

波数・周波数スペクトルを用いた自動車周りの空気力学的圧力と音響圧力の分離

Decomposition of aerodynamic and acoustic pressure of flow around automobile by using wavenumber-frequency

- 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
- 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
- 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 estimate interior noise of automobiles, it is necessary to develop the decomposition method of flow field and sound field around the body. In this research, we attempted to separate flow field and sound field by using the wavenumber frequency spectrum. The result of wind tunnel experiment with MEMS microphone array, it was confirmed that aerodynamic noise components can be separated, and the separated sound field is proportional to the sixth power of velocity. The result of the incompressible flow simulation, it revealed that the wavenumber of peak component of the flow fluctuations becomes apparently small in the reverse flow region of the downstream of the rear-view mirror. In this case, the contribution of the fluid to the interior noise may increase. Therefore it is necessary to elucidate the mechanism by which the wave number decreases in the reverse flow region. The wavenumber analysis is considered to be useful for understanding the noise transmission mechanism of the interior noise caused by the flow around automobiles.

1. はじめに

自動車は、我々にとって身近な産業機器であり、自動車によるエネルギー消費や排気ガスによる環境汚染、騒音問題は、我々の生活と密接にかかわっている。このため、自動車メーカーは近年、環境問題への取り組みを強化し、従来以上に省エネルギー化や排ガス対策などに取り組んできている。自動車の空力設計も燃費改善のために必要な技術であり、様々な対策が進められている。自動車の空力開発が、航空機や鉄道などの公共交通機関の空力開発と大きく異なる点は、自動車の場合、ユーザーの多くが一般消費者であるため、製品の安全性や性能だけでなく、デザイン性および居住性にも配慮する必要があることである。自動車の車内騒音は、居住性にかかわる重要な項目であり、低減対策が求められているが、燃費改善に効果のある軽量化は、騒音対策とは相反する対策であり、軽量化と低騒音化の両立が喫緊に解決すべき課題となっている。また、自動運転が一般的になると自動車はリビングや会議室としての側面を持つことになり、より一層の低騒音化、静粛性が求められると考えられる。ハイブリッド車の普及や電気自動車への転換により、エンジンやギヤボックスなどの駆動系の騒音が減るため、自動車周りの流れに起因する空力騒音の低減技術の開発が必要となってきた⁽¹⁾⁽²⁾。

自動車周りの流れ場はAピラーやドアミラー、ホイールハウス、タイヤなどの様々な部品により複雑な渦度場を形成する。渦の非定常運動は車体表面に圧力変動を生じさせる⁽³⁾⁽⁴⁾。また、渦の非定常運動は空力騒音を発生させる。このため、自動車の車体周りには、流れ場に起因する圧力変動（流体力学的圧力変動）と空力騒音（音響学的圧力変動）が作用すると考えられる^{(5)~(8)}。自動車の車体周りの境界層内部において、流れ場と音場を厳密に分離することが可能かどうかは必ずしも自明ではないが、自動車の設計や機械の設計を行うエンジニアにとっては、流れ場と音場を分けて考えることができると、それぞれの物理現象の特徴を認識しやすという利点がある。自動車の一般的な走行速度（100km/h程度）では、マッハ数が小さいため、流れ場の圧力変動と音場の圧力変動の大きさは100倍以上の違いがあること、渦スケールに比べると音の波長は十分大きいことから、両者を異なる性質を持った物

理量として扱う仮定は、厳密ではないものの工学的には意味のある仮定であると考えられる。このような分離は、流れから発生した空力騒音が流れ場の圧力変動に比べて非常に小さいにも関わらず、車内騒音への寄与が大きいことを説明するためにも必要な仮定であり、我々が経験的に知っているこの事実を定量的に評価するためには、流れ場の圧力変動と外部音場を分けて考え、それぞれのように車内騒音に寄与するのか、その伝達機構について検討していく必要がある^{(5)~(8)}。本研究では、自動車の周りの圧力変動を流れに起因した流体力学的圧力変動と空力騒音（音響学的圧力変動）に分離する方法について検討した。

2. 流れと音の分離に関する基本的な考え方

音や振動などの物理現象は波動方程式で表される。波動方程式の解は

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = A_0 e^{i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで A_0 は振幅、 \mathbf{k}_0 は波数ベクトル、 ω は角周波数である。ここで波動の伝播速度（位相速度）を C とすると、波数と角周波数との間に

