

OptiStruct を活用した音響・振動・電気回路連成シミュレーション による高精度音響設計

2025年6月3日

パナソニック コネクト株式会社

技術研究開発本部 ソリューションディベロップメント

基盤シミュレーション技術開発部

藤本 宮本（発表者）

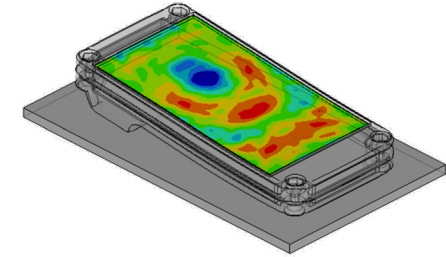
アジェンダ

- ・ 自己紹介
- ・ 取組背景
- ・ 音響・振動・電気回路連成シミュレーション開発
- ・ 事例紹介①：車載スピーカー（ドアスピーカー）
- ・ 事例紹介②：ホームスピーカー（3wayスピーカー）
- ・ まとめ

プロフィール

■2000～ 松下通信工業キャリア入社

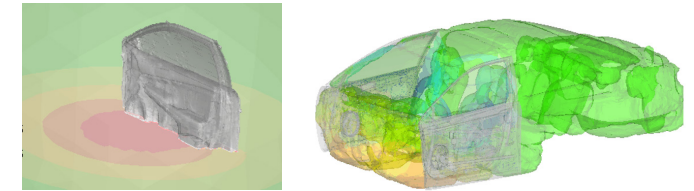
- ・携帯電話の落下シミュレーション技術開発



携帯電話落下SIM

■2014～ パナソニック（株）

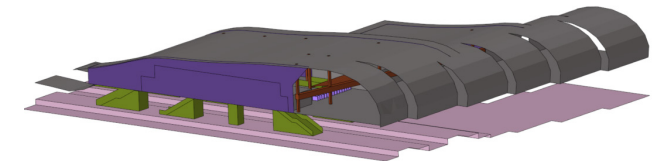
- ・車載機器の衝撃、振動、音響シミュレーション技術開発



車載スピーカー音響・振動SIM

■2022～ パナソニックコネク ト（株）

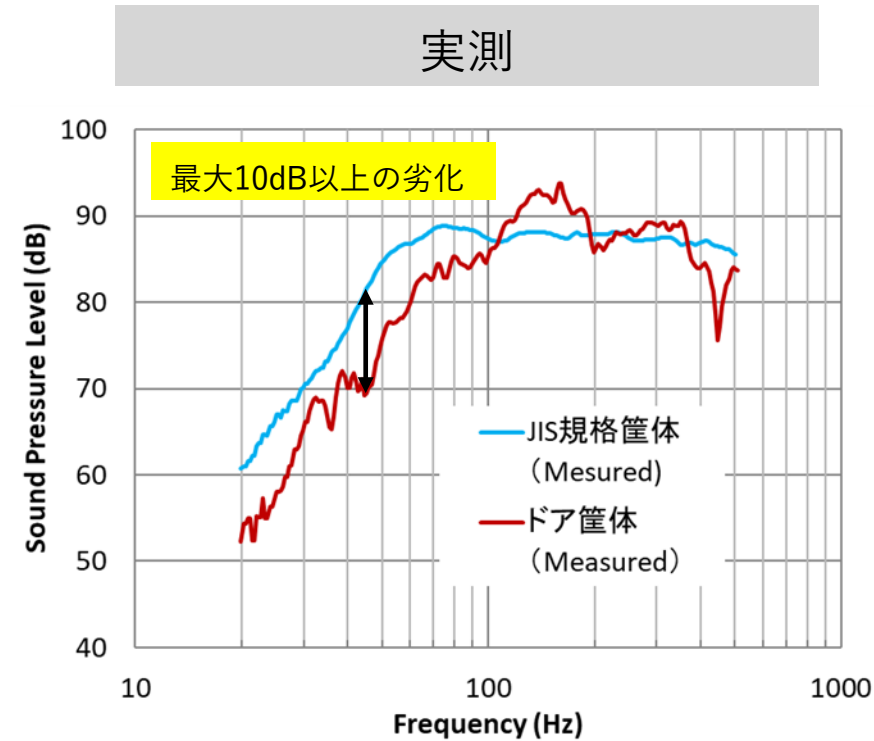
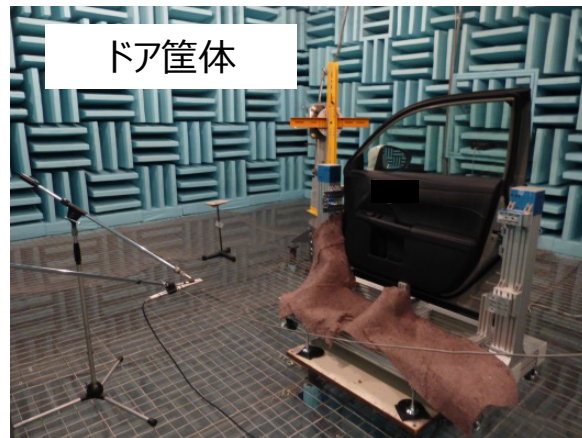
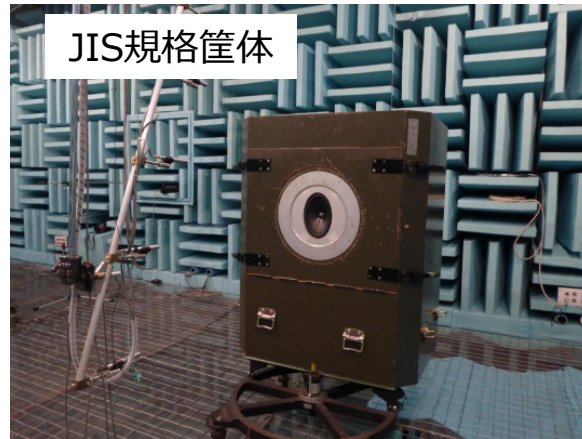
- ・音響製品シミュレーション技術開発
- ・大規模空間音場SIM技術開発



大規模空間音場SIM

取組背景

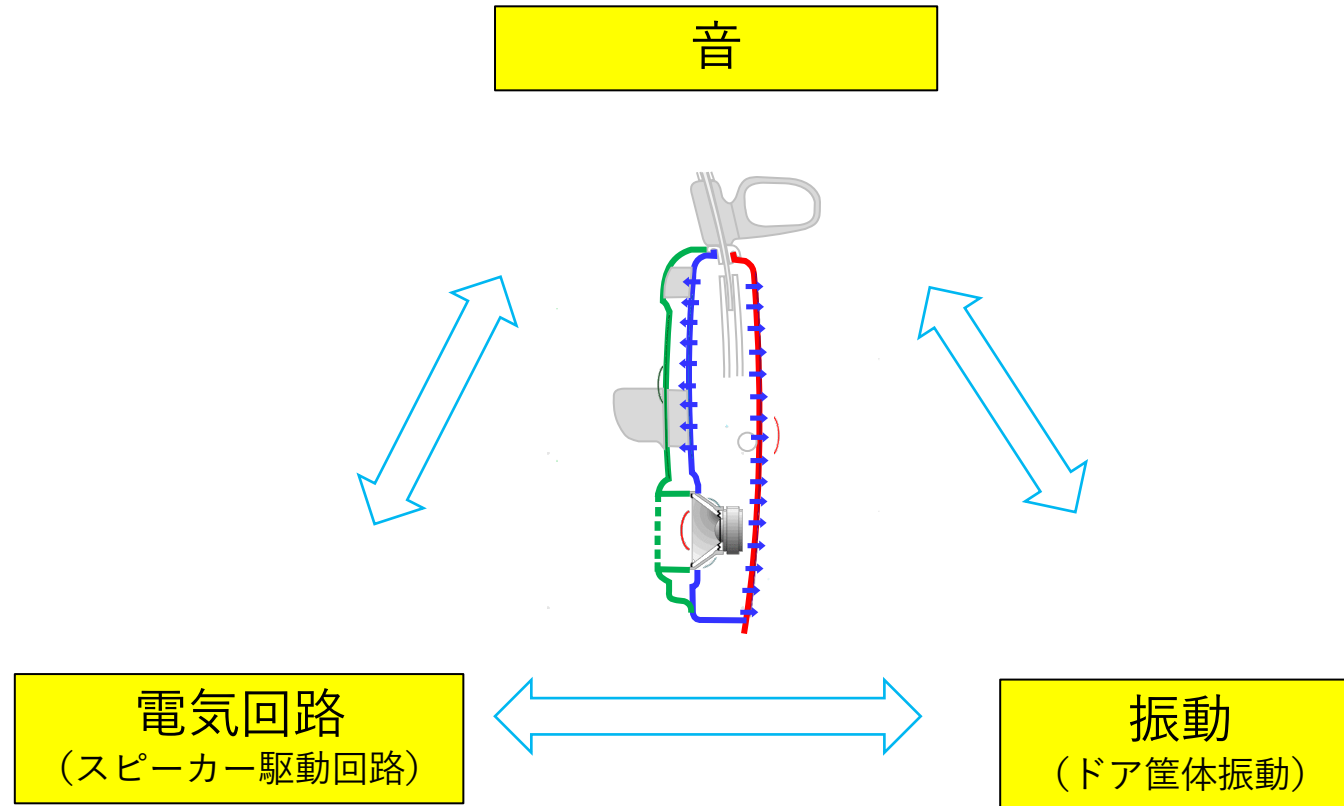
車載スピーカーを車両に設置したときの、振動課題、音質劣化の要因を解明したい



スピーカー正面1mにおける音圧測定結果

開発目標

音・振動・電気のマルチフィジックスシミュレーション技術構築を目指す



音響ミュレーションソフト選定

ベンチマーク結果より、初期投資不要、機能的に候補Aに劣らない 候補B「OptiStruct」を採用

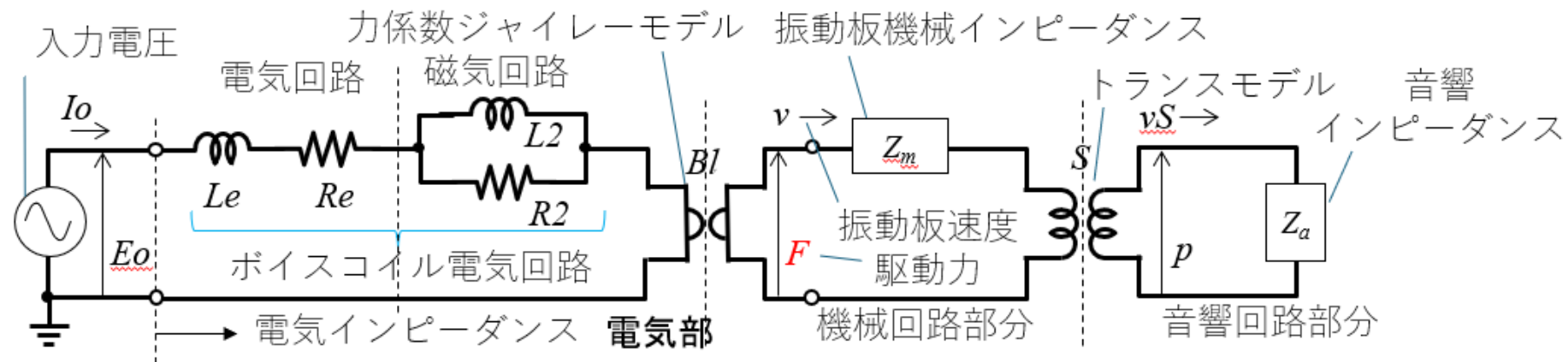
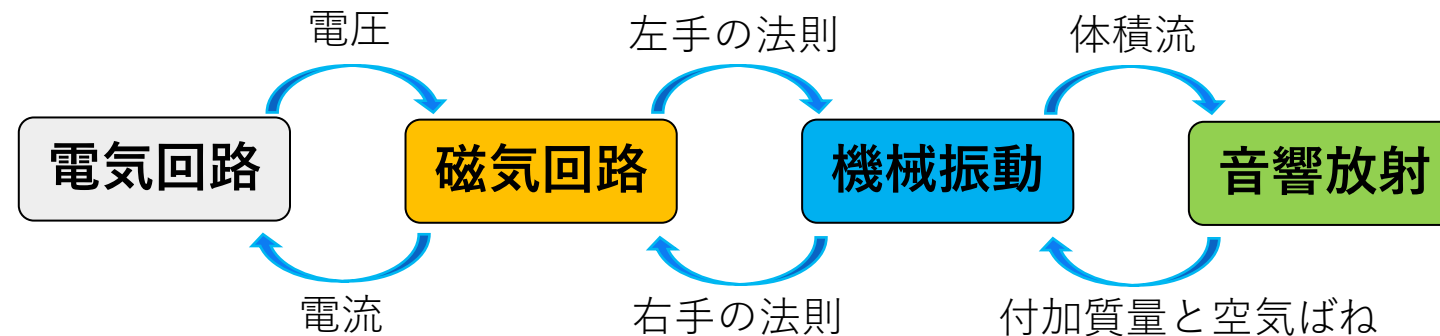
| | 候補A LMS Virtual.Lab Acoustic | 候補B HyperWorks (OptiStruct) | 候補C ANSYS+ WAON |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 特徴 | 音響解析専門ソフト (FEM) | 構造解析ソフト (FEM) (近年音響解析機能を強化) | 構造 + 音響解析ソフト (BEM)の組合せ |
| 実績 認知度 | ◎ | ○ (振動解析実績有り) | △ |
| 機能 | ◎ | ○ | △ |
| 大規模モデル対応 計算スピード | ○ | ◎ | × |
| 初期投資 | × | ◎ (保有済/使用実績大) | △ |

