

# 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）

**Panasonic**  
**CONNECT**

現場プロセスイノベーション

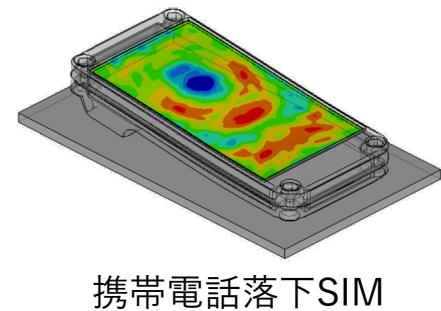
# アジェンダ

- ・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

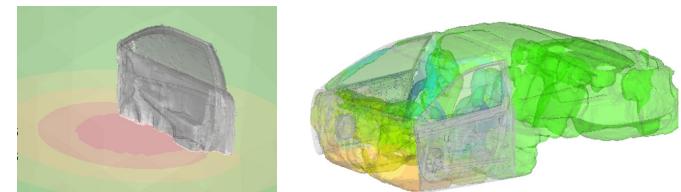
- ・携帯電話の落下シミュレーション技術開発



携帯電話落下SIM

## ■2014～ パナソニック（株）

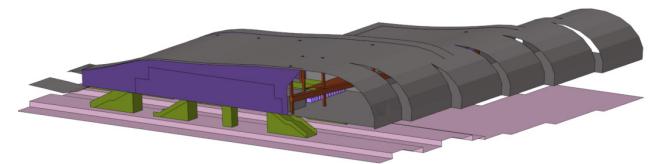
- ・車載機器の衝撃、振動、音響シミュレーション技術開発



車載スピーカー音響・振動SIM

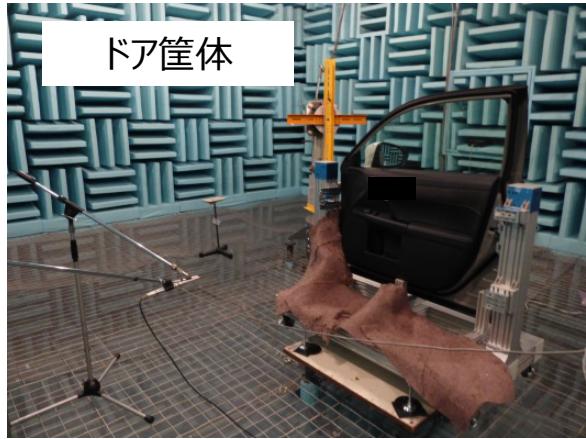
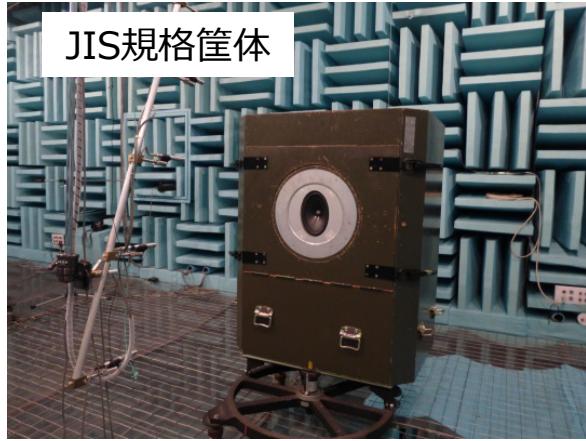
## ■2022～ パナソニックコネクト（株）

