

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06238

研究課題名（和文）均質化とトポロジー最適化を援用した多孔質吸音材微視構造設計法の構築

研究課題名（英文）Optimization method for sound-absorbing poroelastic media by using homogenization method and topology optimization method

研究代表者

山本 崇史（Yamamoto, Takashi）

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：30613640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：多孔質吸音材に適用できるように拡張した均質化法とBiotのモデルを併用して、既存の多孔質吸音材微視構造の寸法をパラメトリックに最適化する手法を構築した。また、それを用いて所望の周波数において吸音率が最大となる吸音材の微視構造を求めた。発泡材に適用し、所望の周波数範囲において吸音率が最大となる微視構造パラメータを求めた。さらに、既存の微視構造にとられない最適な微視構造を創出することを目的に、多孔質吸音材料の微視構造のトポロジーを最適化する設計手法を構築した。目的関数の設計感度および均質化特性の設計感度を求めるため、ミクロスケールおよびマクロスケール解析において随伴変数法を適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

均質化法を用いマクロスケールで定義された目的関数を最小にするミクロスケールのトポロジーを最適化する設計法は弾性体問題では構築されているが、それを多孔質吸音材というマルチフィジクスの問題に拡張した。随伴変数法と密度法を用いるトポロジー最適化を応用しており、考え方は他のフィジクスにも応用が可能である。また、これまで、試作した吸音材に対して吸音率などの性能を予測・評価するという設計法が用いられており、目標性能を満たすためにはトライアンドエラーが必要であったが、所望の吸音特性となる吸音材料を最適設計するという従来とは逆方向の新しい設計法を構築することができ、設計の効率化、材料の高機能化につながる。

研究成果の概要（英文）：Acoustic properties of sound-absorbing poroelastic media such as sound absorption coefficient are affected by microscopic structures. However, a design method for microscopic structures of sound-absorbing poroelastic media has not been established and the trial and error approach by prototypes is required. In this study, two new design methods for sound-absorbing poroelastic media are proposed. One is a parametric optimization method to design microscopic parameters of sound-absorbing poroelastic media, such as fiber diameter and pore size. In this method, Biot's parameters are identified by the homogenization method and are optimized by genetic algorithm. The other is topology optimization method to design microstructure directly. In this method, the homogenization method based on the asymptotic expansion and the topology optimization method based on density approach is utilized. Microscopic structure of sound-absorbing poroelastic structure is optimized to maximize dissipated energy.

研究分野：機械工学

キーワード：吸音材 微視構造 トポロジー最適化 均質化法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車・船舶などの輸送機器や、建築構造物の内部空間における静粛性を確保するために、多孔質吸音材が広く使われている。吸音現象は、吸音材に入射した音波が基材や空孔内部の空気を振動させ、基材の材料減衰や空気の粘性減衰により、音響エネルギーが熱エネルギーに変換され散逸することで生じる。こうしたエネルギーの変換および散逸は微視的なスケールでおこるものであり、代表的な性能指標である吸音率は吸音材の微視構造に大きく依存する。

近年、Biot・Allardらによる微小円管内の音響伝播に対する理論解に基づいたモデル(以降、Biotのモデル)が吸音材の性能予測に広く適用されている。既存の材料について、必要な材料パラメータ(以降、Biotパラメータ)を実験的に取得できれば吸音率などの性能が精度良く予測できる。また、研究代表者は、世界に先駆けて多孔質吸音材に適用可能な均質化法を開発し、具体的な流路形状などの微視構造を考慮した構造音響的な解析を可能にし、任意の微視構造からマクロ特性である吸音率を直接求める手法を構築した。また、発泡材などに多く見られるセル間孔膜をもつ微視構造など、いくつかの特徴的な微視構造については吸音率への影響を明確にしてきた。しかし、これらの手法はいずれも既存の材料や既存の微視構造についての性能を予測するものであり、実際の設計で必要と考えられる、目標とする吸音特性に最も近い吸音材の微視構造はどういうものかという逆問題には対応することができない。すなわち、Biotパラメータを設計変数にして適正化してもそのBiotパラメータに対応する多孔質材料を設計・製作することは難しい。また、均質化法においても、目標とする吸音率になる吸音材の微視構造を求めるという逆問題的な検討は現状ではできないという課題を抱えている。