※2014年当時の資料抜粋

音響・振動・電気回路マルチフィジックスシミュレーション開発

スピーカー解析手法（従来：音響等価回路手法F-vモデリング）

電気、磁気、機械、音響、のすべての物理現象を、集中定数の電気回路に置き換えて計算



シングルユニットスピーカシステムのF-v変換則に基づく音響等価回路モデル

電気回路と機械振動系のアナロジー（類似性）

従来手法

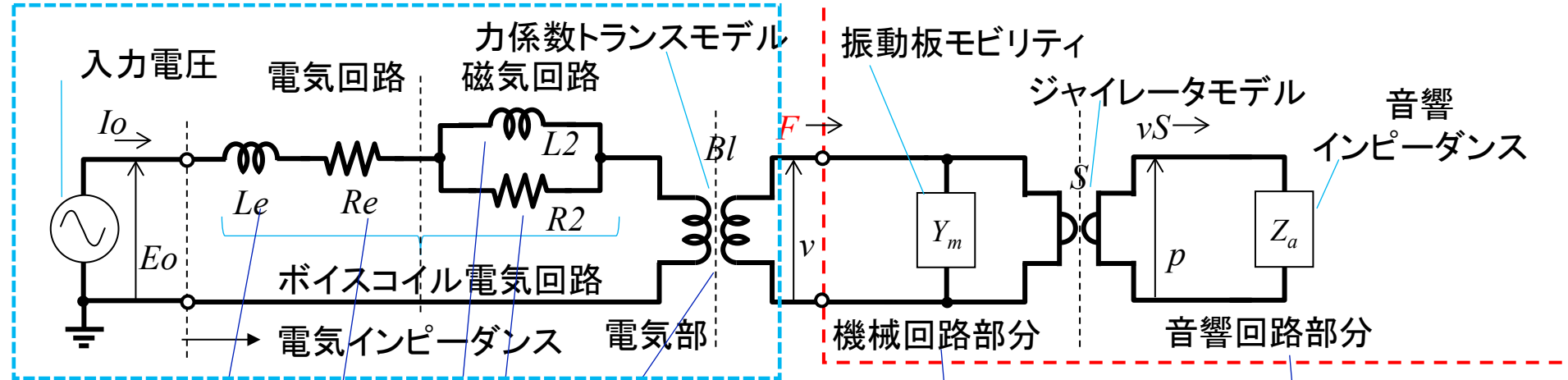
| 電気系 | 機械系F-vモデル | 機械系F-iモデル |
|---------------|-----------|---------------|
| (Spice回路) | (古典的等価回路) | (1Dソフト採用等価回路) |
| 電圧 E | 力 F | 変位速度 v |
| 電流 I | 変位速度 v | 力 F |
| インダクタ L | 質量 m | ばね逆数 $1/k$ |
| 抵抗 R | 粘性抵抗 c | 粘性抵抗逆数 $1/c$ |
| キャパシタ逆数 $1/C$ | ばね k | 質量逆数 $1/m$ |