- ・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

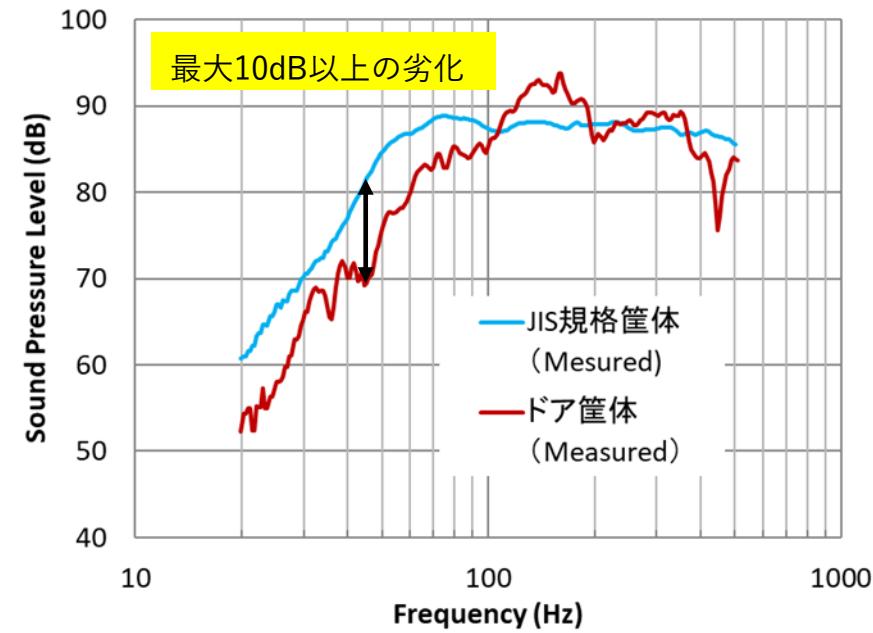


大規模空間音場SIM

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

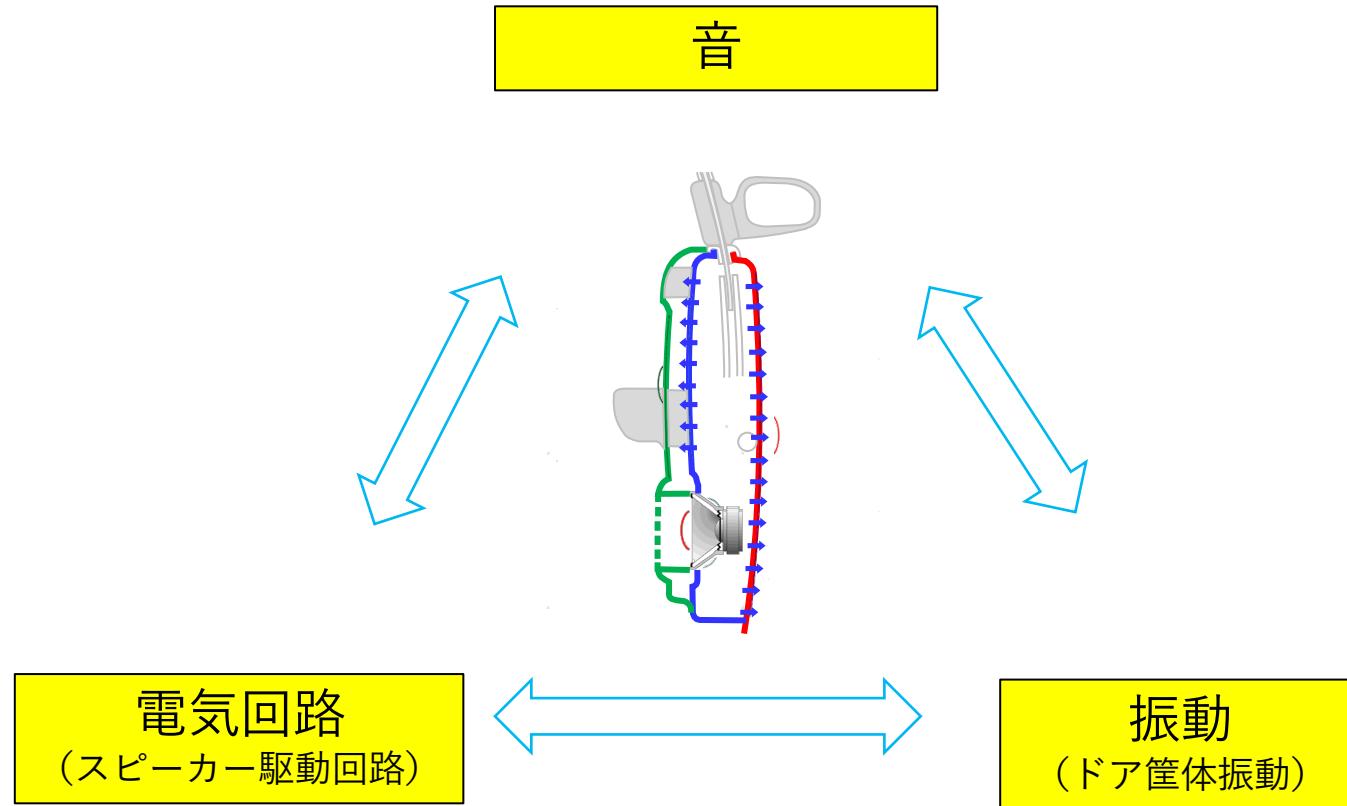


実測



スピーカー正面1mにおける音圧測定結果

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

ATC Japan 2025

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

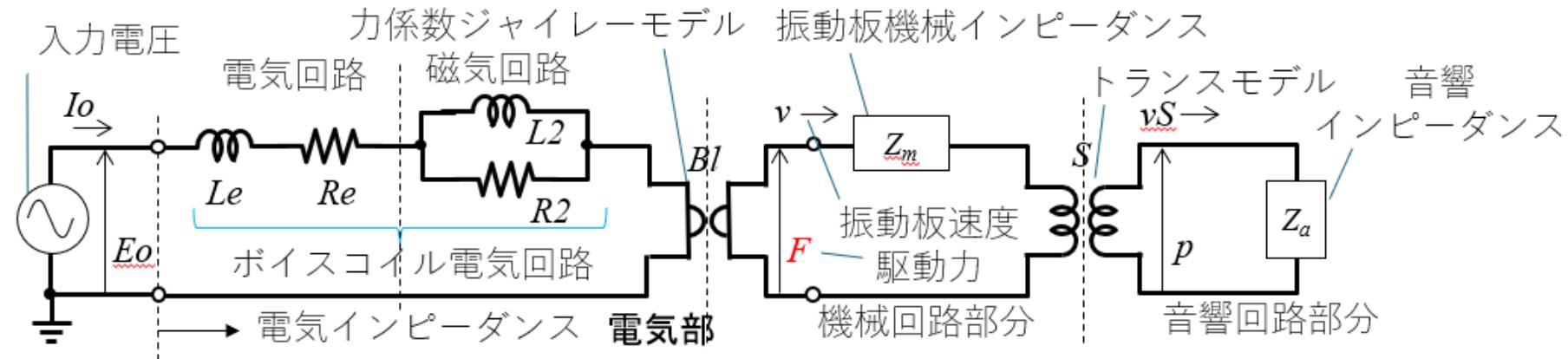
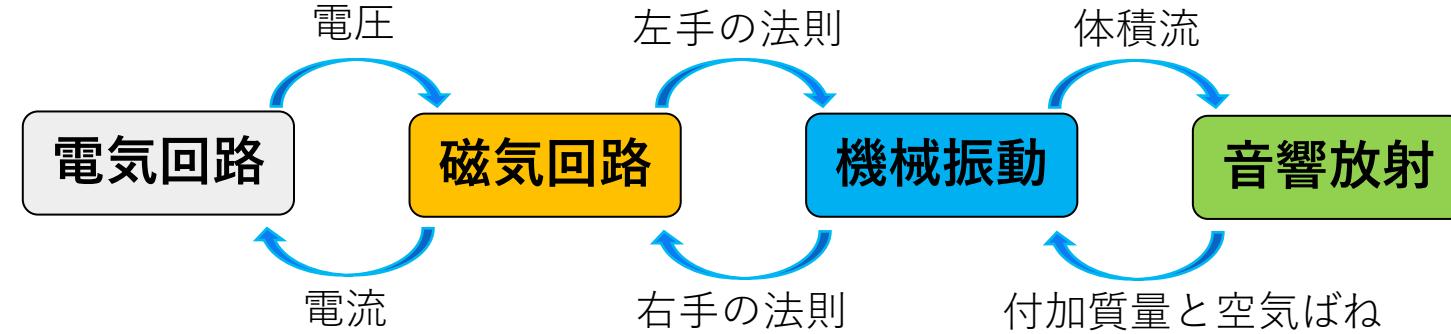
	候補A LMS Virtual.Lab Acoustic	候補B HyperWorks (OptiStruct)	候補C ANSYS + WAON
特徴	音響解析専門ソフト (FEM)	構造解析ソフト (FEM) <b>(近年音響解析機能を強化)</b>	構造 + 音響解析ソフト (BEM)の組合せ
実績 認知度	◎	○ <b>(振動解析実績有り)</b>	△
機能	◎	○	△
大規模モデル対応 計算スピード	○	◎	×
初期投資	× (1000万円以上)	◎ <b>(保有済/使用実績大)</b>	△

※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モーデリング)

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ーシステムの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）

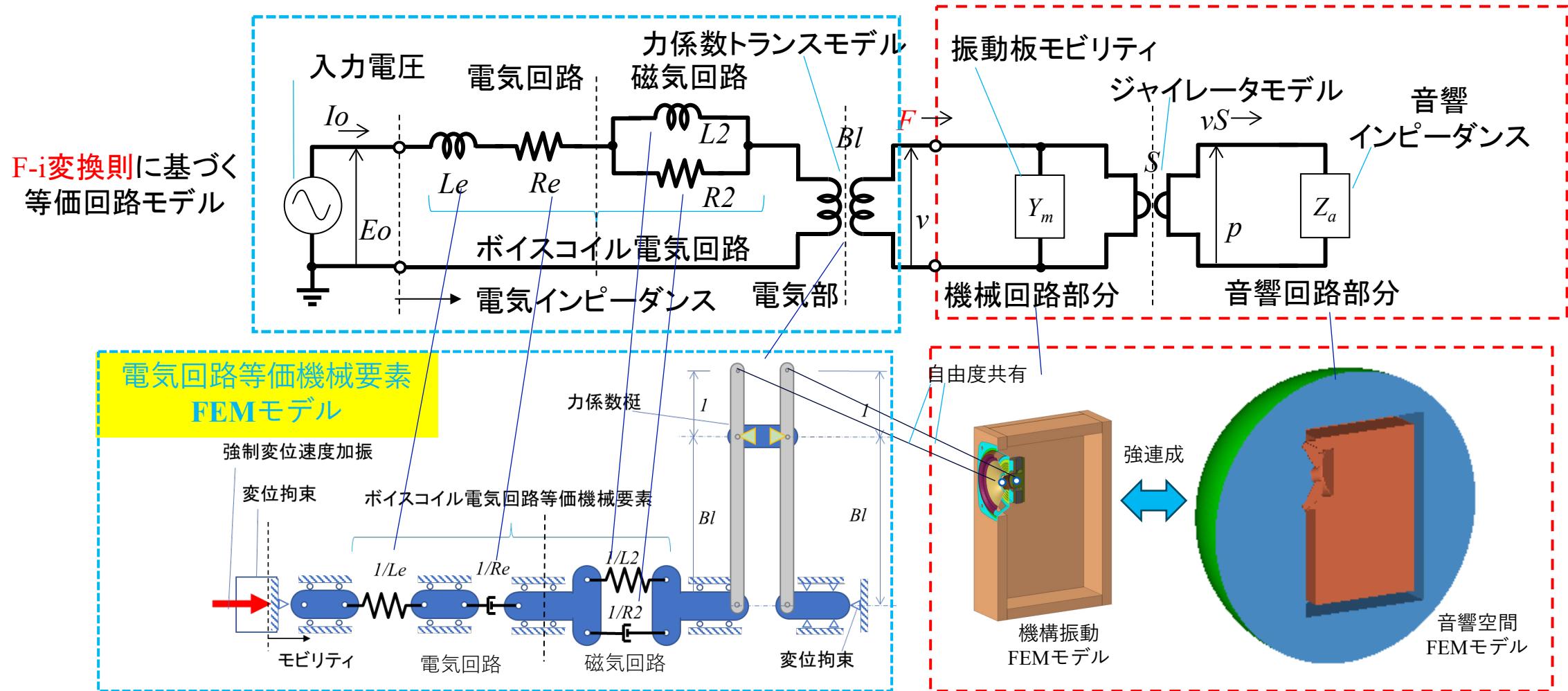
従来手法

電気系 (Spice回路)	機械系F-vモデル (古典的等価回路)	機械系F-iモデル (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

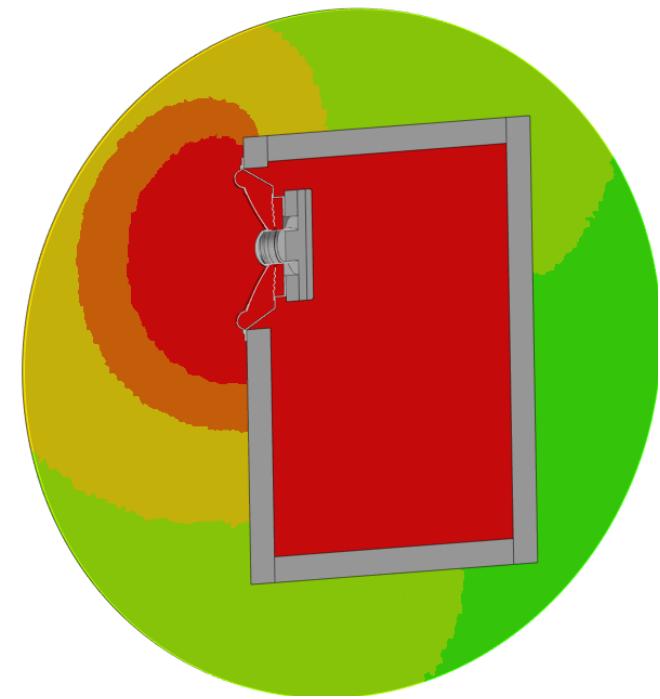
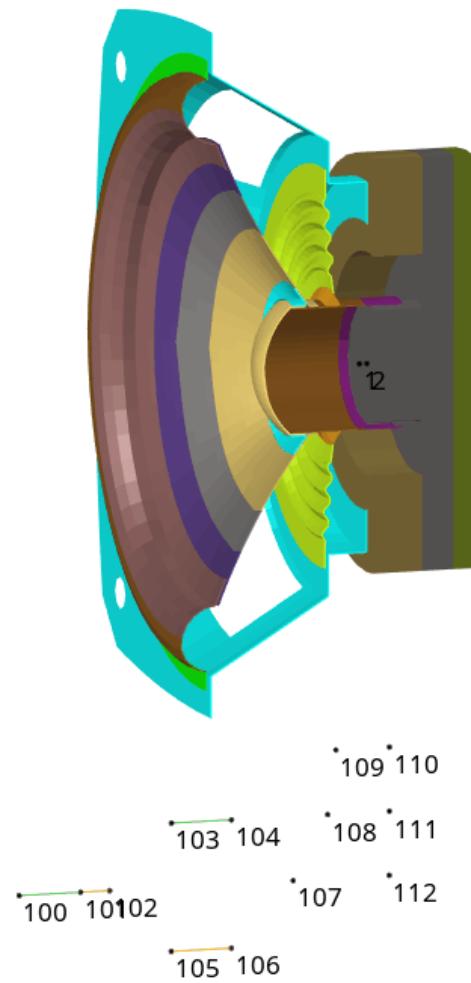
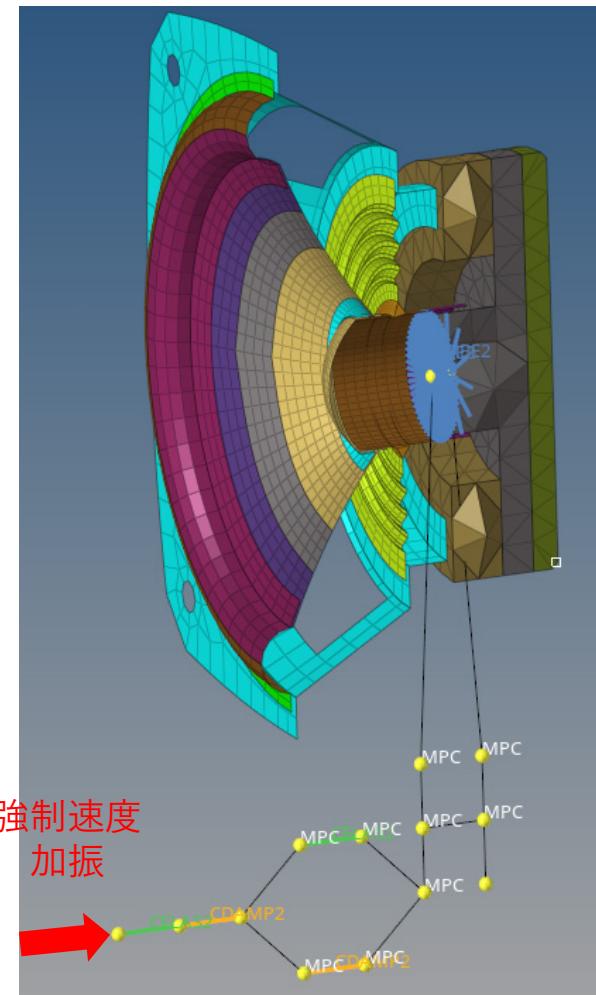
# スピーカー解析手法 (開発手法)

