

## ガラスと中間膜の境界面特性を考慮した遮音ガラスの遮音特性最適化に関する研究

日大生産工 (院) ○佐々木 俊輔 積水化学 (株) 山寄 浩志  
積水化学 (株) 武田 裕磨 日大生産工 高橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人

## 1. まえがき

現在, 世界中で温室効果ガスの排出を削減する取り組みが行われている. そのため我が国では, 国内販売車の電動化について「2035年までに新車販売で電動車100%を実現する」と表明した<sup>(1)</sup>. 電動化は振動騒音に対してはエンジン車より優位であると考えられる. しかし, 電気自動車はモーターやインバーターなどの装置から人間の耳に不快な高周波音が発生してしまうことが報告されている<sup>(2)</sup>. 特にウインドシールドガラスは, モーターやインバーターで発生した騒音の車室内への侵入経路であることからガラスの遮音性能向上がますます必要である. ガラスの遮音性能を向上させるためにはコストパフォーマンス, 多機能との両立を自動車の開発初期段階に検討する必要があることから, ガラスの数理モデルを用いた遮音特性のシミュレーションが重要となってくる.

以上の背景を踏まえ本論では, 遮音性能が予測可能な3層構造遮音ガラスの数理モデル構築を目的とする. 遮音ガラスの数理モデルはFEM (有限要素法) によるモデルとし, 遮音特性の予測精度を向上させるためGAを用いてガラスと中間膜間の境界面特性を最適化する. 次に, 構築した数理モデルで予測した結果と実験値を直接比較し精度検証を行う. 更に, その精度検証を行った数理モデルを用いて, 高周波数領域における遮音性能向上を目的としたGAを用いた中間膜物性値の最適化検討を行う.

## 2. 実験手法

## 2.1 実験値測定に用いたガラス

本研究で用いた遮音ガラスの構造を Fig.1 に示す.

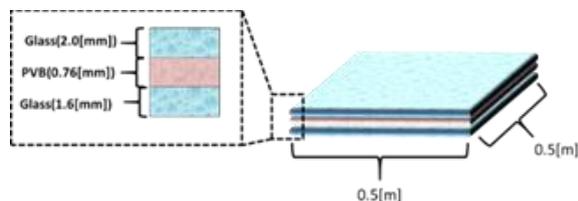


Fig.1 遮音ガラスの構造

縦横共に1辺の長さが0.5[m]の3層構造ガラスで, 厚さ2.00[mm]と1.60[mm]の板ガラスの間に0.76[mm]のポリビニルブチラール (PVB) を挟み込んでいる. 中間膜に使用されるPVBは, 板ガラスと共に加熱, 圧着することで優れた接着性と透明性を発揮するため, 耐

衝撃性と視野の確保に効果的である. そのため, 自動車に用いられるガラスは安全基準上, 中間膜を挟んだ安全ガラスの装着が義務付けられている<sup>(4)</sup>. 本研究で使用した遮音ガラスは自動車用遮音ガラスを数理モデルで再現したものであり, 一般的な材料特性を持つ板ガラスと中間膜で構成されている.

2.2 実験値の測定方法<sup>(5)</sup>

構築した数理モデルの精度比較用として, 音響インテンシティ法を用いて透過損失を測定した. 本研究では, JIS A 1441-1<sup>(6)</sup>で定められた規格に則り算出された数値を使用している. 音響インテンシティは, 音の進行方向に対して垂直な単位面積に単位時間通過した際の音響エネルギーのベクトル量を表す. 実験値の測定環境の図をFig.2に示す.