FEMと親和性良し
今回採用

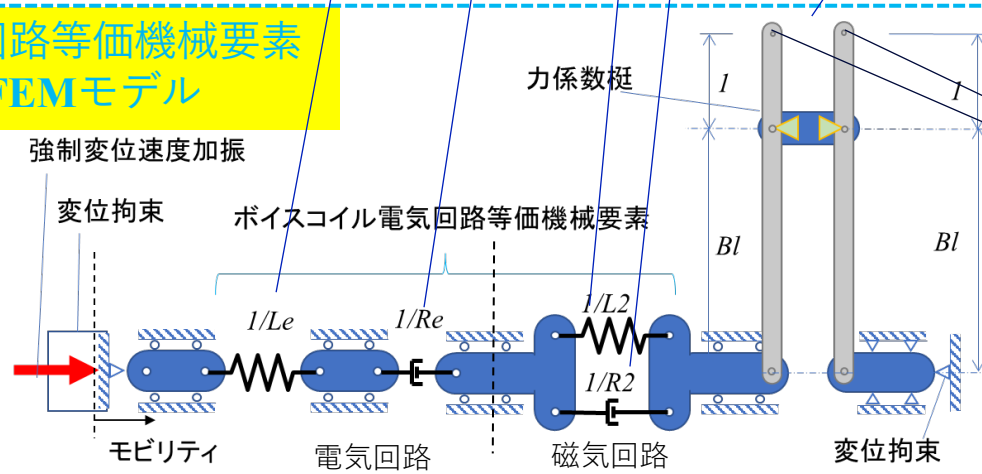
スピーカー解析手法（開発手法）

電気回路を機械要素に置き換える「電気回路等価機械要素法」を開発

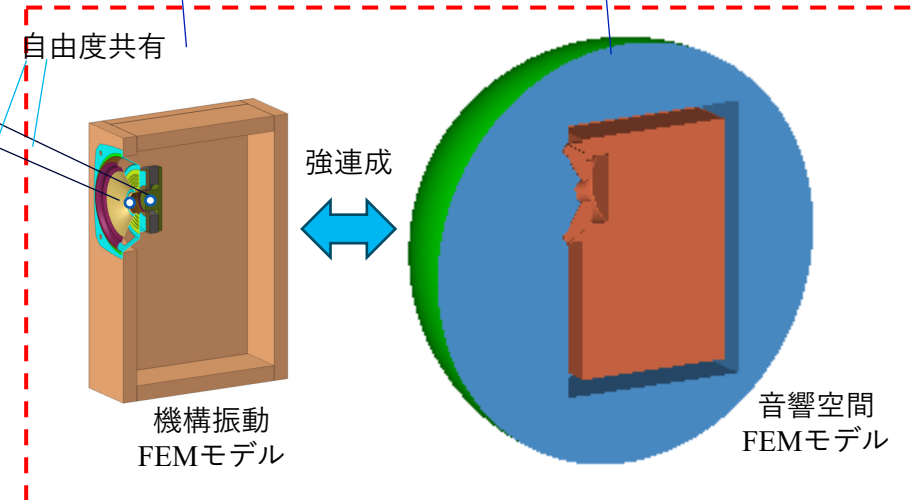
F-i変換則に基づく
等価回路モデル



電気回路等価機械要素
FEMモデル

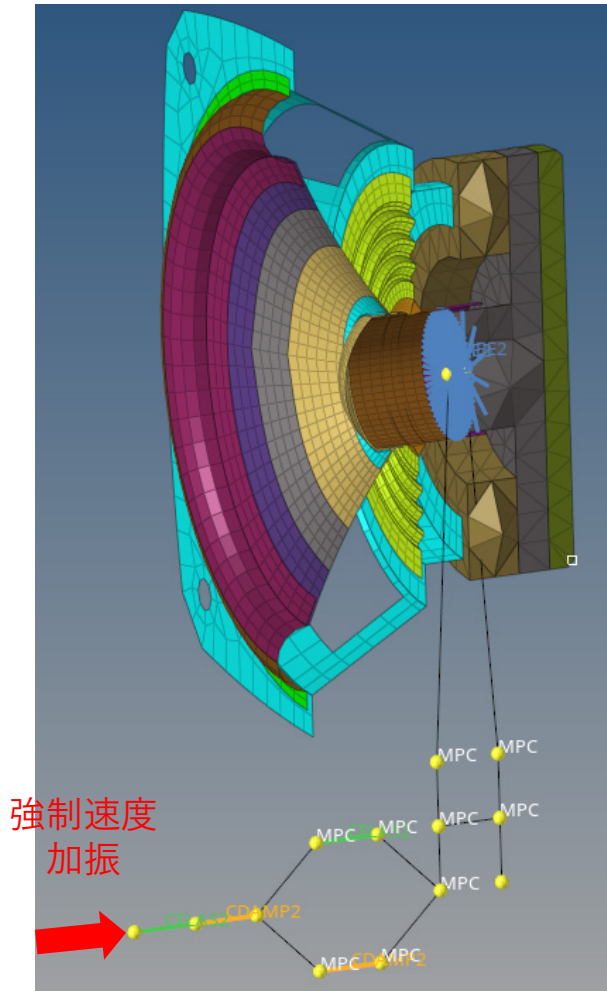


自由度共有

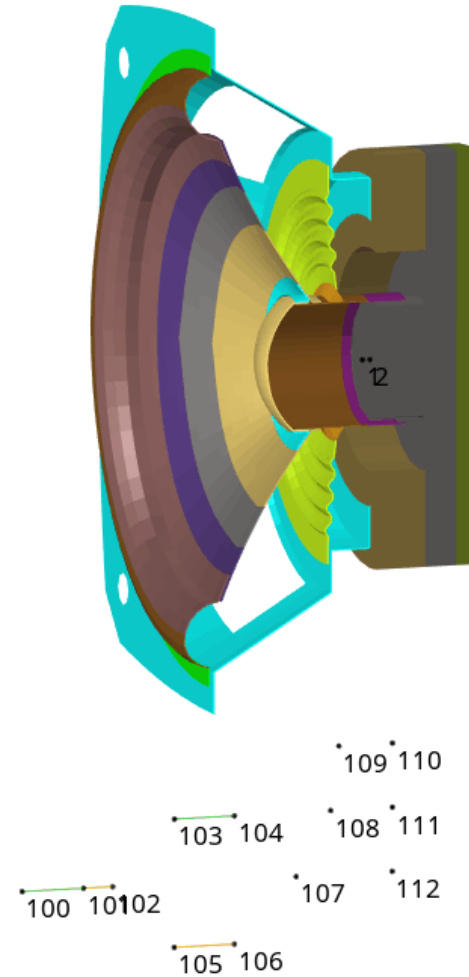


※ 2023秋日本音響学会にて発表

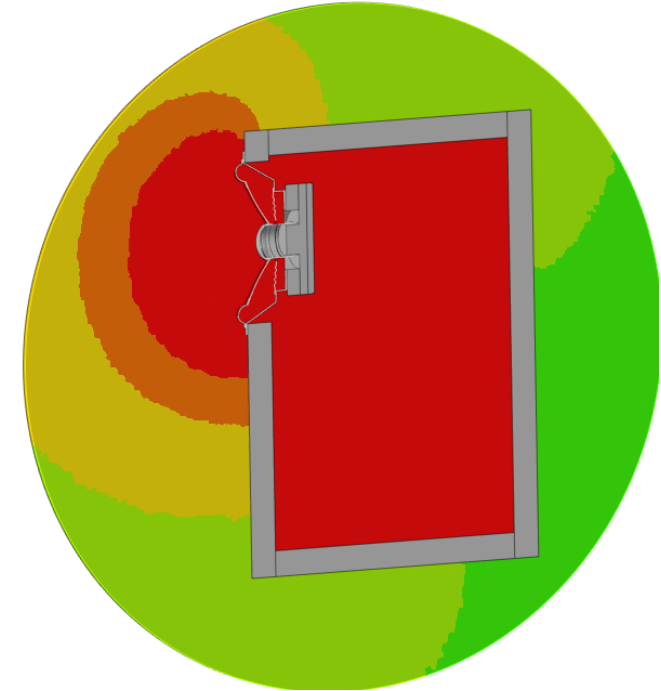
スピーカー解析手法（開発手法）



FEMモデル



振動挙動

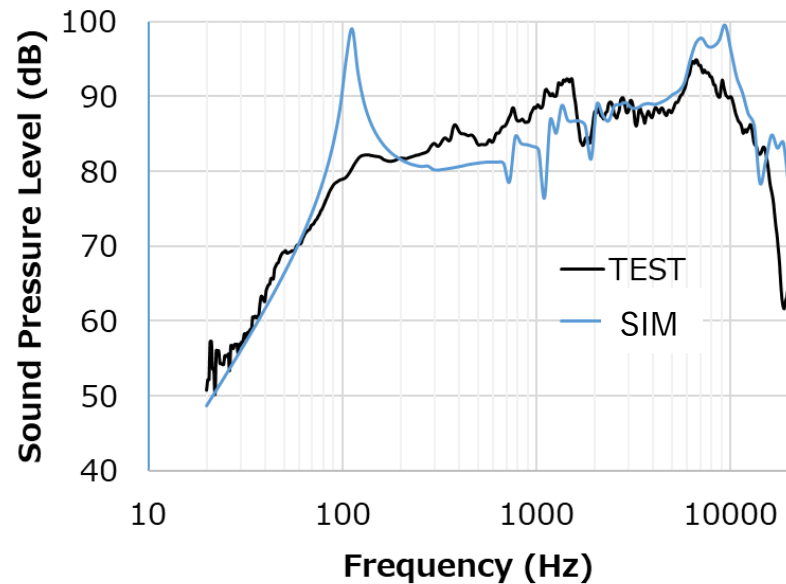


音圧分布

スピーカー解析手法（開発手法）

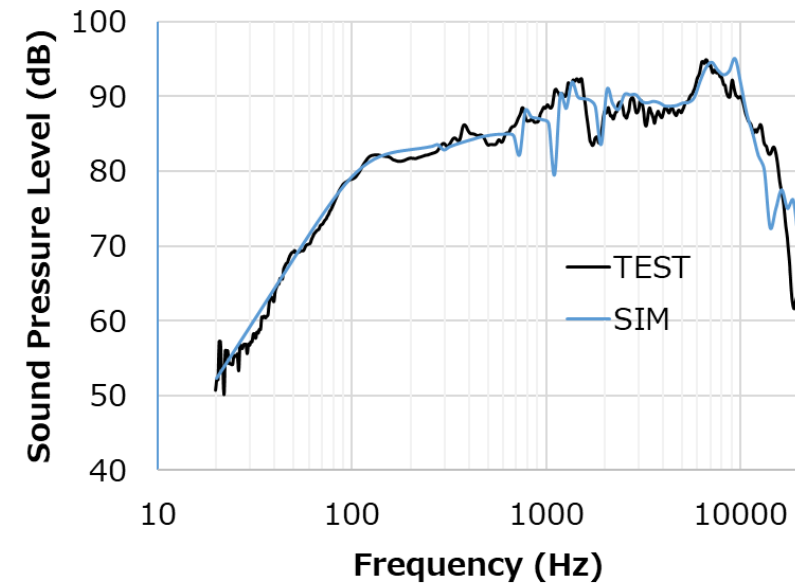
高精度音響・振動・電気マルチフィジックスシミュレーションの実現！

電気回路連成なし（一定加振力条件）



スピーカー正面1mにおける音圧結果

電気回路連成あり（定電圧駆動）

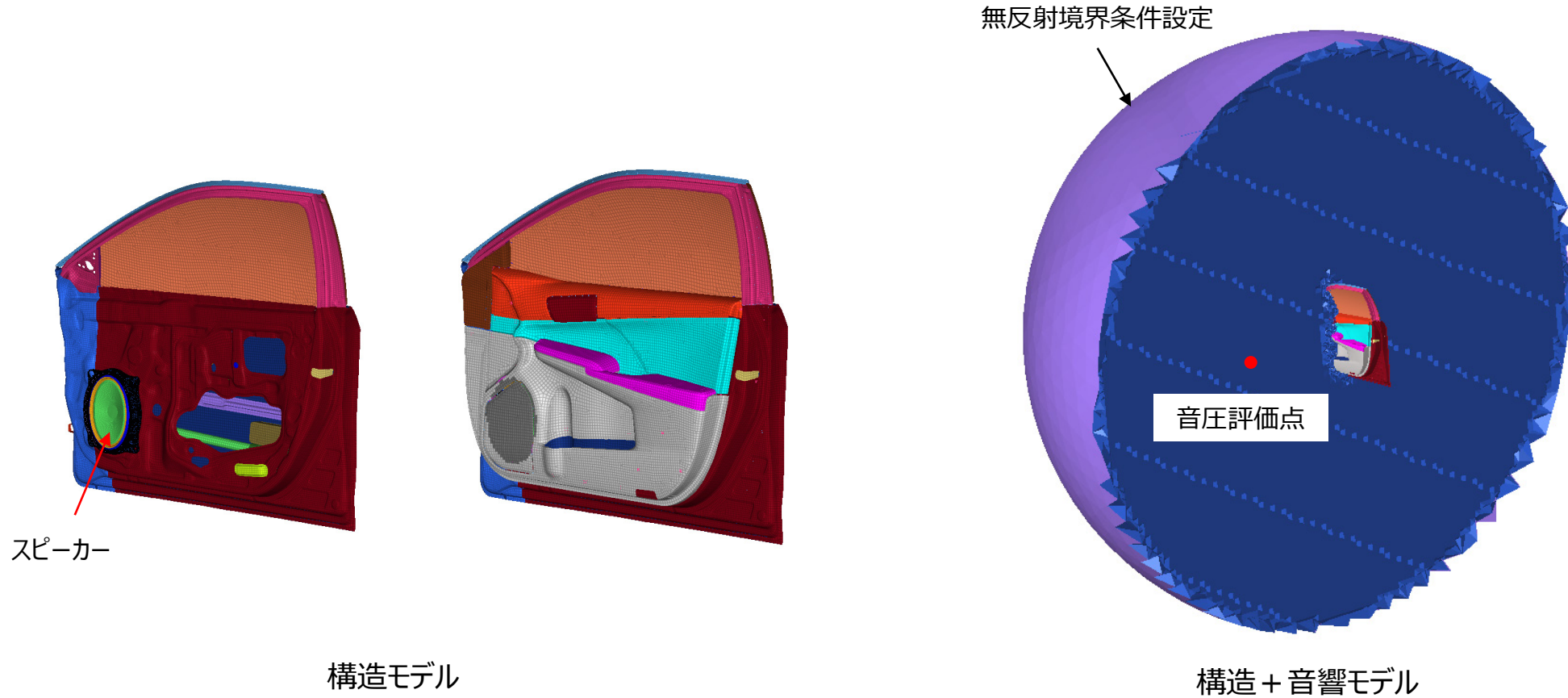


スピーカー正面1mにおける音圧結果

シミュレーション事例：車載ドアスピーカー

ドアスピーカー解析モデル

ドア筐体にスピーカーを設置時のドア単体音圧放射特性を評価

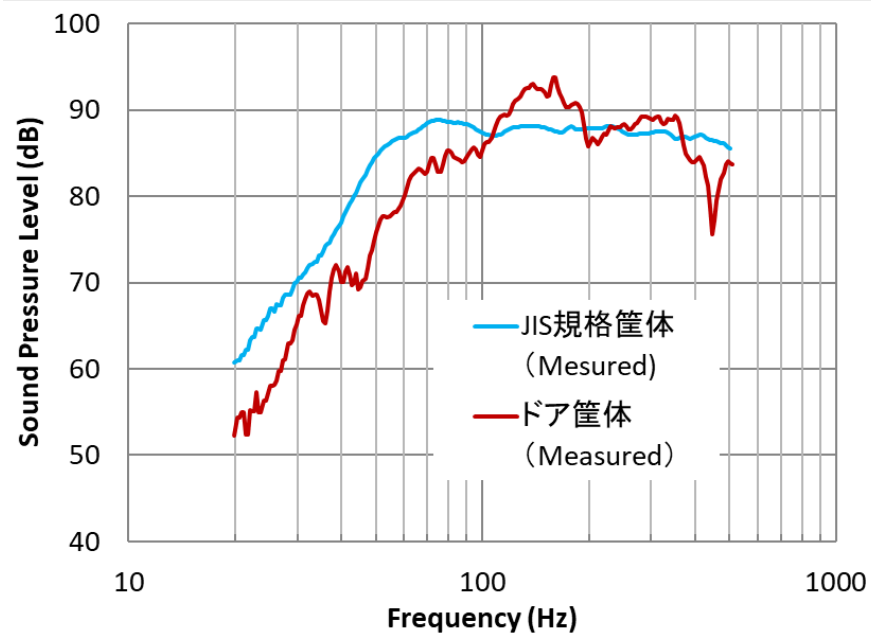


※ 車両モデル出所 : Center for Collision Safety and Analysis at George Mason University

ドアスピーカー解析結果

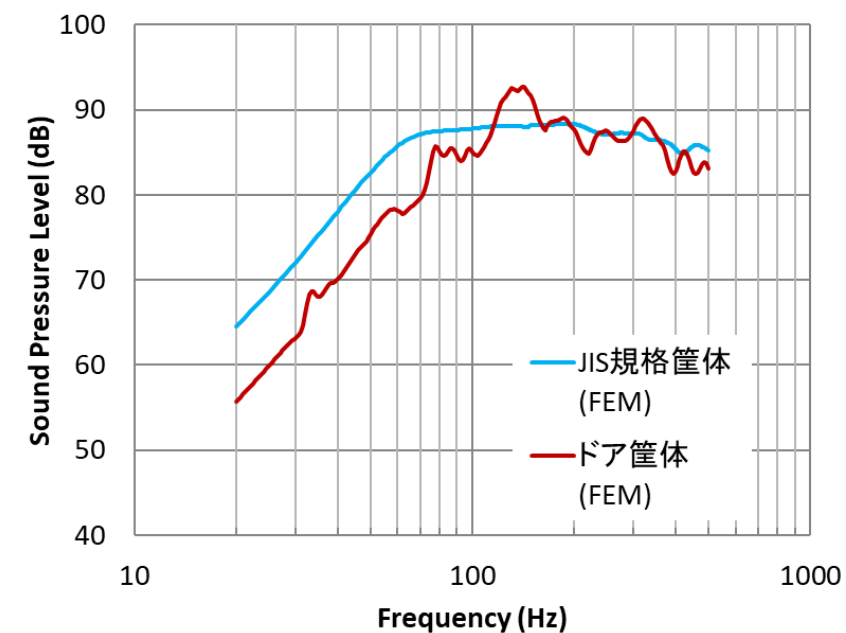
ドア筐体に設置したときの音圧特性の変化をシミュレーションで忠実に再現！

実測



スピーカー正面1mにおける音圧結果

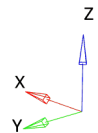
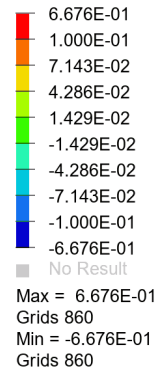
シミュレーション



