

車室内音場シミュレーション技術の開発

Analysis of the Sound Field within a Car through the Boundary Element Method and Measurement

長谷川 知己, 今西 快友

Tomomi Hasegawa, Yoshitomo Imanishi

要 旨 車室内の音響設計を効率良く実施するための手段として、車室内の音場特性シミュレーション技術の提供を目指した。簡易模型を用いて、壁面、座席、カーペットなどの物性値の扱いを検討した。次に、完成車での解析を実施した。実測と解析の比較結果を通して、材料、壁面の取り扱い、および課題について報告する。

Summary To improve the design of the sound field within a car through simulation, we have investigated the accuracy of boundary element method analysis by comparing analysis results to measurements. First, through a simplified model, we examined how to treat the walls, seats and floor carpets in a car interior. Next, we have analyzed a full-size car with seats and floor carpets, and we report on the comparison of the simulation results to measurements and problems that we encountered when applying the simulation results to an actual car design.

キーワード：シミュレーション, 音場, 測定, 解析, 境界要素法, 車

Keyword: Computer aided engineering, Modeling, Simulation, Boundary Element Method, Sound field, Car

1. まえがき

近年のCAEの発展とともに、設計の現場では試作を行わないものづくりが主流となっている。音響メーカーにおいても、最近の車室内の多チャンネル化などを鑑みると、実験と解析の連携による効率的な音響設計が重要視される。一方、実際に設計の現場で解析を利用するためには、精度と課題を把握しておくことが重要となる。そこで筆者らは、実用性を考慮した解析手法の有効性を検討した。最初に、簡易車室模型を用いて、壁面および、材料物性値の扱いについて検討を実施した。次に、実車適用へ向け、精度の高いモデルの作成を行い、実車内で音源位置を変えた検討を実施した。最後に、座席シート、床カーペットを入れた完成車の状態で、実測と解析の比較を実施した。これらの結果と課題について報告する。

2. 対象モデル

対象車両は2BOXタイプの小型車とした。車室内にはさまざまな内装材が存在する。本報告では、特に解析の精度に影響を与えると思われる座席シートと床カーペットについて着目した。事前検討に用いる簡易車室模型は、この車室内の大よそ1/2スケールを目安に、アクリル材(壁面:t=10mm, 座席シート:t=30mm)を用いて作成した(図1)。また、座席シートと床カーペットについては、実際に対象車両で使用されている材料を用いた模型も作成した。

一方、解析モデルは、車室内の空間を3次元CADでモデリングし、そのデータを利用した。特に、実車をモデリングする際には、できるだけ精度の高い実車モデルを実現できるように、非接触型の3次元形状測定器を用いて、実際に車室内内側の形状を測定し、デー

タ化した(図2)。

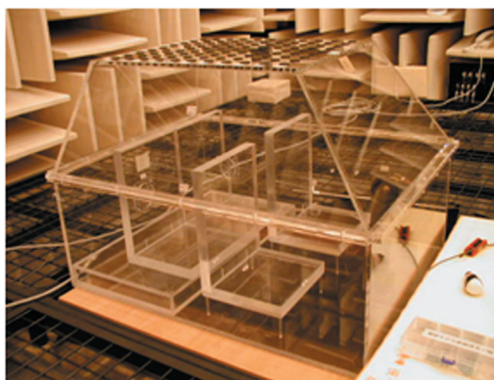


Fig.1 Simplified model (scale = 1/2)

図1 簡易車室模型 (1/2 スケール)

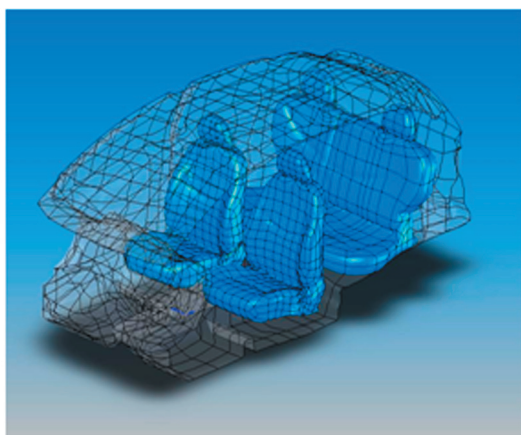


Fig.2 3D-CAD model of a cabin

図2 実車 3D-CAD モデル

3. 解析条件

解析手法は、媒質を扱えるように改良を施した境界要素法を用いて、車室内の音場特性の解析を行う⁽¹⁾。数値解析モデルは、CADモデルから作成した。解析精度を保つため、要素サイズは上限周波数の波長の1/5～1/6程度に設定するのが望ましい⁽²⁾。本報では、モデル規模と計算リソースを考慮して、解析帯域は1kHz上限とし、要素サイズは約7cm(簡易車室模型で約2500要素、完成車の状態で約8200要素)とした。