こうした背景から、本研究課題では、吸音材料の性能を予測し適正な材料を選択するという従来の設計法とは逆に、所望の吸音特性に最も近い性能を持つ吸音材料を設計するという新しい設計法の構築を目指すものである。発泡成形法などの生産技術・化学的なプロセスの進展により、セル形状や気孔率・気孔径などの微視構造の制御ができるようになってきており、設計した微視構造を有する吸音材を創成することは十分可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上述した背景およびこれまでの研究成果をもとに、多孔質吸音材に適用可能な均質化法およびトポロジー最適化手法を応用し、吸音率などのマクロ特性が目標値に最も近くなる吸音材の微視構造設計法を構築することを目的としている。

- a) 均質化法により求めたマクロ特性から Biot パラメータを同定し、Biot パラメータと空孔径、繊維径や繊維間距離などの微視構造を特徴づける寸法パラメータと関連付ける手法を構築する。これにより、微視構造の寸法パラメータに対する吸音率を効率よく求めることができる。また、本手法を用いて既存の微視構造について寸法をパラメトリックに最適化する手法を構築する。
- b) 均質化法およびトポロジー最適化手法を用いて、吸音特性などのマクロ特性を、あらかじめ定めた目標値との残差二乗和が最小となるように、吸音材の微視構造を最適化する設計法を構築する。

3. 研究の方法

本研究では図1の赤線で示すように、微視構造を取り扱うことのできる均質化法と、効率よく吸音率などの音響的性能を算出することのできる Biot のモデルを併用し、多孔質吸音材の微視構造をパラメトリックに最適化するハイブリッド手法を提案する。すなわち、多孔質吸音材の微視構造に対して繊維径や空孔径などをパラメータにした微視構造モデルを複数作成し、それらに均質化法を用いて等価密度などのマクロ特性を算出する。次に、Biot のモデルにおいて、均質化法の計算により得られたマクロ特性と一致するように Biot パラメータを同定する。そして、微視構造パラメータと Biot パラメータを関連付ける関数を導出する。この関数を用いることで、微視構造のパラメータを変更した場合でも、吸音率などの音響的性能を容易に算出することができる。さらに、遺伝的アルゴリズムを適用し、指定周波数で吸音率が最大となる微視構造のパラメータを求める。

上記の手法は、既存材料をもとに構築した微視構造のパラメトリックの最適化であり、既存材料をベースにした設計には有用であるが、微視構造の抜本的な設計にはつながり難いという問題点がある。そこで、本研究では既存の微視構造には依存しないトポロジー最適化により多孔質吸音材の微視構造を設計する方法論についても構築する。

4. 研究の成果

図2(a)は代表的な繊維系吸音材を走査型電子顕微鏡により撮像したものである。繊維系吸音材は図に示すように、繊維が平面的に積層して構成されている。繊維の配向は平面内において特定の方向に偏ることはなく、等方的

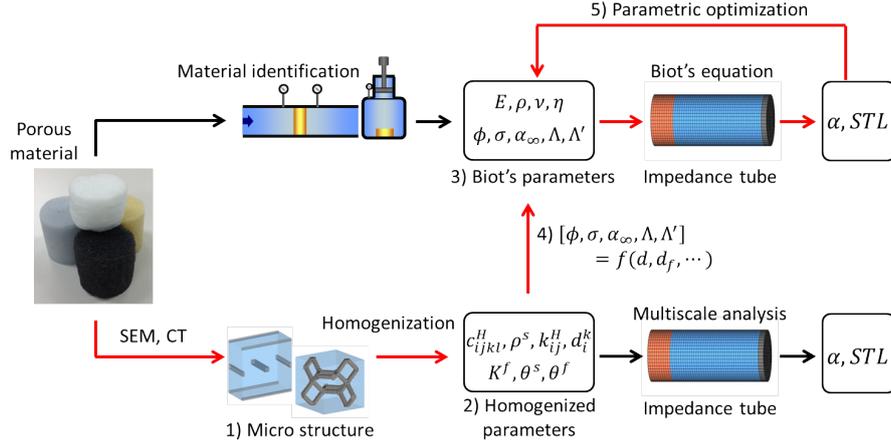


Figure 1: Proposed process to design optimal microstructure of sound-absorbing poroelastic materials (in red line).

