

車室内音響設計におけるシミュレーションの取り組み

Approaches to Simulation in In-vehicle Acoustic Design

宇治野 正 Tadashi UJINO
前田 昌宣 Masanobu MAEDA
加藤 茂樹 Shigeki KATO

1 はじめに

近年、自動車メーカにおける車両開発の試作レス化、開発期間の短縮が進み、自動車部品メーカに対しても「高品質・低価格の製品を短期開発すること」が強く求められている。この要求を実現する手法として、シミュレーションによる設計が盛んに行われている。シミュレーションは、現物がなくても対象物の挙動を詳しく見ることができたり、構成部品の変更による影響を短時間で確認することなどができる。この実用化には、アルゴリズム研究の発展に加え、半導体技術の発展によるPCの性能向上が大きく寄与している。

こうした流れは音響分野においても同様である。音響シミュレーションによる現象の解析が行われ始めた約20年前は、ワークステーションや解析ソフトなど一式数千万円の投資が必要だった。車室内音場の解析を例にとると、数日間計算させ続け、それでも500Hz以下の低い帯域と2kHz以上の高い帯域しか実用的な結果が得られず、最も必要とされる中域は目処が立たない状態であった。低域から高域までをシミュレートするには非常に大掛かりなコンピュータが必要だったのである。

これに対し、現在では一般的なPCを用いて同じ計算を実行しても、わずか数時間で低域から高域まで実用的な計算結果を得ることができるようになっている。

こうした中、当社では車室内の音作りに対し、一般的な境界要素法や有限要素法、音線法と呼ばれるシミュレーション方式を基礎に、これまで積み重ねてきた音作りのノウハウを組み合わせることで実用化の技術開発を進めてきた。本稿ではスピーカシミュレーションの事例と車室内音場シミュレーションの事例を紹介する。

2 音響分野におけるシミュレーション

音響分野におけるシミュレーションでは、主に「音を出す機器（スピーカ）の挙動」と「音の空間伝播」について計算を行う。

前者では振動系を構成する部品の挙動を調べ、不要な振動を抑える手がかりとしている。材質や形状を変更した際、この挙動がどのように変化するかを調べることで、その改善の効果を事前に検討することができる。

後者では音圧分布や位相分布を求めることで、音源や障害物の影響を調べる手がかりとしている。音源や障害物の位置関係を変更した際、分布にどのような変化が起きるのかを調べることで、前者同様にその改善効果を実測せずとも検討することができる。

音は、波長によって波とビームの2つの性質を併せ持つ。このうち「波の伝播」のシミュレーションには有限要素法（Finite Element Method:FEM）、境界要素法（Boundary Element Method:BEM）という手法が多く使われる。また、波は高周波になると直進性を持つことから、音の進行をビームとして考えた音線法と呼ばれる手法も使われる。各手法の特徴を表1に示す。

表1 音響解析手法について
Table 1 Acoustic analysis methods

	FEM	BEM	音線法
特徴	対象物の内部まで要素分割 内部の挙動に着目した手法	対象物の表面だけ要素分割 表面の挙動に着目した手法 無限放射問題を解ける	音をビームとして扱い、反射、拡散に着目した手法 低域は解析精度が低下
解析上限周波数	要素1辺の長さ：1/6波長 例）解析上限周波数：20kHz 1辺 = (340 [m/s] / 20 [kHz]) / 6 = 0.28 [mm] の要素で対象物を分割		制限なし
計算時間	要素数の二乗に比例		反射の回数と音線の数に比例

これらの特徴を活かし、当社では下記の組み合わせで音響シミュレーションを行なっている。

- FEM：スピーカの振動シミュレーション
- BEM：スピーカの周波数特性シミュレーション
車室内音場シミュレーション
- 音線法：車室内音場シミュレーション

次章では、シミュレーションを活用していくにあたり解決すべき課題と取り組みについて述べる。

3 シミュレーションにおける課題

当社のミッションは「お客様に快適な車室内音場空間を提供すること」である。車室内音場特性を測定し、その特性にあわせてスピーカを設計するためには、車の中で音を聞く際にどういった現象が起きているのかを正しく把握する必要がある。そのためにシミュレーションを活用していくが、そこには大きく分けて2つの課題がある。

【課題】

- ①シミュレーションと実測が良い相関を持つこと
- ②より良い音場空間を提供するための効果的な計算結果の扱い方を確立すること

～課題①について～

我々が目指しているのは、「車室内音場シミュレーションが聴感と一致する」ことである。まずは、聴感への影響が大きい周波数特性や音圧分布について、スピーカシミュレーション、車室内音場シミュレーションそれぞれに以下の目標を立てた。