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{Tc} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2)$$

の関係が成り立つ。波数が角周波数に比例（比例定数は位相速度）するとき、分散のない現象と呼ぶ。分散のない波の場合、波の形は崩れずに遠方まで伝達される。分散がない場合、位相速度と群速度（ $c_g = d\omega/dk$ ）が等しくなる。音は分散のない現象である。一方、車両周りの乱流場は波動そのものではないため、分散のない現象と定義することは厳密にはできないが、狭い範囲でみれば、乱流場は渦などの物理量が流れ場の移流速度で輸送される現象であるため、移流速度を流れ場の位相速度とみなして議論を進めることができる（乱流場の基礎理論では、波数が用いられており、テイラーの凍結仮説を用いて波数と周波数を結びつけた議論がなされている）。このように乱流場や音場を波数を用いて扱うことが可能である。乱流の基礎理論の研究者にとっては波数という概念は身近なものであるが、車両開発の現場ではあまりなじみがなく、

周波数のほうが一般的に広く用いられている。しかし、周波数は現象の伝播速度が等しい場合は問題ないが、流れ場と音、構造振動と音のように物理量の伝播速度が異なる場合は、周波数での議論ではなく、波数で議論したほうが良い。特に車内騒音を取り扱う場合は、構造振動におけるパネルの曲げ波は位相速度が周波数に依存する分散のある系であるため、流れ場や音とは根本的な性質が異なる。このため、各物理現象に対して周波数を比較しても現象の本質が見えないことがある。逆に波数の性質を用いて両者を分離することが考えられる。

3. 波数・周波数解析

波数を用いることにより流れ場と音場の違いを調べることが可能と考えられることから、流れ場と音場の圧力に対して、波数・周波数スペクトルを求める。今、流れ場と音場が混在する空間に平板が設置されているとする。このときの圧力変動を $p(\mathbf{x}, t)$ とすると、その周波数軸上のスペクトルは

$$P(\mathbf{x}, \omega) = \int p(\mathbf{x}, t) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

と表すことができる。流れが乱流の場合、測定領域内において乱流場の性質が統計的に一様であると仮定する。このとき、2 点間のクロススペクトルの期待値は、

$$S_{pp}(\mathbf{r}, \omega) = E[P(\mathbf{x}, \omega) P^*(\mathbf{x} + \mathbf{r}, \omega)] \quad (4)$$

と書くことができる⁽⁸⁾。ここで十分に多くのアンサンブルデータが得られた場合、クロススペクトルの値が場所によらず距離 r の関数として表せると仮定すると、波数・周波数スペクトルは、

$$\Phi_{pp}(\mathbf{k}, \omega) = \iint S_{pp}(\mathbf{r}, \omega) e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}_x d\mathbf{r}_y \quad (5)$$

と表すことができる⁽⁵⁾⁽⁹⁾。ただし、流れ場において波数・周波数スペクトルを実験により求めることは難しい。これは流れ場の圧力変動と音の圧力変動は圧力の大きさが 1000 倍程度異なるため、計測の SN 比が非常に高くなくてはならないためである。一般にマイクロフォンは、SN 比の高い計測器であるが、流れ場の圧力変動のような大きな圧力変動に測定感度を合わせると、音の圧力変動レベルではノイズの影響を受ける可能性があり、両者を分離することは難しい。また、波数・周波数スペクトルを求めるには複数（多数）のマイクロフォンが必要となる。波数の分解能と最低波数は、アレイ長の長さと同数により決まるため、乱流場の幅広い周波数帯域と音波の長い波長に対応するには、非常に長いアレイ長と多数のマイクを必要とする。数値解析の場合、流れ場と音を十分な精度で解析できているかが問題となる。幸い自動車のマッハ数では、流れ場と音場の波数が非常に離れているので、波数空間では両者の成分が重なることがほとんどないと考えられるので、波数・周波数スペクトルをそれぞれの帯域で分離することにより、流れ場と音場を分けることができると考えられる。図 1 に波数・周波数スペクトルの模式図を示す。

直接解法の場合は、流れ場と音場を同時に計算するには、高い解析精度が必要となる。たとえば、倍精度変数で流れ場が表現されているとすると、流れ場の乱流成分が十分大きい壁面近くでは、最初の 3 桁が流れ場の平均値 (C_d の計算に利用される)、乱流成分が次の 5 桁程度の数字で表現されると考えられる。放射音はこれらの後に続く少数以下 8 桁から 10 桁程度の数値となる。つまり解析精度が少数点以下 10 桁程度の値まで保証されていないと乱流中の音場のみを抽出することは難しいと考えられる。したがって直接解法から音場のみを抽出するには何らかの数学的処理が必要であり、波数・周波数解析はそのような手法の一つである。