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



※ 2023秋日本音響学会にて発表

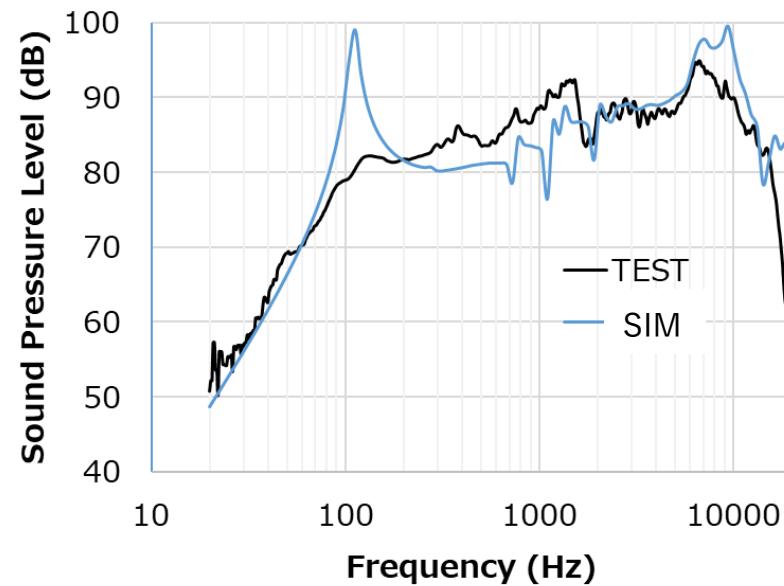
## スピーカー解析手法 (開発手法)



# スピーカー解析手法 (開発手法)

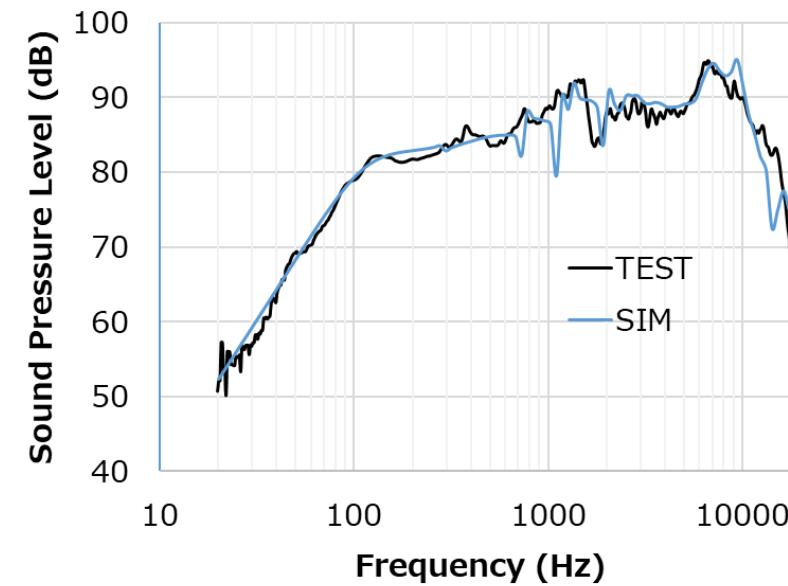
高精度音響・振動・電気マルチフィジックスシミュレーションの実現！

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

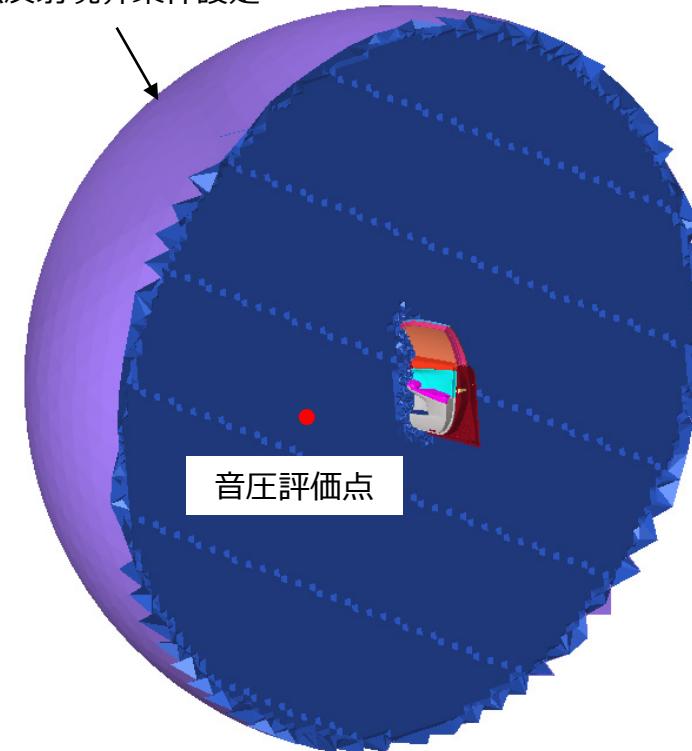
ドア筐体にスピーカーを設置時のドア単体音圧放射特性を評価



構造モデル



無反射境界条件設定



音圧評価点

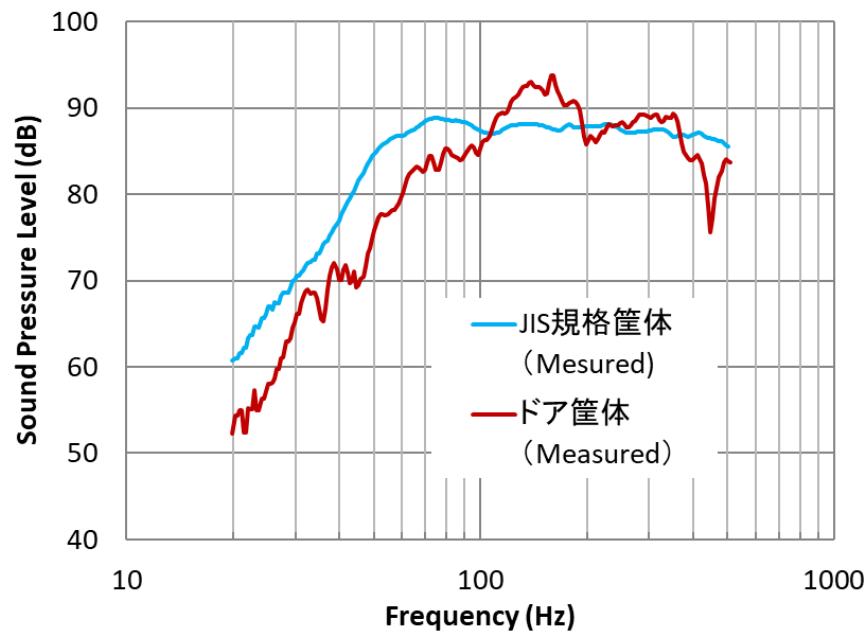
構造 + 音響モデル

※ 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

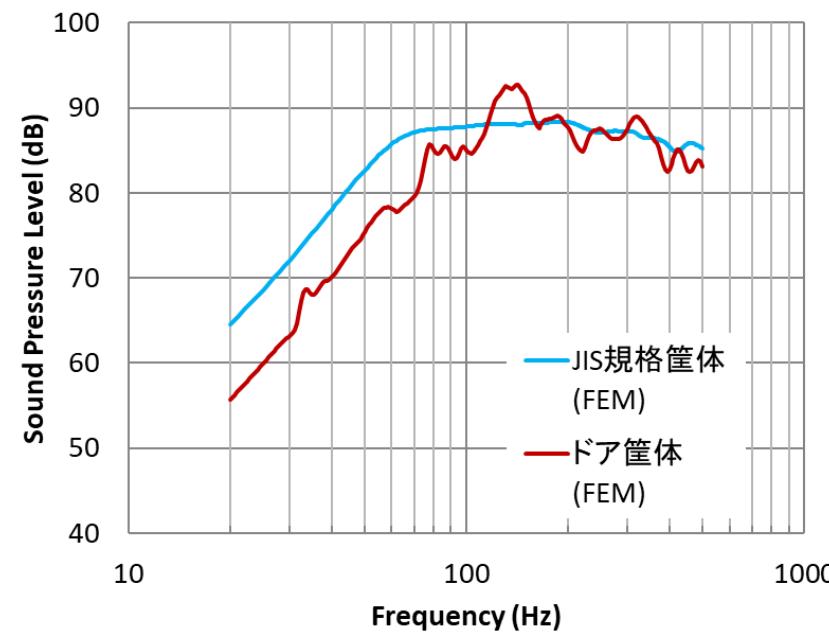
ドア筐体に設置したときの音圧特性の変化をシミュレーションで忠実に再現！

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

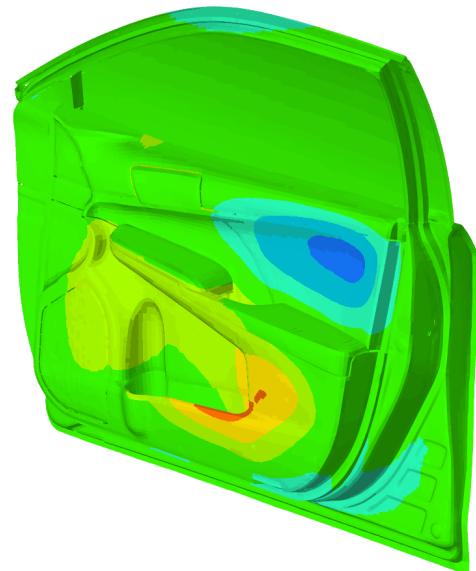
# ドアスピーカー解析結果

Contour Plot  
Displacement(Y)  
Analysis system

6.676E-01  
1.000E-01  
7.143E-02  
4.286E-02  
1.429E-02  
-1.429E-02  
-4.286E-02  
-7.143E-02  
-1.000E-01  
-6.676E-01  
No Result

Max = 6.676E-01  
Grids 860  
Min = -6.676E-01  
Grids 860

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



X  
Y  
Z

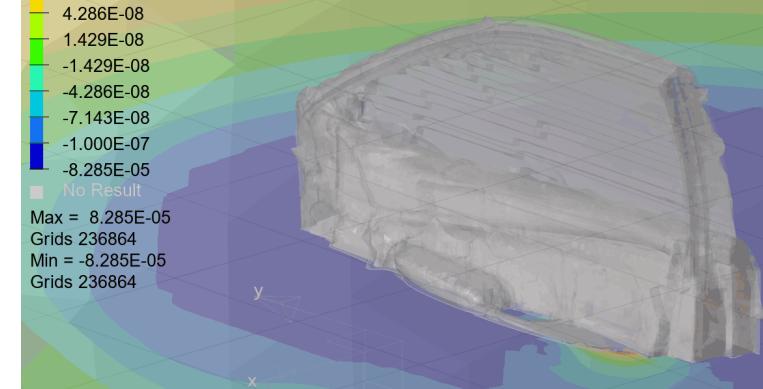
振動挙動

1: Model  
Contour Plot  
Pressure(Pressure)