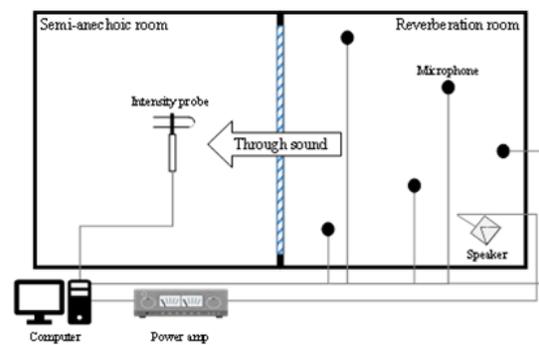


Fig.2 音響透過損失の測定環境

Fig.2の左側が半無響室, 右側が残響室を示している. 残響室側には音源となるスピーカーを設置し, 拡散音場の状態を作成している. 一方, 半無響室側には, 残響室側から透過した音の強さと流れの方向を測定するために音圧差から粒子速度を求める Face to Face 方式のインテンシティプローブを設置している.

## 3. 遮音ガラスの数理モデル

本研究では, 有限要素法(Finite Element Method: FEM)を用いて数理モデルを構築した. Fig.3に構築した数理モデルを示す.

Study on optimization of sound insulation characteristics of glass considering boundary surface characteristics between glass and interlayer film

Shunsuke SASAKI, Koushi YAMAZAKI, Yuma TAKEDA, Ayumi TAKAHASHI and Kazuhito MISAJI

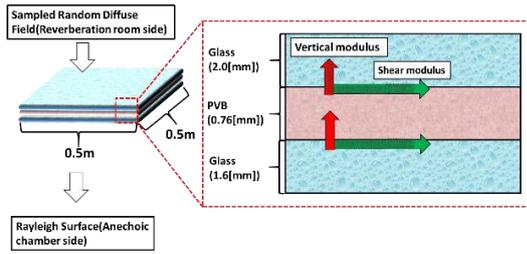


Fig.3 境界面特性を考慮した数理モデル

Fig.1 に示した 3 層構造遮音ガラスを、ACTRAN (FEM 音響解析ソフト) を用いて構築した。実験環境と同様に厚さ 2.00[mm]側の板ガラスにランダム拡散音場 (残響室)、厚さ 1.60[mm]側の板ガラスに放射面 (無響室) を設定した。また FEM を用いた解析の際にはメッシュサイズ、メッシュ分割数、要素数を決める必要がある。本研究では、メッシュサイズを 8.30[mm]、メッシュ分割数を縦横 60 分割、総要素数を 21600 とした。また、境界条件として遮音ガラス端部は完全固定とした。今回、本研究では、ガラスと中間膜の間に境界面特性を考慮している。これは境界面特性を考慮しないモデルで実測値との精度検証を行った時に誤差が大きかったからである。そのグラフを Fig.4 に示す。

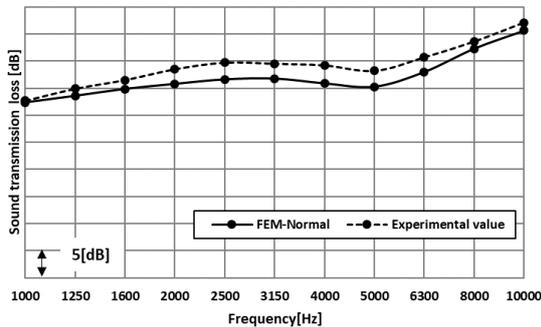


Fig.4 境界面特性を考慮していない場合の音響透過損失

Fig.4は解析対象周波数を1000~10000[Hz]としたときの境界面特性を考慮していない場合の音響透過損失と実測値のグラフである。横軸が1/3オクターブバンド周波数[Hz]、縦軸が音響透過損失である。グラフの点線が実験値、実線がFEMモデルで解析した結果を示している。Fig.4より解析値と実測値には差が生じていることが分かる。特に周波数が4000[Hz]付近においてはかなり誤差が大きいことが分かる。これはコインシデンス効果の影響によって解析精度が下がっている。そのため4000[Hz]付近を中心とした解析精度の向上が必要である。解析精度を向上させることを目的として本研究では、ガラスと中間膜の間に境界面特性を考慮した。各層の界面挙動はこれまで定量的に議論されていない。そこで本研究では、GAを用いた最適化計算を用いて中間膜の持つ界面挙動を複素弾性率として垂直方向、せん断方向毎に算出し、

