

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32613
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04367
研究課題名（和文）動的均質化法にもとづく弾性・音響メタマテリアルの設計法構築

研究課題名（英文）Acoustic metamaterial

研究代表者
山本 崇史（Yamamoto, Takashi）
工学院大学・工学部・教授

研究者番号：30613640
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：構築した動的均質化に、密度法にもとづくトポロジー最適化を組み込むことを検討していたが、密度法にもとづくトポロジー最適化の収束性に問題があることが分かった。スケールをまたいだ随伴変数による設計感度は、差分感度と1%以内の精度で一致しており、感度解析には問題ない。今後も引き続き検討する。
並行して低周波数の吸音率を向上させるため、独立気泡を周期的に混在させ、流路を屈曲化する新たな微視構造を考案した。垂直入射した音波の伝播方向を約45度傾けることができ、一種のメタマテリアルと言える。計算検討の結果、厚さ10mmで1kHzの吸音率0.5を達成した。また、3Dプリンターで実際に試作しその効果を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
吸音という現象は、音波が微細な流路を伝播するときに発生する音響エネルギーの損失に起因するため、吸音材は連続気泡で構成されるのが通例であるが、その逆に独立気泡を混在させることで、向上させることが難しい低周波数帯域の吸音率を改善することができた。3Dプリンターで造形した多孔質材でその効果を実験的に検証することはできたが、実際の発泡系吸音材においてどのような化学的プロセスで実現できるかが課題である。今後、別の応用例を含めて情報発信することで当該分野の専門家との協調を図る。

研究成果の概要（英文）：Topology optimization based on a dynamic homogenization cannot be established as scheduled due to the convergence problem of the optimization although the sensitivity by the adjoint method is successfully obtained. We further continue to develop the method. However, we propose a new concept of a microscopic structure to enhance the sound absorption coefficient in the low frequency range below 1 kHz. In this concept, flow path in porous material where acoustic wave propagates is elongated. In this study, closed pores and open pores are aligned alternately and acoustic wave in normal incidence propagates at the angle of 45 degree. Sound absorption coefficient at 1 kHz reached to 0.5 for 10 mm thickness by designing the microscopic cell size of 400 micro meters. We also fabricate a proto type by using 3D printer BMF microArch S240 and verified the effect of the proposed new concept.

研究分野：機械工学

キーワード：均質化法 最適化 多孔質材 吸音材 吸音率 微視構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

音響メタマテリアルとは人工的な周期構造物であり、等価密度などの等価特性の少なくとも1つが負値あるいは通常よりも大きな値となり、弾性波・音波の伝播に対して革新的な制御ができる材料として大きな期待が寄せられている。共振系としては、ばね・マス系を連続体で具現化した構造を応用している事例が多く、共鳴系としては、ヘルムホルツレゾネータが多様されている。また、単位構造の一部を共振・共鳴で振動を増幅させたり、位相を変化させたりし、周囲の領域との間で生じる局所干渉を応用している事例もある。

一方、研究代表者はこれまで、多孔質吸音材料のように弾性体と空気が混在する二相材料の均質化法を構築し、その微視的な単位構造のトポロジーを最適化する設計法を提案している。音響メタマテリアルも、弾性体やヘルムホルツレゾネータ内部の空間で構成されており、多孔質吸音材料と類似した構造であるが、単位構造内部に共振系・共鳴系を含む点が異なる。このため、これまでに構築した従来の均質化法をそのまま適用することはできず、近年提案されている、動的均質化法を用いる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに当研究室で構築した従来の均質化法を発展させ、構造・音響連成問題に対して適用できる動的均質化法を構築する。また、これまでの共振・共鳴系の構造にとらわれない革新的な構造を有する音響メタマテリアルを創出するため、構造最適化でも抜本的な構造設計が可能となるトポロジー最適化手法を組み合わせる。そして構築した設計法を用いて、既存の材料では難しい、低周波数域の吸音・遮音性能を向上可能な音響メタマテリアルを開発することを目的とする。さらに、検討の結果得られる音響メタマテリアルを積層造形法により試作し、検証実験を行いその性能を確認する。

