



# 繊維系防音材の温度依存性を考慮 した最適設計に関する研究

日本大学大学院生産工学研究科数理情報工学専攻  
見坐地研究室  
佐々木 俊輔

連絡先:[cish21005@g.nihon-u.ac.jp](mailto:cish21005@g.nihon-u.ac.jp)

# 研究背景

車外騒音規制及び燃費達成基準の強化に伴う車両の軽量化と騒音の低減の両立

Table.1 騒音規制値

Category		M1(普通乗用車相当)		
Phase		1	2	3
Season		2016~	2020~	2024~
Noise regulation value[dB]	PMR ≤ 120	72	70	68
	120 < PMR ≤ 160	73	71	69
	PMR > 160	75	73	71

4年ごとに  
2[dB]低減

参考：環境省, 資料17-2-2国連四輪車走行騒音規制 (UN-ECE R51-03) における加速走行騒音試験法及び規制値等の導入について, [https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y071-17/mat%2002\\_2.pdf/03\\_%E8%B3%87%E6%96%9917-2-2.pdf](https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y071-17/mat%2002_2.pdf/03_%E8%B3%87%E6%96%9917-2-2.pdf), (最終参照: 2022/01/31)

Table.2 燃費達成基準値

Category	Passenger auto	
Season	2016	2030
Fuel economy standard value[km/L]	19.2	25.4

14年で  
6.2[km/L]向上  
(燃費改善率:  
32.3%)

参考：経済産業省, 「乗用車の2030年度燃費基準を策定しました」, 2020/3/31, <https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200331013/20200331013.html> (最終参照: 2022/02/03)

車両の軽量化と騒音の低減の両立を実現する手法  
→動力源の周りを繊維系防音材で囲う技術

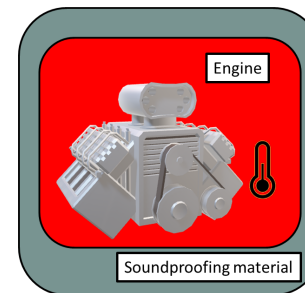


Fig.1 軽量化と静粛性の両立

エンジンは稼働時高温のため, 温度によって音響特性が変化する可能性がある. 今後, 電動化によって動力源の温度や騒音の種類が変わる.

→材料の音響特性に対する温度の影響を把握することが重要！！

# 研究目的

温度依存性を考慮した吸音特性を予測する数理モデルを構築し, そのモデルとGA最適化手法により繊維度の最適設計を実施する.

→温度依存性を考慮した繊維素材の音響設計を可能にする.

# Biot理論

## 多孔質における音の伝搬

- 空気の振動伝搬
- 固体の振動伝搬
- 固体と空気の相互作用

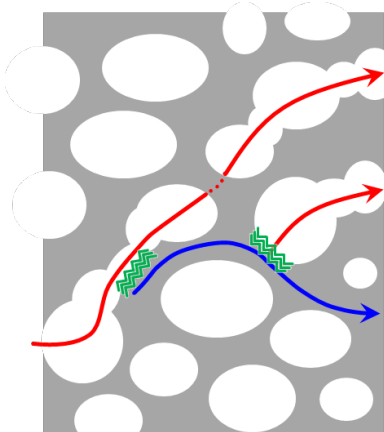


Fig.2 音の伝搬

## Biotパラメータ

防音材の吸遮音性能を測定または予測する際に用いるパラメータ。

音響系 Biotパラメータ	流れ抵抗	$\sigma$	構造系 Biotパラメータ	嵩密度	$\rho$
	多孔度(空隙部)	$\phi$		ヤング率	$E$
	迷路度	$\alpha_\infty$		損失係数	$\eta$
	粘性特性長	$\Lambda$		ポアソン比	$\nu$
	熱的特性長	$\Lambda'$			

## JCAモデル

材料中の隙間を通過する空気伝播音を、実効密度、および実効体積弾性率で表現したモデル

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

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

$\tilde{\rho}(\omega)$ : 実効密度,  $\tilde{K}(\omega)$ : 実効体積弾性率  
 $\alpha_\infty$ : 迷路度,  $\phi$ : 多孔度,  $\rho_0$ : 空気密度,  
 $\sigma$ : 流れ抵抗,  $i$ : 虚数単位,  $\omega$ : 角振動数 ( $\omega = 2\pi f$   $f$ : 周波数),  
 $\mu$ : 空気粘度,  $\Lambda$ : 粘性特性長,  $\gamma$ : 比熱比,  
 $P_0$ : 平衡時の圧力,  $\kappa$ : 温度拡散率(熱拡散率),  $\Lambda'$ : 熱的特性長