8.285E-05  
1.000E-07  
7.143E-08  
4.286E-08  
1.429E-08  
-1.429E-08  
-4.286E-08  
-7.143E-08  
-1.000E-07  
-8.285E-05  
No Result

Max = 8.285E-05  
Grids 236864  
Min = -8.285E-05  
Grids 236864

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



X  
Y  
Z

音圧分布

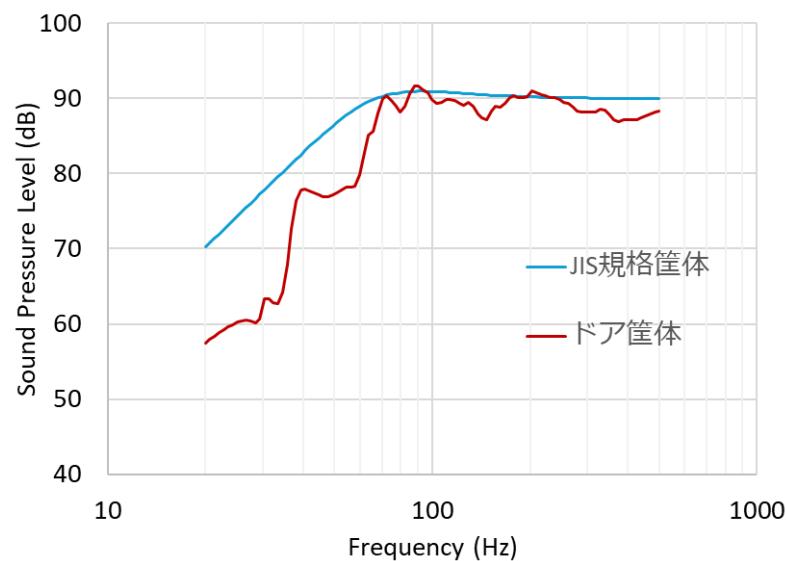
56Hz

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

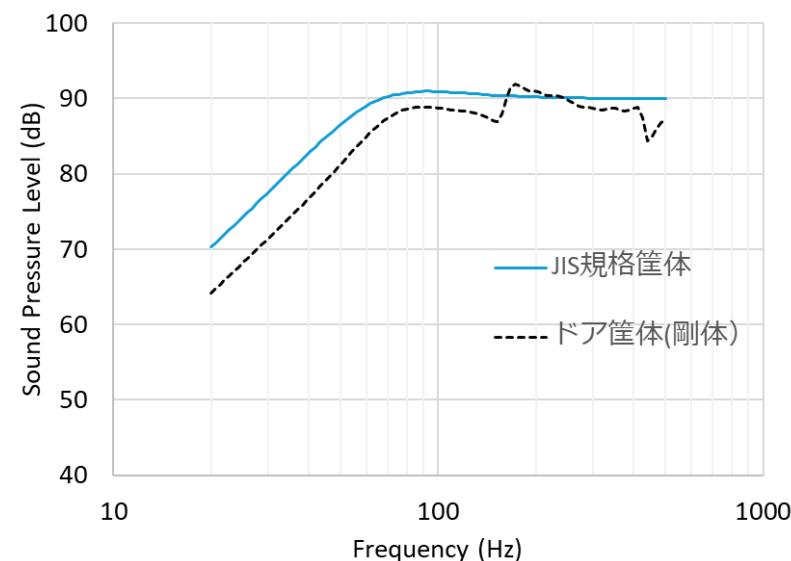
# 音質劣化要因分析

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)

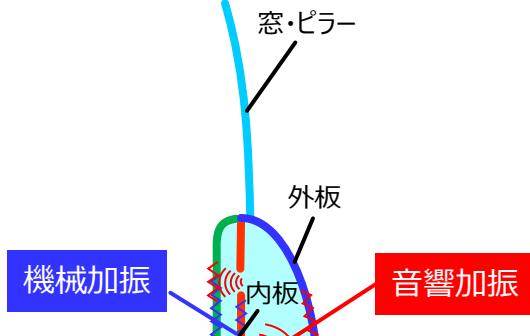


ドア筐体振動なし (ドア剛体)

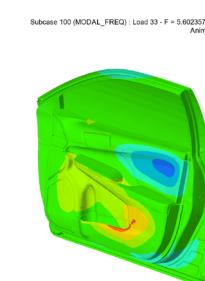
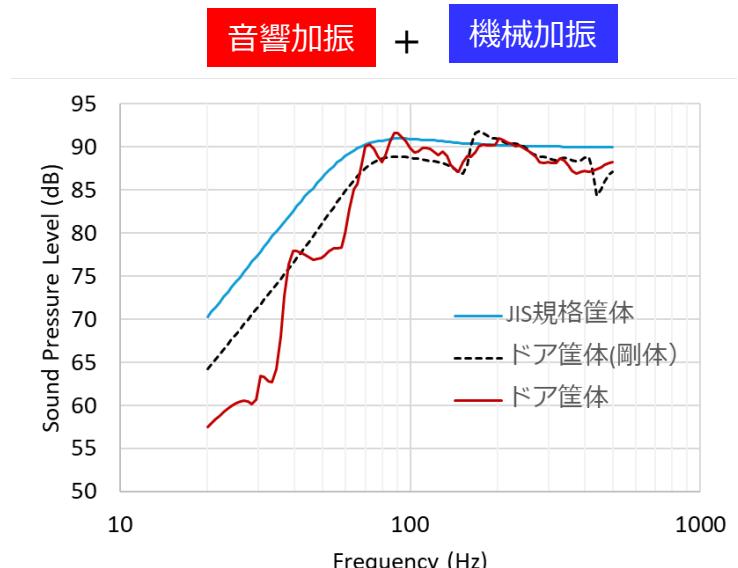


# 音質劣化要因分析

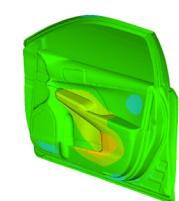
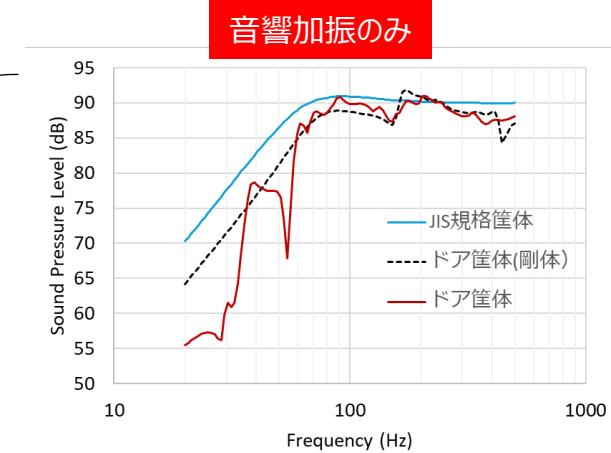
ドア振動要因は音響加振が支配的