とみなすことができる。本研究では、Limp フレームモデルを微視構造において表現したモデルを用いる。すなわち、図 2(a) に示すように、繊維の配向角は 0° と 90° を考慮し、各繊維は接触することなく繊維間距離 d_f の間隔で配置しているものとする。また、繊維の断面形状は、一般的に円形に近いが、ここでは 1 辺の長さが d の正方形で近似する。図 2(b) は、ユニットセルの構造を示しており、ここでは非接触直交ファイバーモデルと称する。

繊維径 d および繊維間距離 d_f を微視的パラメータとし、それらの値を変更して作成した多様なユニットセルモデルについて、上述した均質化法を適用し、その結果から Biot パラメータを同定する。また、得られた Biot パラメータと微視的パラメータの関係式を導出する。図 2 に示す微視構造の場合、空孔率 ϕ を繊維間距離 d_f と等価な微視的パラメータとする。ここでは、繊維径 d を $0.5 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ の 10 種、空孔率 ϕ を 0.7500 から 0.9931 の 5 種の組み合わせをとり、計 50 種類の微視構造について、均質化法による計算結果より Biot パラメータの値を同定した。次に、トーチューシティ α_∞ 、空気流れ抵抗 σ 、粘性特性長 Λ および熱的特性長 Λ' について、 d_f のべき乗と $(1 - \phi)$ のべき乗からなる関数を仮定し、それらの指数と係数の値を最小二乗法により同定した。その結果、各 Biot パラメータと微視的パラメータについて以下の関係式を得ることができた。

$$\alpha_\infty = 2.03 - 1.03\phi \quad [-] \quad (1)$$

$$\sigma = 3.33 \times 10^5 d_f^{-2.00} (1 - \phi)^{0.16} \quad [\text{kNs/m}^4] \quad (2)$$

$$\Lambda = 0.70 d_f (1 - \phi)^{-0.15} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

$$\Lambda' = 0.76 d_f (1 - \phi)^{-0.13} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

ここで、 d_f は $[\mu\text{m}]$ の単位における値を用いるものとする。

微視構造の寸法パラメータである繊維径 d および 繊維間距離 d_f および 繊維材料の質量密度 ρ^s を設計変数とし、指定周波数における垂直入射吸音率の最大化を目的に、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化した。

表 1 は、指定周波数において垂直入射吸音率が最大となる設計変数の値を示している。繊維径は 4.0 kHz の場合を除き $3 \mu\text{m}$ から $5 \mu\text{m}$ が最適値となっている。また、低周波数ほど空孔率が小さく圧縮度合いの大きい繊維材となっており、これまで得られている経験則にも合致している。

もう一つの手法である、多孔質吸音材微視構造のトポロジー最適化において、目的関数には、吸音材の代表特性である吸音率と等価であり、かつトポロジー最適化において扱いやすい、散逸エネルギー和 (の負値) を用いる。トポロジー最適化では、従来、随伴変数法を用いて目的関数の設計感度を求めており、その場合、マクロスケールにおける材料特性の設計感度が必要になる。マクロスケールにおける材料特性は、一般的には基準となる材料特性値と、設計変数による密度関数を用いて表現され、設計感度は解析的に求めることができる場合が多い。しかし、本研究で対象としているマルチスケルトポロジー最適化では、マクロスケールにおける材料特性は、ミクロスケールにおける境界値問題の解の体積平均で求めているため、マクロスケールにおける材料特性の設計感度を陽に求めることができない。ここでは、マクロスケールにおける材料特性の設計感度を、ミクロスケールにおいても随伴変数法を適用し求めた。

