

温度依存性を考慮した、 積層防音材設計の音響特性最適化に関する研究

研究開発本部 試験解析室 三木 達郎

本稿は、「公益社団法人 自動車技術会 2024年秋季大会 学術講演会講演予稿集」に投稿し、発表した内容であり、本誌用に内容を一部変更・加筆しております。

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^{1), 2)}ことから、エンジンルームをはじめとした車輻の防音強化が求められている。また、一方で軽量化による低燃費化も重要である。そのため、自動車部品においては自動車騒音の低減と低燃費化の両立が必要となっている。騒音対策としては、繊維質材料をはじめとした防音材が用いられているが、車体重量が重くなり燃費を悪化させてしまうため、最適な製品設計を行うことは容易ではない。近年、遮音材と吸音材を組み合わせた積層防音材が提案されており³⁾、積層防音材を動力部近傍で用いて防音材の総量を少なくすることで、軽量化と静粛性の両立が期待されている。一方で動力部は稼働時に高温になる可能性があり、耐熱性能の高い繊維質材料を使用することが想定される。現状の防音材設計は常温での評価を基準としており、高温環境下では最適な材料とされない可能性がある。高温における防音性能を予測するためには、材料の音響特性に対する温度の影響を理解することが重要である。

当社ではこれまで、積層防音材における温度依存性を考慮した吸音率シミュレーション技術に取り組んできた。本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いた音響特性最適化シミュレーションを基にした積層材料設計を行い、高温音響管で吸音率の変化を検証した結果について紹介する。

2. 繊維質防音材における音の伝搬モデル⁴⁾

繊維質防音材は空隙部と骨格部からなるため、材料中の音は空気伝搬と固体伝搬および両者の相互作用により、複雑に伝搬することが知られている。Allardらによって提案されたJCA (Johnson-Champoux-Allard) モデルは、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、および、空気の圧縮膨張による熱的散逸を考慮した実効体積弾性率で表現したモデルである。式 (1) および (2) にJCAモデルにおける実効密度と実効弾性率の計算式を示す。

$$\left. \begin{aligned} \rho_a &= \alpha_\infty \rho_f \left(1 + \frac{\phi \sigma}{j \omega \rho_f \alpha_\infty} G(\omega) \right) \\ G(\omega) &= \left(1 + \frac{4j \mu \omega \alpha_\infty^2 \rho_f}{\Lambda^2 \sigma^2 \phi^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} K_f &= \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\xi}{j \omega \Lambda'^2} H(\omega) \right]^{-1}} \\ H(\omega) &= \left(1 + \frac{j \omega \Lambda'^2}{16\xi^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 j は虚数単位、 ω は角振動数、 P_0 は平衡時の圧力、 ξ は温度拡散率である。また、 α_∞ は迷路度、 ρ_f は空気の密度、 ϕ は材料の空隙率、 σ は流れ抵抗、 μ は空気の粘度、 Λ は粘性特性長、 Λ' は熱的特性長、 γ は比熱比であり、これらはBiotパラメータと呼ばれる。

3. Biotパラメータを用いた繊維特性の推定

繊維質防音材の素材設計には繊維径、かさ密度等の繊維特性があり、繊維特性と流れ抵抗は式(3)、(4)に示す関係がある。例えば繊維の真密度およびかさ密度が既知で、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、設計要素である繊維径 D 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 と空隙率 ϕ (繊維の真密度 ρ_t 、かさ密度 ρ)を用いた実験式である⁵⁾。また、流れ抵抗については温度による空気の粘度変化を考慮した⁶⁾。

$$\sigma = 8.89 \times 10^5 \times \mu(1 - \phi)^{1.40} D^{-1.12} \dots\dots\dots (3)$$

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

また、求めた繊維径 D と空隙率 ϕ から式(5)、(6)を用いて熱的特性長、粘性特性長を求められる。

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

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

ここで、 c は多孔質体の空隙形状に依存するパラメータで、おおむね1であることが知られている。

4. 積層防音材の最適化シミュレーション

4.1 Actran解析モデル

積層防音材の音響解析には市販ソフトのActran (Hexagon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。解析モデルを図1に示す。ここで、Felt 2、Felt 4をそれぞれ1st layer、2nd layerとした。防音材は、一辺200mmとし、防音材のトータル厚みを10mm以下とした。

