

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：34419

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22453

研究課題名（和文）音響メタマテリアルを用いた次世代吸音材の開発

研究課題名（英文）Study on novel sound absorbing material using acoustic metamaterial

研究代表者

菅原 彬子（Sugahara, Akiko）

近畿大学・建築学部・助教

研究者番号：90878175

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自然界に存在する結晶構造や共鳴器構造を単位格子とした周期構造を設計し、有限要素法解析や実験的検討によりその垂直入射吸音特性を検討した。実験的検討では、3Dプリンターで実際に設計構造を造形し、音響管を用いて垂直入射吸音率を測定した。これらの結果より、単位格子のパラメータチューニングにより、様々な吸音特性を実現できることが示唆された。また、孔部にグリッドを付けた共鳴器を単位格子とすることで、低・中周波数帯域で安定した吸音特性をもつことがわかった。以上の知見より、提案構造は、状況に応じた所望の特性をもつ吸音材となり得ることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来用いられてきたグラスウールなどの無機系多孔質吸音材には、重力等による性能劣化や、低域の吸音率の低さなどの問題があった。3Dプリンターの発展により近年着目される人工材料である音響メタマテリアルは、次世代材料として注目されているが、建築環境工学分野での応用例はまだ少ない。よって、本研究で、3Dプリンターを用いて所望の吸音特性をもつ様々な吸音材を作成できる可能性を示したことで、従来の吸音材の課題を解決した新たな音響材料開発の発展に寄与する。また、これにより、従来の施工条件に縛られない新たな室内空間の創出につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, some micro-periodic structures using naturally occurring crystal structures and simple resonators as unit cells were designed. Their sound absorption characteristics at normal incidence were investigated by finite element analysis and experimental investigation of 3D-printed objects. The results suggest that parameter tuning of the unit cells enables various sound absorption characteristics. It is also found that a resonator-type unit cell with grids have stable and high sound absorption for low- and middle-frequency ranges. These findings suggest that the proposed structures lead to a good sound absorber with the desired characteristics depending on the situation.

研究分野：建築音響，音響材料

キーワード：3Dプリンター 吸音材開発 音響メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

室内外で発生した環境騒音を制御し、静かな室内音環境を保つことや、コンサートホールで楽音を心地よく響かせる、駅などの公共空間や会議室で音声を明瞭に伝達するなど、室の目的に応じた音環境を形成するためには、適切な吸音材を適切に配置する、吸音設計が重要である。一般的に吸音材として用いられる無機系多孔質吸音材は、安価で軽量であるが、湿気や重力等による性能劣化などの課題があり、それゆえに施工条件に制約がある。このような背景から、維持管理や意匠といった様々な面で課題を解決した新たな吸音材の開発が望まれている。

そこで、本研究では、次世代材料として近年注目される音響メタマテリアルに注目した。メタマテリアルとは、1/10 波長程度の構造・材料を周期的に組み合わせることで所望の物性を実現し、波動を制御することのできる人工的な構造体である。元々は電磁波の分野で発展したが、音波の制御への応用も検討されており、物体を音響的に隠す音響クロウキングや、入り組んだ迷路状の内部構造により見かけの音速を下げる手法などが提案されてきた。音響メタマテリアルに関する研究は、以前は理論的な解析に留まっていたが、3D プリント技術の発展により近年は実験的な検討も行われている。構造や素材の選定により、所望の音響特性・形状・材質の材料を作り出すことが出来る音響メタマテリアルの利点を利用することで、実用性の高い優れた吸音材を開発できると期待された。

2. 研究の目的

本研究では、3D プリンターを用いて所望の吸音特性を持つ音響メタマテリアルを作成し、従来の吸音材で懸念される耐久性やデザイン性等に関する課題を解決した次世代吸音材として提案することを目的とした。具体的に、下記について検討した。

(1) 物質の結晶構造を模した“疑似”多孔質吸音材

原子や結合手を球と円柱により模した、単純立方格子(SC)、面心立方格子(FCC)、体心立方格子(BCC)、ダイヤモンド構造(Diamond) を作成した。単純な結晶構造のパラメータチューニングにより、様々な吸音特性を実現できれば、状況に応じた所望の特性をもつ吸音材となることが期待される。