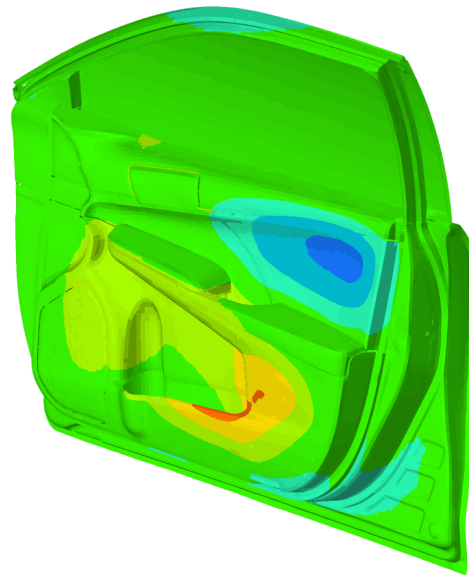
スピーカー正面1mにおける音圧結果

ドアスピーカー解析結果

Contour Plot
Displacement(Y)
Analysis system

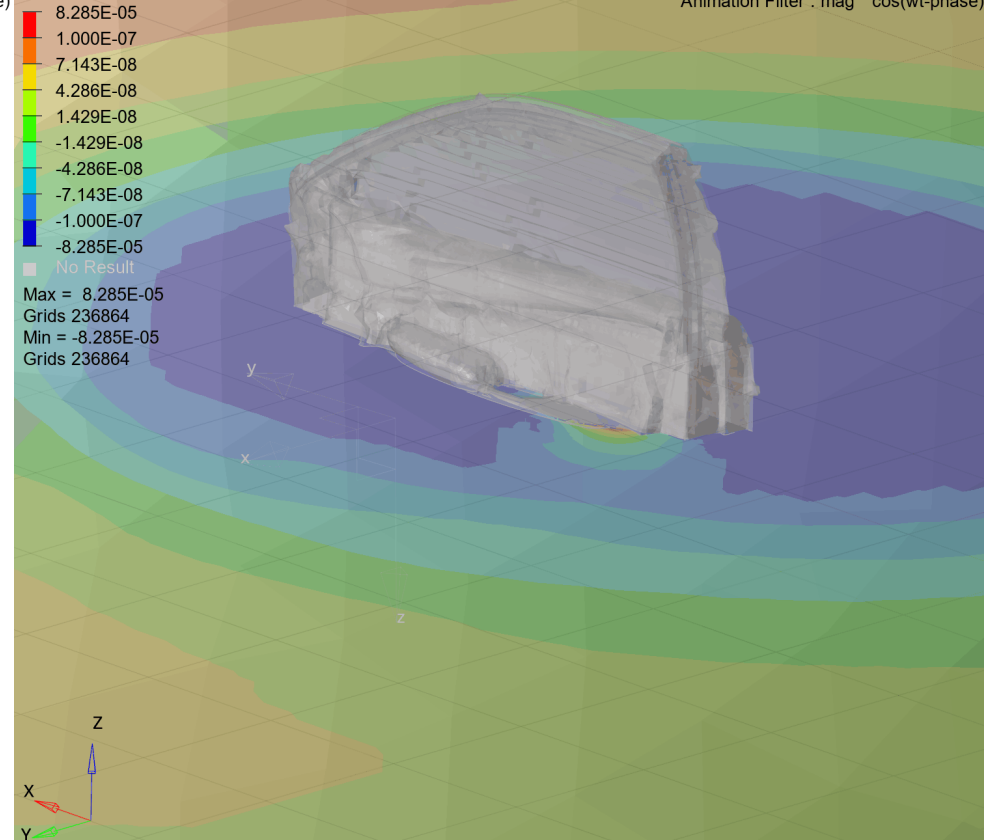


1: Model
Subcase 100 (MODAL_FREQ) : Load 33 - F = 5.602357E+01 : Frame 1 : Angle 0.000000
Animation Filter : mag * cos(wt-phase)



振動挙動

1: Model
Contour Plot
Pressure(Pressure)
Subcase 100 (MODAL_FREQ) : Load 33 - F = 5.602357E+01 : Frame 1 : Angle 0.000000
Animation Filter : mag * cos(wt-phase)



音圧分布

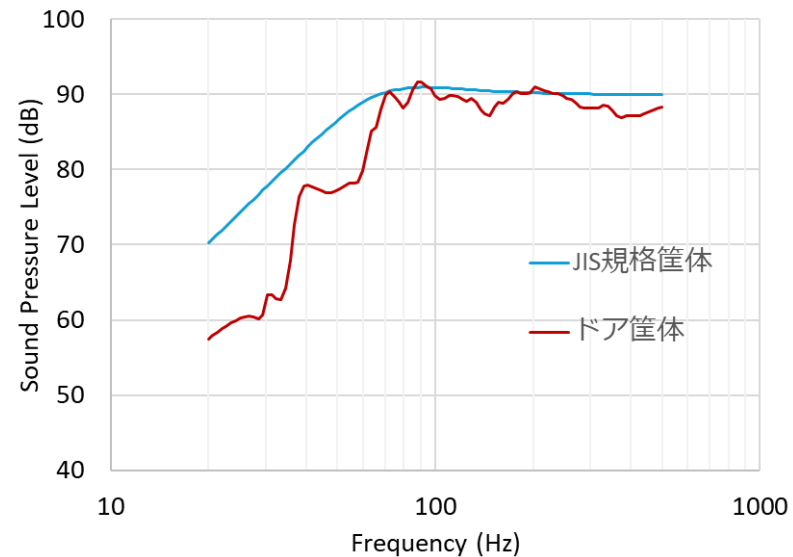
56Hz

※ 車両モデル出所 : Center for Collision Safety and Analysis at George Mason University

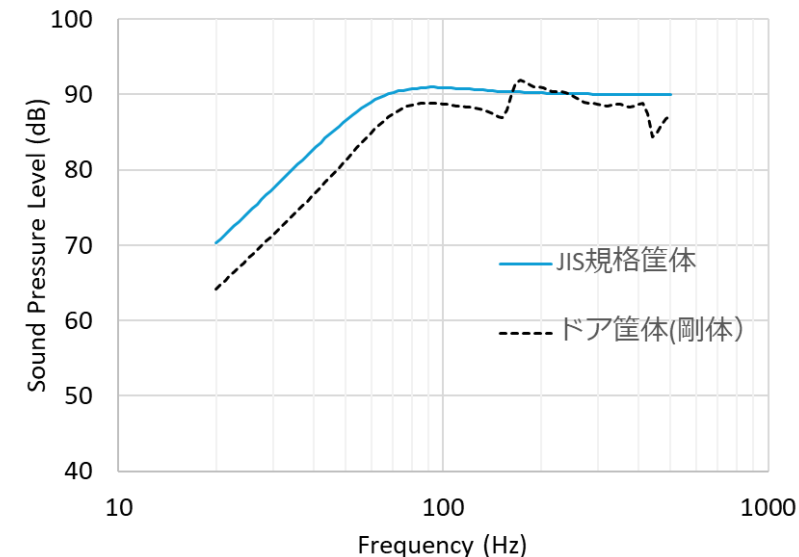
音質劣化要因分析

音質劣化の主要因はドア振動

ドア筐体振動あり (ドア弾性体)

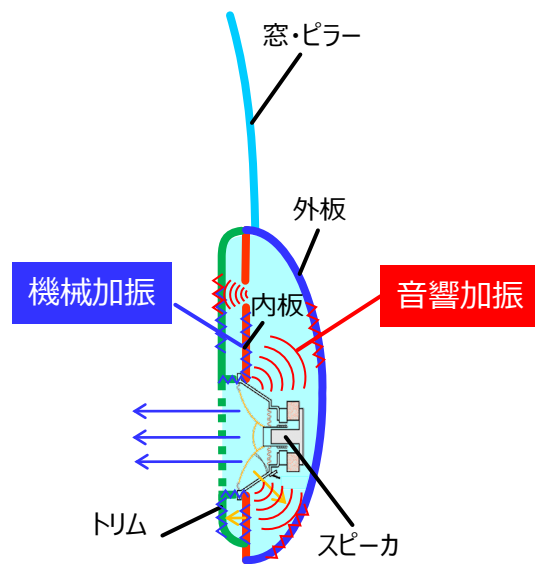


ドア筐体振動なし (ドア剛体)

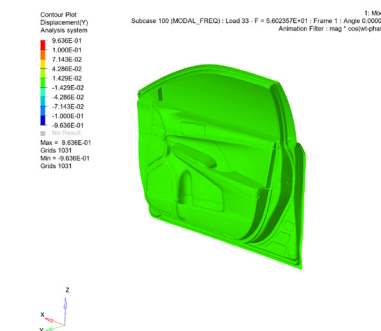
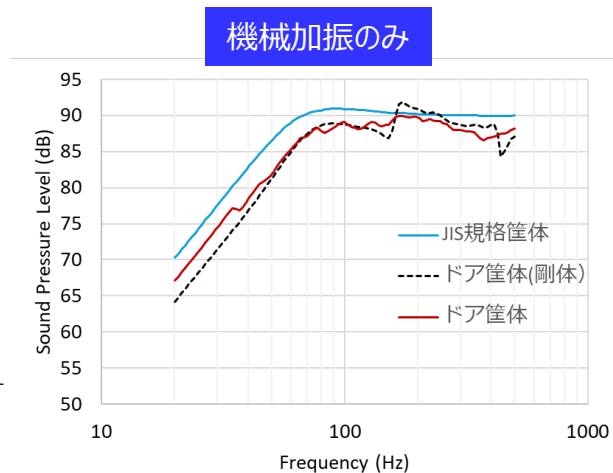
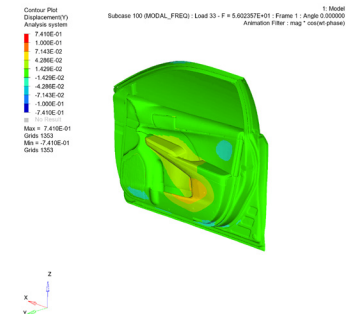
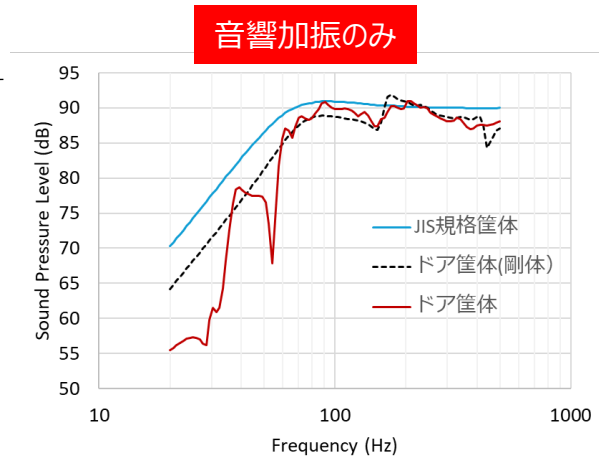
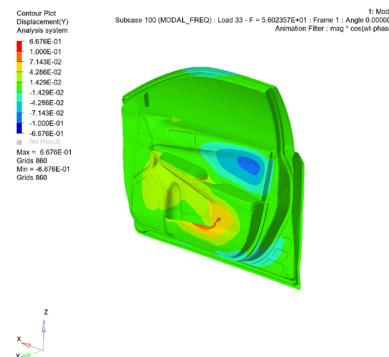
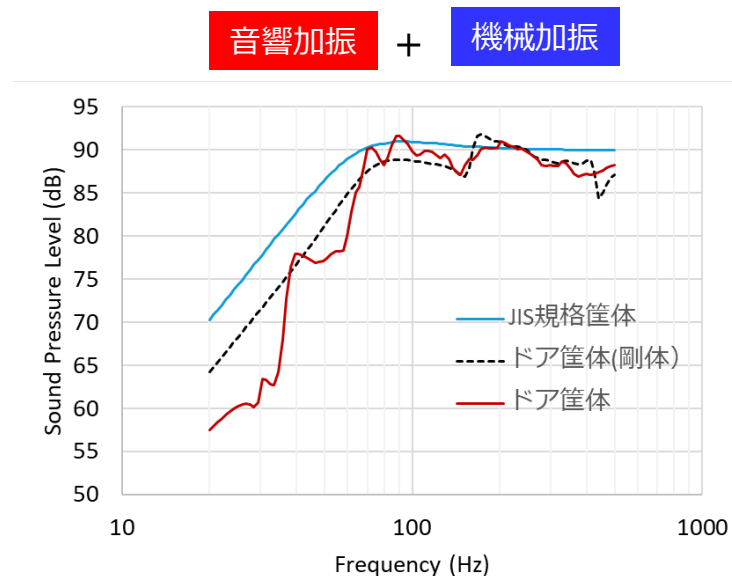