3. 研究の方法

研究代表者はこれまでに、弾性体と空気が混在するマルチフィジクスの問題に適用可能な漸近展開にもとづいた均質化法を構築し、多孔質吸音材に適用し、その微視的構造と巨視的特性である吸音率を関連付けている。しかし、従来の漸近展開にもとづく均質化法では、波長が十分長い、すなわち十分低い周波数であることを仮定としており、単位構造の内部にある共振系や共鳴系の周波数特性を考慮できないため、音響メタマテリアルの問題には適用できない。これに対して、動的均質化法は、変位などの物理量に加えて、周波数も漸近展開することで、単位構造においても動的な問題となるようにしている。これにより、単位構造の内部にある共振・共鳴系の動特性を含めた均質化特性を求めることができ、音響メタマテリアルの問題にも適用可能となる。そこで、まずこれまで構築してきた均質化法を発展させ、構造・音響連成問題に対して適用可能な動的均質化法を新たに構築する。

次に、構築した動的均質化法に、密度法にもとづくトポロジー最適化を組み込み、設計法として確立する。巨視的な性能である吸音率や音響透過損失を目的関数にとり、単位構造のトポロジーを最適化する場合、スケールをまたいだ設計感度が必要になるが、従来の均質化では随伴変数法を複数回用いて求められることが分かっており、同様のアプローチをとる。

構築した設計法を用いて、所望の性能を有する音響メタマテリアルの構造を創出する。ここでは、既存の材料では難しい低周波数域、特に1kHz以下の吸音・遮音性能を向上可能な音響メタマテリアルを検討する。さらに得られた構造から実際に試作して実験検証する。試作は、学外の積層造形装置を利用する。

4. 研究の成果

構築した動的均質化に、密度法にもとづくトポロジー最適化を組み込むことを検討していたが、密度法にもとづくトポロジー最適化の収束性に問題があることが分かった。内挿関数やペナルティとして与えるべき乗の値などを検討したが、周波数や初期条件に大きく依存し、条件ごとに設定が必要であり統一的な指針が得られていない。なお、ミ

クロ・マクロスケールをまたいだ随伴変数による設計感度は、数値差分感度と 1 % 以内の精度で一致しており、感度解析には問題ないことを確認している。今後も引き続き検討する予定である。

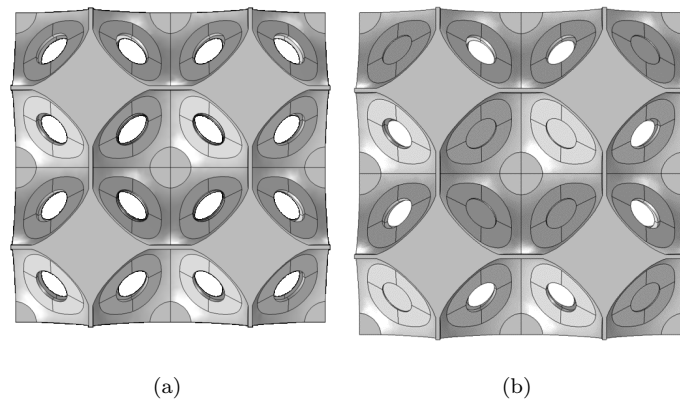


図 1 Unit cell model of (a) open cell and (b) semi-open cell.

並行して低周波数帯域における散逸エネルギーを向上、すなわち吸音率を向上させる微視構造の適正化を検討した。ここでは、微視構造を適正化することで音波の伝播経路を屈曲化させ、流路を長くするという考え方を応用し、図 1(a) の連続気泡で構成される微視構造に、図 1(b) に示す独立気泡（図中の中央）を周期的に混在させるという新たな微視構造を考案した。