(2) 共鳴器構造を組み合わせることで広帯域の吸音を目指す吸音材

共鳴器を2つ直列に接続し、連結共鳴器とすることで共鳴ピークを2つ発生させられること、共鳴器の孔部の粘性抵抗を調整することでピーク間のディップを低減できることを眞田らが示している[1]。これを参考に、多くの共鳴器を連結させることで共鳴ピークを複数発生させ、更に縦横の連結により多孔質吸音体的な特性も実現できるのではないかと考えた。これにより、従来の吸音材で困難であった、低・中周波数帯域を広帯域で吸音できる吸音材となることが期待される。

(3) 上記(1)(2)を組み合わせさせた吸音材

複数構造の組み合わせにより、各構造の特性を活かした吸音材となるのではないかと考えた。

3. 研究の方法

[1] 数値解析および理論的検討

単位格子内での粘性流問題と熱拡散問題を解くことでこれが構成する周期構造の等価特性(等価密度, 等価音速)を推定する Zielinski らの解析手法[2]を有限要素法解析ソフトウェアに実装し、本研究では、小さな単位格子を多数連結した周期構造がもつ吸音特性について検討した。検討した単位格子構造は表1, 表2に示す。

表1 物質の結晶構造を模した単位格子。全て単位格子サイズ 5 mm×5 mm×5 mm。

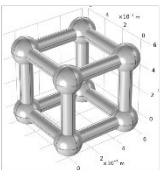
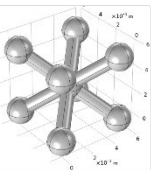
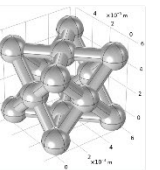
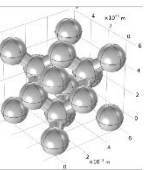

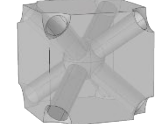
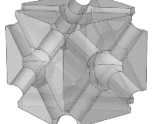
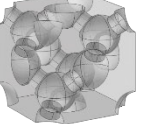
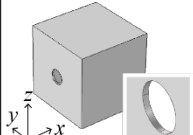
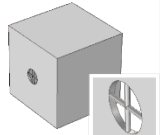
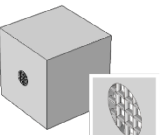
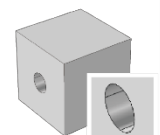
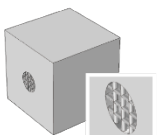
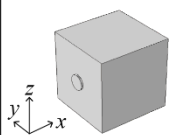
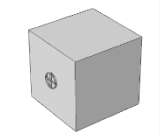
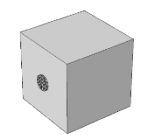
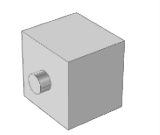
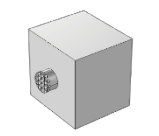
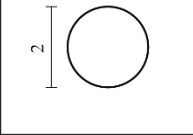
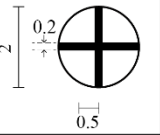
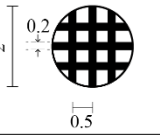
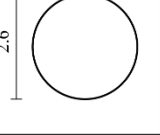
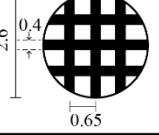
	SC B1S2	SC B2S4	BCC B1S2	BCC B2S4	FCC	Diamond
	Simple cubic		Body centered cubic		Face centered cubic	Diamond
Solid domain						
Fluid domain						
Atoms diameter [mm]	2	4	2	4	2	2
Bonds diameter [mm]	1	2	1	2	1	1
Porosity $\phi$ [-]	0.91	0.64	0.81	0.34	0.74	0.7

表 2 共鳴器型単位格子

	RES	RES-g1x1	RES-g3x3	RES2	RES2-g3x3
Solid domain					
Fluid domain					
Hole geometry [mm]					
Unit cell size	(x) 10 mm × (y) 10 mm × (z) 10 mm				
Neck size	0.25 mm			1.5 mm	
Grid position (x)	0.1 mm			0.24 mm	
Wall thickness	0.25 mm				
Cavity size	(x) 9.75 mm × (y) 9.5 mm × (z) 9.5 mm			(x) 8.5 mm × (y) 9.5 mm × (z) 9.5 mm	
Porosity [-]	0.8807	0.8806	0.8804	0.7751	0.7737
Aperture ratio [-]	0.031	0.024	0.013	0.053	0.011