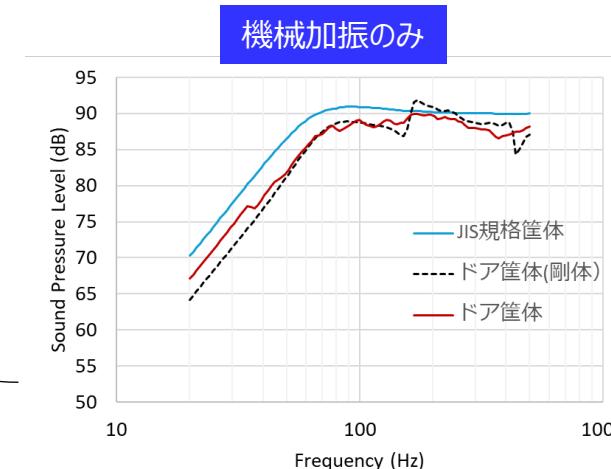
スピーカー振動の伝達経路



z  
x  
y



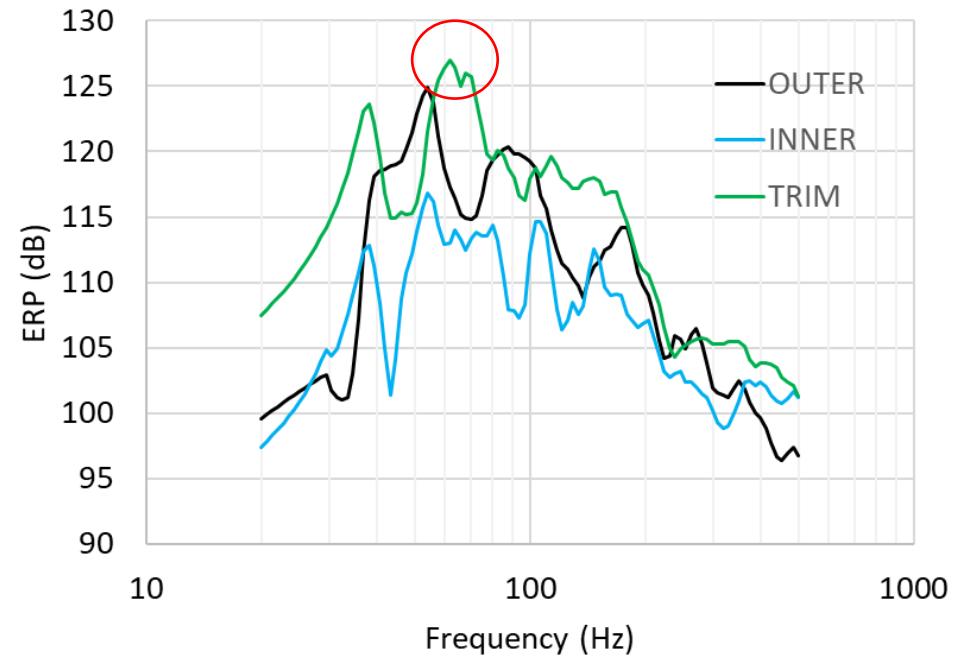
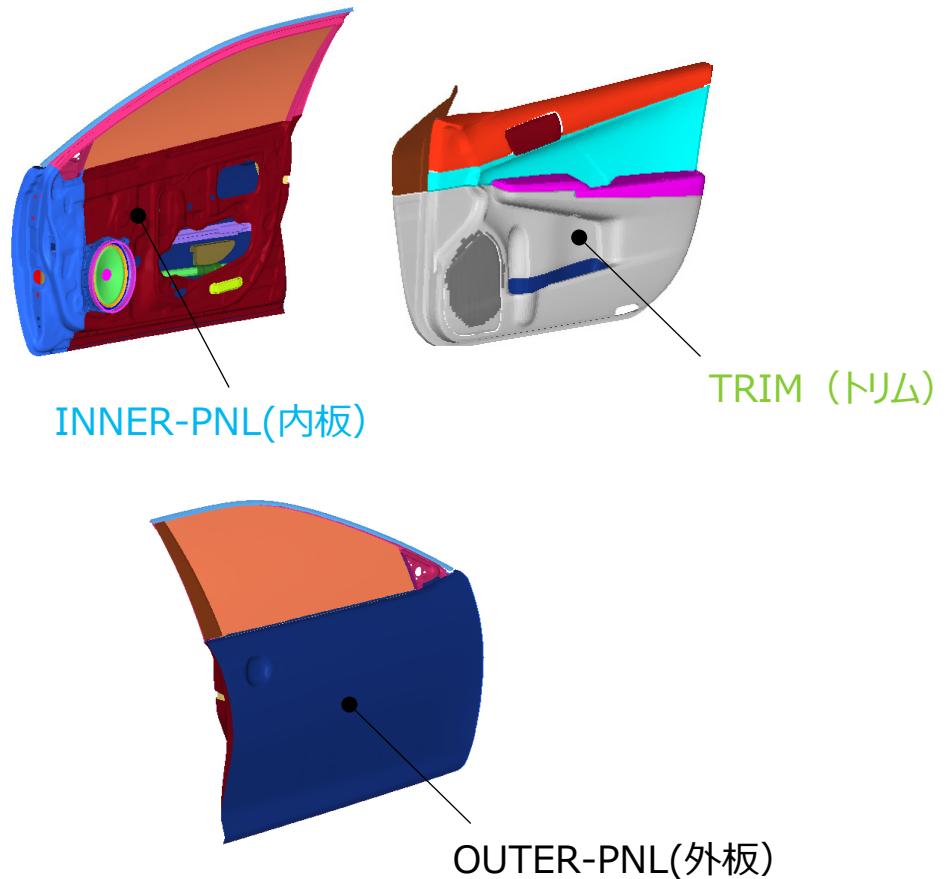
z  
x  
y



z  
x  
y

# 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

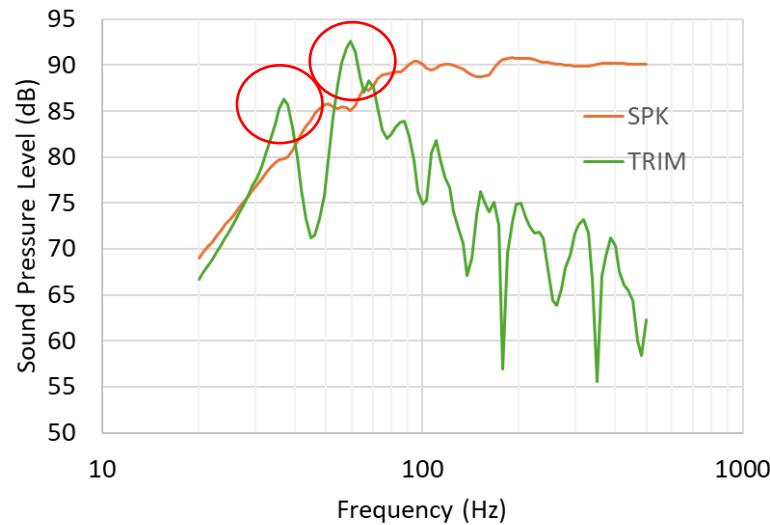
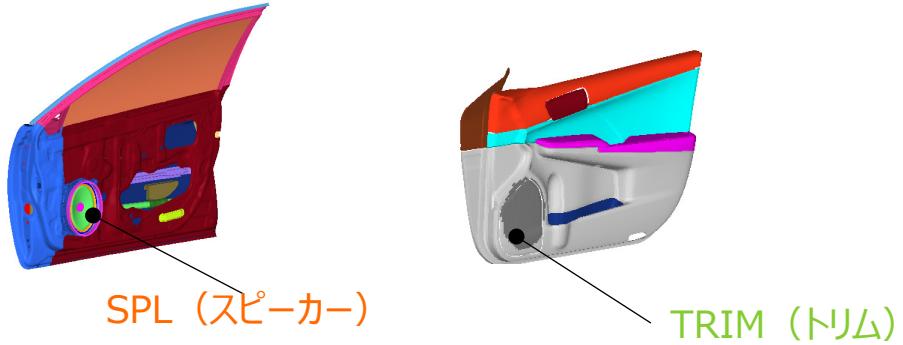


※車両モデル出所 : Center for Collision Safety and Analysis at George Mason University

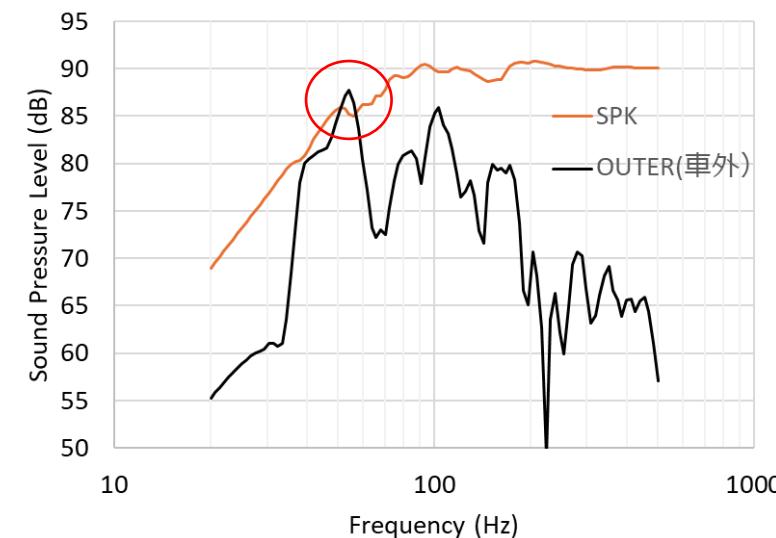
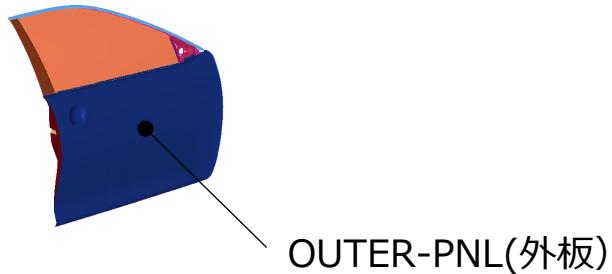
# 部位別放射音レベル

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)

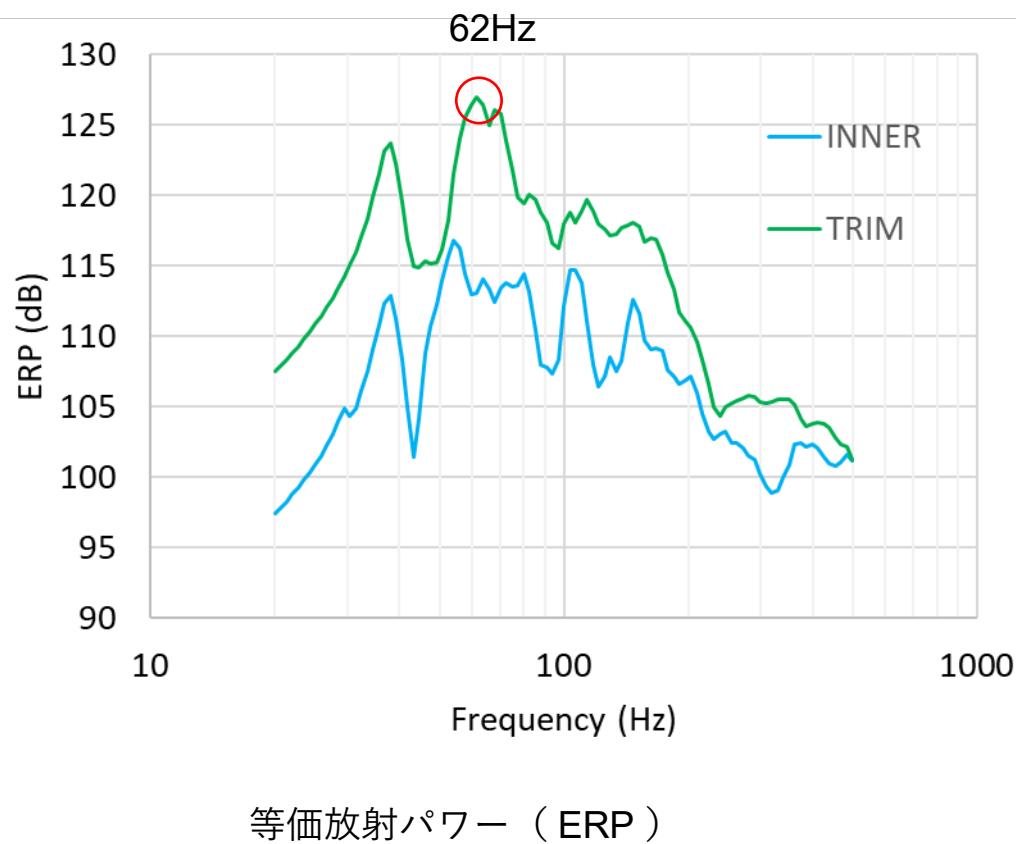


外板放射音 (車外側)