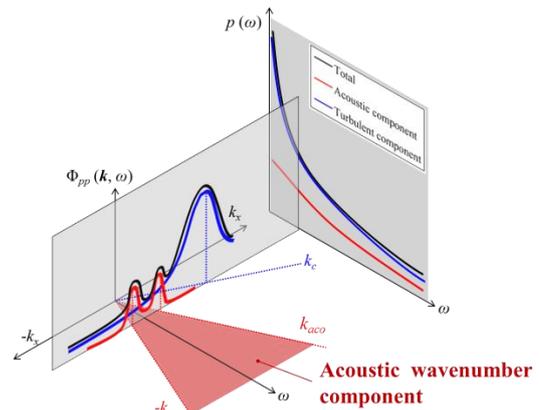


Fig. 1 Schematic diagram of the concept of wavenumber-frequency spectrum

通常の周波数スペクトル解析は図 1 の右側に見える信号波形のエネルギーを周波数毎に示したものである。波数・周波数スペクトルは周波数の各成分が波数空間でどのような分布を持っているかを示したものである。音波による成分と流れ場による成分は波数が主たる成分の波数が異なるため、周波数スペクトルでは一塊で表されていたものが波数空間では分離される。このとき、実験でも解析でもデータの精度が問題となることは前述したとおりであるが、波数・周波数スペクトルの利点は、伝播速度の違いによって流れ場と音場ではスペクトル異なる領域に集中することである。この性質を利用することにより両者を分離することが可能となる。すなわち各周波数成分の波数・周波数スペクトルを k_x - ω 平面に投影すると、各物理量はそれぞれの位相速度で波数空間を伝わっていく。このため、音や流れ場のような分散のない現象であれば、投影された空間では位相速度一定の線上にピーク成分がみられるようになる（図 2 参照）

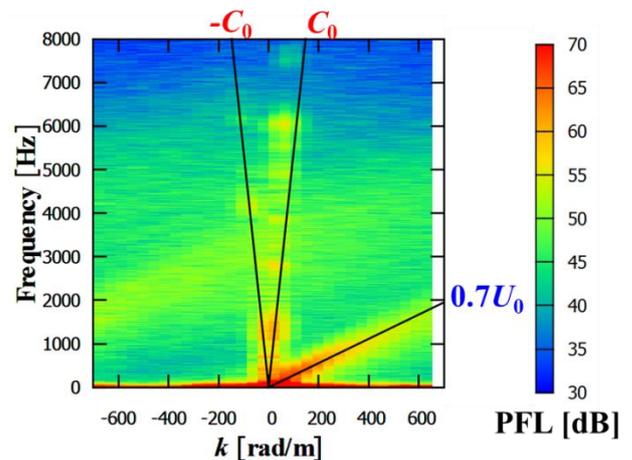


Fig. 2 An example of one-dimensional wavenumber-frequency spectrum projected on wave number frequency plane

波数・周波数スペクトルの概念を 2 次元平面に拡張した場合、2 次元波数・周波数スペクトルを求めることができる（図 3）。例えば原点に 1kHz の点音源が置かれた場合、原点から音は平面上に放射される。また、同じ空間を流れ場が一定速度で一方向に移動しているとすると、2 次元平面では音場は同心円状にスペクトル成分を持ち、流れ場はある特定の波数（主流方向）に集中した成分を持つ。変動圧力レベルが同程度の場合、実空間では両者を区別することは難しいが、波数・周波数スペクトルで表すと音場は

原点を中心とした波数の小さな領域に集中し、流れ場は波数の大きな領域に集中する。この違いは伝播方向と伝播速度の違いにより生じる。このことから、仮に両者の圧力レベルが大きく異なっていて、SN 比的にデータ処理が難しい場合でもある程度の分離が可能であると考えられる。

