

# 積層防音材の音響特性最適化に関する研究

研究開発本部 CAE室 三木達郎

## 1. はじめに

自動車の車外騒音規制が2016年より年々厳しくなっていることから<sup>1), 2)</sup>, 自動車部品においては振動騒音性能向上と軽量化の高次元両立が大きな課題となっている。一方で、動力源がガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、そしてモーターと変化する中で、ノイズの種類や周波数域も異なってきた<sup>3)</sup>。

防音材による対策では、静粛性と軽量化は一般的に相反することから、両者を高次元で両立させるための一つの考え方として、防音材を積層させることによる吸音特性（以下、 $\alpha$ ）、透過損失特性（Transmission Loss 以下、TL）、固体伝播音特性（Insertion Loss 以下、IL：挿入損失、本論で言うILとは固体振動加振時における防音材挿入前後における放射音エネルギーの差分）といった音響特性の多機能化がある。これは、各層の製品部材を調整することにより、防音材の吸音、遮音、固体伝播音特性を、対象とするノイズに対して効果的に発揮させるものである。こうした防音仕様は、開発初期段階に最適に設計する必要がある。

当社はこれまでに、Biot理論を用いて、繊維系多孔質材料の密度や繊維径から吸音率を予測する技術に取り組んできた<sup>4)</sup>。

本論ではノイズ特性に合わせた最適な設計を可能にするシミュレーション手法を提案することを目的とする。本論では、遺伝的アルゴリズムを用いて音響特性を同時に最適化する技術を紹介する。

## 2. 解析の流れ

弊社は、繊維系多孔質材料を用いた製品を多数開発している。そこで、これまでに得られた繊維特性の知見を元にBiotパラメータを算出し、解析モデルを作製した。続いて、モデルの精度についてILで実測値との比較検証を行った。そして、遺伝的アルゴリズムで多目的最適化計算を行い設計パラメータとの相関を検証した。それぞれについては以下で詳細に記載する。

## 3. Biotパラメータを用いた繊維特性の推定

繊維系防音材の素材設計には繊維径 $D$ 、多孔度 $\phi$ （繊維の真密度 $\rho_t$ 、かさ密度 $\rho$ ）等の特性値があり、特性値と流れ抵抗 $\sigma$ は式(1)、(2)に示す関係がある。例えば繊維の真密度 $\rho_t$ が既知で、音響特性を最大化させるBiotパラメータ（流れ抵抗 $\sigma$ 、多孔度 $\phi$ ）の要求が決まれば、設計要素である繊維径 $D$ を決定することができる。式(1)の流れ抵抗 $\sigma$ は、空気の粘度 $\mu$ と多孔度 $\phi$ を用いた実験式である<sup>4)</sup>。

$$\sigma = A \mu (1 - \phi)^B D^C \quad (1)$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_t} \quad (2)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ は実験から求めるフィッティング係数である。

また、求めた繊維径 $D$ と多孔度 $\phi$ から式(3)、(4)

を用いて熱的特性長 $A'$ 、粘性特性長 $A$ を求められる。ここで $a_\infty$ は迷路度である。

$$A' = \frac{\phi}{2(1-\phi)} D \quad (3)$$

$$A = \sqrt{\frac{8\eta a_\infty}{\sigma \phi}} \quad (4)$$

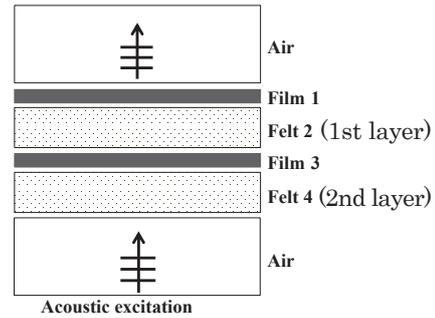


図2 透過損失の計算モデル

## 4. 解析

### 4.1 解析モデル

積層防音材の音響解析には市販ソフトのActran (MSC社)、遺伝的アルゴリズムによる最適化計算はMATLAB (MathWorks社)を用いた。

$\alpha$ , TL, ILの4層構造防音材の解析モデルをそれぞれ図1～3, に示す。モデルは200mm角, トータル厚みを10mm以下とした。ここで, Felt 2, Felt 4をそれぞれ1st layer, 2nd layerとした。