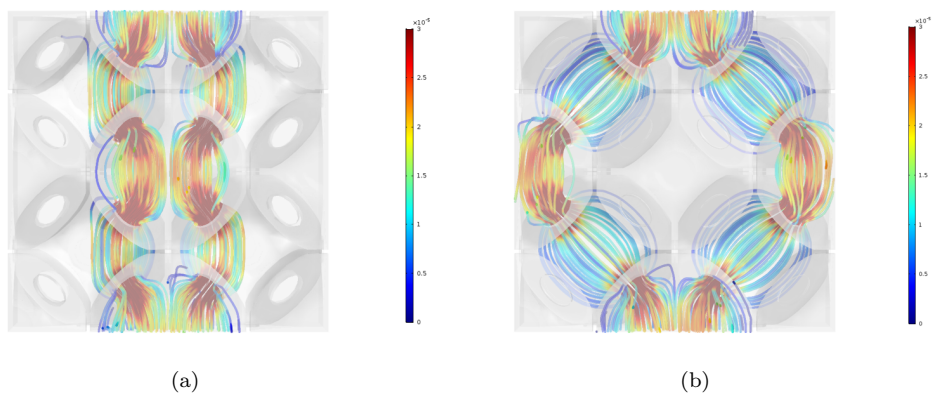


図 2 Propagating path of acoustic wave for (a) open cell and (b) semi-open cell.

図 2 は、図の上部から垂直に入射した音波の伝播経路を示したもので (a) は連続気泡、(b) は独立気泡が混在している場合である。独立気泡のセルを迂回することで、音波の伝播方向を約 45 度傾いていることが分かる。

図 3 は、ユニットセルサイズ 1.000 mm、厚さ 10mm の場合で垂直入射吸音率を比較したものである。セルサイズおよび連通孔径は同一で独立気泡の有無が異なるだけであるが、吸音率のピーク周波数を 5 kHz から 3 kHz まで低くすることができている。共振系を含む構造ではないが、これも一種の音響メタマテリアルと考えることができる。

この多孔質材を直径 29 mm の円筒形状として、光造形方式の 3D プリンターで実際に試作しその効果を検証した。ユニットセルの材料部分の厚さは 50 μm であり、安定して造形するにはこの厚さより 3D プリンターの空間分解能（寸法精度）が十分小さくなければならない。そこで、空間分解能 10 μm の性能を有する高精度 3D プリンターである BMF 社 micro Arch S240 を利用した。

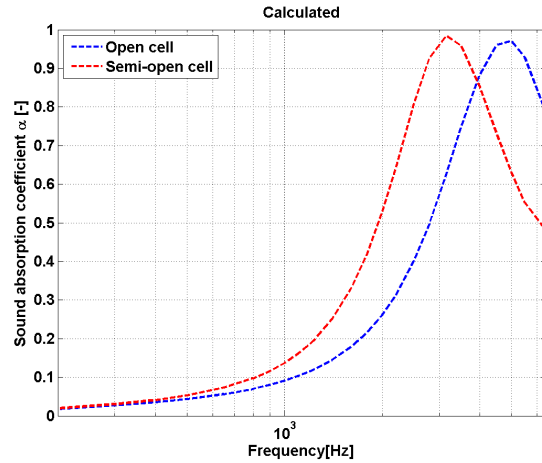


図 3 Sound absorption coefficients for 10 mm thickness.

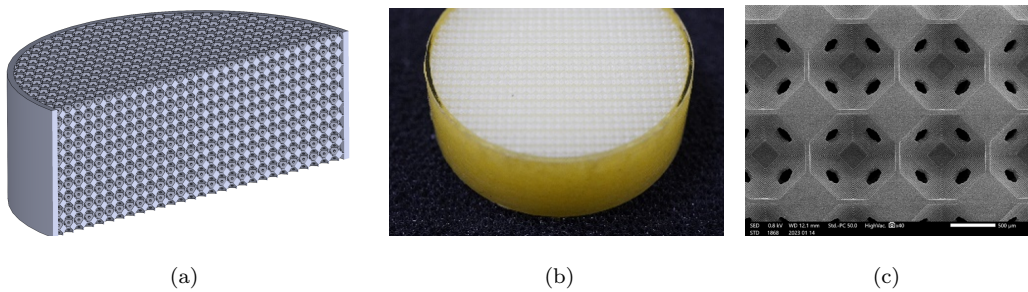


図 4 (a) CAD model, (b) fabricated sample and (c) microscopic view of sample for open cell.