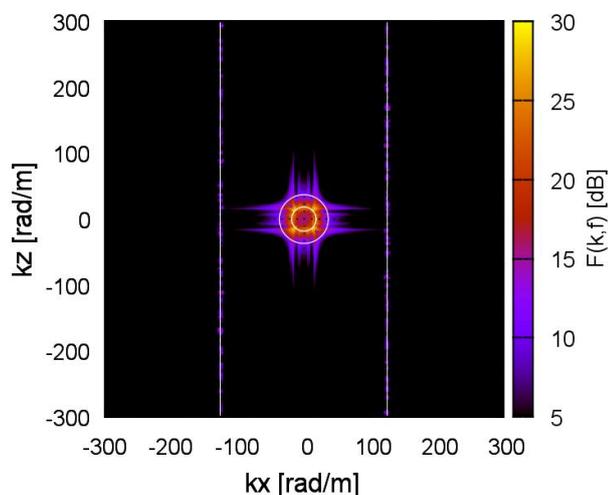


Fig. 3 An example of two-dimensional wavenumber-frequency spectrum (Single frequency sound wave and random fluid motion of convected uniform flow velocity)

4. 風洞実験

波数・周波数スペクトルによって空力騒音を分離することができるかを確認するため、風洞実験を実施した。実験には、吐出し型の低騒音風洞を使用した。ノズルの大きさは $450\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ である。風洞の送風ダクトをすべ吸音処理し、さらにダクト内にスリット型のサイレンサー、ベンド型サイレンサーを設置し、ファンがダクトを介して測定室に影響を及ぼさないようにした。風洞コレクタ部には柔毛と吸音材を取り付け、コレクタで発生する空力騒音を抑制し、風洞暗騒音を低減した。風洞測定部の無響室の大きさは $3240\text{ mm} \times 2265\text{ mm} \times 2900\text{ mm}$ とし、壁面には厚さ 300 mm の吸音材を取り付けた。無響室の壁は厚さ 21 mm のベニアを 18 mm 離れた 2 重壁とし、外部からの音を遮音した。図 4 に測定部の模式図を示す。

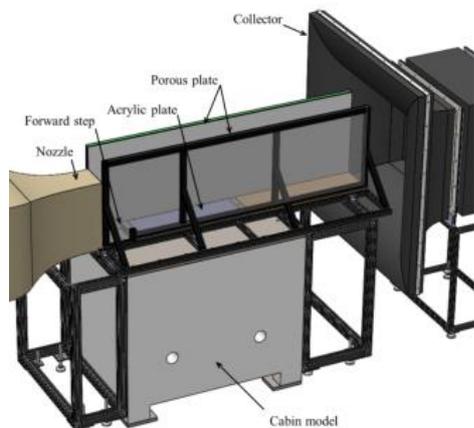


Fig. 4 Schematics of wind tunnel for aerodynamic noise measurements

波数-周波数スペクトルを実験により求めるため、32 個の MEMS マイクロフォン (Knowles Electronics / SP0103NC3-3) か

らなるマイクロホンアレイを製作した。マイクの設置間隔 Δx を 4.5 mm とした。このため、サンプリング波数 Δk は 1396 rad/m となる。図 5 に MEMS マイクの外觀図を示す。MEMS マイクを風洞床面 (車室内モデル上面) に設置し、ドアミラーモデル下流の波数・周波数スペクトルの計測を行った。図 5 にドアミラー周りの波数・周波数スペクトルを示す。この図では音場の成分がわかりにくい、図 2 の参考例では、風洞実験での流れ場に対して、外部からスピーカーで音を入射して実験を行った。この場合、流れ場の変動成分以外にも、強いスペクトル成分が観察され、そのスペクトルは音の伝播速度と周波数から求めた波数と周波数の交点に分布している。図 6 は伝播速度に基づき流れ場と音場を分離した場合の周波数スペクトルである。黒線が直接計測された圧力変動 (全成分)、青線が乱流成分、赤線が音場成分である。乱流場が支配的であるため、黒線と青線はほとんど区別がつかない、空力音成分は数 dB から 20 dB 小さいことがわかる。図 7 に分離された圧力場の速度特性を示す。乱流場の圧力変動成分は速度の 4 乗 (青い点線) に比例するが、分離された空力音成分 (壁面上) と外部音場は速度の 6 乗に比例しており、空力音の特性である 6 乗則が検出された。波数成分に分離することにより乱流場中に存在する音場を抽出できることがわかる。