$\alpha$ については, 式(5)にて, Film 1側からの入力に対する吸音率を求めた。透過損失は, 式(6)にてFelt 4側からの入力音圧とFilm 1側から出力される透過音圧から求めた。ILは, 式(7)にて図3のPlate面を構造加振し, 4層構造防音材の有無におけるFilm 1側から100mmの上方の音響エネルギー差分から求めた。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{P_1}{P_{in}} \right|^2 \quad (5)$$

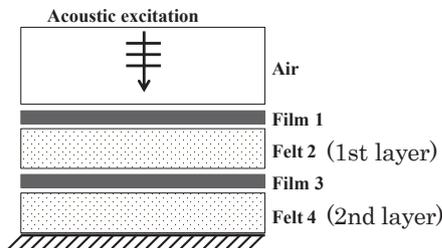


図1 吸音率の計算モデル

$$TL = 20 \log \frac{P_{in}}{P_1} \quad (6)$$

$$IL = 20 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (7)$$

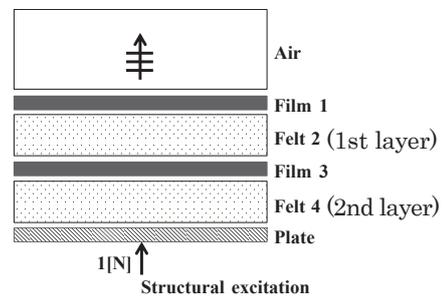


図3 挿入損失の計算モデル

ここで,  $P_{in}$ は入射音圧,  $P_1$ は試料あり時の放射音圧,  $P_2$ は試料なし時の放射音圧を示す。また,  $\alpha$ , TLについては音響加振, ILについては構造加振を入射エネルギーとした。

### 4.2 遺伝的アルゴリズムを用いた音響特性最適化

#### 4.2.1 最適化手法

多目的最適化の目標は, 積層防音材の $\alpha$ , TL, ILの性能が最大になる設計変数を見つけることである。遺伝的アルゴリズムの最適化においては, 各性能をパレートランキング法によるパレート解にて算出した。一般的に多目的関数の最適化においては, 複数の解の組合せがあり, これら最適な解の集まりをパレート解と呼ぶ。解は原点に近づくほど評価が高くなる傾向にある。また, 解全体をプロットした図をパレート図と呼ぶ<sup>5)</sup>。

パレートランキング法とは, 解の優越関係に基づいて定められる個体間の順位を適合度を用いる方法である。得られた解を, 最適に近い方から順

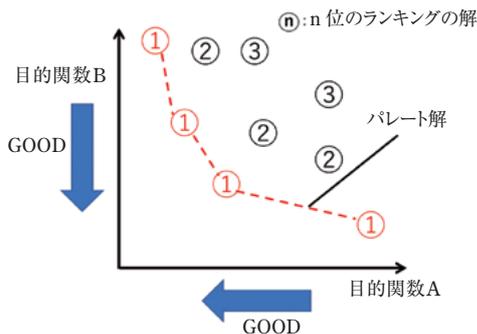


図4 一般的なパレート解

に1位, 2位…とし, 1位をパレート解とする。図4にパレートランキング法を用いた2変数での一般的なパレート解の例を示す。

#### 4.2.2 設計変数

設計変数として, 各フェルト層のヤング率 $E$ やかさ密度 $\rho$ , 厚さ $l$ に着目した。繊維径は一定とし, 2層目と4層目のフェルト層の材料特性 ( $l_2, l_4, \rho_2, \rho_4, E_2, E_4$ ) を設計変数とした。また, 全体の厚さは10mm以下とした。

#### 4.2.3 目的関数

多目的最適化の目標は, 積層防音材の $a$ , TL, ILの性能が最大になる設計変数を見つけることである。また,  $a$ , TL, ILを総合的に評価する多目的関数として式 (8) に示す $f$ を用意した。

$$f = \omega_a \times a + \omega_{TL} \times TL + \omega_{IL} \times IL \quad (8)$$