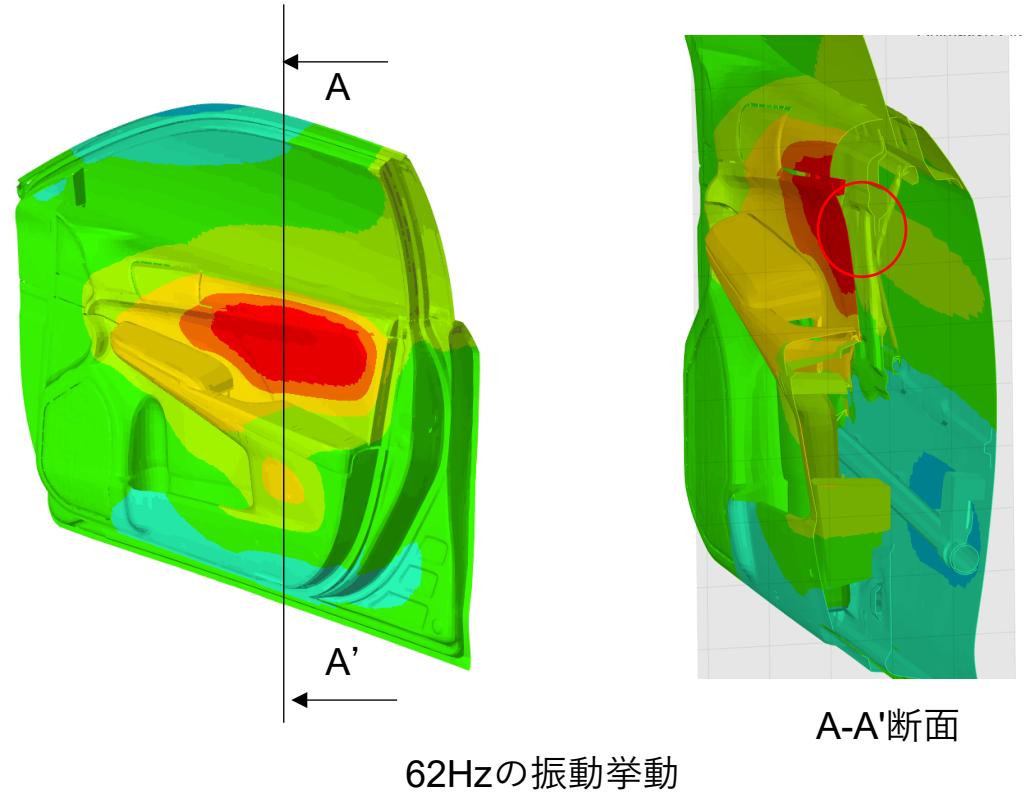


# 対策検討

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

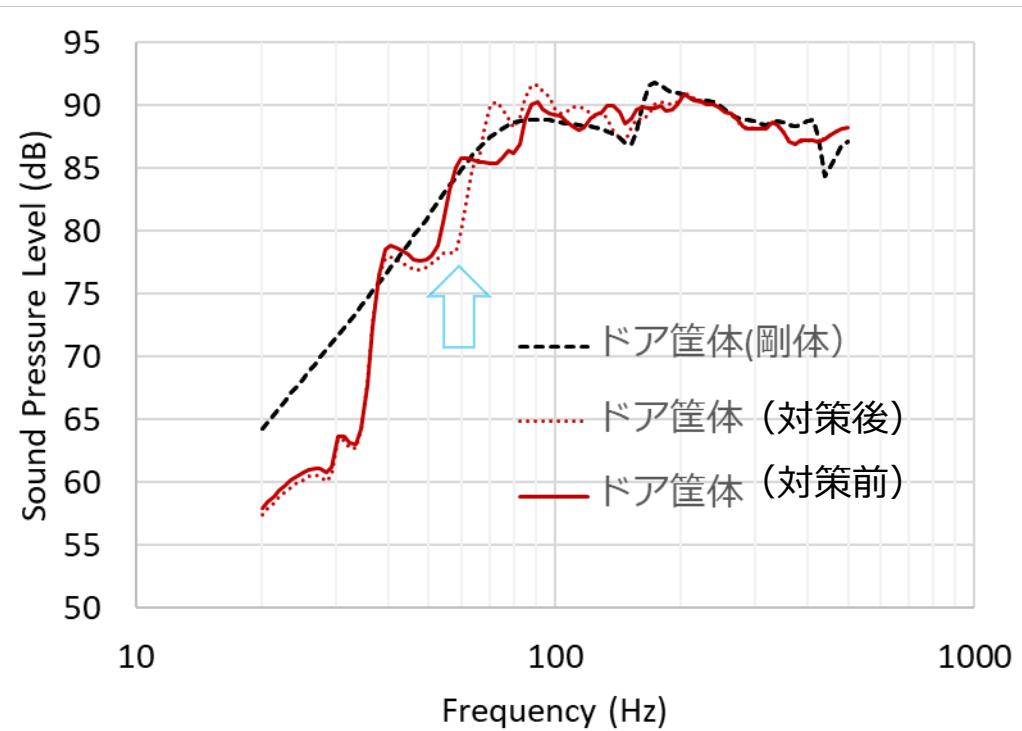


対策：トリムとINNERパネル間に締結点を追加

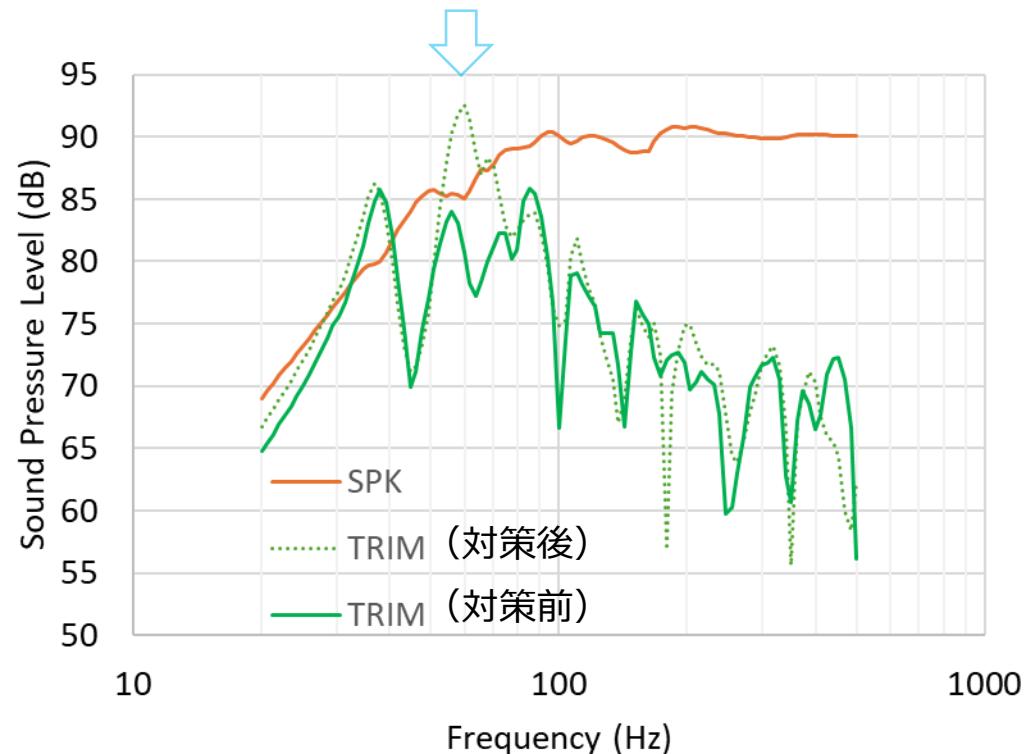


# 対策効果確認

評価点における音圧、部品別放射音で対策効果を把握



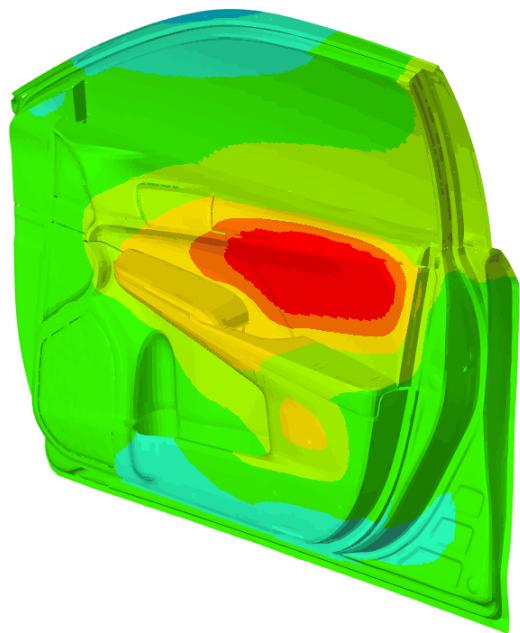
スピーカー正面1mにおける音圧



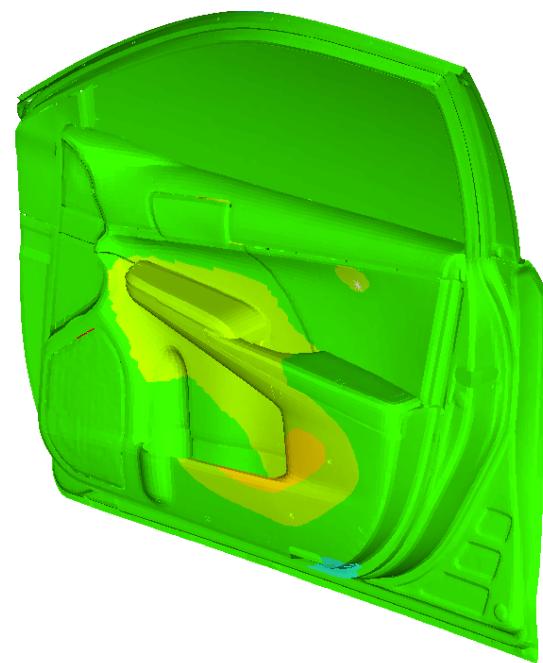
スピーカー正面1mにおける部位別放射音 (RADSN)