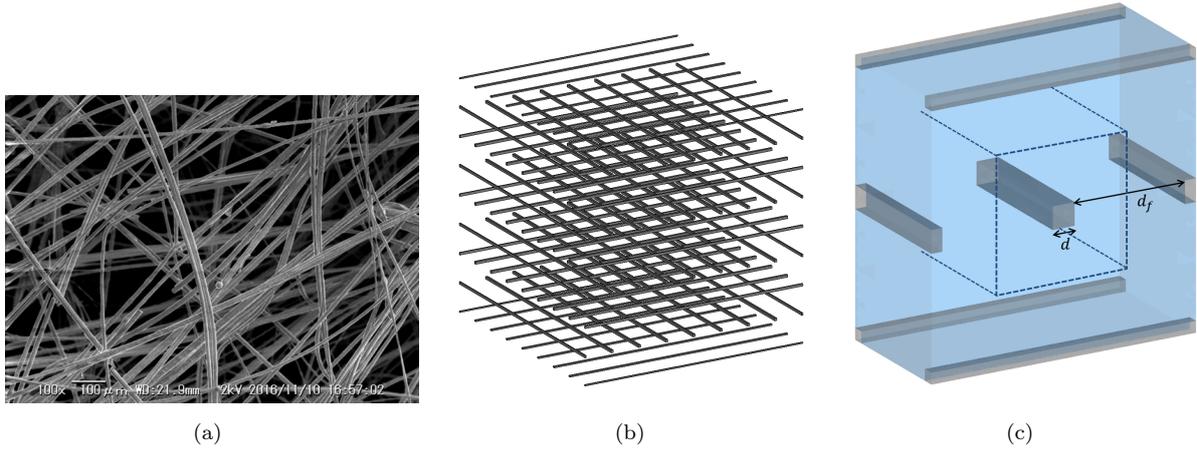


Figure 2: (a) Typical microscopic structure of fibrous poroelastic material obtained by scanning electron microscope (SEM). (b) Micro structure model of fibrous poroelastic material. (c) Unit cell model of fibrous poroelastic material.

Table 1: Optimal microscopic parameters obtained by a genetic algorithm (GA).

Target frequency	d [μm]	d_f [μm]	ϕ [-]	ρ^s [kg/m^3]
250 Hz	4.572	6.452	0.828	1650.
500 Hz	4.956	14.049	0.932	956.6
1.0 kHz	3.278	25.472	0.987	1301.
2.0 kHz	3.535	42.102	0.994	944.5
4.0 kHz	34.911	77.764	0.904	2000.

目的関数 g は散逸エネルギー和の負値として次式で書くことができる.

$$g = \frac{1}{2} \Re [(j\omega) \mathbf{X}^{p*T} \mathbf{D}^p \mathbf{X}^p], \quad \mathbf{D}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^s - \omega^2 \mathbf{M}^s & j\omega \mathbf{C}^{sT} \\ -j\omega \mathbf{C}^f & -\mathbf{K}^f + \omega^2 \mathbf{M}^f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{U}^s \\ \boldsymbol{\Psi}^f \end{bmatrix}$$

ここで, \mathbf{X} は場の状態変数, \mathbf{K} , \mathbf{M} , \mathbf{C} はそれぞれ剛性, 質量, 連成マトリックスである.

目的関数 g の設計変数 μ_i に対するマクロスケールにおける設計感度は随伴変数 \mathbf{Y} を用いて以下で求められる.

$$\frac{\partial g}{\partial \mu_i} = \frac{j\omega}{4} \left(\mathbf{X}^{*T} \frac{\partial \mathbf{D}^p}{\partial \mu_i} \mathbf{X} - \mathbf{X}^T \frac{\partial \mathbf{D}^{p*}}{\partial \mu_i} \mathbf{X}^* - \mathbf{Y}^T \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mu_i} \mathbf{X} + \mathbf{Y}^{*T} \frac{\partial \mathbf{D}^*}{\partial \mu_i} \mathbf{X}^* \right)$$

また, 均質化弾性テンソル, 等価密度, 等価体積弾性率の設計感度は随伴変数法により次式で求められる.

$$\frac{\partial \mathbf{C}^H}{\partial \mu_i} = \frac{1}{|\mathbf{Y}|} p \mu^{p-1} [([\mathbf{C}^s]_1 - [\mathbf{C}^s]_0)([\mathbf{I}] - 2[\boldsymbol{\varepsilon}] + [[\boldsymbol{\varepsilon}]]^T([\mathbf{C}^s]_1 - [\mathbf{C}^s]_0)[\boldsymbol{\varepsilon}]]$$

$$\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mu_i} = -j\omega \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \boldsymbol{\Lambda}^T \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \mu_i} \boldsymbol{\Lambda}$$

$$\frac{\partial}{\partial \mu_i} \left(-\frac{\phi}{K_f} \right) = -\frac{\partial \phi}{\partial \mu_i} \frac{\gamma - (\gamma - 1)h}{\gamma P_0} + \phi \frac{(\gamma - 1) \frac{\partial h}{\partial \mu_i}}{\gamma P_0}, \quad \frac{\partial h}{\partial \mu_i} = -\frac{1}{|\mathbf{Y}|} \boldsymbol{\Theta}^T \frac{\partial \mathbf{K}_b}{\partial \mu_i} \boldsymbol{\Theta}$$

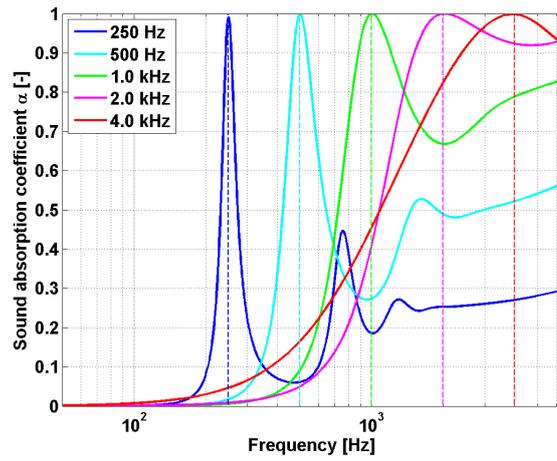


Figure 3: Frequency characteristics of sound absorption coefficients for normal incidence when the optimal microscopic parameters for prescribed target frequency are applied.