境界条件としてFEMモデルへ組み込み実験値との比較を行った。

#### 4. ガラスと中間膜の境界面特性最適化

未知数である界面挙動を算出するため、GAを用いた最適化計算を行った。

##### 4.1 設計変数

設計変数は、境界面特性弾性率とし、実部と虚部に分けて設計した。さらに垂直方向、せん断方向の弾性率は異なる場合として考えた。

設計変数の上限値及び下限値をTable.1に示す。

Table.1 境界面特性の設計変数

	境界面特性 弾性率 (せん断方向・ 実部)	境界面特性 弾性率 (せん断方向・ 虚部)	境界面特性 弾性率 (垂直方向・実 部)	境界面特 性弾性率 (垂直方 向・虚 部)
下限値	1.00E+07	0.01	1.00E+07	0.01
上限値	1.00E+11	100	1.00E+11	100

Table.1 は界面挙動弾性率の設計変数を示したものであり、左から実部のせん断方向弾性率、虚部のせん断方向弾性率、実部の垂直方向弾性率、虚部の垂直方向弾性率である。設計変数の範囲は現実的な値の範囲としている。

##### 4.2 目的関数

構築した数理モデルの解析結果と実験値との音響透過損失の差分が最小になるように目的関数を設定した。解析対象周波数域は 1000~10000[Hz]とした。

##### 4.3 解析結果

ここではまず、ガラスと中間膜の間の界面挙動の最適化を求めた。次に、最適化した界面挙動弾性率を組み入れた遮音ガラスの数理モデルを用いて予測した音響透過損失と実測値との相対誤差率を示す。最適化計算においてGAの世代数は10、個体数を20として解析を行った。

界面挙動を考慮した音響透過損失結果(FEM-Interface behavior)、界面挙動を考慮していないFEMモデル(FEM-Normal)の音響透過損失結果と実験値(Experimental value)を Fig.6 に示す。縦軸が音響透過損失(Sound transmission loss)を示し、横軸は1/3オクターブバンド周波数[Hz]を示している。

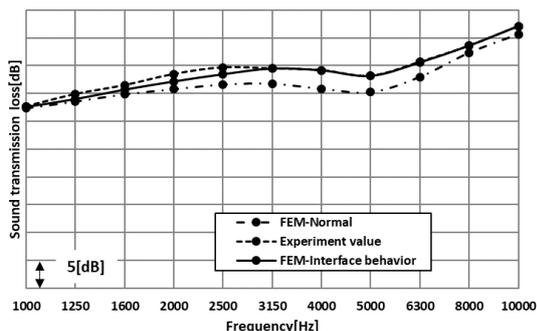


Fig.5 境界面特性最適化解析における音響透過損失

Fig.5の点線が音響透過損失の実験値を示し、実線が界面挙動を考慮した場合、一点鎖線が、界面挙動を考慮していないFEMモデルを用いて解析した結果を示している。Fig.6より界面挙動を考慮しているFEMモデルは実測値に対し、非常に良い一致を示していることがわかる。2500[Hz]以下において実測値に対し差異があるのは質量則の影響と考えられる。この中間膜のコインシデンス限界周波数は4000[Hz]である。コインシデンス周波数付近を見ていくと境界面特性を考慮したモデルでは、誤差が非常に小さくなっていることがグラフから分かった。よって、コインシデンス周波数付近の解析精度の向上を確認することができた。次に、境界面特性としてのせん断方向実部弾性率特性の最適化結果をFig.6、せん断方向損失係数の最適化結果をFig.7に示し、垂直方向実部弾性率特性の最適化結果をFig.8、垂直方向損失係数の最適化結果をFig.9に示す。

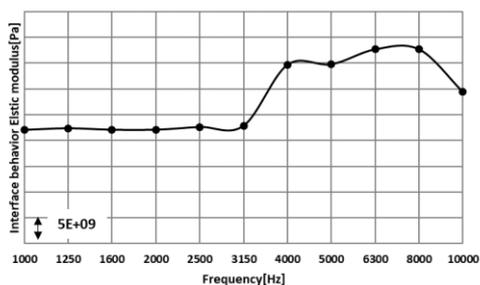


Fig.6 境界面特性弾性率 (せん断方向・実部)