【スピーカシミュレーション】

- ・周波数特性上で計算結果－実測の相関値0.85以上

【車室内音場シミュレーション】

- ・聴取者近傍の音圧分布で、実測と相関値0.85以上

～課題②について～

車室内での現象が再現できたら、次は、より快適な音場を創りだす活動となる。これを達成するため、以下の取組を行っている。

【スピーカシミュレーション】

- ・部品改良前後の相関解析から、改良パターンと改善結果をデータベース化

このデータベースによって、スピーカ設計の改善を効率良く進める。

【車室内音場シミュレーション】

- ・計算結果から心理指標値を求め、聴感の予測

これにより、補正が必要な周波数とその制御手段を提示できると考えている。

4 スピーカシミュレーション

4.1 精度向上への取り組み

まず、スピーカシミュレーションにおける相関向上の取り組みについて紹介する。スピーカの断面図を図1に示す。

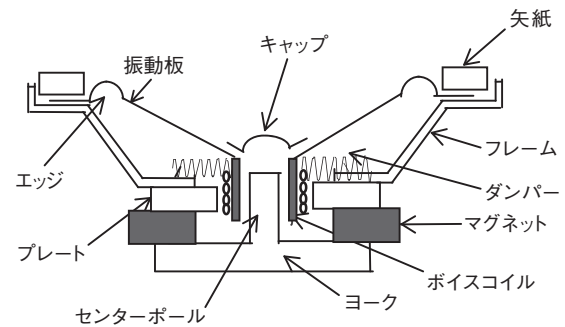


図1 スピーカ断面図

Fig.1 Cross-sectional view of loudspeaker

スピーカシミュレーションとは、2章で述べた通り振動シミュレーションによってスピーカの挙動を詳しく調べることである。表1より、振動シミュレーションを得意とするFEMを用いてスピーカシミュレーションを行う。計算に用いるパラメータと設定方法を表2に示す。

表2 パラメータと設定方法について
Table 2 Parameters and setting methods

	主な設定方法	
密度 [g/cm ³]	便覧などから引用	実物から測定
厚み [mm]	設計値を使用	実物から測定
ヤング率 [N/m ²]	便覧などから引用 (金属など)	実物から測定 (振動板など)
ポアソン比	多くの材質で約0.3	—
ボイスコイルへの加振力[N]	ボイスコイルに発生する電磁力を設計情報から計算	ボイスコイルに流れる電流値と磁気回路の磁束密度などを実測

加振力を除く物性値は、すべての構成部品に適用する。これらのパラメータに実物と同じ値を入力すれば、計算して得られた振動は実物と同じになる。

これらパラメータの中でも特に計算精度に大きく影響するのが、図1の「振動板」「エッジ」のヤング率である。ヤング率は、物体の硬さを表す指標の一つで、値が大きいほど硬い物質である。スピーカの振動板やキャップ、エッジなどに用いる繊維質な素材は繊維の編み方や圧縮時の力、防水処理の有無でヤング率が大きく変化するため、一般に使われる値では計算精度が悪い。

そこで、部品メーカーに協力を依頼し、さまざまな材質の振動板のヤング率をデータベース化した。さらに、そのデータベースを基に、密度や厚さといった部品の仕様からヤング率を推定するシステムを開発した (図2)。

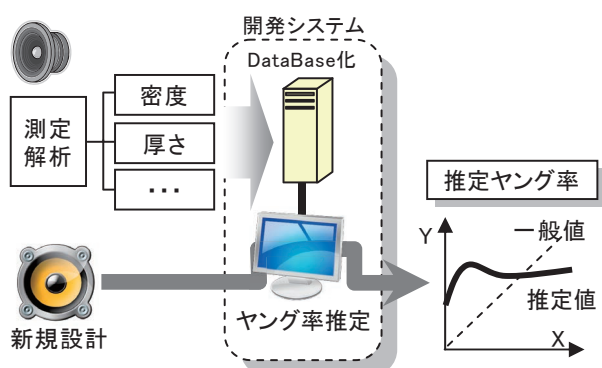


図2 最適ヤング率推定システムイメージ図

Fig.2 Schematic diagram of system estimating optimum Young's modulus

このシステムにより、振動板試作前の計算精度が向上し、試作回数低減による時間と費用の削減に大きく貢献するとともに、スピーカの挙動についてより正確に把握できるようになった。さらなる精度向上に向けて、試作前後のヤング率を比較し、差分要因を検討、ヤング率予測システムへフィードバックする活動を継続して行なっている。また、ヤング率の実測が非常に難しいエッジなどの変形しやすい材料は、質量と共振周波数の関係からヤング率を推定する手法も確立した。

次にボイスコイルへの加振力は、スピーカのボイスコイルに流れる電流、プレート・ヨーク間に発生する磁束密度、磁束を横切るコイルの長さから求めている。

こうして得られた振動シミュレーション結果を用い、BEMによる音響シミュレーションを実施する。表3に実測との相関値を示す。推定システムにより、相関値が向上していることが分かる。