有限要素法解析を用いて表 1, 2 の単位格子から推定した等価密度・等価音速を、材料の吸音特性に関する理論式に適用し、垂直入射時の吸音率や音響インピーダンスを求めた。そして、単位格子の種類や、空隙率、球径・円柱径などの骨格部分のパラメータ、共鳴器の形状などが吸音特性に及ぼす影響について検討した。また、複数の構造を重ねて組み合わせた場合の吸音特性についても検討した。

[2] 3D プリンターでの造形と実験的検証

光造形式の 3D プリンターで(1)で検討した各種構造体を造形した。材料としては ABS 系の樹脂材料やセラミック配合樹脂材料を用いた。光造形式 3D プリンターは、液体樹脂中にプラットフォームを浸し、下からレーザーを当てて層ごとに固化することで 3D オブジェクトを造形するものである。上記の通り造形した構造体に対し、JIS A 1405-2: 2007 に従い、音響管を用いて垂直入射吸音率を測定し、実際の造形物の性能検証や課題点の把握を行った。音響管として、低周波数帯域用の太管(内径 100 mm)と細管(内径 29 mm)を用いた。作成した試料の例を図 1 に示す。

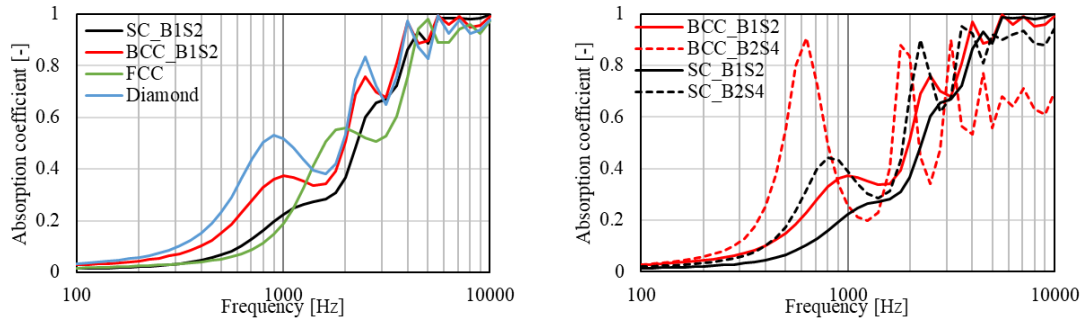


図 1 3D プリンターで造形した試料(右から SC, RES2, RES2-g3x3)