図 4 は、3 kHz における最適化された固体相のトポロジーを示している。なお、体積制約として固定設計領域の体積の 10% を上限に設定した。また、設計変数の初期値は全節点で μ は 0.1 とし、中央に対称な 8 点を連動させることで、構造の対称性を維持するようにしている。固体相の振動による散逸エネルギーのみを考慮しているため、入射方向と並行な方向に固体相が生成されていると考えられる。

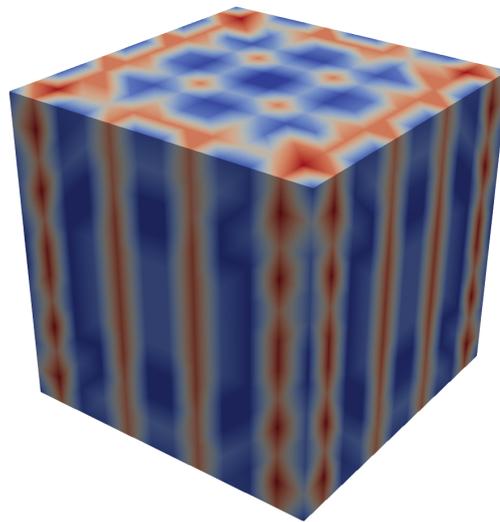


Figure 4: Optimal topology of solid phase.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本 崇史（工学院大），桂 大詞，久保田 寛（マツダ株式会社）
2. 発表標題 Optimization of microstructure of sound-absorbing poroelastic material by homogenization method
3. 学会等名 自動車技術会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本 崇史（工学院大）
2. 発表標題 均質化法による多孔質吸音材微視構造の寸法最適化
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本 崇史（工学院大）
2. 発表標題 均質化法による吸音材微視構造の寸法最適化
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島村 凌平，高草木 亮平，山本 崇史（工学院大），赤坂 修一（東工大）
2. 発表標題 均質化法によるナノファイバー吸音材の微視構造モデル化検討
3. 学会等名 制振工学研究会 技術交流会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島村 凌平, 高草木 亮平, 山本 崇史 (工学院大)
2. 発表標題 均質化法による繊維系吸音材の微視構造モデル化検討
3. 学会等名 自動車技術会 関東支部 2018年度 学術研究講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Yamamoto, Y. Imae
2. 発表標題 Design of micro structure of poroelastic material to control sound absorption by homogenization method
3. 学会等名 ICSV24 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑 翔, 山本崇史
2. 発表標題 吸音材微視構造の最適設計
3. 学会等名 制振工学研究会 技術交流会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑 翔, 山本崇史
2. 発表標題 吸音率最大化を目的とした多孔質吸音材の空孔径最適化
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川畑 翔 , 山本崇史
2. 発表標題 均質化法を用いた発泡系吸音材の微視構造最適化
3. 学会等名 自動車技術会 関東支部 2017年度 学術研究講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本崇史
2. 発表標題 散逸エネルギー最大化を目的とした多孔 質吸音材微視構造のトポロジー最適化
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本崇史
2. 発表標題 吸音材微視構造のマルチスケルトポロロジー最適化
3. 学会等名 日本機械学会 第 29 回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山川 啓介, 桂 大詞, 山本 崇史
2. 発表標題 均質化法による発泡 樹脂吸音材の材料内部構造モデル化技術の開発
3. 学会等名 自動車技術会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 崇史, 山川 啓介, 桂 大詞, 遊川 秀幸, 大下 浄治
2. 発表標題 均質化法とトポロジー最適化を併用した多孔質材微視構造の設計法
3. 学会等名 制振工学研究会 技術交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 崇史, 山川 啓介, 桂 大詞, 遊川 秀幸, 大下 浄治
2. 発表標題 散逸エネルギー最大化を目的とした均質化法に基づく多孔質材微視構造のトポロジー最適化
3. 学会等名 日本音響学会 春季研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考