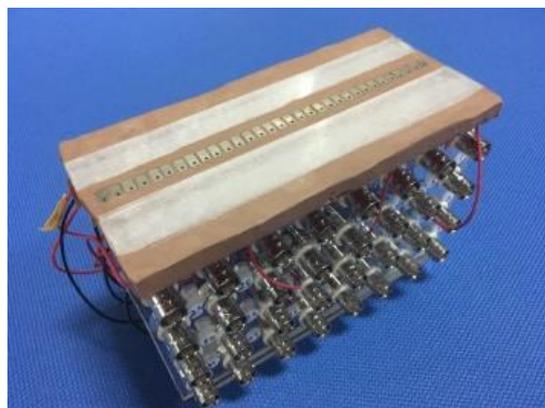


Fig. 4 Picture of developed MEMS Microphone Array

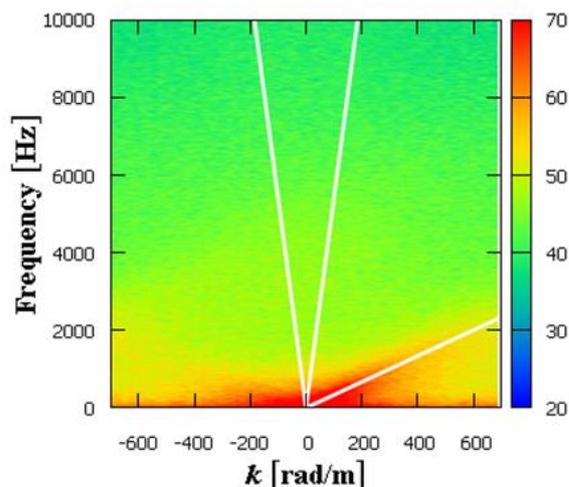


Fig. 5 Wavenumber-Frequency spectrum of wake flow of rear-view mirror model

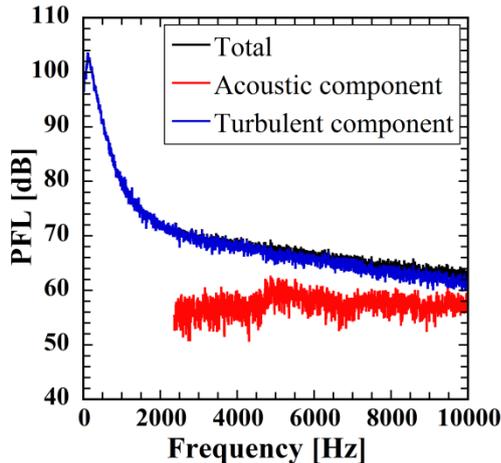


Fig. 6 Pressure spectrum decomposed into turbulent and acoustic fields

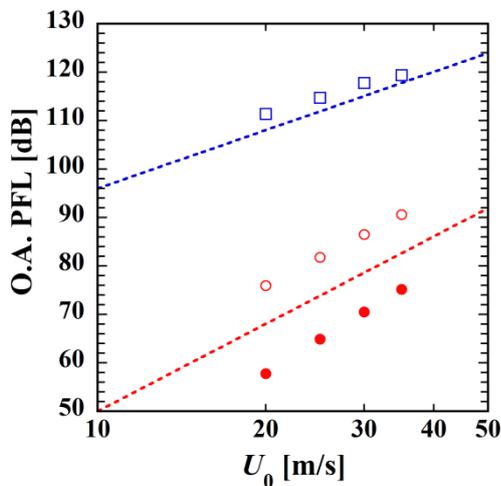


Fig. 7 Dependency of mean flow velocity on sound field and pressure field. Red line: Acoustic pressure^{6th} power law of velocity, Blue line: ^{4th} power law of velocity)

