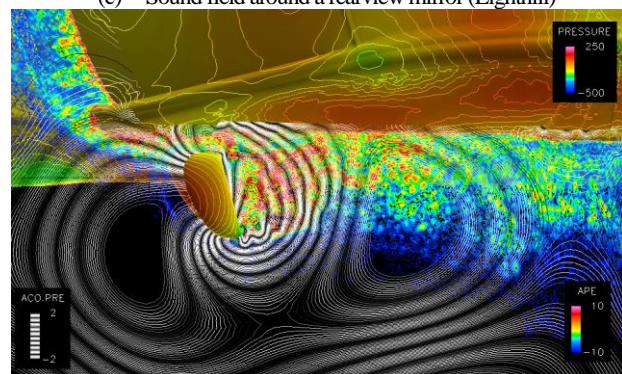
(a) Sound field around a car body (Far field)



(b) Sound field around a car body (Near field)



(c) Sound field around a rearview mirror (Lighthill)



(d) Sound field around a rearview mirror (Ribner)

Fig.7 Comparison of aerodynamic noise simulations using Lighthill (above) and Ribner (below) sound source

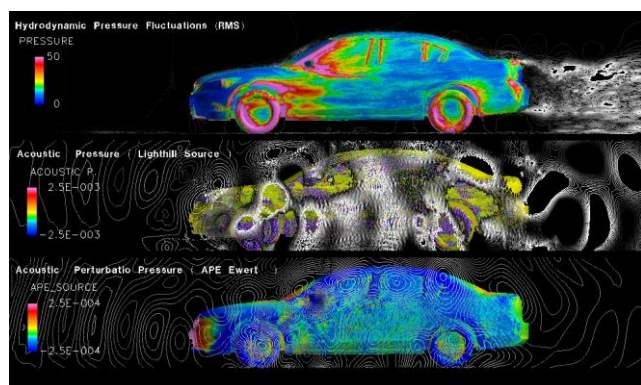


Fig.8 Comparison of flow field, noise field around an automobile
(Above : Flow Filed, Middle : Lighthill, Below: Ribner)

5. まとめ

自動車周りの流れから放射される空力音を空間音源を用いて予測することを試みた。空間音源を用いた解析では、音源となる流れ場の非定常運動を正確にとらえる必要があるだけでなく、空間微分処理に注意する必要がある。Lighthill 音源を用いることにより、微細渦構造から放射される音まで解析することが可能であり、疑似音波の性質や音の放射特性を調べる上で有益であることがわかった。その一方で、疑似音場をどうやって分離するかも課題となる。このことを考慮すると音の伝播のみを計算するように定式化された Ribner 音源 (APE) は、解析モデルには物理学的な問題があるが、車内騒音を解析する場合に、流れ場と音場を分けて考えるには適したモデルあると考えられる。ただし、もともと渦領域において音と流れ場を分離することは原理的にできないことを念頭に置いたうえで、如何にして設計に役立てるかを考えるべきであり、解析結果だけをうのみにせず、元になっている流体力学的な考えたかと設計開発として必要なことがらを各自がよく認識する必要がある。それらを考える上で大規模で精密な解析は (モデルの限界を調べる上で) 重要であると考えられる。

参考文献

- (1) 飯田 明由,加藤 千幸, 吉村 忍, 飯田 桂一郎, 橋爪 祥光, 山出 吉伸, 秋葉 博, 恩田 邦蔵,"流れに起因する自動車車内騒音の予測",ながれ,34 (2) (2015), pp. 143-148
- (2) 飯田明由,加藤千幸,吉村 忍,飯田桂一郎,橋爪祥光,山出吉伸,秋葉 博,恩田 邦蔵,"空力・構造振動・音響連成解析による自動車車室内騒音の予測",ながれ,33 (2) (2014),pp. 119-123
- (3) Yasuhiko OKUTSU, , Naoki HAMAMOTO, Kazuo YANAGIMOTO, Katsunori DOI, and Yoshiaki NAKAMURA, "Verification of Automobile Aerodynamic Noise Transmitted through Side Window Glass", Journal of Environment and Engineering, Vol. 8, No. 1, (2013), pp. 41-56
- (4) 前田裕樹, 安藤裕啓, 熊野宜弘, 福山順也, 高阪文彦, "Aピラー, サイドミラー周辺の流れに起因する自動車車内騒音の予測", 2018 年自動車技術会秋季大会学術講演会, 講演番号 96, (2018), pp.1-6
- (5) Hiroshi Yokoyama, Katsuya Kitamiya, and Akiyoshi Iida, "Flows around a cascade of flat plates with acoustics resonance", 25(10), 106104, (2013)
- (6) Takenori Miyamoto, Hiroshi Yokoyama and Akiyoshi Iida, "Suppression of Aerodynamic Tonal Noise from an Automobile Bonnet Using a Plasma Actuator", SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 10(3) (2017)
- (7) 田所真樹, 横山博史, 水野雅隆, 飯田明由, 若松幹生, Phan

- Vinh Long, 田中博, "乱流境界層が流入する前方ステップから生じる空力騒音の音源および伝播プロセスの解明", 日本機械学会論文集, pp.18-00199-1-18-00199-16, (2018)
- (8) Lighthill, M.J., "On sound generated aerodynamically I. General theory", Proc. Roy. Soc. London., A222, (1954) pp.1-32
- (9) Powell A., J., "Theory of Vortex Sound", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, No. 1, (1964), pp. 177-195
- (10) Ribner, H.S., "The Generation of Sound by Turbulent Jets", Advances in Applied Mechanics Vol.8, (1964), pp. 103-182
- (11) Curle, N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", Proc. Roy. Soc. London, A231, (1955) pp.505-514
- (12) R. Ewert, W. Schröder, "Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering", Journal of Computational Physics 188 (2003) pp. 365-398
- (13) 漁哲司, 三宅 裕, 辻本公一, "壁乱流からの放射音の DNS", 第 14 回数値流体力学シンポジウム論文集, (2000)
- (14) J. R. Ristorcelli, "Fluctuating dilation rate as an acoustic source", ICASE Report No. 97-21 NASA, CR-201676 (1997)