音質劣化要因分析

ドア振動要因は音響加振が支配的

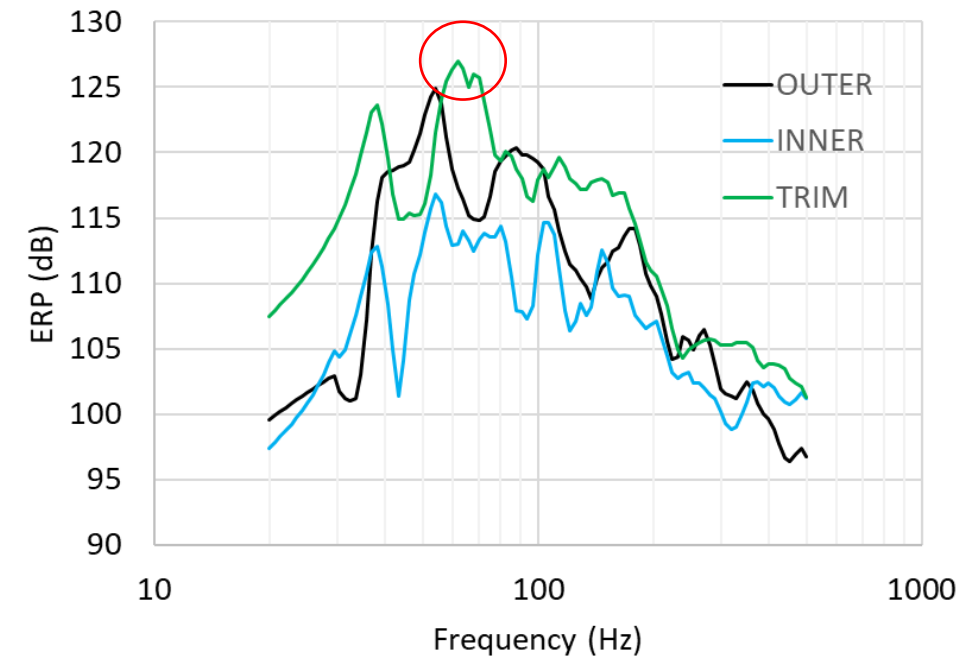
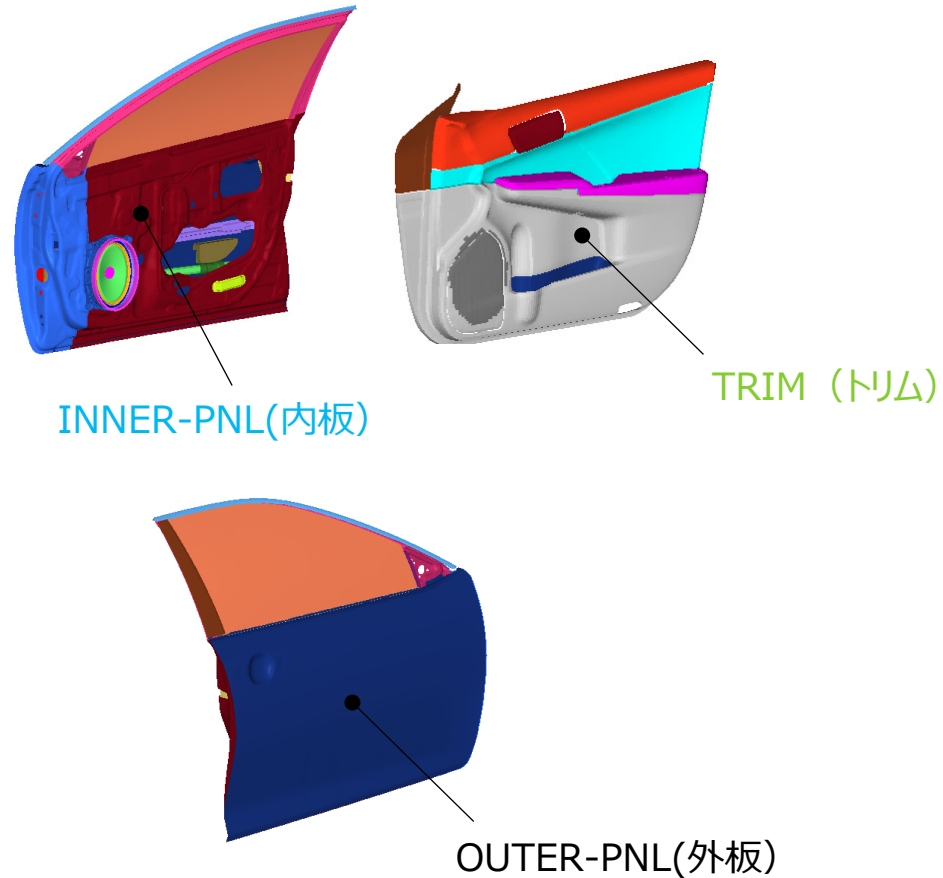


スピーカー振動の伝達経路



振動課題部品抽出

各部材の振動レベルや周波数を等価放射パワー（ERP）で把握



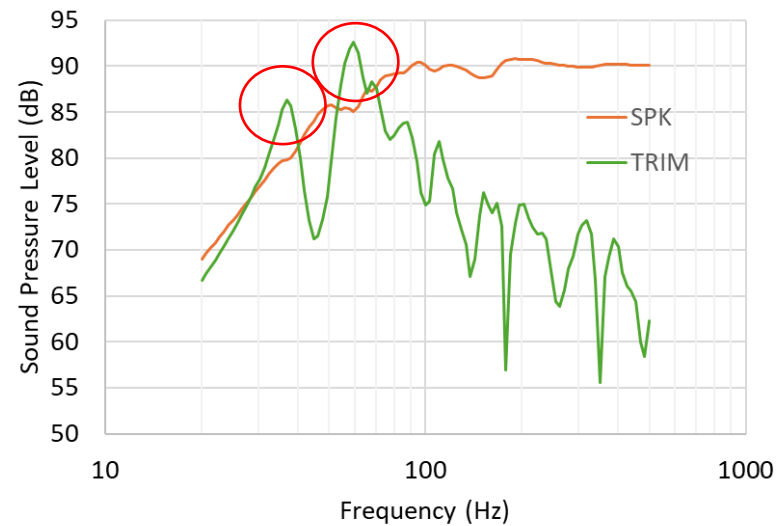
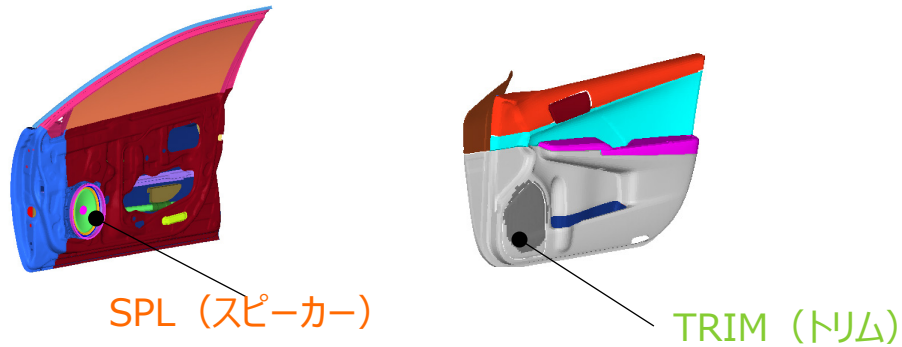
等価放射パワー（ERP）

※車両モデル出所：Center for Collision Safety and Analysis at George Mason University

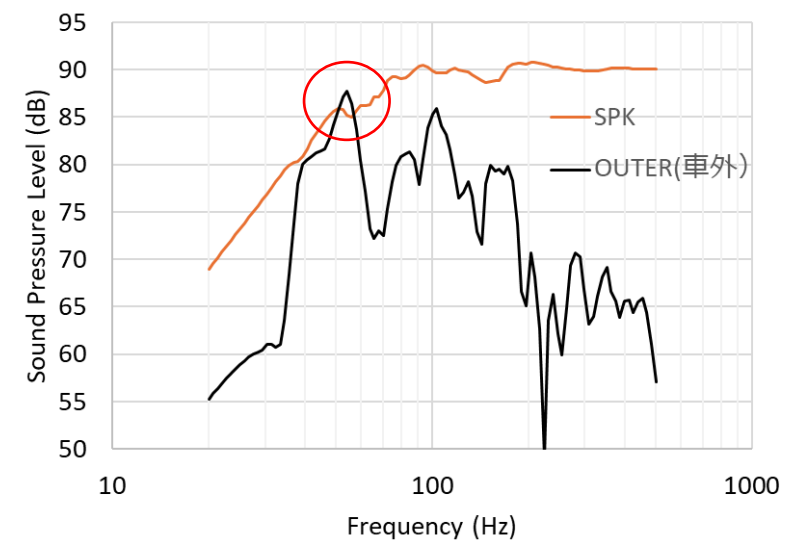
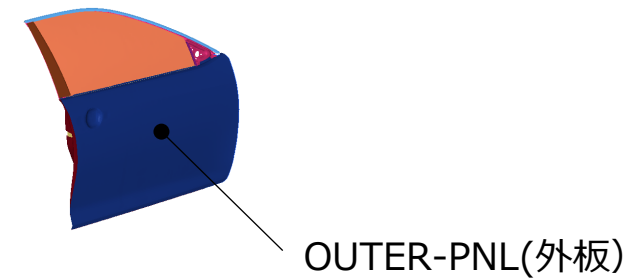
部位別放射音レベル