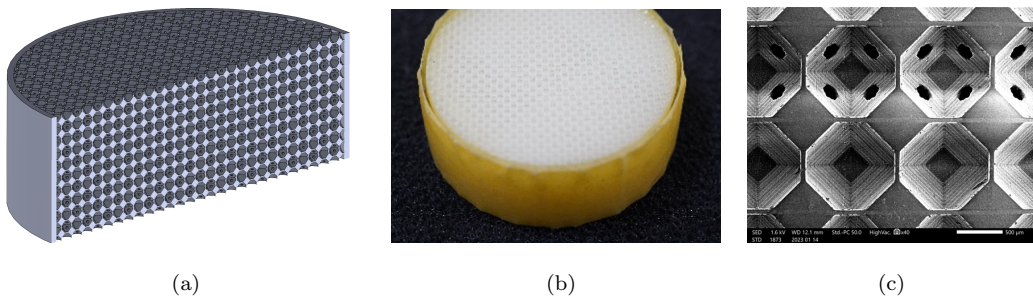


図 5 (a) CAD model, (b) fabricated sample and (c) microscopic view of sample for semi-open cell.

図 4 は連続気泡からなる多孔質材の (a) CAD モデルとその断面, (b) 造形サンプルおよび (c) 造形サンプル表面の拡大画像である。また, 図 5 は同様に, 独立気泡を混在させた多孔質材の (a) CAD モデルとその断面, (b) 造形サンプルおよび (c) 造形サンプル表面の拡大画像である。

図 6 は, 音響管で測定した垂直入射吸音率の実測値と, 図 3 で示した計算値を比較したものである。ピークレベルに若干の差があるものの, 200 Hz から 6.4 kHz の周波数帯全域でよく一致している。これにより, 独立気泡を周期的に混在させた微視構造からなる多孔質材が, 低い周波数帯域における吸音率改善に有効であることが実証できた。

図 7(a) は, 連通孔直径を $100 \mu\text{m}$ としユニットセルサイズを $300 \mu\text{m}$ から $600 \mu\text{m}$ まで変えた場合, また, (b) は

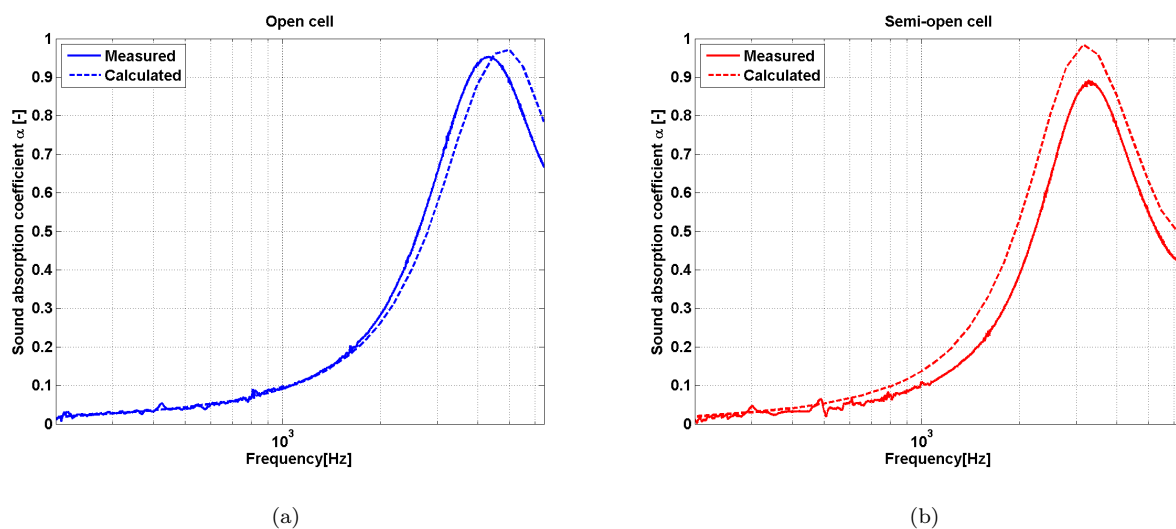


図6 Comparisons between measured and calculated sound absorption coefficients for (a) open cell and (b) semi-open cell.