吸音率(以下、 α)については、式(7)にて、Film 1側からの音響加振入力に対する α を求めた。

積層防音材は構造を定義する積層情報、材料物性値(流れ抵抗、多孔度、迷路度、特性長、ヤング率、損失係数、真密度、繊維径、厚さ)を定義する材料情報をそれぞれ定めて作成した。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{P_{ref}}{P_{in}} \right|^2 \dots\dots\dots (7)$$

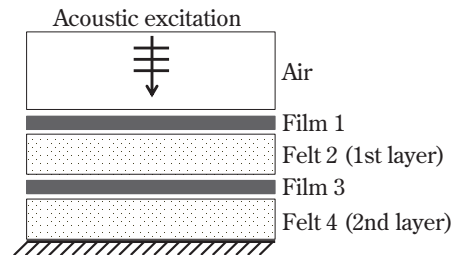


図1 吸音率解析モデル

4.2 遺伝的アルゴリズムを用いた音響特性最適化^{5), 6)}

積層構造防音仕様の音響特性を最適化するために、遺伝的アルゴリズムによる最適化を実施した。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。

設計変数として、Felt 2、Felt 4の繊維径は一定とし、含まれるかさ密度(ρ_2 、 ρ_4)を設計変数とした。また、各層の厚さは10mmとした。世代数・個体数は解析時間とのバランスを考慮し200個体10世代とした。また、吸音率の解析対象周波数範囲は2000 ~ 5000Hzとした。

4.3 密度の最適化シミュレーション結果

表1にシミュレーションで得られた、温度ごとのかさ密度の最適化結果を示す。表中の密度の数値は初期値を1とした場合の割合である。

1st Layerについて、300℃における密度の最適値は20℃の半分程度であった。2nd Layerについてはいずれの温度の最適値も同程度であったが、

表1 各温度の密度最適化結果

Temperature	Bulk density ratio	
	1st Layer	2nd Layer
20℃	0.61	0.28
100℃	0.61	0.21
300℃	0.30	0.24

表2 密度と吸音率の相関係数

	Correlation Coefficient [-]	
	1st Layer	2nd Layer
Bulk density	- 0.2	- 0.2

常温と比較して密度が小さい方がよい結果となることが示唆された。また、表2に常温における各Layerの密度と吸音率の相関係数を示す。密度と吸音率には軽度の負の相関があることがわかった。

5. 高温音響管による吸音率測定

5.1 装置概要

図2に作製した高温吸音率測定装置（以下、測定装置）の概略を示す。装置作製にあたっては、日本音響エンジニアリング株式会社に多大な協力を仰いだ。装置構成はJIS A 1405-2による吸音率測定装置を基本とし、音響管周辺に精密な温度制御が可能な円筒ヒーターを設置した。測定用マイ

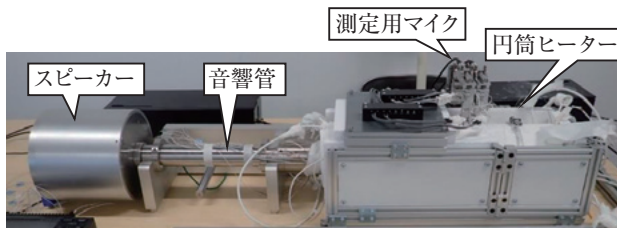


図2 高温音響管装置外観

クは、測定部品への温度負荷を低減するためにプローブマイクとし、プローブ周辺にも温度制御が可能な装置を取り付けた。

5.2 試料作製方法および測定方法

測定試料は、材質の耐熱性を考慮して無機繊維および市販のアルミ箔を積層させた材料とした。無機繊維は所定の重量を水中で攪拌し、厚さを固定した状態で乾燥させ、音響管の内径に合わせて直径41.5mmで切り出した。アルミ箔はアロンセラミック®（東亜合成社）で接着した。表3に測定試料の例を示す。表中のNo.1が密度初期値、No.2が常温での最適吸音率、No.3が300℃での最適吸音率、No.4とNo.5については最適でない密度の組合せを狙った設計としている。