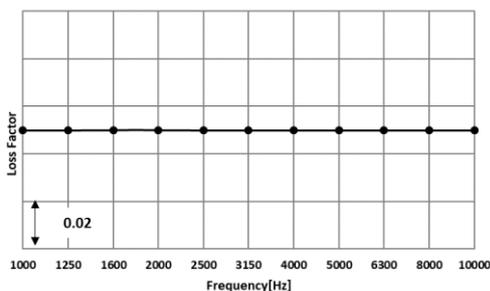


Fig.7 境界面特性損失係数 (せん断方向)

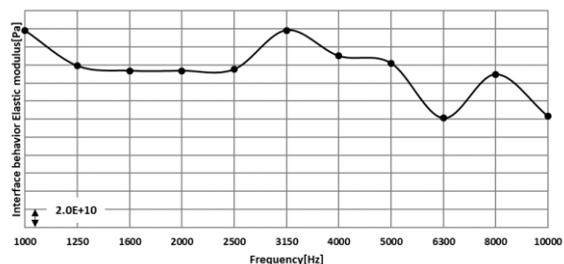


Fig.8 境界面特性弾性率 (垂直方向・実部)

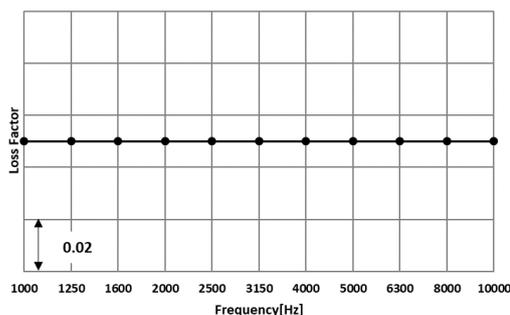


Fig.9 境界面特性損失係数 (垂直方向)

Fig.6からFig.9とともに横軸が周波数で、縦軸が界面挙動弾性率と損失係数(Loss factor)を表している。Fig.8、Fig.10から損失係数が非常に小さいことがわかる。

## 6. 高周波数領域における遮音性能改善

前節までに構築した、界面挙動を考慮した数理モデルを用いて1000[Hz]以降の遮音性能を向上させるために中間膜物性値をどのようにすれば良いのかGAの最適化手法を用いて解析を行った。

### 6.1 設計変数

設計変数は、中間膜の貯蔵弾性率と損失係数の2つとした。貯蔵弾性率と損失係数の上限値・下限値を以下のTable.2に示す。

Table.2 中間膜物性値最適化における設計変数

	貯蔵弾性率[Pa]	損失係数
下限値	0	0
上限値	材料データ×10	材料データ×10

貯蔵弾性率と損失係数の上限値は既存材料データの10倍とした。

### 6.2 目的関数

解析対象周波数を1000~10000[Hz]とし、FEM解析値を実験値より2[dB]向上させることを目的関数とした。

### 6.3 解析結果

中間膜物性値の最適化計算結果について示す。GAの世代数は10, 個体数を20として解析を行った。はじめに最適化後の音響透過損失結果と実験値のグラフをFig.10に示す。

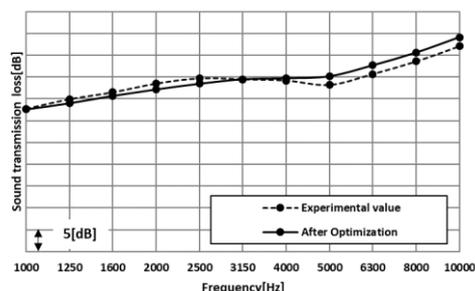


Fig.10 中間膜最適化計算における音響透過損失

Fig.10の縦軸が音響透過損失[dB], 横軸が1/3オクターブバンド周波数[Hz], 実線が中間膜物性値最適化における音響透過損失の結果, 点線が最適化前の実験値である。概ね2dB性能が向上しているのがわかる。但し, 2000, 2500[Hz]で効果が確認できないことがわかる。これは2500[Hz]以下においては質量則の影響が大きいためと考えられる。

