

JCA 音響数理モデルと GA を用いた繊維系防音材の最適化に関する研究

日大生産工 (院) ○平野 洸祐 日大生産工 (院) 森木 俊輔
日大生産工 高橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人

1. はじめに

近年、自動車の車外騒音規制と燃費基準が強化され、車外騒音が静かで低燃費な自動車が求められている 1)。それを具現化する課題として、NV 性能の向上と防音材の軽量化の高次元両立がある。

本論では、防音材の音響特性が予測可能な JCA (Johnson-Champoux-Allard) モデルと最適化手法である GA (遺伝的アルゴリズム) を用いて、繊維特性の詳細設計が可能になるシミュレーション手法の提案を目的とし、繊維系防音材であるフェルト層の吸音特性に対する最適化を行った。その結果について報告する。

2. JCAモデル

JCA モデルとは、多孔質材料中の隙間を通過する空気伝播音を空気の粘性摩擦によるエネルギー減衰を考慮した実効密度、空気の圧縮や膨張による熱的散逸を考慮した実効体積弾性率の 2 つを表現した音響特性予測手法を指す。実効密度 $\tilde{\rho}(\omega)$ と実効体積弾性率 $\tilde{K}(\omega)$ の理論式を (1), (2) にそれぞれ示す 2)。

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_{\infty}\rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma\phi}{i\omega\rho_0\alpha_{\infty}} \sqrt{1 + i\frac{4\alpha_{\infty}^2\mu\rho_0\omega}{\sigma^2\Lambda^2\phi^2}} \right] \quad (1)$$

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\gamma P_0/\phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - i\frac{8\kappa}{\Lambda'^2\omega} \sqrt{1 + i\frac{\Lambda'^2\omega}{16\kappa}} \right]^{-1}} \quad (2)$$

ここで、 α_{∞} は迷路度、 ρ_0 は空気の密度、 ϕ は多孔度、 σ は流れ抵抗、 i は虚数単位、 ω は角振動数、 μ は空気の粘度、 Λ は粘性特性長、 γ は比熱比、 P_0 は平衡時の圧力、 κ は温度拡散率、 Λ' は熱的特性長を示す。

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 ϕ (繊維の真密度 ρ_t 、かさ密度 ρ) 等の繊維特性があり、繊維特性 (繊維径 D と繊維の真密度 ρ_t 、かさ密度 ρ) と流れ抵抗 σ は式 (3), (4) の関係がある。繊維の真密度 ρ_t が既知で、音響特性を最大化させる Biot パラメータの要求が決まれば流れ抵抗 σ 、多孔度 ϕ を決定

することができる。式 (3) の流れ抵抗 σ は、空気の粘度 μ と多孔度 ϕ (繊維の真密度 ρ_t 、かさ密度 ρ) を用いた実験式である 2)。

$$\sigma = A\mu(1 - \phi)^B D^C \quad (3)$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_t} \quad (4)$$

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 ϕ から式 (5), (6) を用いて熱的特性長 Λ' 、粘性特性長 Λ を求められる。式 (3) ~ (6) のパラメータを 2 章で述べた JCA モデルに用いることで吸音率 α を求めることができる。

$$\Lambda' = \frac{\phi}{2(1 - \phi)} D \quad (5)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{8\eta\alpha_{\infty}}{\sigma\phi}} \frac{1}{c} \quad (6)$$

4. 解析

GA とは、生物の進化のメカニズムを最適化に適用したもので問題を遺伝子と表現し、複数の遺伝子を用いて交叉、突然変異などの遺伝子操作と淘汰による世代交代によって最適解を探索する 3)。

GA の最適化手法のフローについて Fig.1 に示す。

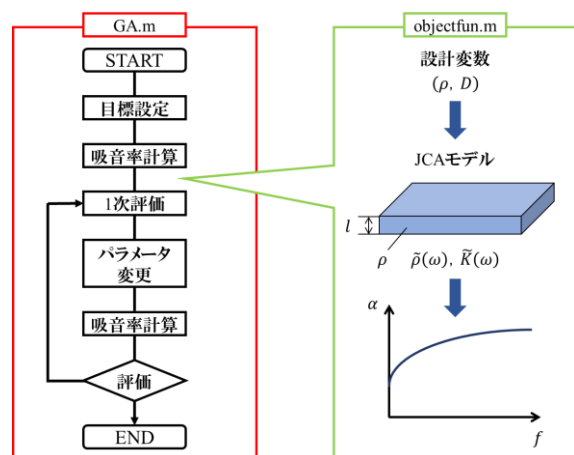


Fig.1 GA の最適化手法のフロー

繊維系防音材の音響特性を解析するため、MATLAB 内の Toolbox である多目的 GA コードを用いた。フェルト層のかさ密度 ρ 、繊維径 D に着目し、これら2つを設計変数、吸音率 α を目的関数として解析を行った。