ここで,  $\omega_a, \omega_{TL}, \omega_{IL}$ は重みづけ係数であり, 今回は $a, TL, IL$ をバランスよく最大化するためそれぞれ1/3とした。なお,  $a, TL, IL$ の解析対象周波数範囲はそれぞれ2000~5000Hz, 800~2500Hz, 300~800Hzとした。

## 5. 精度検証

Biotモデルと伝達マトリックス法による $a$ とTLに関する精度検証については, 過去に実施がなされている<sup>6)</sup>。そこでILについて, Actranにより求めた計算値と実測値を比較した。

## 5.1 実験方法

小型加振機を用いた放射音測定実験を行った。今回実験に用いた装置を図5に示す。半無響室に小型加振機 (IMV社製) を設置し, その周辺を鋼板 (幅870mm, 高さ530mm, 厚さ2mm) で覆った。鋼板の内側には吸音材としてグラスウールボードを貼り付けた。上面はプレートの振動に干渉しないように加工し, 上面以外から漏れる音は無視できるレベルであることを確認済みである。プレート中心の100mm上方にマイクが設置しており, プレートのみの放射音とサンプルがある時の放射音を測定した。また, サンプルは全面をのりで接着した。

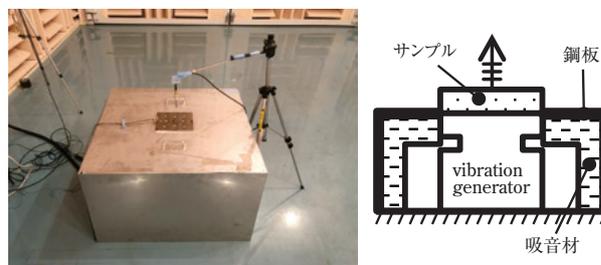


図5 固体伝搬音測定装置

## 5.2 ILの妥当性検証

ILの実験値と計算値の比較を図6に示す。測定サンプルは計算モデルと同じ構造で作製し, 熱プレスによって $\square 200\text{mm}$ , 厚さ10mm, 面密度 $500\text{g/m}^2$ とした。この結果, 計算値と実測値が概ね一対一対応していることから, よく一致していることがわかる。

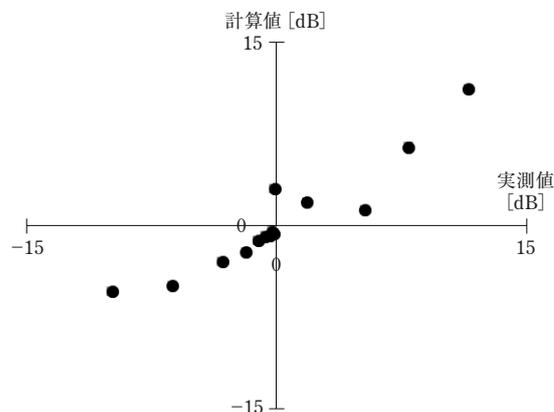


図6 ILの実測値と計算値の比較

## 6. 解析結果

遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を行い、 $a$ 、TL、ILのパレート解を得た。それぞれ個体数は300、世代数は10とした。 $a$ -TL-IL多目的最適化パレート図を図7、 $a$ -TL最適化パレート図を図8、IL- $a$ 最適化パレート図を図9、IL-TL最