4. 研究成果

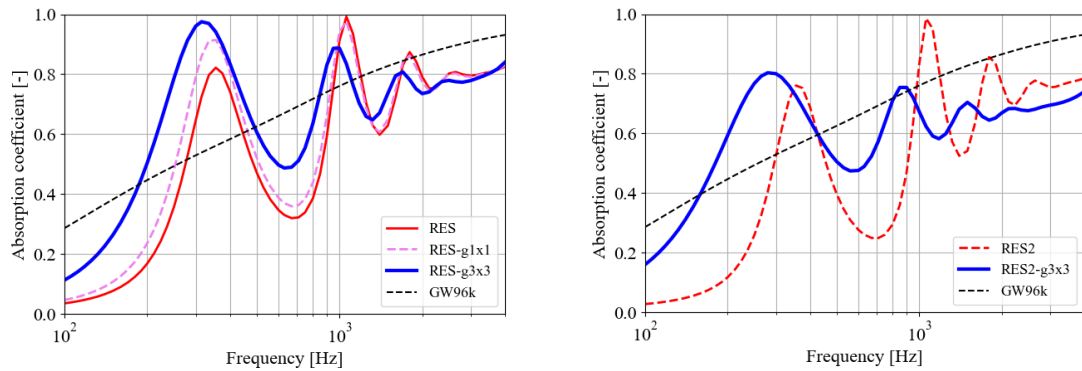
[1] 数値解析および理論的検討

まず、SC, BCC, FCC, Diamond 構造について、球径や円柱径を変えて 100 Hz-10 kHz までの吸音率を計算した結果を図 2 に示す。厚みは全て 100 mm である。図 2(s)の結果より、空隙率の比較的高い B1S2 構造ではどれも、周波数が高いほど吸音率が大きくなる多孔質吸音材の特性を持っている。一方、図 2(b)の結果より、球径・円柱径を太くして空隙率を下げることによって、低域で複数の吸音ピークが立つ、共鳴器的な構造に近づくことが示唆された。よって、結晶構造を基にした単位格子について、パラメータチューニングにより、状況に応じた様々な特性をもつ吸音材を作成できる可能性が示唆された。



(a) 構造による違い (b) 球径・円柱径による違い  
 図2 表1の単位格子を基にした周期構造の垂直入射吸音率(数値解析)

次に、共鳴器を単位格子とし、100 Hz-4 kHz を対象として計算した結果を図3に示す。厚みは全て100 mmである。すべての結果で複数の吸音ピークを示し、連結共鳴器の特性が表れている。また、周波数が高くなるほど吸音率は増加しており、多数の共鳴器の連結により多孔質吸音材的な特性も示しているといえる。また、RES-g3x3とRES2-g3x3の結果より、孔部にグリッドをつけて粘性抵抗を上げることで、吸音ピーク間のディップを低減し、安定して高い吸音率を実現できることがわかった。よって、孔部にグリッドを付加した共鳴器型の単位格子を用いることで、低・中周波数帯域で広く吸音可能な有用な吸音材となり得ることが示唆された。



(a) RES, RES-g1x1, RES-g3x3 (b) RES2, RES2-g3x3  
 図3 表2の共鳴器型単位格子を基にした周期構造の垂直入射吸音率(数値解析)

最後に、2種類の単位格子からなる周期構造を重ねて2層構造とした。例としてRES2とRES2-g3x3を組み合わせた結果を図4に示す。図より、RES2\_RES2-g3x3では、1層のRES2-g3x3よりピークが急峻でRES2よりディップが小さい。RES2-g3x3\_RES2では、RES2のようにピークが急峻だがRES2-g3x3の影響でディップは小さい。これらのことから、2層構造では両方の特性を付加できることが示唆された。また、特に入射側の影響が大きい。故に、複数の構造を組み合わせることで、より様々な状況に対応できる可能性がある。

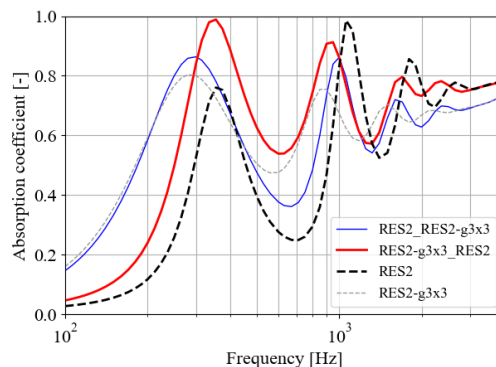


図4 RES2とRES2-g3x3の2層構造の垂直入射吸音率(数値解析).  
 「背後壁側\_入射側」のように凡例を示す。

## [2] 実験的検証

各構造について50 mm厚の試料を3Dプリンターで2つずつ造形し、重ねて厚み100 mmの1層構造および2層構造とした。例として、RES2, RES2-g3x3, RES2\_RES2-g3x3を細管で垂直入射吸音率を測定した結果を図5に示す。図中には、[1]の計算結果も示す。結果より、数値解析結果

と実験結果は概ね一致しており、結果の妥当性を示す。ただし、いくつかの点で齟齬もある。例えば、(a) RES2 の場合、1 kHz 以上の高帯域で、実験結果のほうがよりピークディップが大きい。このような齟齬の一因として、細管試料の外周部で空洞サイズが異なる点や、試料内部に残留する液体樹脂の影響等が考えられる。よって、横穴などの構造的な改善策を今後検討する必要がある。とはいえ、実際の構造体でも、連結共鳴器と多孔質吸音材、双方の特性を活かした特性を示し、提案構造の有用性を示すことができた。また、今回のように硬い樹脂材料で作成することで、従来の無機系多孔質吸音材で課題となった重力等による繊維の沈下などが起こらない耐久性の高い吸音材となりうると期待される。