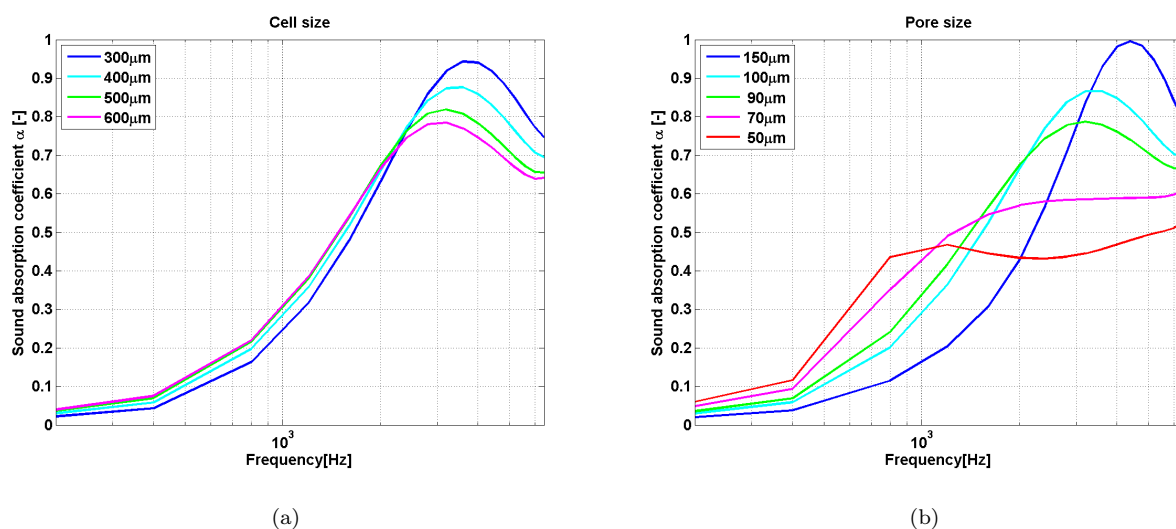


図7 Effects of (a) cell size and (b) throat size for sound absorption coefficients.

ユニットセルサイズを $400\ \mu\text{m}$ とし連通路径を $50\ \mu\text{m}$ から $150\ \mu\text{m}$ まで変えた場合の垂直入射吸音率を示している。この結果、ユニットセルサイズ $400\ \mu\text{m}$ で連通路径 $50\ \mu\text{m}$ の場合、厚さ $10\ \text{mm}$ で $1.0\ \text{kHz}$ の吸音率 0.45 を達成できた。

吸音は、音波が微細な流路を伝播するときに発生する音響エネルギーの摩擦損失に起因するため、吸音材は連続気泡で構成されるのが通例であるが、本研究では、逆に独立気泡を混在させることで、向上させることが難しい低周波数帯域の吸音率を改善することができた。3D プリンターで造形した多孔質材でその効果を実験的に検証できたが、実際の発泡系吸音材においてどのような化学的プロセスにより実現できるかが課題である。今後、別の応用例を含めて情報発信することで当該分野の専門家と協調を図りたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 李 知桓, 山本 崇史
2. 発表標題 吸音率向上を目的とした均質化法による発泡系吸音材の微視構造検討
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 知桓, 山本 崇史
2. 発表標題 低周波数域における吸音率向上を目的とした均質化法による発泡系吸音材の微視構造検討
3. 学会等名 制振工学研究会技術交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhihuan Li, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 ENHANCE SOUND ABSORPTION COEFFICIENT IN LOW AND MID FREQUENCY RANGE BY ALTERNATING OPEN AND CLOSED PORES
3. 学会等名 The 29th International Congress on Sound and Vibration
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------