表3 実測との相関値

Table 3 Correlation coefficient between measured value and simulated value

	相関値 (20Hz～15kHz)
一般的な値	0.78
推定システム	0.93

現在では約15kHzの帯域まで相関値0.9以上（極めて高い相関）を確保できるようになり、目標を達成した。図3に実測と比較した一例を示す。

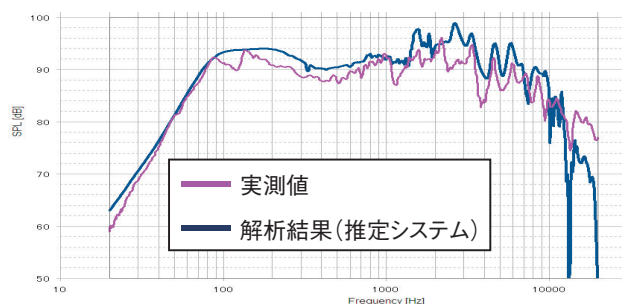


図3 周波数特性の実測との比較

Fig.3 Comparison of frequency response between measured curve and simulated curve

4.2 改善手段の確立への取り組み

特性の改善活動については、下記のプロセスで内容を分析し、それらの結果をデータベース化している。

- 計算結果より最も改善効果の高い部位を抽出
- 形状・物性値変更により再計算
- 差分を相関分析

相関分析は、形状・物性値などの変更により振動に変化があった周波数の相関が下がることに着目し、改善の影響度を見える化し、改善効果を予測するためのデータベースにしている。このデータベースもヤング率予測システム同様、フィードバックし、スピーカ設計モデル毎に蓄積を図っている。

5

車室内音場シミュレーション

5.1 精度向上への取り組み

本章では車室内音場シミュレーション活用事例を紹介する。スピーカシミュレーションとの違いは、下記の2点である。

- 車室内は空間の容積が大きく
音波の伝搬特性を考慮しなければならない
- 反射・吸音する内装材、障害物が多く
空気中の伝搬特性が複雑である

従って、スピーカ設計と同じFEM,BEMを用いると、要素数が増加し、可聴帯域20Hz～20kHzの計算に数週間必要になることがある。そこで、表1の計算時間にあるように、計算する帯域でシミュレーション手法を使い分けることで時間短縮を図った。表4のように周波数1kHzを境界として音線法とBEMを使い分けると、計算時間を5時間以内に抑えることができる。

表4 帯域と手法

Table 4 Analysis method suitable for the characteristics of each band

	波 (Wave)	ビーム (Beam)
特徴	音が定常的 波動方程式で解く	音が直進性のビーム 幾何および統計で解く
手法	BEM	音線法

図4 (a) にBEMによる聴取位置近傍の音圧分布の一例を、(b) に音線法による音の到来方向の一例を示す。

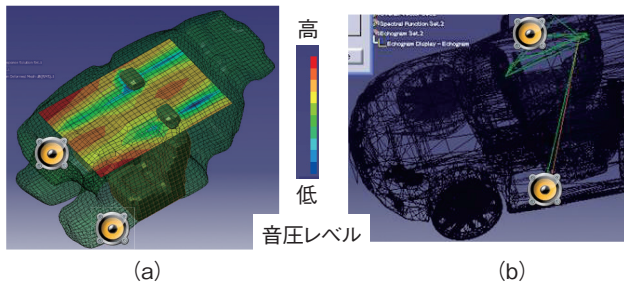


図4 (a) BEMによる聴取位置近傍音圧分布
(b) 音線法による音の到来方向

Fig.4 (a) Distribution of sound pressure in the vicinity of listening position by BEM
(b) Direction of arrival of the sound by Sound ray tracing method

5.2 相関値向上への取り組み

この使い分けによる方法で、スピーカを実車の位置に配置してシミュレーションし、実測した物理特性と結果の相関値を検証している段階である。この相関値が向上できれば、車室内音場シミュレーションの結果をスピーカレイアウトの設計や、音場補正プロセスへ活用することが期待できる。さらに聴感特性を求め、聴取時の心理値予測も並行して活動している。

6

今後

スピーカシミュレーションと物理特性の相関が向上し、この結果を車室内音場シミュレーションに織り込むことで、設計から音の空間特性までを視覚化できた。

しかし、音は最終的に聴感で判定されるものである。音圧特性が同じでも、聴感で異なる聴こえ方になる。従って、物理特性に対するシミュレーションの誤差を極小化することだけにとらわれることなく、聴感を予測することが今後のシミュレーション技術に求められる。我々は聴感と相関関係の強い物理特性を検証し、当分野の技術開発を推進していく。

筆者紹介



宇治野 正
(うじの ただし)

CI技術本部第一技術開発室



前田 昌宣
(まえだ まさのぶ)

CI技術本部第一技術開発室



加藤 茂樹
(かとう しげき)

CI技術本部第一技術開発室主査