次に, 中間膜のベース材の貯蔵弾性率(縦方向)の実験値に対する, 求めた最適値の比率を Fig.11, 損失係数(縦方向)のベース実験値に対する最適値の比率を Fig.12に示す。

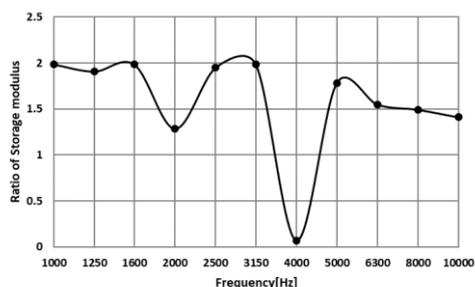


Fig.11 貯蔵弾性率の比率

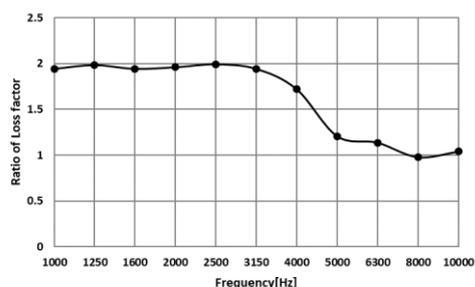


Fig.12 損失係数の比率

貯蔵弾性率, 損失係数の比率ともにベースデータに対

し, 3150[Hz]までと5000[Hz]以降での変化はそれほど大きくないが, コインシデンス限界周波数の影響を受けだす4000[Hz], 5000[Hz]においては, 変動が大きくなっていることが分かった。これは質量則の影響によって3150[Hz]までは変動が小さくなったのではないかと考えられる。4000[Hz]を除いて, 貯蔵弾性率ではベース特性に対し, 約2倍, 損失係数で見ると3150Hzまでは約2倍, 5000Hz以上では約1倍となっている。現実的な中間膜の粘弾性特性は周波数に対し連続的な特性を示す。その為 Fig.12の4000[Hz], 5000[Hz]の特性はコンベンショナル手法では再現できないことから, 今後の課題である。

### 7. まとめ

本研究から, 以下のことが分かった。

- (1) ガラス面と中間膜間の境界面特性を複素弾性特性(せん断方向, 垂直方向)として定義し, GAを用いた最適化計算により定義することにより, 精度を向上させた遮音ガラスの数理モデルを構築することができた。特にコインシデンス周波数付近の精度を向上することができた。
- (2) 提案した数理モデルを使用し, 高周波数領域における遮音性能向上を目的とした遮音ガラスの中間膜物性値の最適化計算を行うことができた。これによりベース特性に対し3150[Hz]以降においては2[dB]の遮音特性向上を確認することができた。

本研究では第一段階として, 設計変数の範囲を中間膜と板ガラス, 両方の持つ弾性率の値から現実的な値を定め, 周波数ごとに界面の複素弾性率として最適化計算を行った。そのため境界面特性の妥当性の検証が必要である。今後, この境界面の複素弾性特性については, 境界面の引張(せん断, 垂直)試験等により検証していきたい。

### 参考文献

- (1) 通常国会での施政方針演説(2021)
- (2) Timothy Whitehead bassett: Study of high frequency noise from electric machines in hybrid and electric vehicles, inter.noise 2014(2014).
- (3) 安保慧: 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), 79巻(804号), pp.1415-1417(2013)
- (4) 国土交通省: 道路運送車両の保安基準, 第29条第1項(2014)
- (5) 矢野博夫: 建築音響における音響インテンシティ計測法の応用(<小特集>音響インテンシティ), 日本音響学会誌, 43巻(12号), pp.966(1987)
- (6) JIS A 1441-1: 音響インテンシティ法による建築物及び建築部材の空気音遮断性能の測定方法(2007)