# 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

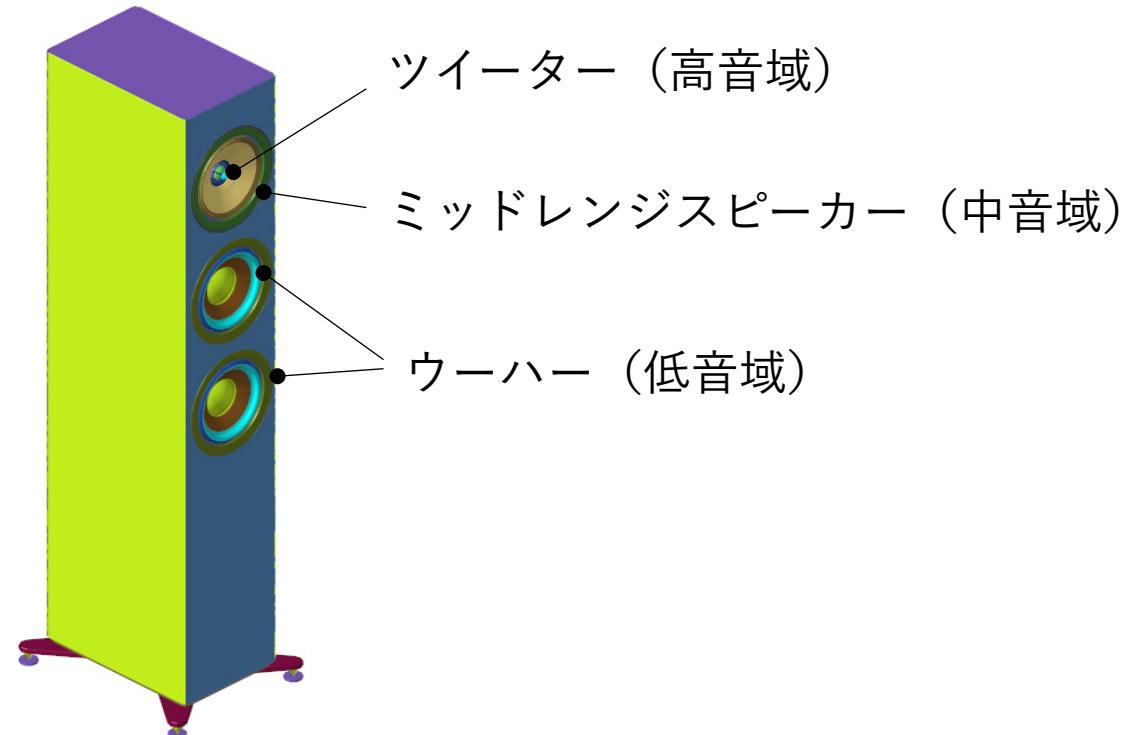
※62Hzの振動挙動

## 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

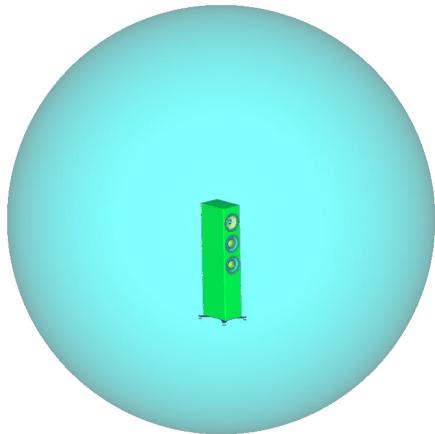


3way loudspeaker

# 音響空間モデリング、解析手法

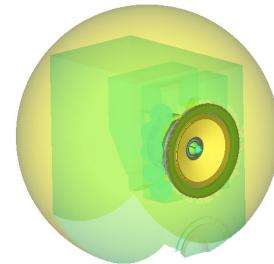
周波数領域に応じて、解析手法や音響空間のモデリング手法を最適化

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)

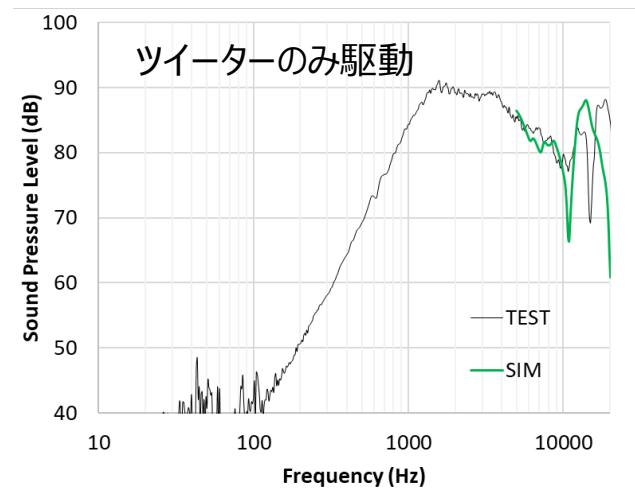
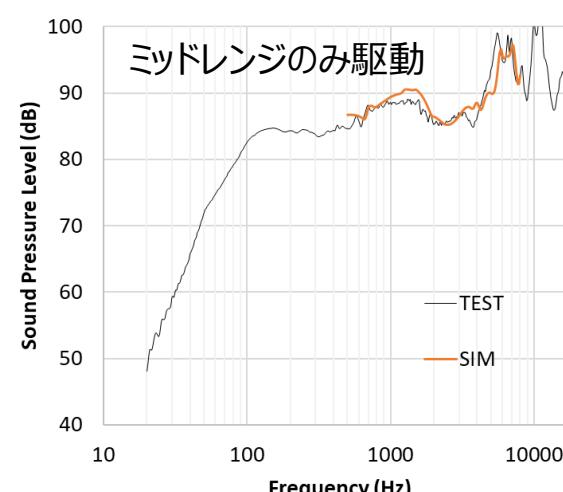
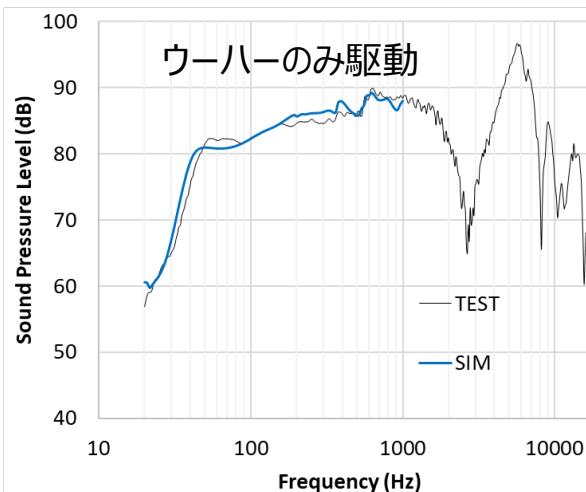


- 無限境界要素
- メッシュサイズ：5mm
- 音響空間：r 250mm
- 構造体：振動非考慮
- 解析手法：直接法

高周波評価モデル (~20kHz)