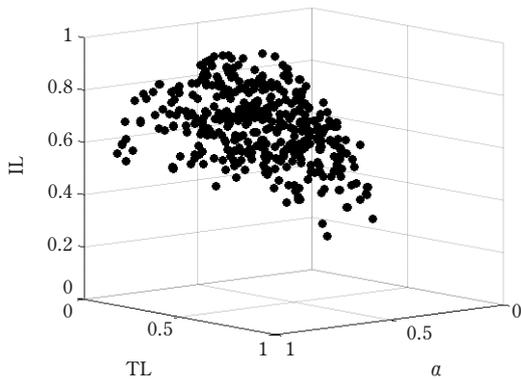


図7  $a$ -TL-IL 3次元パレート図

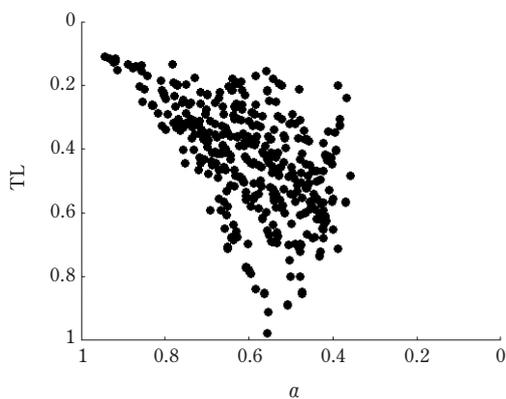


図8  $a$ -TL 2次元パレート図

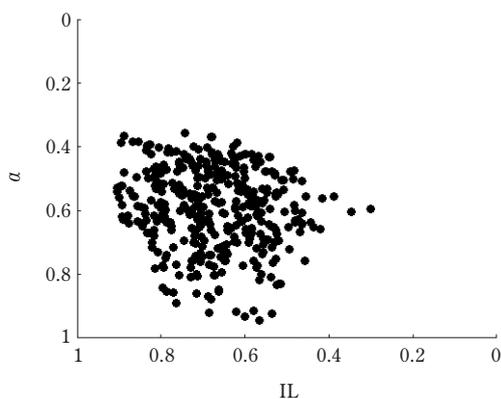


図9 IL- $a$  2次元パレート図

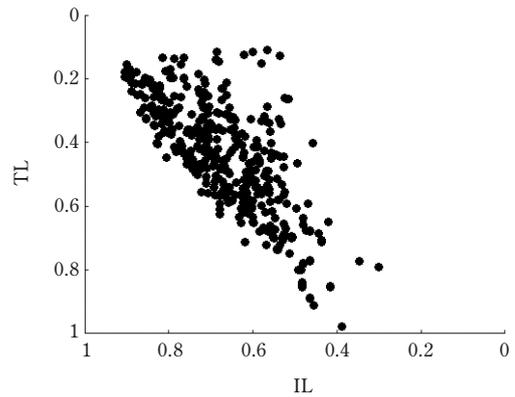


図10 IL-TL 2次元パレート図

適化パレート図を図10にそれぞれ示す。また、 $a$ 、TL、ILは、計算結果の最大値を1として、0～1までの割合で表記する。

## 7. 設計パラメータの検討

ここでは最適化計算結果をもとに、 $a$ 、TL、ILのそれぞれを良くするBiotパラメータの値を求めた。図11～14に結果を示す。図中の各Biotパラメータは、今回設定した範囲の最大値を1として正規化したものである。

図11に示すヤング率との相関を例にとって説明する。 $a$ のみを向上させるには、1st layerのヤング率を大きくし、2nd layerを小さくすればよいことがわかる。TLのみを向上させるには、1st layer、2nd layer両方を最大値の0.6程度にすればよい。ILを向上させるには、1st layerを最大値の0.3にし、2nd layerのヤング率をできるだけ小さくすればよい。