音源、壁面、座席、床を以下のように設定して、検討を実施する⁽³⁾⁽⁴⁾。

(1) 音源

音源のパラメータは、実際に使用されているスピーカ電気的および、機械的インピーダンスの測定値を用いた。加振力は現実的に即して、定電圧駆動とした。

(2) 壁面

車室内壁面は、一律の吸音率から換算した音響インピーダンスを設定した。これにより、内部から外部への音漏れ(音の透過)、吸音などを考慮する。

(3) 座席シート、床カーペット

車室内で使われている座席シート、床カーペットの音響パラメータは、垂直入射吸音率計測装置を用いて測定したものをを用いた⁽⁵⁾。座席シート材は内部を音が透過する媒質とみなし、その媒質条件は周波数特性を持つ伝播定数、実効密度を適用した。床カーペット材には、境界条件として音響インピーダンスを適用した。

4. 実測と解析の比較手法

解析の精度評価は、実際に測定した周波数特性と解析結果とを比較することで行った。比較を実施する観測点は、車室内に運転者の耳元と同じ高さになるように基準面を設け、この面上に設定した。

5. 簡易車室模型での検討

実車への適用を試みる前に、簡易車室模型を用いて解析の精度を評価した。

5.1 壁面の扱い

最初に、条件を簡単にするため、座席シートや床カーペットを配置していない状態で、実測と解析結果の比較を行った。従来のように、アクリル材の壁面を剛壁として扱うと、モード周波数でのピークディップが顕著に生じてしまい、実測との差異が目立つ傾向にある(図3)。実際、アクリル材で作成した簡易車室模型の壁面の場合でも、機械振動を介して生じる音漏れなどによるエネルギーの損失があると考えられる。こ

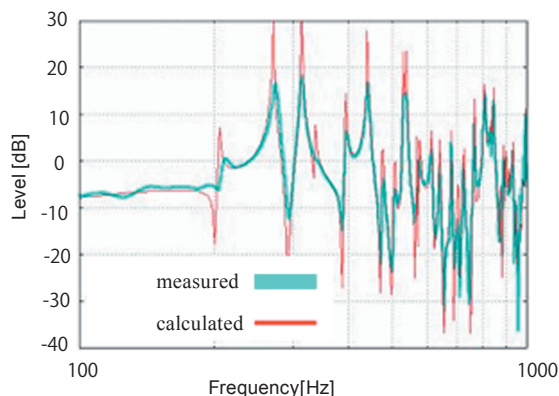


Fig.3 Frequency response of simplified model (wall: rigid)

図3 周波数特性比較グラフ(壁面:剛体)

れを想定して、壁面に適度な吸音率を仮定した音響インピーダンスを設定した。その結果、モード周波数でのピークが抑えられ、実測との差異が小さくなり、精度が向上した(図4)。

本報告では、壁面の吸音率を一定値として扱い、検証を行った。実際には、周波数帯域により壁面からの音漏れや吸音の状態が変化すると考えられる。これらを考慮し、境界条件として周波数特性を考慮した音響インピーダンスを用いれば、さらに精度が向上すると予想される。

次に、座席シートや床カーペットを簡易車室模型内に配置した場合の評価について述べる。

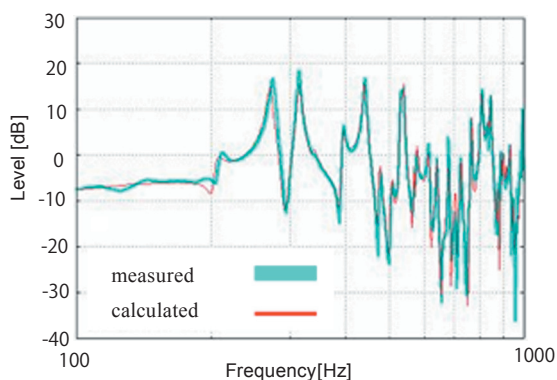


Fig.4 Frequency response of simplified model (wall : absorptive)