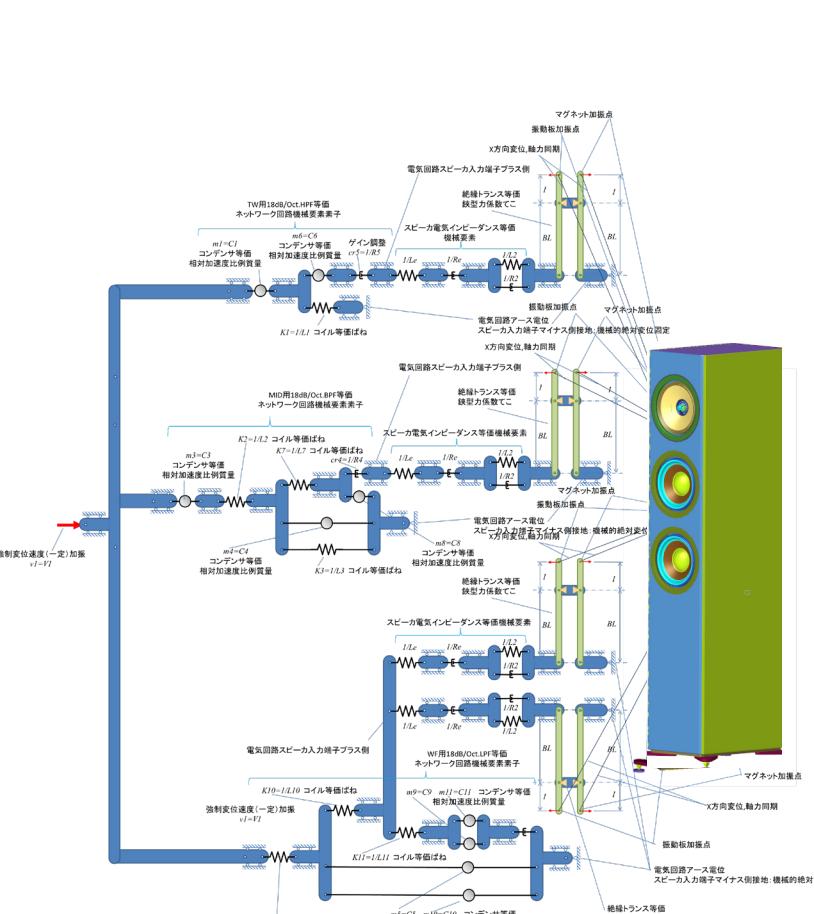


- 無限境界要素
- メッシュサイズ3mm
- 音響空間：r90mm
- 構造体：振動非考慮
- 解析手法：直接法

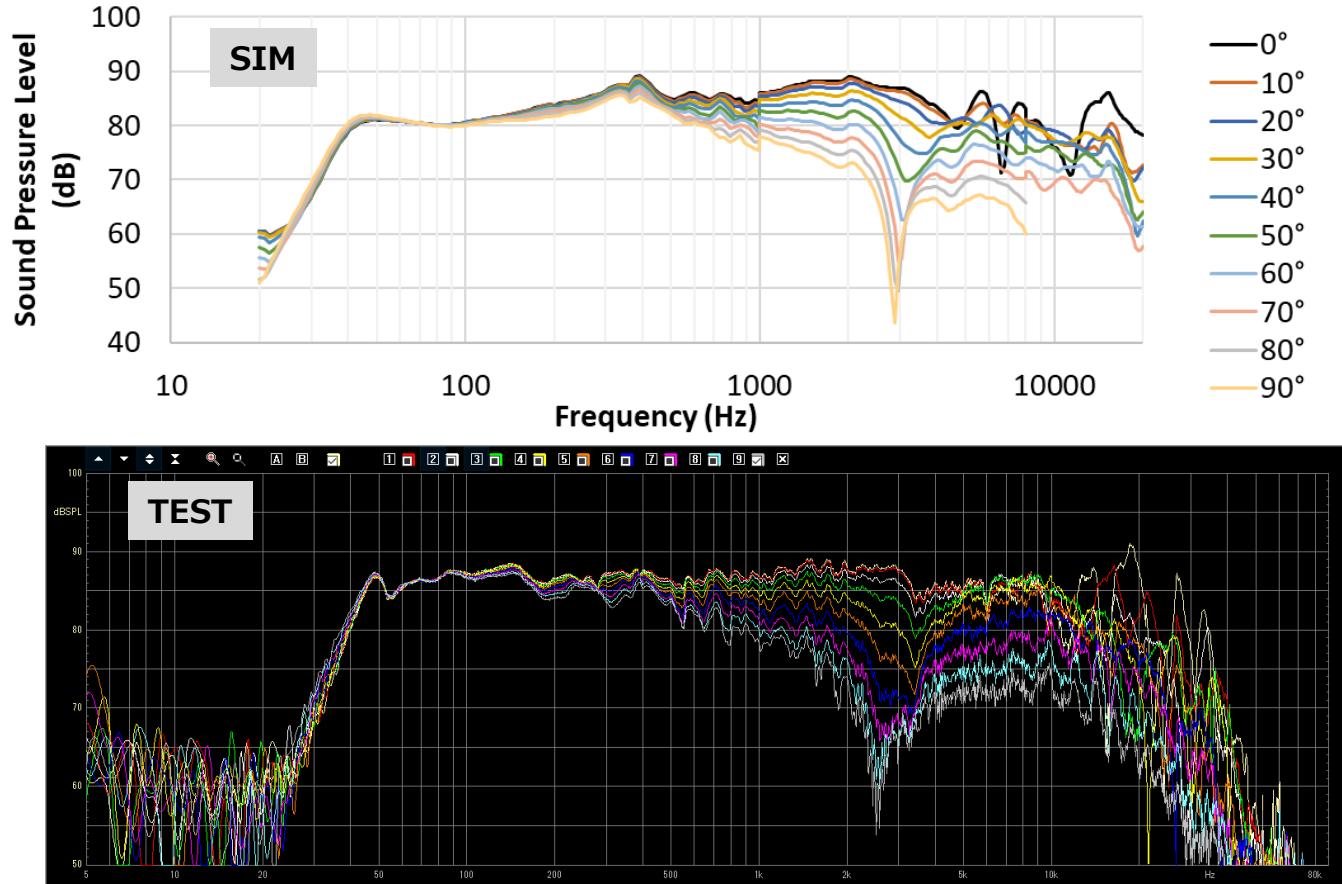


# 実測結果との比較

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



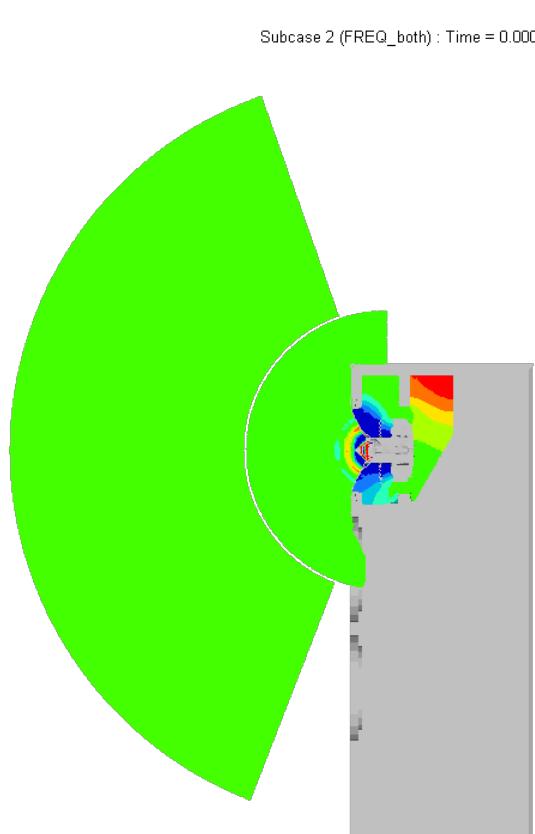
電気回路等価機械要素法 FEMモデル



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

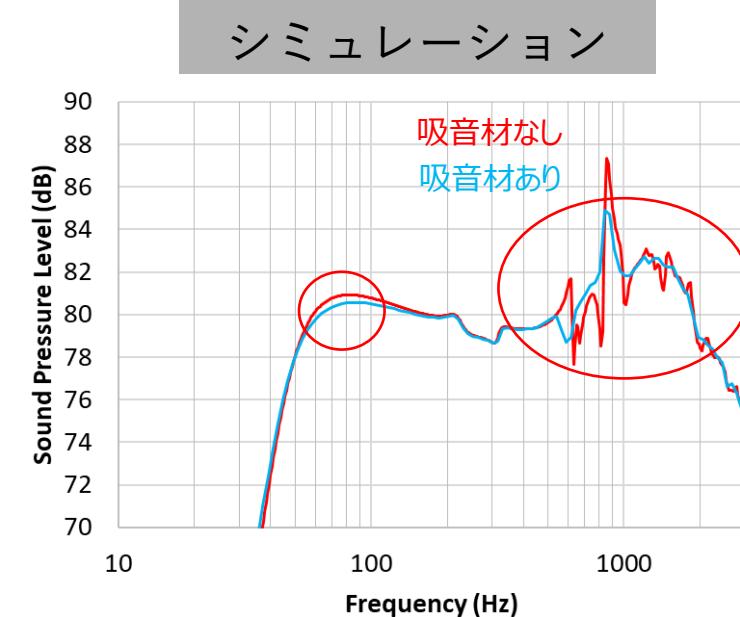
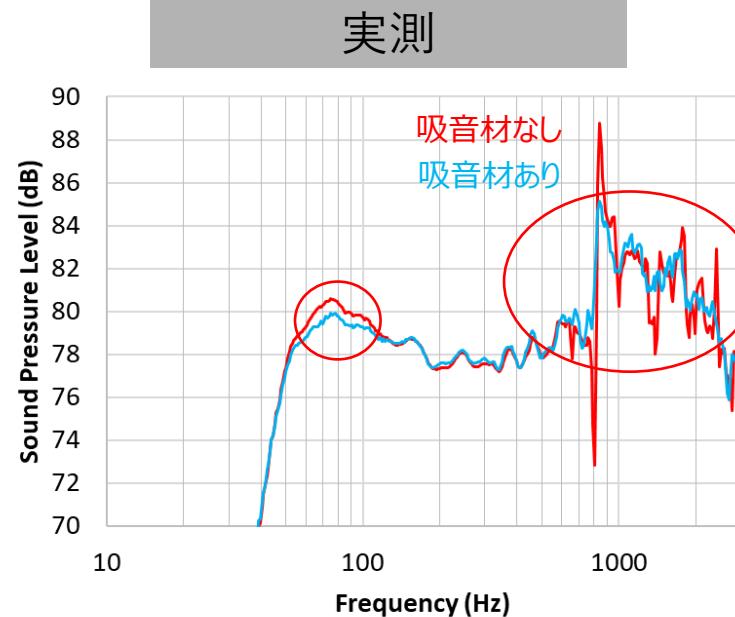
# 吸音材効果検証

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/m <sup>4</sup> ]	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/m <sup>2</sup> ]	1,093	1,256	1,383
Bulk Density [kg/m <sup>3</sup> ]	57.6	57.6	69.6
Shear modulus [N/m <sup>2</sup> ]	7,700	5,350	6,350
Poisson's ratio	0	0	0
Loss factor	0.444	0.571	0.375
Young's modulus [N/m <sup>2</sup> ]	15,400	10,700	12,700

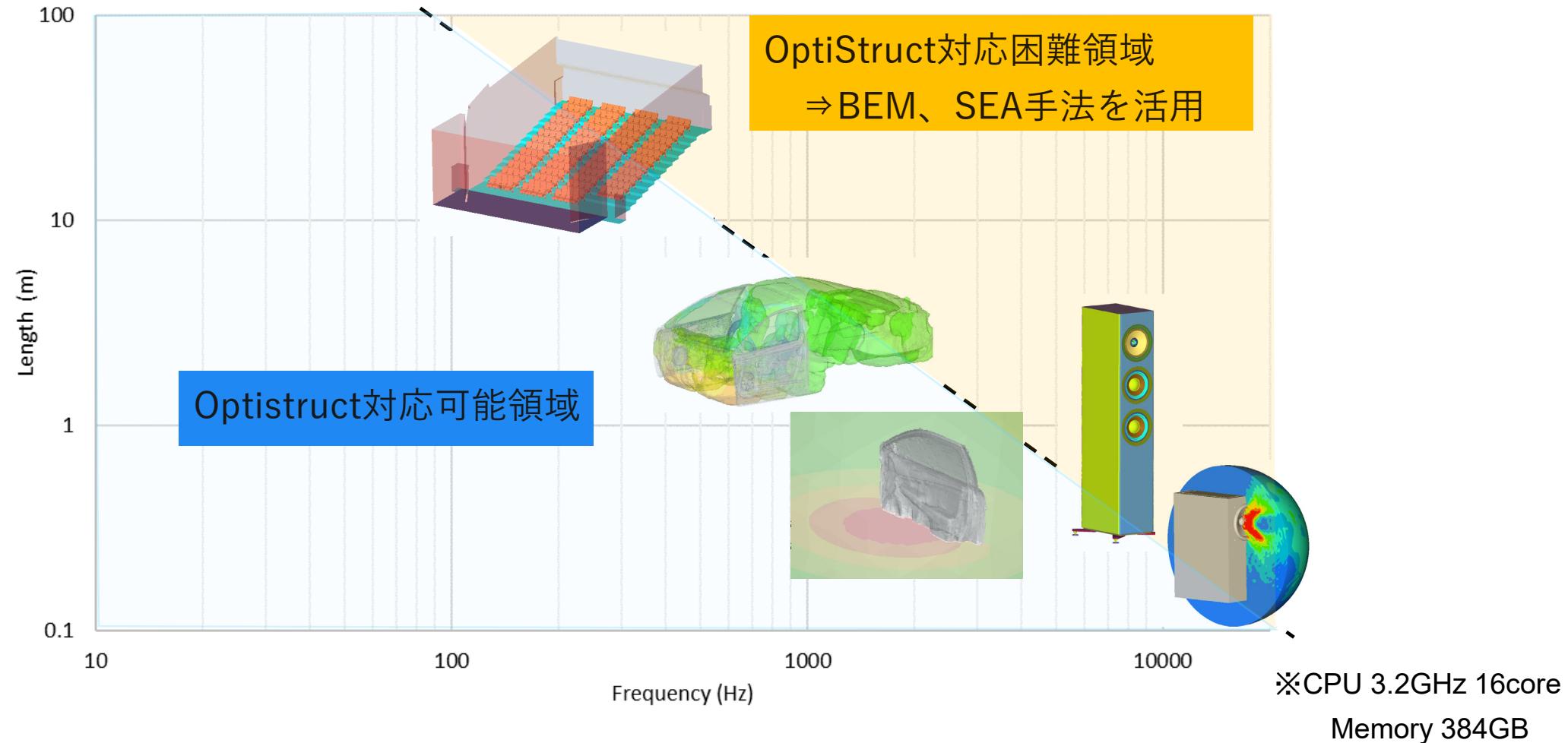
Biotパラメータ



※ 2 Wayスピーカーの結果

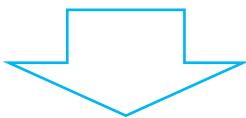
# 解析可能サイズと上限周波数の関係

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 came
- ・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組んだ



自社製品の商品力強化、受注拡大を実現



Panasonic  
CONNECT