5. 数値解析

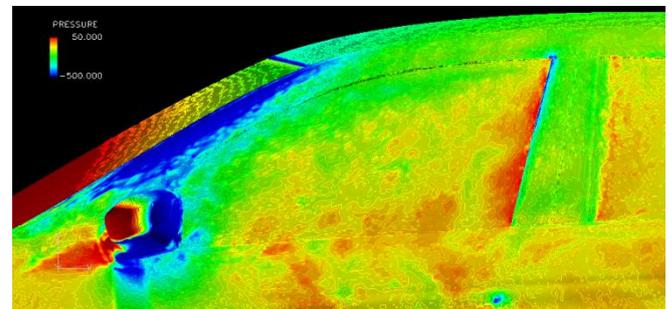
風洞実験により流れ場と音場を分離することが確認され、波数・周波数スペクトル解析の有効性が確認された。そこで自動車周りの流れ場において波数・周波数スペクトルの解析を行った。流れ場は非圧縮性解析によって求めたため、この解析では音場の影響は表れない。現在、外部音場の解析を別途行っており、外部音場が求まり次第、音場についても波数・周波数解析を行う予定である。ここで直接解析ではなく、分離解法を用いた理由は、流一般に流れ場の圧力変動の波数は音場や振動場の波数分布である波数円よりも大きな値を持つため、影響が少ないと考えられているが、実際の車両開発では、流れ場の影響を無視できない場合もあり、はく離領域などで波数円と流れ場の波数の関係がどのようになっているかを明らかにしたいためである。仮に、パネルの曲げ波の伝播速度に基づく波数円の内部に流体の圧力変動の波数・周波数スペクトル成分が存在するのであれば、その圧力変動は曲げ波を効率よく誘起するはずである。一般的なイメージとして、乱流場はランダムだから加振しにくく、音場はコヒーレントだから加振しやすいと思われているが、これはあまり正確な理解ではない。音場であるか、乱流場であるかに関わらず、振動の波数円との関係が最も重要である。ドアミラー後流のように逆流が生じている場合、ガラス面やパネル面に投影される波数ベクトルは、元の波数ベクトルよりも短くなる。周波数は対象面への写像で変

わらないため、この場合は、伝播速度が見かけ上早くなるとみなせる。その場合、流れ場の速度に起因する渦であっても逆流域では見かけの波数が短くなるため、パネル振動の波数円内に流れ場の圧力変動の影響が現れる懸念がある。実際の流れ場においてこのような波数が見かけ上短くなる現象があるのか、あるいはどの程度その程度その影響があるのか必ずしもはっきりとしない。非圧縮性解析で波数・周波数スペクトルを求めた場合、本来、主流速度で対流する成分が逆流等の影響で見かけの波数に影響がでるのかを調べやすい。このことから本研究ではドアミラー近傍の圧力変動に対して波数・周波数スペクトル解析を実施した。

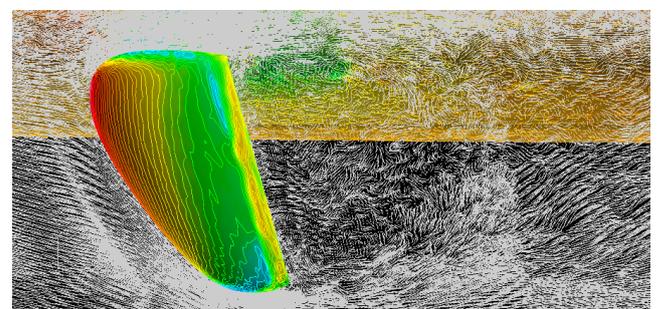
図 8 に解析対象である車体周りの圧力場を示す。A ピラー及びドアミラー部で流れがはく離し、大きな変動が発生している。別途行っている音の解析結果では、この周辺から空力音が発生していることが確認されている。

図 9 は圧力変動の波数・周波数スペクトルの解析結果である。

図中の白い破線が渦の対流速度から予測される波数成分である。ドアミラーの下流では、対流速度から予測される波数よりも小さな成分(伝播速度の速い方向)にシフトする傾向がみられる。特に周波数 1000 Hz でその傾向が顕著である。周波数 1000 Hz の流れがどのような特徴を有しているのか、何故、波数が短くなるのか(逆流による見かけの波数変化が大きい理由)まではまだ不明である。ある特定の周波数のはく離による巻き込みが大きくなるかなどを調べていく必要がある。先に述べたように車内騒音への寄与は音場であるか乱流場であるかよりも、大きなエネルギーを持つ変動が振動の波数円内部にあるかどうか重要である。このため、非圧縮性流れ場であってもはく離領域では波数が小さくなるのであれば、車内騒音への影響が大きくなる可能性があり、対策が必要となる。今後、屋根面などのはく離の小さな領域でも同様の解析を行い、比較検討していく必要がある。