図4 周波数特性比較グラフ(壁面:吸音性あり)

5.2 座席シートの扱い

通常のウレタン材、および実車の座席シート材を用いて座席模型を作成して評価を行った(図5)。物性値は、それぞれの材質からサンプルを切り出して測定をした値を用いた。



Fig.5 Seat model (left; urethane, right; seat material of a car)

図5 座席模型(左:ウレタン材,右:実車の座席材)

通常、境界要素法を用いて解析する場合は、座席の境界面に音響インピーダンスを設定して解析を実施する。この場合、座席の表面の影響のみを考慮するため、実測と解析が合わない問題があった。そこで、本報告では、媒質を扱えるように改良した解析手法を用いて、実際に座席シート内部を音が透過する媒質として扱えるようにした。その結果、座席と壁面との相互作用など、実際に近い状態の音の伝播を解析で再現することができ、精度の高い結果を得ることができた(図6)。

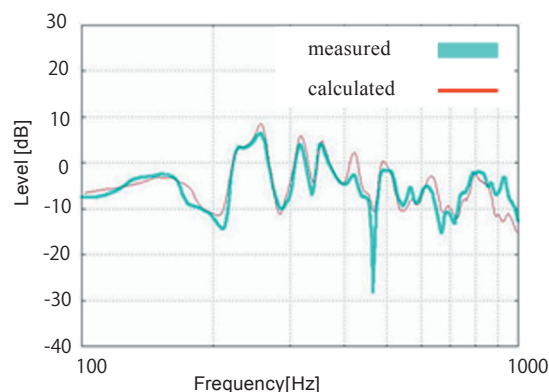


Fig.6 Frequency response of simplified model (including all seats made of materials actually used in a car)

図6 周波数特性比較グラフ(座席あり)

5.3 床カーペットの扱い

前席側のフロントカーペットと後席からトランクエリアに掛けて敷かれているリアカーペットを切り出して、簡易車室模型に敷いて評価を行った。物性値は、座席と同様に、実際にサンプルを切り出して測定をした値を、音響インピーダンスとして床面の表面に設定した。その結果、リアカーペットを配置した場合は、材質そのものの影響が少ないことが分かった。一方、フロントカーペットを配置した場合、座席シートの場合よりも実測との差異が拡大した(図7)。実際のフロントカーペット材は、表面に音を透過しない樹脂シート部を含んだ多層構造になっている(図8)。一般的に、音響パラメータの測定では試料が均一材料であることを仮定しているため、このような多層構造の場合は測定結果にばらつきを生じる。このことが実測と解析の差異の要因と考えられる。フロントカーペット材のような多層構造になっている材質を評価する場合は、物性値の扱い方および測定方法について、さらに検討が必要である。

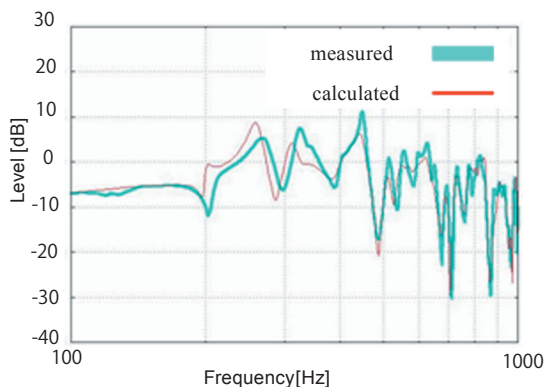


Fig.7 Frequency response of simplified model (including floor carpet made of materials actually used in a car)

図7 周波数特性比較グラフ (床カーペットあり)



Fig.8 Front floor carpet (cross-section)

図8 フロントカーペット材断面

6. 完成車での検討

簡易車室模型による検討の結果を踏まえて、実車への適用を試みた。

6.1 実車形状測定と解析条件

正確な形状で解析用の実車モデルを作成するため、非接触型3次元形状測定器を用いて車室内部の壁面形状を測定した。これによって得られた3次元CADモデルから解析モデルを作成した。