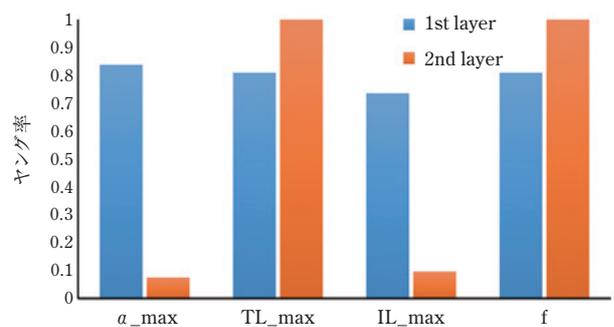


図11 ヤング率と音響性能の相関

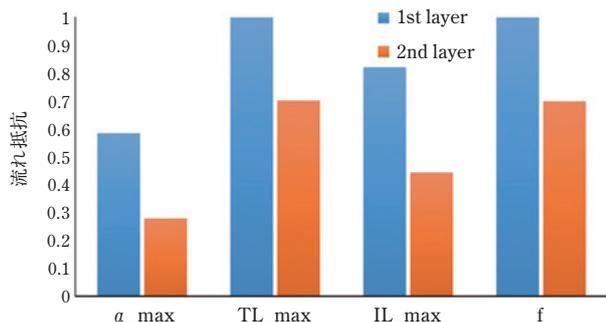


図12 流れ抵抗と音響性能の相関

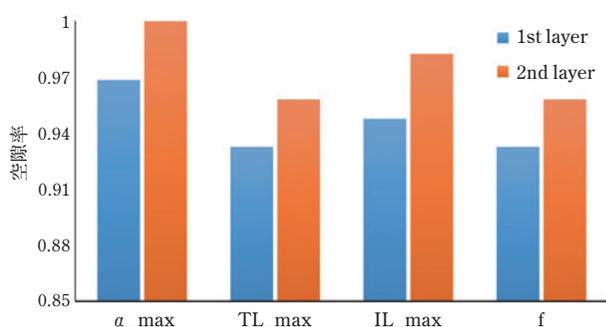


図13 空隙率と音響性能の相関

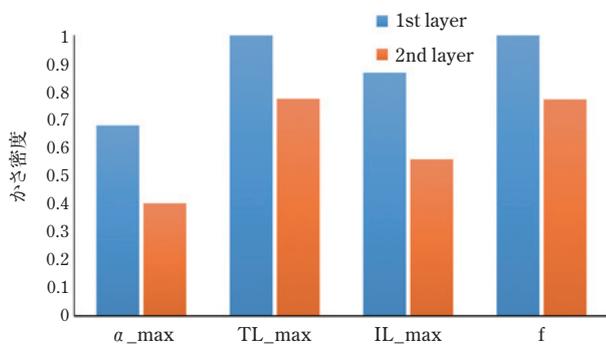


図14 かさ密度と音響性能の相関

図12～14についても同様の検討ができ、向上させたい音響特性に応じた防音仕様の設計が可能になる。

従って、上記のようにBiotパラメータの要求値が決定できるため、式(1)より繊維径 $D$ を決定することができる。

## 8. まとめ

積層防音材について、吸音特性、透過損失特性、固体伝搬音特性といった音響特性を最適にする構造設計シミュレーション手法を提案することができた。

これにより、開発初期段階において効率的なノイズ対策が可能になると考えられ、低燃費化と静粛性向上の高次元両立の一助になることが期待できる。

今後は実測値との比較検証により今回提案した手法の妥当性検証をさらに進めたい。

### 参考文献

- 1) GRB Expert Group on Regulation 51 : Proposal for the 03 series of amendments to Regulation No.51 (Noise of M and N categories of vehicles), Informal Documents for the 58th GRB session, GRB-58-04, p.1-74 (2013).
- 2) 経済産業省：乗用自動車のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等，経済産業省・国土交通省告示第二号，2013，9p.
- 3) 見坐地一人，鈴木雄輔，高橋亜佑美：ハイブリッドSEA法を用いた電気自動車のギアノイズとモーターノイズ解析，自動車技術会，2012年春季大会，学術講演会前刷集，No.61-12，20125357 (2012).
- 4) 見坐地一人，石井仁樹，高橋亜佑美，三木達郎，藤澤生磨，安藤大介：繊維体吸音材料のBiotパラメータの推定，自動車技術会論文集，49巻4号 p.787-792 (2018).
- 5) 野口好洋，土居隆之，多田寛子，見坐地一人：SEA法による吸音型防音材料仕様の決定手法，Honda R&D Technical Review Vol.18 No.1 p.149-153 (2006).
- 6) Claudio Bertolini, Luca Guj, Francesca Avenati Bassi, 見坐地一人，井出史彦：Tresuri2/FE: A Tool for the FE Simulation of Sound Package Parts Fully Integrated in Nastran, SAE 2009 International Journal of Passenger Cars Mechanical-systems, 2, 1511-1527 (2009).

※本報告は日本大学見坐地教授との共同研究の成果であり，自動車技術会2019年 秋季大会で報告した「積層防音パッケージの音響特性最適化に関する研究」の内容を整理したものである。

### 筆者紹介



#### 三木 達郎

研究開発本部 CAE 室  
音響測定技術の開発と音響解析に従事