## 音響系Biotパラメータ推定式

### 熱的特性長

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

$\Lambda'$ : 熱的特性長  $\phi$ : 空隙率  
 $D$ : 繊維径

### 粘性特性長

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

$\Lambda$ : 粘性特性長,  $\eta$ : 損失係数,  $\phi$ : 空隙率  
 $\sigma$ : 流れ抵抗,  $\alpha_\infty$ : 迷路度,  
 $c$ : 多孔質体の空隙形状に依存するパラメータ(1に近い値)

### 流れ抵抗

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

$\sigma$ : 流れ抵抗  $\mu$ : 空気粘度  
 $\phi$ : 空隙率  $D$ : 繊維径  $A, B, C$ : フィッティング係数(未知数)

※流れ抵抗の推定式は温度ごとのフィッティング係数が求まっていること、同じ材料であることが条件である。

**Biotパラメータと繊維特性には相関がある**

# 流れ抵抗の温度依存性検証



Fig.3 音響管

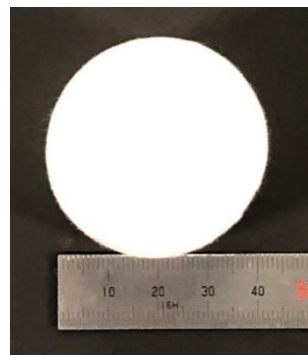
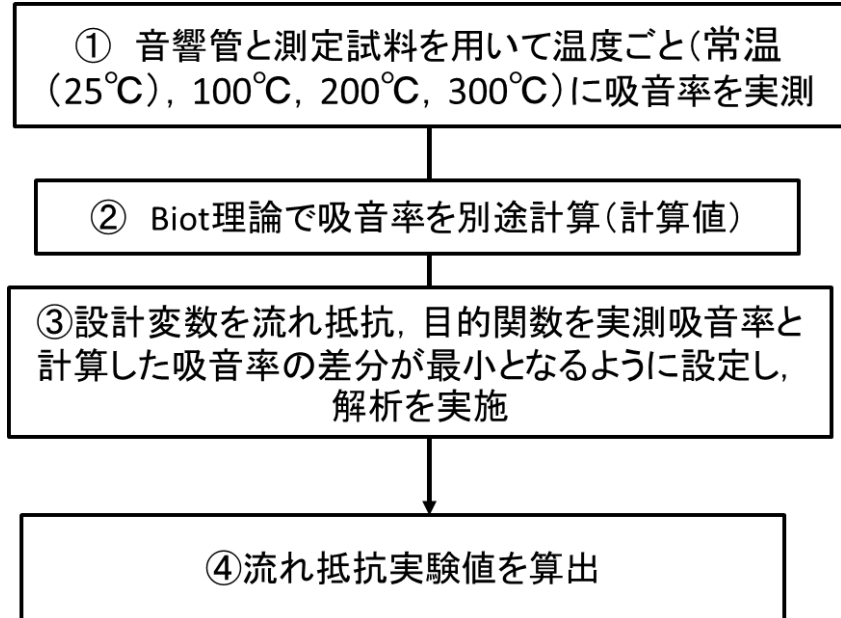


Fig.4 測定試料  
(無機繊維, 板厚25mm)

## 実験の流れ



Biotパラメータの一つ, 流れ抵抗は温度によって大きく変化すると考えられる.