部品ごとの放射音レベルを放射音評価機能（RADSND）で把握

トリム放射音（車内側）

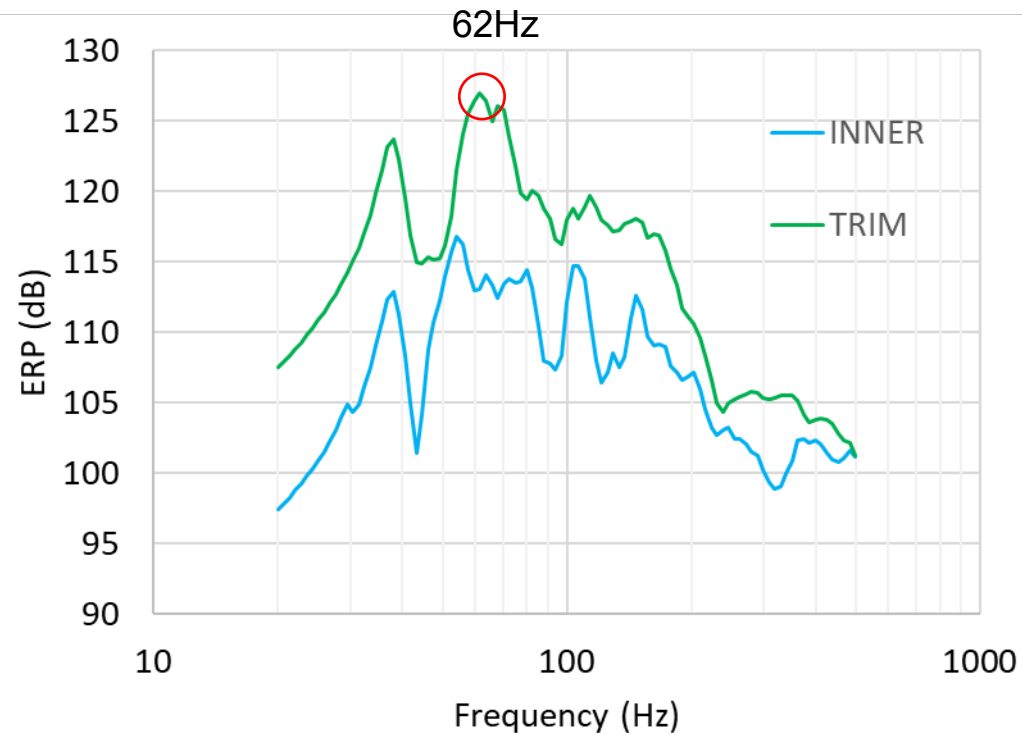


外板放射音（車外側）



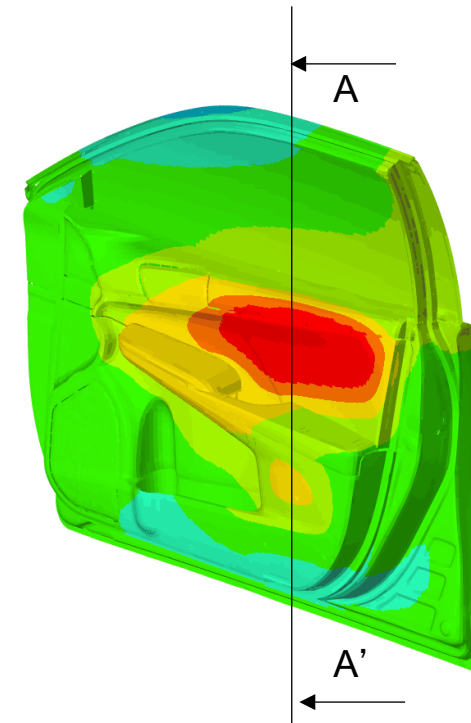
対策検討

対策必要箇所を各部品の等価放射パワーと振動アニメーションで把握

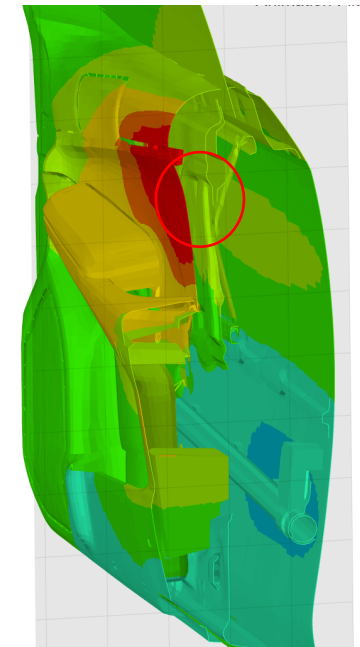


等価放射パワー（ERP）

対策：トリムと**INNER**パネル間に締結点を追加



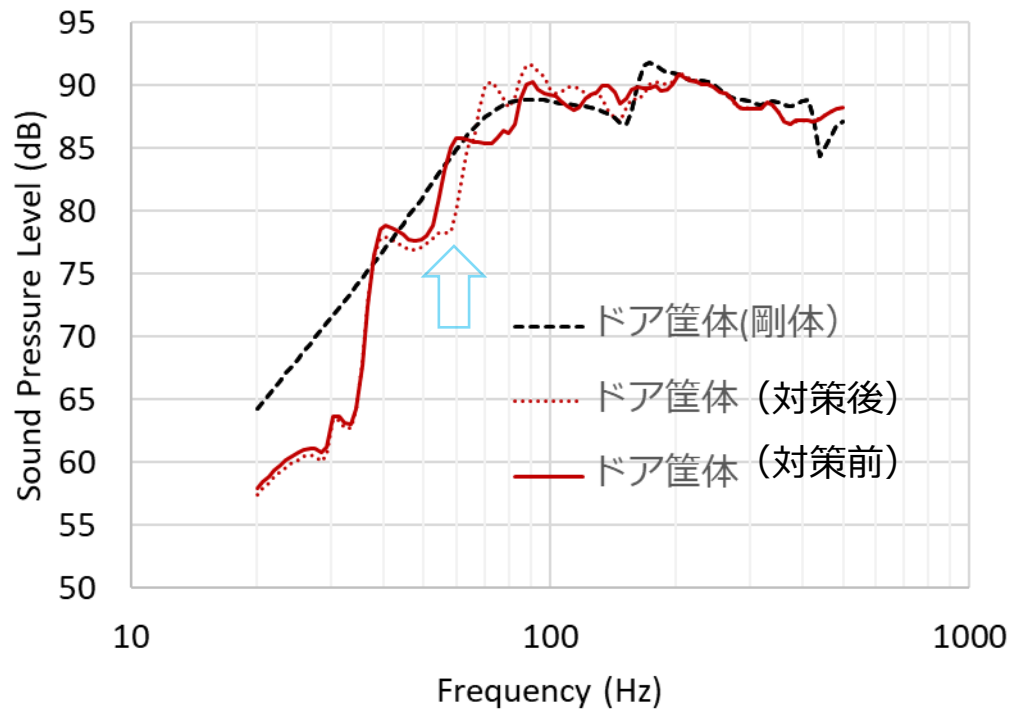
62Hzの振動挙動



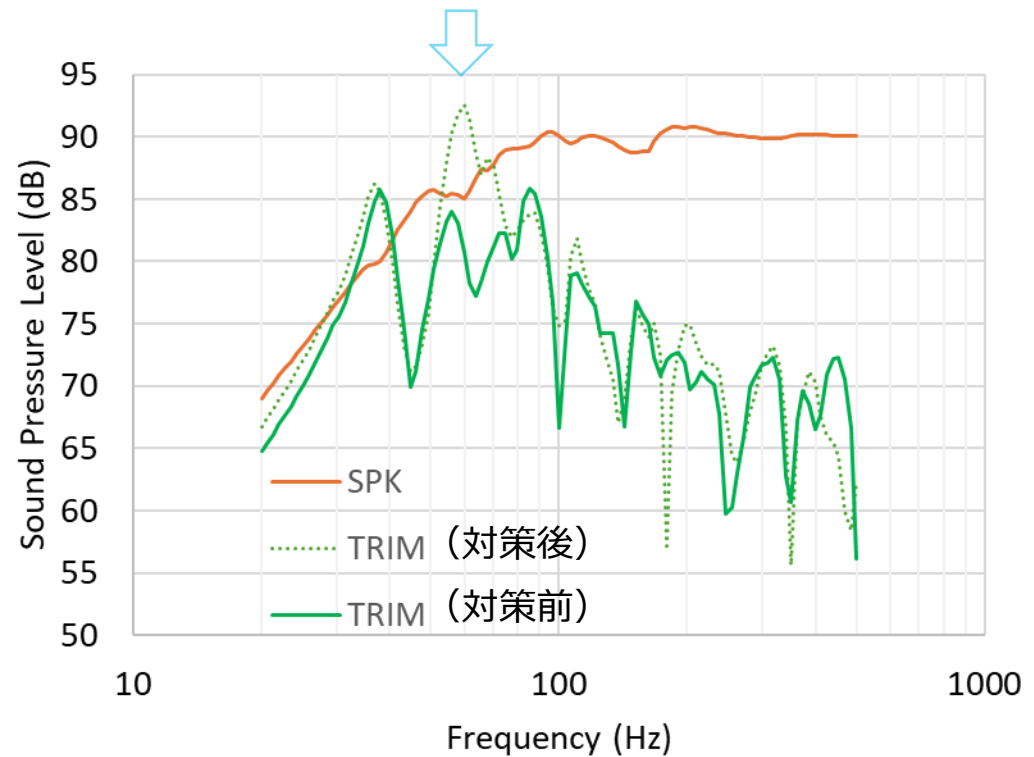
A-A'断面

対策効果確認

評価点における音圧、部品別放射音で対策効果を把握



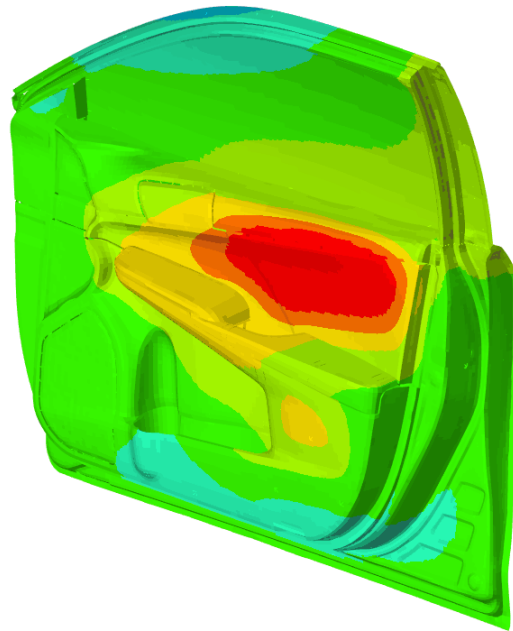
スピーカー正面1mにおける音圧



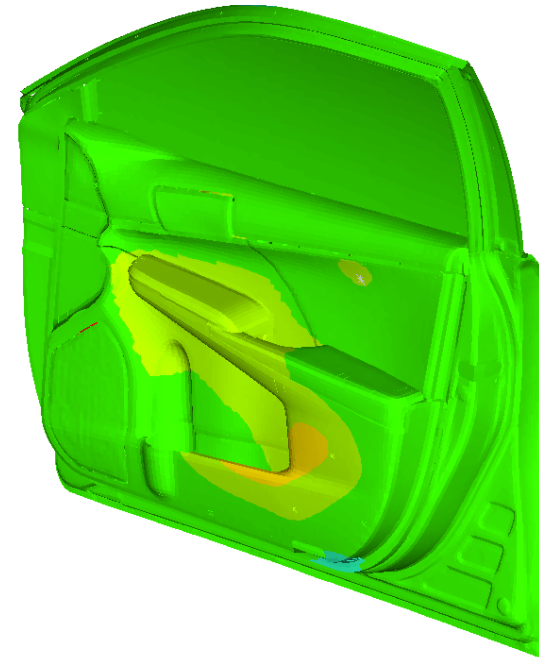
スピーカー正面1mにおける部位別放射音 (RADSDND)