(1) 床カーペットの扱い

前述のように、多層構造として床材を扱うのは困難である。そこで、取り扱いを簡略化して、壁面と同様に、床カーペットも一律の吸音率を持つと看做した音響インピーダンスを用いた。

(2) 座席シートの扱い

座席内部は、前述と同様に、内部を音が透過する媒質として扱う。

6.2 音源の位置違いの検討

実車においても、簡易車室模型と同様の手順で評価を実施する。

最初に、条件を簡単にするため、座席シートや床カーペットを配置していない状態での実測と解析結果の比較を行った。この際、実車内で音源位置を変えた場合の実測と解析の比較検討を実施した。

(1) 解析条件

音源については、位置を自由に変えて検証できるように、別筐体のスピーカを用いて、検討を行った(図9)。また、壁面などの解析条件は前述と同様に、一律の吸音率から換算した音響インピーダンスを設定した。



Fig.9 Loudspeaker for measurement

図9 測定用音源

(2) 実測と解析結果の比較

音源の位置を車室内の前・中・後に設置し、実測と解析の比較を行った。その結果、若干帯域によっては差異が見られるが、音源位置違いによる傾向は捉えていることが確認できた(図10)。音源位置の違いにおける解析の有効性も同時に確認することができた。

6.3 完成車での検討

最後に、実際に使用されている、座席シート、床カーペットを入れた、完成車の状態で検討を行った。音源については、実際にドアに取り付けられている音源を用いて解析を実施する。

(1) 実測と解析結果の比較

実測と解析の比較を行った結果を報告する。実際に比較を実施した観測点、前席2箇所(運転席、助手席)と後席2箇所(後右側、後左側)の計4箇所の位置を、CADモデル上に示す(図11)。運転席側ドア音源で加振した場合の、実測と解析の音圧比較結果(図12)をみると、帯域によっては、実測と解析の差異がみられる。要因としては、ダッシュボード周りの複雑な形状や座席の構造が十分に評価されていないこと、床カーペット、座席の取り扱いが十分ではない、などが考えられる。一方、結果について、音響設計を行っている