吸音率測定は、装置をヒーターで昇温し、十分温度が安定した後2マイクを用いた伝達関数法で行った。測定温度は常温（25℃）、100℃、300℃とした。

表3 物性値一覧

No.			1	2	3	4	5
			初期値	常温最適	300℃最適	非最適①	非最適②
狙い密度	1st Layer		1	0.6	0.3	1	0.6
	2nd Layer		1	0.3	0.3	0.6	1
試料画像							
1st layer	直径 [mm]		42.4	42.9	41.1	42.3	41.6
	高さ [mm]		10.2	10.6	9.5	10.1	10.1
	密度比率 [-]		0.92	0.60	0.40	0.97	0.68
2nd layer	直径 [mm]		42.4	42.6	41.8	42.2	41.0
	高さ [mm]		10.4	8.9	9.6	10.3	10.7
	密度比率 [-]		0.94	0.42	0.40	0.59	0.98
総厚さ [mm]			21.0	19.5	19.2	20.4	20.9

6. 試験結果

6.1 温度別吸音率

図3～図5に各温度で測定した吸音率を示す。グラフの数値はNo.1の値を基準とした比で表している。最適化したNo.2, No.3は1000Hz以降で吸音率が高くなる傾向であった。No.4, No.5は初期密度よりも悪くなる傾向であった。常温の試験結果より、No.4とNo.5はピークの振動が増えていることがわかる。これは、弾性率が高くなって振動が生じているものと考えられ、その結果試料からの音の反射が大きくなり、吸音率の悪化につながった可能性がある。

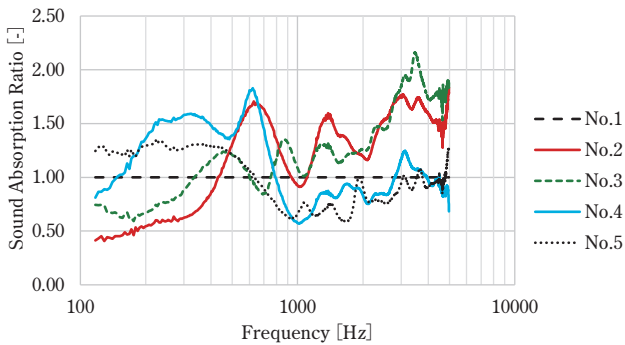


図3 常温 (25°C) の吸音率測定結果

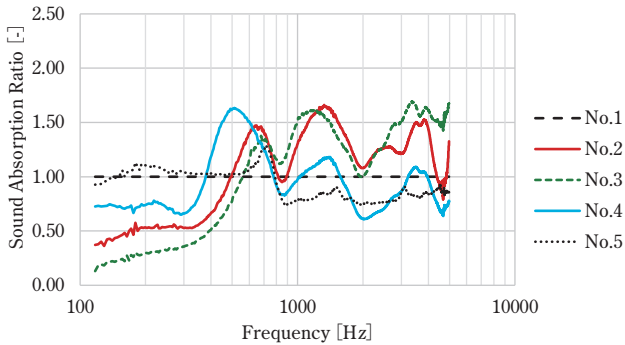


図4 100°Cの吸音率測定結果

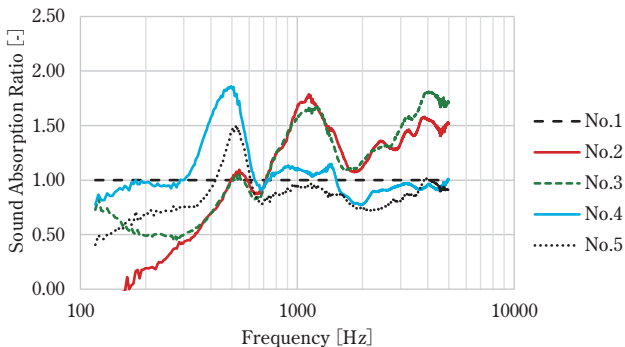


図5 300°Cの吸音率測定結果

6.2 平均吸音率

図6～図8に、温度別の1000～5000Hz平均吸音率を示す。いずれの温度でも最適化シミュレーションで得られた物性値に近いNo.2, No.3の吸音率が高くなっている傾向であった。

図6によると、常温においても300°C最適であるNo.3の平均吸音率が最も高い結果となった。こちらの要因については検討段階であるが、シミュレーションでは考慮されていない接着剤による弾性率の変化などの外的な影響があった可能性がある。