対策効果確認

対策効果をアニメーションで把握



対策前



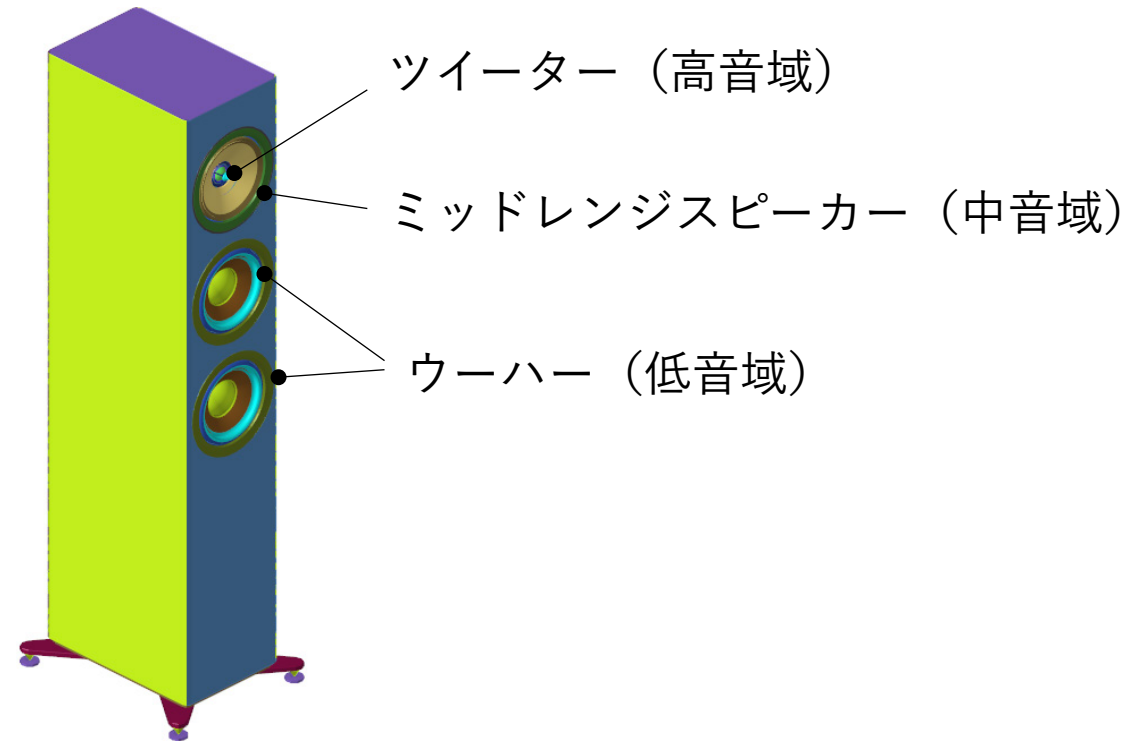
対策後

※62Hzの振動挙動

シミュレーション事例：ホームスピーカー

ホームスピーカー

3wayスピーカー評価を実施
目標評価対象周波数領域は可聴域全域

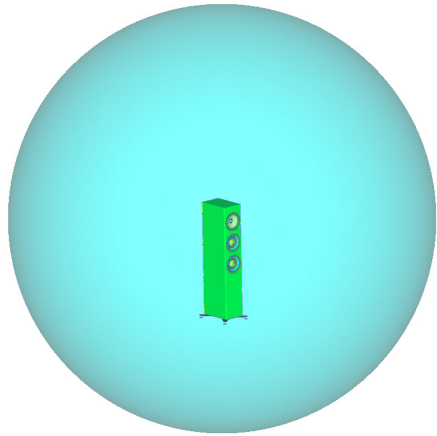


3way loudspeaker

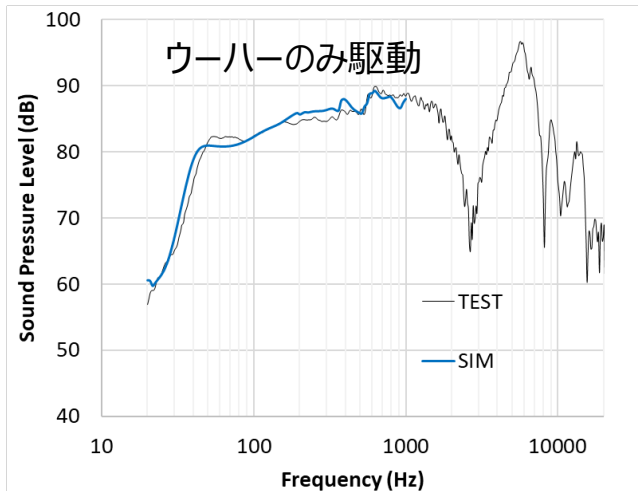
音響空間モデリング、解析手法

周波数領域に応じて、解析手法や音響空間のモデリング手法を最適化

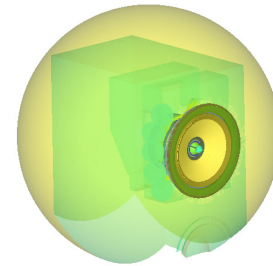
低～中周波数評価モデル（～1kHz）



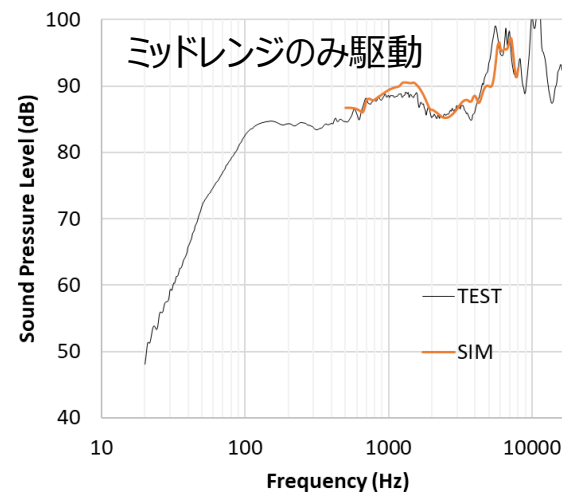
- ・無反射境界要素
- ・メッシュサイズ50mm
- ・音響空間：r 2000mm
- ・構造体：振動考慮
- ・解析手法：モード法



中周波評価モデル（～8kHz）



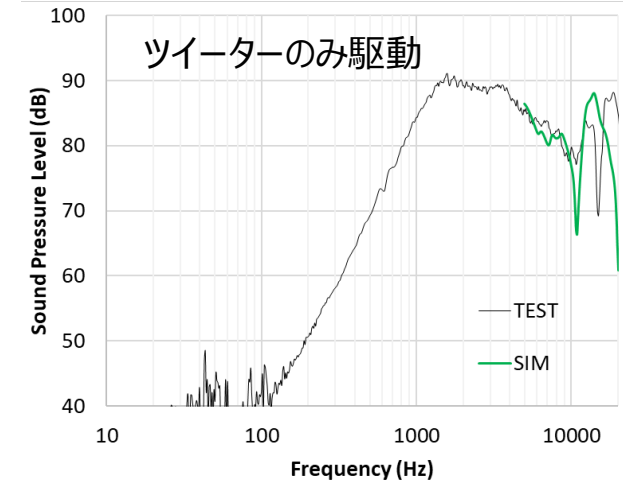
- 無限境界要素
- メッシュサイズ：5mm
- 音響空間：r 250mm
- 構造体：振動非考慮
- 解析手法：直接法



高周波評価モデル（～20kHz）

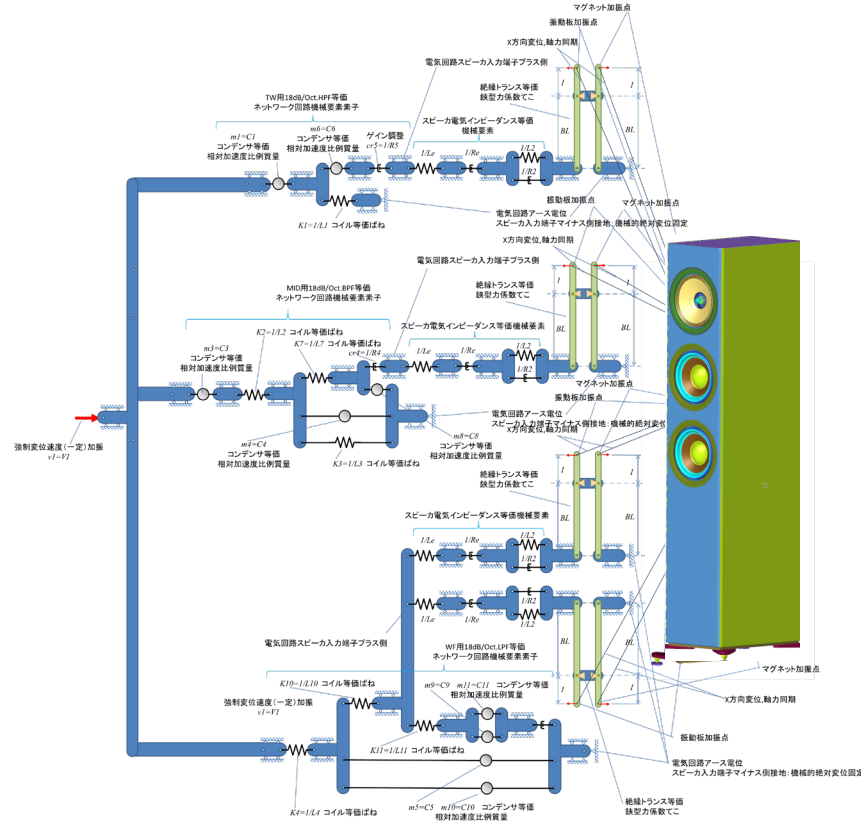


- 無限境界要素
- メッシュサイズ3mm
- 音響空間：r90mm
- 構造体：振動非考慮
- 解析手法：直接法

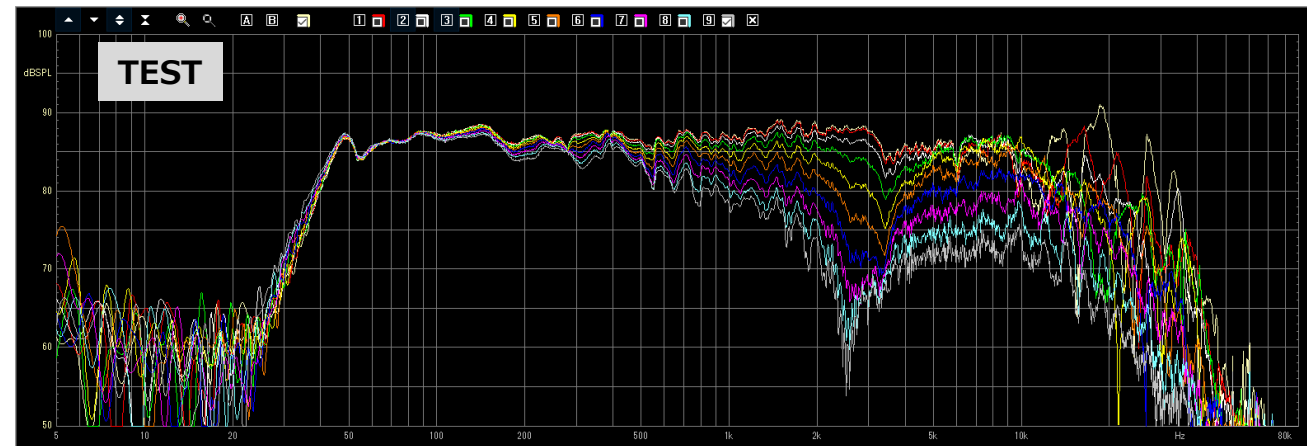
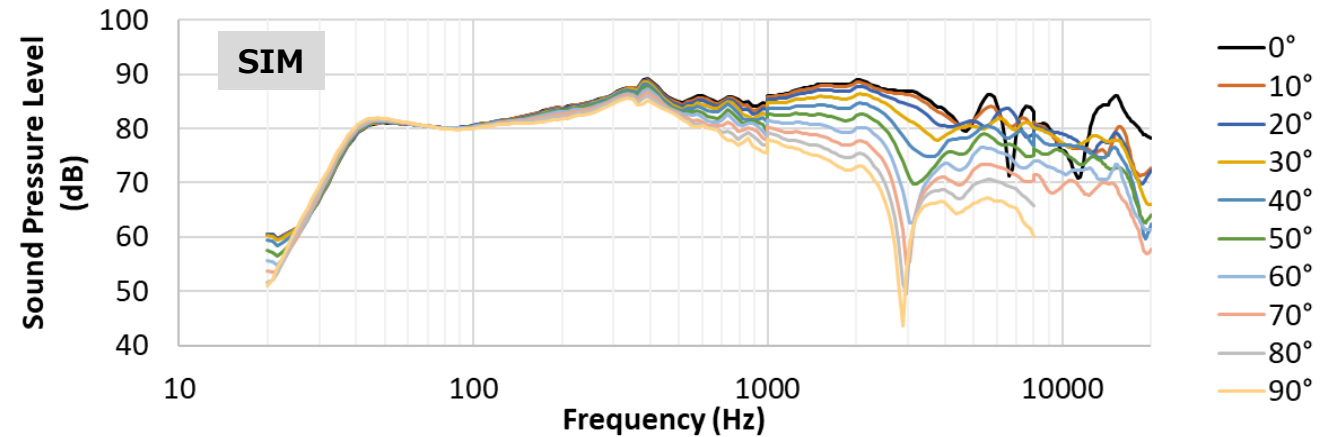