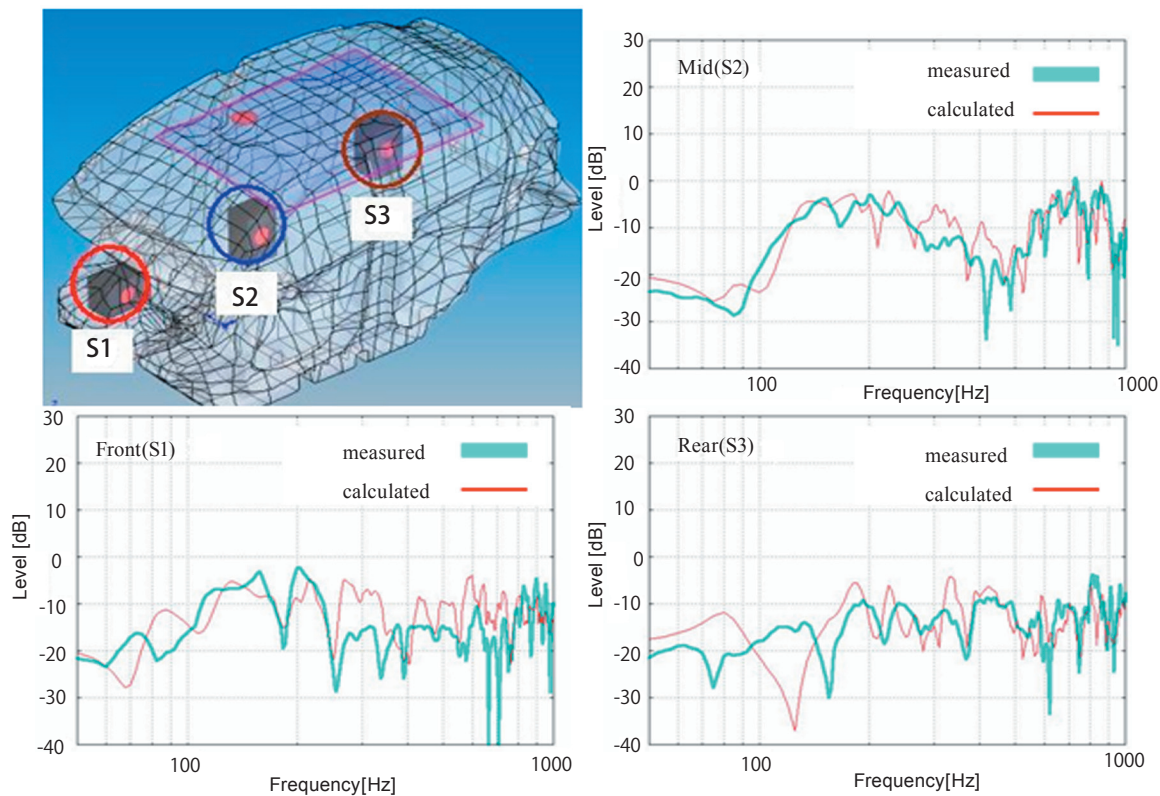


Fig.10 Frequency response of car model at driver's position

図 10 音源位置違いによる周波数特性比較グラフ

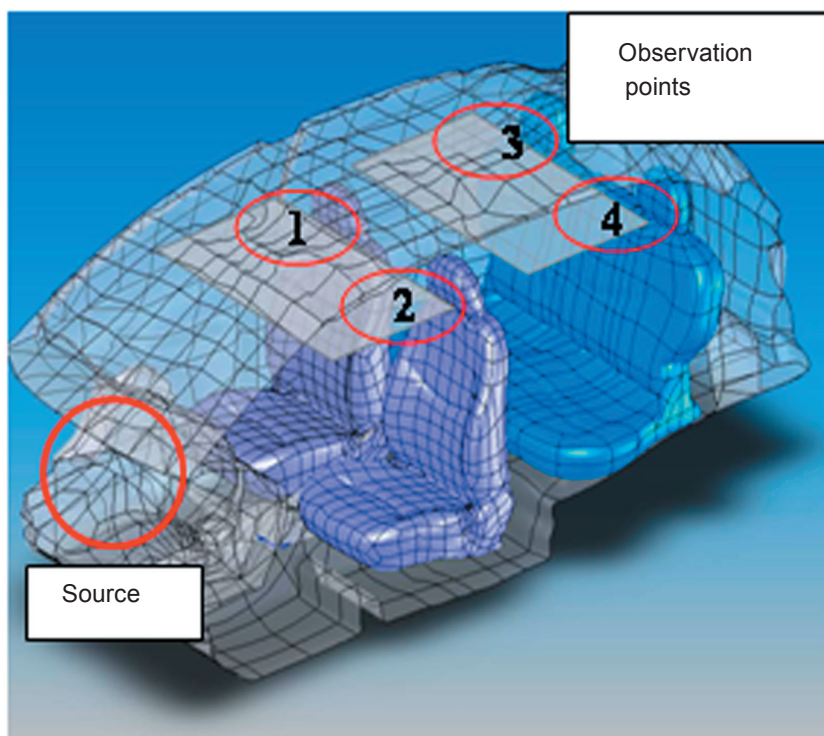


Fig.11 Observation points on Reference plane

図 11 観測点4箇所

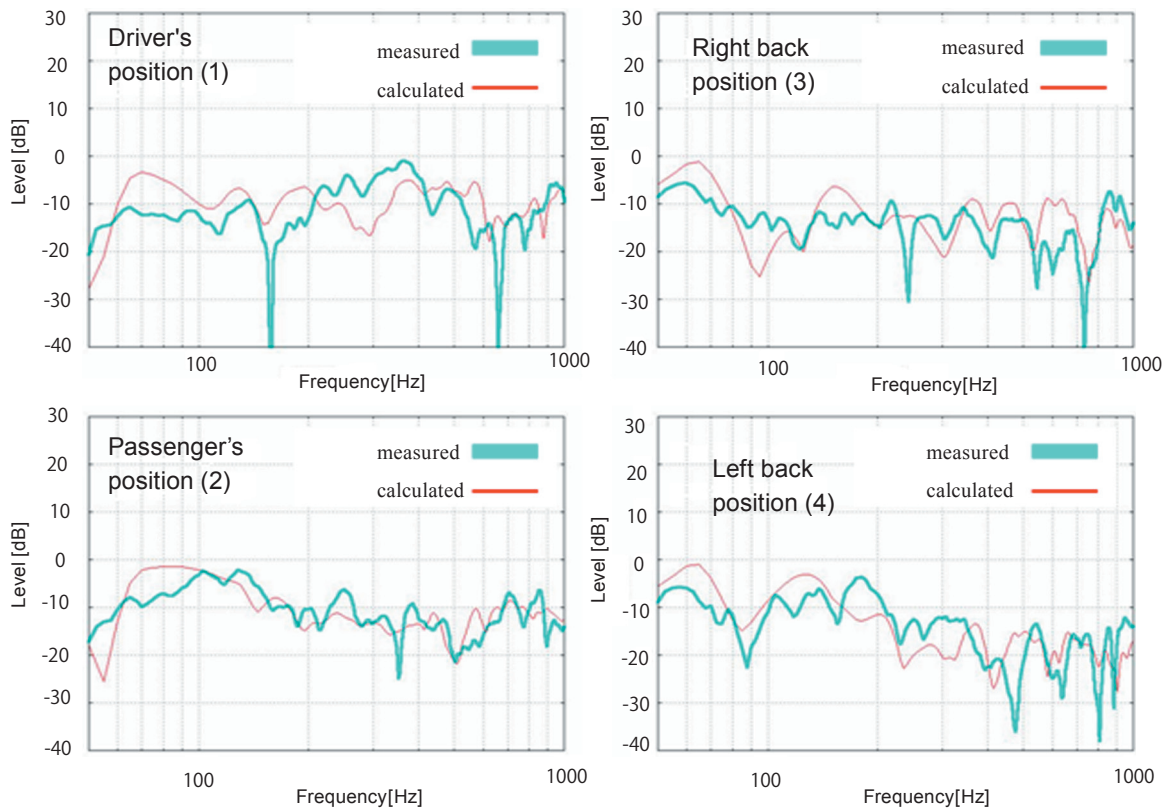


Fig.12 Frequency response of car model at four observation points (with seats and floor carpets)

図 12 観測点位置違いによる周波数特性比較グラフ

設計者の意見なども取り入れて、全体を俯瞰すると、音圧特性の傾向は概ね捉えられていると評価できた。完成車の解析においては、精度の面では改善の余地は多々あるが、解析を用いて、ある程度の傾向を掴むことができた。

7. まとめ

以下に、本報告の内容をまとめる。

- (1) 簡易車室模型を用いて、壁面、座席シート、床カーペットの取り扱いを検討した。適切な音響パラメータを設定することで精度が向上することを確認した。
- (2) 実車を用いて、音源位置違いによる検討の後、床材、座席が入った完成車の状態で実測と解析の比較を実施した。床カーペットを一律の吸音率の材料、座席シートを透過性の材質として扱った。前後の4箇所の観測点で、実測と解析結果の比較評価を行った結果、精度に改善の余地はあるが、概ね全体の傾向を掴めることが確認できた。