→音響管と測定試料を用いた実験を実施

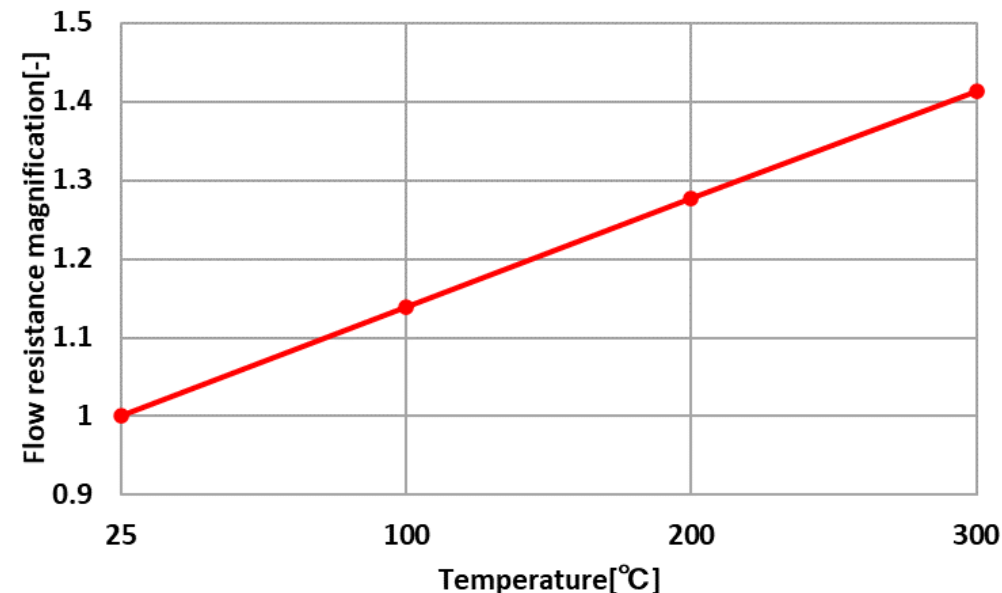


Fig.5 常温25°Cにおける流れ抵抗を1としたときの実験値の倍率結果

Fig.3より温度が上昇するにつれて, 流れ抵抗の倍率が上がっている. →流れ抵抗は空気の温度依存性で説明できる

# 繊維特性の最適設計

流れ抵抗の温度依存性検証で求めた流れ抵抗実験値，サンプル試料をもとに作成した数理モデル，GAの最適化手法，JCAモデルを用いて繊維特性の最適設計を実施

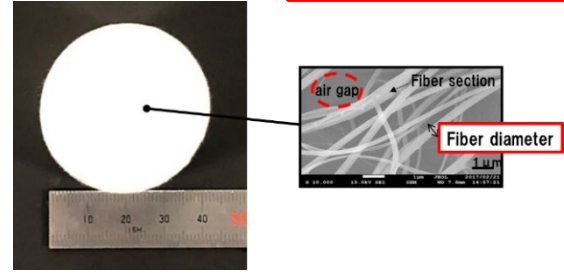


Fig.6 サンプル試料

## 解析条件

設計変数	繊維径(Fiber diameter)・嵩密度(Bulk density)	設計変数範囲	既存材料から範囲を設定
温度	25°C, 100°C, 200°C, 300°C	周波数範囲	1000~10000[Hz]
目的関数	吸音特性平均が最大になるように設定	GA世代数・個体数	世代数：20 個体数：100

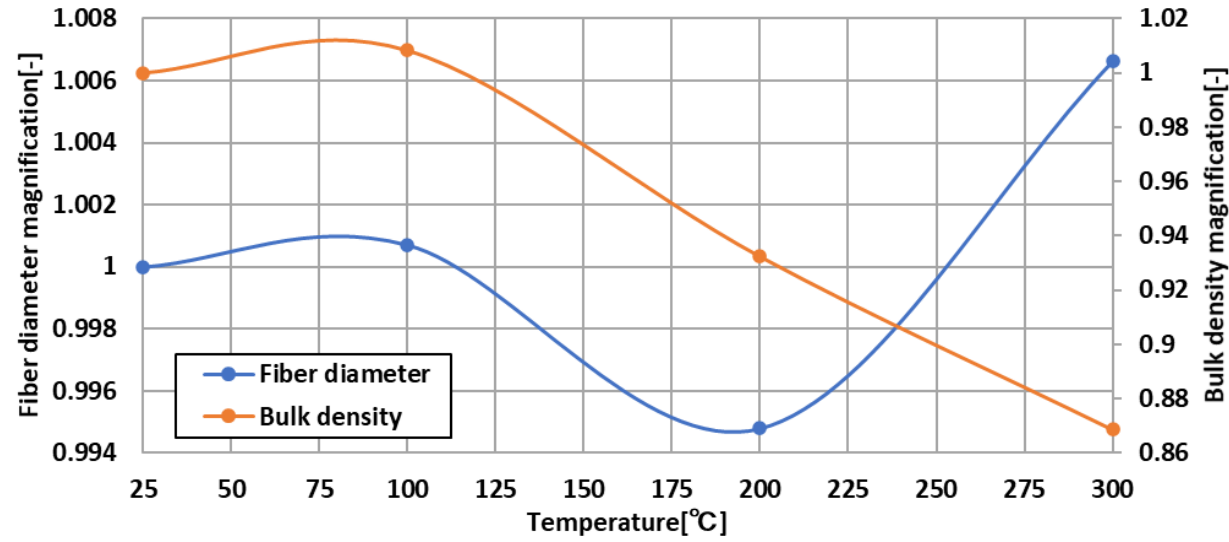


Fig.7 吸音特性平均を最大にした時の繊維度最適結果 (常温25°Cの最適値をそれぞれ1としたときの倍率)

## 結論

- ・ 流れ抵抗は空気の温度依存性で説明することが分かった。
- ・ 温度依存性を考慮した吸音特性を予測する数理モデルを構築し，そのモデルとGA最適化手法により繊維度の最適設計を実施することができた。これにより，防音材の軽量化による低燃費化と静粛性の両立の一助になる。
- ・ 繊維度の最適設計を実施したことによって温度による音響特性の影響を把握することができた。

Fig.7より繊維特性の最適値は温度によって変化することが分かる。

## 今後の展開

得られた繊維特性の繊維系防音材を新規に作成し，今回予測した解析結果についての実機検証を進める。