実測結果との比較

3wayスピーカーにおいて、可聴域全域で実用上十分な解析精度を確保



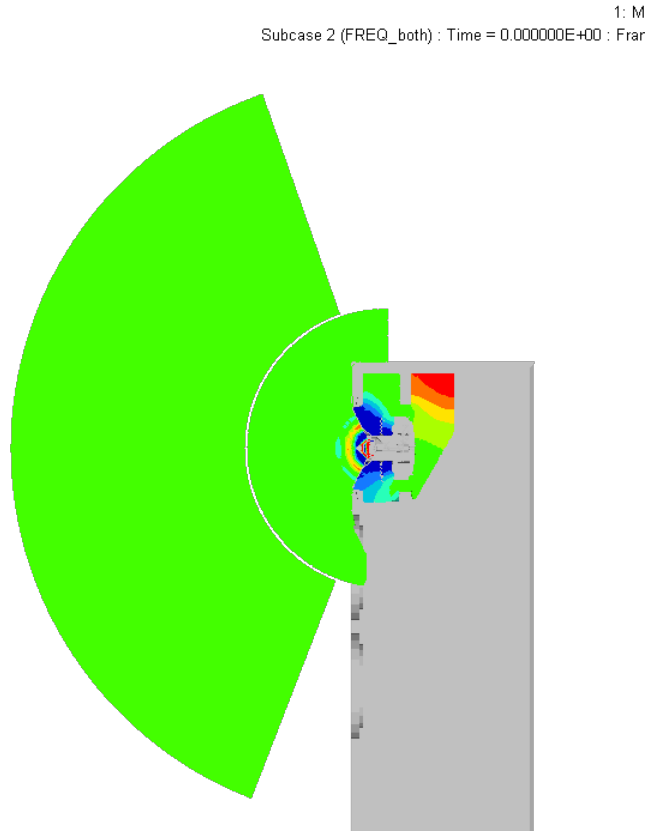
電気回路等価機械要素法 FEMモデル



スピーカー1m位置（角度0° ～90° ）の音圧特性

時刻歴応答解析

時刻歴解析機能により、時間領域の評価も可能



ミッドレンジ+ツイータ駆動時のインパルス応答アニメーション

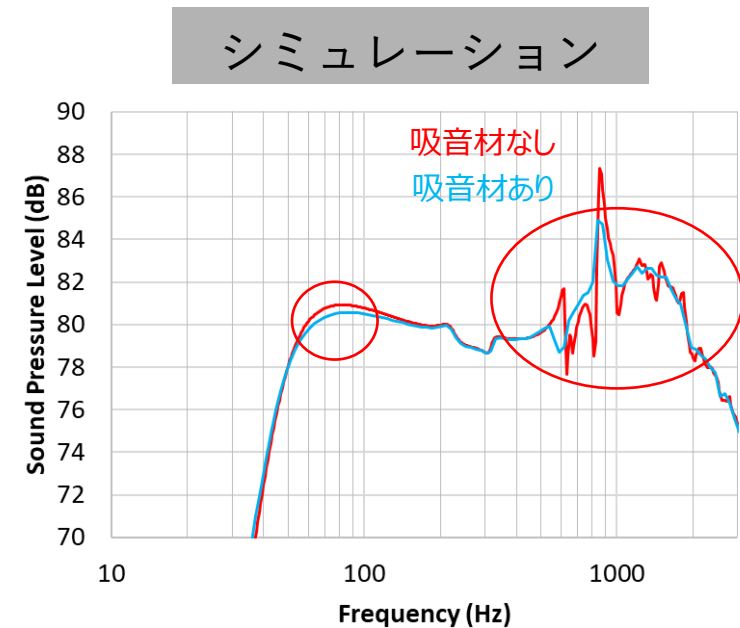
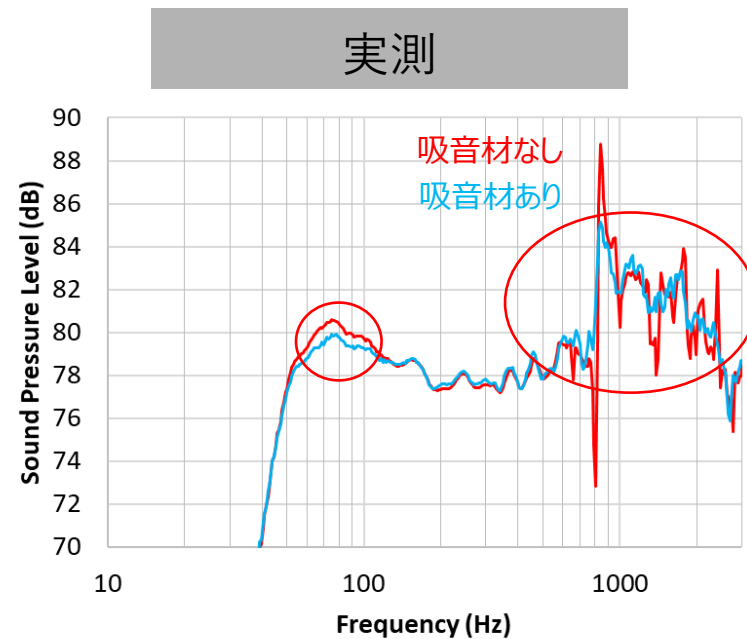
吸音材効果検証

吸音材の吸音効果をBiotモデルにて評価。吸音材の設置位置検討に活用



| No | 1 | | |
|--------------------------|----------|--------|--------|
| サンプル名称 | 吸音材Green | | |
| 枝番 | N1 | N2 | N3 |
| Model | Biot | Biot | Biot |
| Thickness [mm] | 19.0 | 21.8 | 19.9 |
| Flow resistivity [Ns/m4] | 25,746 | 31,454 | 38,483 |
| Porosity | 0.952 | 0.952 | 0.942 |
| Tortuosity | 1.054 | 1.017 | 1.021 |
| VCL [μm] | 72.7 | 61.6 | 56.4 |
| TCL [μm] | 140.6 | 66.2 | 56.4 |
| Area Density [g/m2] | 1,093 | 1,256 | 1,383 |
| Bulk Density [kg/m3] | 57.6 | 57.6 | 69.6 |
| Shear modulus [N/m2] | 7,700 | 5,350 | 6,350 |
| Poisson's ratio | 0 | 0 | 0 |
| Loss factor | 0.444 | 0.571 | 0.375 |
| Young's modulus [N/m2] | 15,400 | 10,700 | 12,700 |

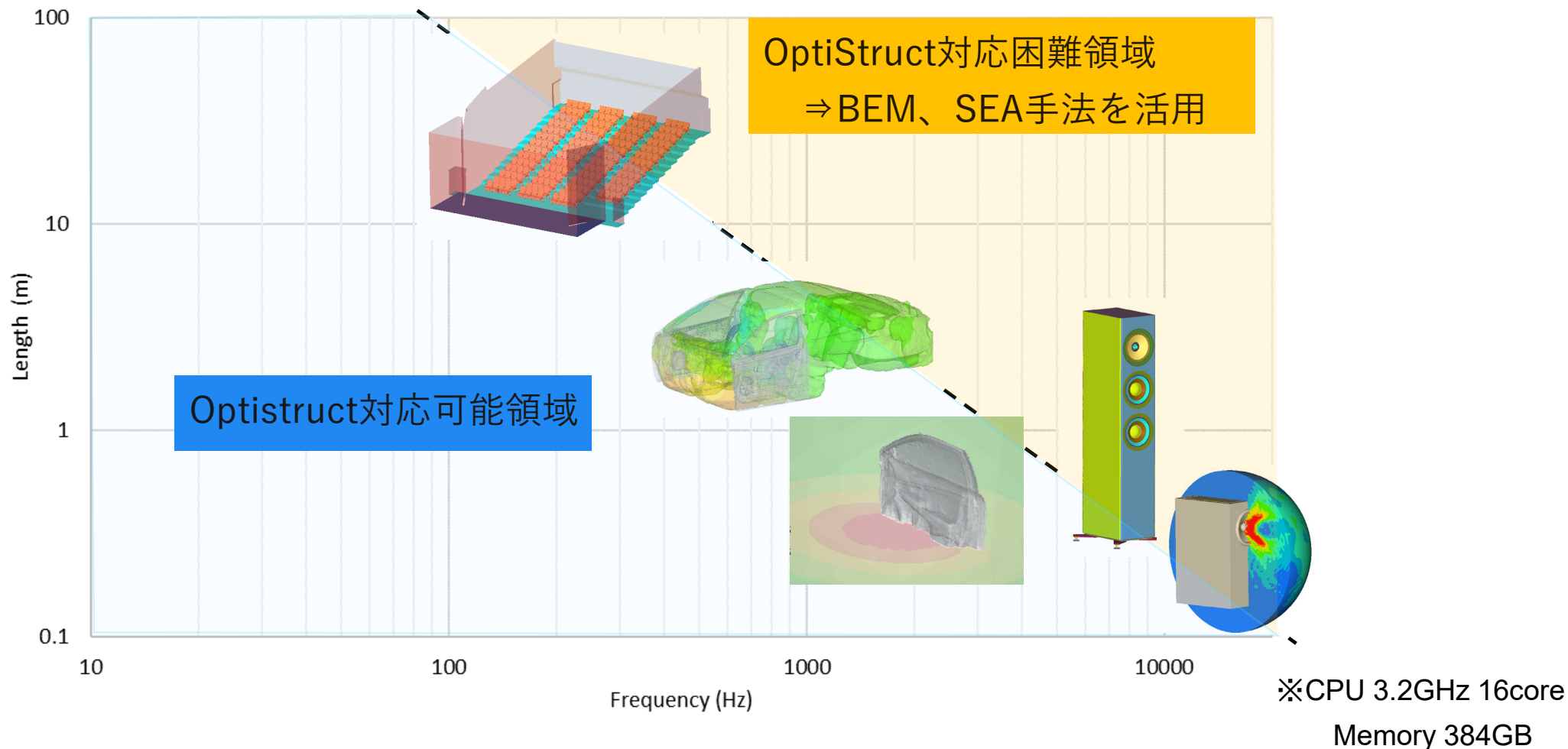
Biotパラメータ



※ 2 Wayスピーカーの結果

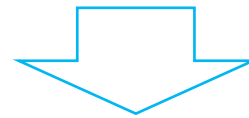
解析可能サイズと上限周波数の関係

FEM手法であるOptiStructでは評価対象サイズにより対応可能上限周波数が限られてしまう
対応困難領域では、他の手法（BEM、SEA）を活用



まとめ

- ・ 振動・音響連成シミュレーションに強いOptiStructに、独自開発した電気回路との連成手法を適用することで、音・振動・電気回路連成（マルチフィジックス）シミュレーション技術を開発した
- ・ ドアスピーカーにおいては、開発した解析手法と、OptiStructが保有する各種評価機能（等価放射パワー、放射音解析機能）を組み合わせることで、音圧特性劣化要因の解明と、対策効果の定量化を実現出来た
- ・ ホームスピーカーにおいては、音響空間モデリング手法や解析手法の最適化により可聴域全域のSIMを実現。また吸音材効果検証や時刻歴応答などにも取り組んだ



自社製品の商品力強化、受注拡大を実現



Panasonic
CONNECT

The image features the Panasonic CONNECT logo centered on a dark blue background. The word "Panasonic" is in white, and "CONNECT" is in a light blue color. The background includes a grid of squares and a large circular arc on the left side.