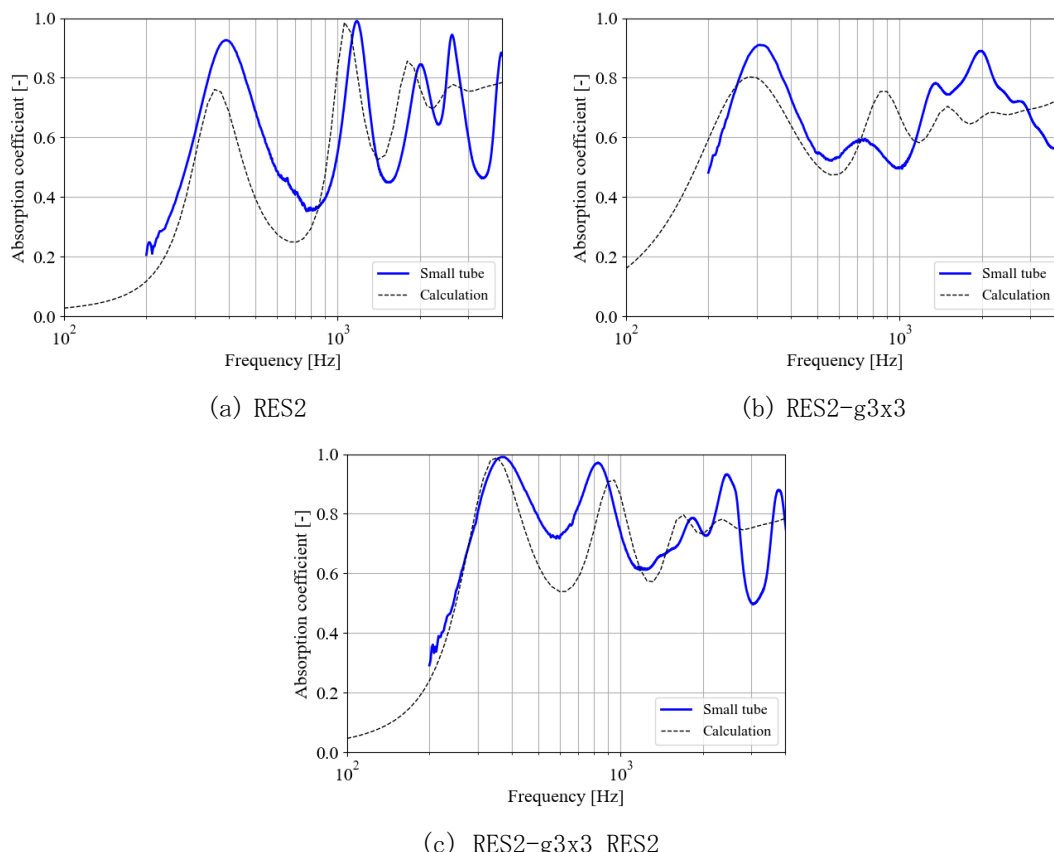


図5 音響管による各構造の垂直入射吸音率測定結果の例

上記の研究成果についてまとめた論文を執筆中である。

【参考文献】

- [1] 眞田他, 連結共鳴器形吸音パネルの吸音特性, 日本音響学会誌, 62 巻, 11 号, p. 759-766, 2006.
- [2] Zielinski et al., Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media, Journal of Sound and Vibration, Volume 483, 115441, 2020.

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 菅原彬子
2. 発表標題 結晶構造を利用した多孔質吸音材の吸音特性に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原彬子
2. 発表標題 微細周期構造を組み合わせた多層吸音体の垂直入射吸音特性に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原彬子
2. 発表標題 共鳴器型の単位格子をもつ周期構造による低中周波数帯域の吸音に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2021年度日本音響学会秋季研究発表会における「結晶構造を利用した多孔質吸音材の吸音特性に関する検討」という題目での発表内容が、同会の第51回粟屋潔学術奨励賞を受賞した。

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
---------	---------