8. 謝辞

本開発を進める上で、MBG オーディオ開発課の皆様には多大なるご協力を頂きました。理解と支援をして下さった方々に心から感謝いたします。本開発が、よりよい車室内音場設計に貢献できれば幸いです。

参考文献

- (1) 宇津野秀夫, 他: 多層形吸収材垂直入射吸音率の境界要素法による予測, 機械学会論文集 (C 編) 56 巻 532 号, p. 88-92 (1990)
- (2) 室内音場予測手法 - 理論と応用 -, 日本建築学会, (2001)
- (3) 白木万博: 騒音防止設計とシミュレーション, 産業科学システムズ, (1987)
- (4) 山口道征: 多孔質材料の吸音特性, 音響学会誌, 59 巻 6 号, p. 328-336 (2003)
- (5) J. Y. Chung and D. A. Blaser: Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory: J. Acoustic. Soc. Am, 68(3), p.907-913, Sept. (1980)

筆 者 紹 介

長 谷 川 知 己 (はせがわ ともみ)

技術開発本部 モーバイルシステム開発センター
サウンド技術開発部。現在、車室内の音場シミュレーションに従事。

今 西 快 友 (いまにし よしとも)

技術開発本部 モーバイルシステム開発センター
サウンド技術開発部。入社以降スピーカの設計、開発業務に従事。現在は音場解析に関する研究開発に従事。