5. 実験方法

吸音率の測定は、材料開発の観点で音源から発する音の方向を垂直のみに限定した垂直入射吸音率測定法で、フェルト層の材料は厚さ 0.01t のポリエチレンテレフタレート (PET) を用いた。その方法の利点は測定する試験体のサイズが小さく、測定方法も容易であることが挙げられる。そのため、吸音材料の比較や基礎的な材料特性の把握にとっても優れており研究、開発段階で利用されることが多い。



Fig.2 音響管（小野測器-2 マイクロフォン法垂直入射吸音率計測ソフトウェアより）

6. 結果

6.1 JCAモデルの妥当性

2章で述べた JCA モデルの実測値と計算値の比較を Fig.3 に示す。解析周波数の範囲を 2000~5000[Hz] とした。Fig.3 の結果から実測値と計算値は概ね一致していることがわかる。

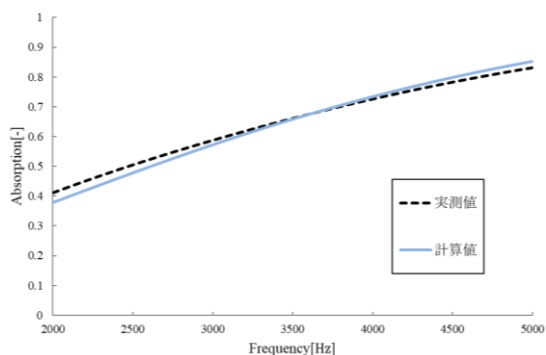


Fig.3 α の実測値と計算値の比較

6.2 解析結果

吸音率 $\alpha = 1$ を目標値とした吸音性能が最大となる最適化を行った結果を以下の Fig.4 に示す。個体数

を 100、終了世代数を 10 として、GA で目標値から吸音率 α の計算値の平均を引いて差分が 0 に一番近いときのかさ密度 ρ 、繊維径 D を最適値とした。

これらの最適値を 2 章で述べた JCA モデルに代入し、最適化計算を行った。Fig.4 の結果から、6.1 で行った妥当性の検証で用いたかさ密度 ρ 、繊維径 D のパラメータより低い値の方が主に流れ抵抗 σ 、多孔度 ϕ の大きさに影響され目標値に近い結果を得ることができた。

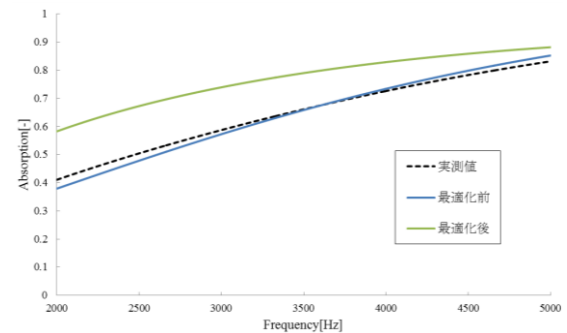


Fig.4 吸音率 α の最適化

7. まとめ

フェルト層における吸音率 α が予測可能な最適化手法とそれを用いて繊維特性の詳細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ができた。これにより、NV 性能の向上と防音材の軽量化による高次元両立の一助になることが期待できる。

今後は、かさ密度 ρ 、繊維径 D 以外の繊維特性について検討し、音響特性による影響の考察を更に進めていきたい。

参考文献

- 1) 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2号，(2013) p.9
<http://www.mlit.go.jp/common/001023498.pdf>
- 2) 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，(2018) p.787-792
- 3) 穴井 宏和，数理最適化の実践ガイド，株式会社講談社，(2013) p.85-90
- 4) 井上 全人，花ヶ崎 宣人，塩崎 弘隆，石川 晴雄，セットベース設計手法による多孔質積層材の吸音／遮音性能予測，自動車技術会論文集，40 巻 3 号，(2009) p.699-704