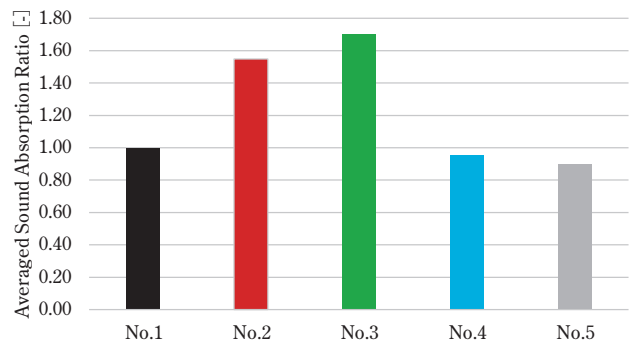


図6 常温 (25°C) の平均吸音率

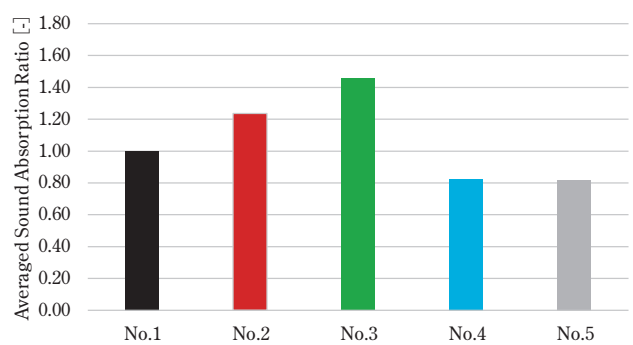


図7 100°Cの平均吸音率

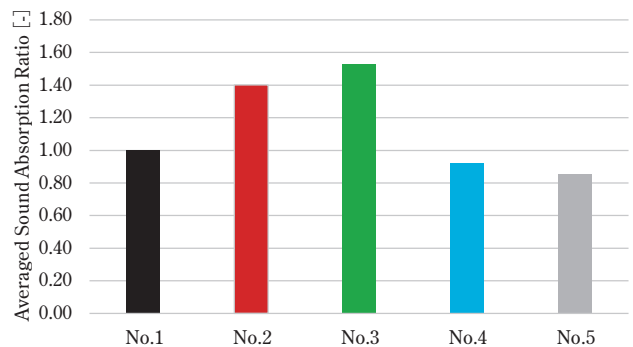


図8 300°Cの平均吸音率

7. おわりに

遺伝的アルゴリズムを用いた音響特性最適化シミュレーションを基にした積層材料設計を行い、高温音響管で吸音率の変化の検証を行った。

シミュレーションで得られた密度の組合せで、設計通りに吸音率が高くなることが確認できた。本稿で用いたシミュレーション技術によって、高温における最適な積層材料設計が可能になると考えられ、低燃費化と静粛性向上の両立の一助になることが期待できる。

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) 黒沢良夫, 尾崎哲也, 武藤幸一, 山下剛：積層吸音材の接着による遮音性能への影響, 日本機械学会論文集, 82巻 837号 p.15 (2016)
- 4) J. F. Allard and N. Atalla, Propagation of Sound in Porous Media, John Wiley & Sons, Inc. (2009)
- 5) 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)
- 6) 三木達郎, 見坐地一人, 高橋亜佑美, 平野洸祐, 佐々木俊輔, 小野寺正剛：繊維質防音材の温度依存性を考慮した音響特性最適化に関する研究, 自動車技術会2021年秋季大会, [セッションNo.103], 2021.10.13

筆者紹介



三木 達郎

研究開発本部 試験解析室
音響測定技術の開発と音響解析に従事

ニチアスの自動車部品



クルマの環境イノベーションに
『断つ・保つ』技術で貢献します。



シール関連部品

- ゴム/金属複合ガスケット
- メタコート®
- メタフォーム®
- 排気系&軟質ガスケット
- CR ポルテックス®
- ジョイントシート
- 摺動材
- エクセライド®

熱関連部品

- 遮熱・保温材
- インサルカバー®
- N-フレチューブ®
- 熱制御
- ウォータージャケットスペーサー
- 触媒担体保持材
- エコフレックス™

音関連部品

- プレーキシム材
- メタプラス® 積層シム
- 防音カバー
- エアトーン®

※@が付されている名称はニチアス(株)の登録商標です。
※「エコフレックス」は英国Saffil Ltd.の商標です。