(a) Flow field around a front-side shield



(b) Separated flow around rear-view mirror

Fig. 8 Flow field around a major noise source of automobiles

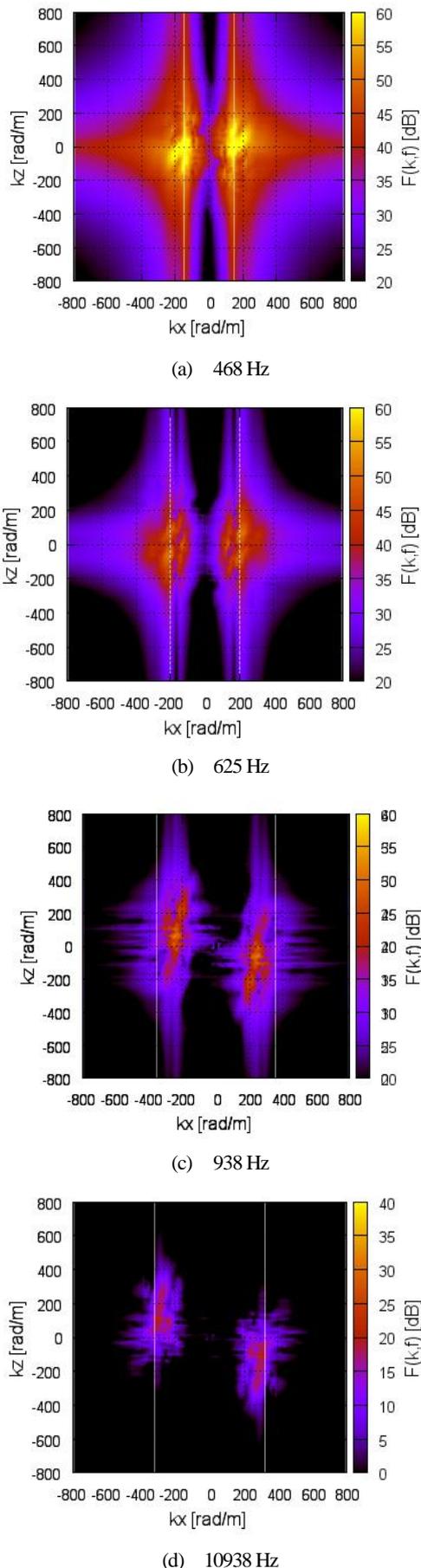


Fig. 9 Comparison of wave number / frequency spectra (incompressible flow simulation data)

5. まとめ

流れに起因した自動車の車内騒音を予測するには、車両周りの流れ場と外部音場の寄与を明らかにする必要がある。外部音場と流れ場を分離する手法として、波数・周波数スペクトル解析について実験及び数値解析による評価を行った。MEMS マイクロホンアレイを用いて風洞実験を行った結果、波数・周波数スペクトルを用いることにより、音場を分離できることがわかった。波数分離によって得られた音場の速度依存性を調べた結果、音圧は速度の6乗に比例することが確認された。

波数を用いる方法は航空機のキャビン騒音を予測にも利用されているが、自動車の場合、走行速度と音速が10倍程度異なることから、航空機と比べて分離しやすく、この方法のメリットを有効に活用できると考えられる。自動車の解析結果に波数・周波数スペクトル解析を適用した結果、スペクトル成分は概ね主流の対流速度に予測される波数に分布しているが、周波数によっては小さな波数領域にシフトしていることがわかった。波数が見かけ上小さくなると、その周波数において車内音に対して流れ場の寄与が大きくなる可能性があり、車内騒音を対策する上で重要なポイントとなる。逆流領域で波数が小さくなる理由として、はく離による見かけの波数の変化と予想されるが、詳細については今後検討していく必要がある。波大規模流れ解析と波数・周波数スペクトル解析を組み合わせることにより車内騒音の予測及び低減技術の開発が進められていくと考えられる。

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) 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
- (4) 加藤由博, 河上充佳, 榎原孝文, 寺門 晋, "横風時の自動車周りで発生する風切り音の数値解析", 2018年自動車技術会秋季大会学術講演会, 講演番号 95, (2018), pp.1-6
- (5) 高阪 文彦, 奥津 泰彦, 濱本 直樹, 塩崎 弘隆, "波数-周波数スペクトルを用いた空力騒音予測のためのSEAモデリング手法", 日本機械学会論文集 C 編 79(806), (2013) 3691-3709,
- (6) 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)
- (7) 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
- (8) 安保慧, 吉野崇, 寺村実, "前方ステップから発生する風切音のガラス透過メカニズム", 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 79, No. 804 (2013), pp.1408-1418.
- (9) Corcos., G. M., "Resolution of pressure in turbulence", J. Acoust. Soc. Amer., vol. 35(1963), pp. 192-199