

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2018～2021  
課題番号：18H01356  
研究課題名（和文）音響・構造連成効果を考慮した均質化法に基づく音響メタマテリアル創成設計法の構築

研究課題名（英文）Construction of Structural Design Method for Acoustic Metamaterials Considering Acoustic and Structural Coupled Effects Based on the Homogenization Method

研究代表者  
西脇 眞二（Nishiwaki, Shinji）  
京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10346041  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：音響メタマテリアルは、音響伝搬現象を対象に、通常の物質が持たない物理特性を示す構造材料である。この音響メタマテリアルを利用すれば、音響ハイパーレンズ、音響フラットレンズ、音響導波路などの様々な高性能な音響デバイスを開発することができる。  
本研究では、音響メタマテリアルとメタマテリアルに基づくデバイス構造の一貫した構造設計法を開発するため、トポロジー最適化に基づく構造創成設計法を構築した。すなわち、高周波均質化法に基づきメタマテリアルの構造を創成する設計法と、マイクロ構造である音響メタマテリアルとマクロ構造である音響デバイスのマルチスケール構造最適設計法を構築した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、特異な分散特性をもつ音響メタマテリアルとその音響メタマテリアルで構成される音響デバイスを同時に設計できるマルチスケール構造最適設計法を、数学理論と数値計算理論に基づき、世界に先駆けて構築することができたことは、学術的に意義が大きい。また、この方法論により、最適なメタマテリアル構造とその最適配置による高性能な音響デバイスを設計できる。これにより高性能な音響デバイスを開発でき、産業界への貢献も期待でき、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Acoustic metamaterials are structural materials that exhibit physical properties at specific frequencies, which are not exhibited by natural materials, for acoustic propagation phenomena. Various high-performance acoustic devices such as acoustic hyperlenses, acoustic flat lenses, and acoustic waveguides can be developed using acoustic metamaterials. However, design methods for acoustic metamaterials have not yet been established.

In this research, we developed a structure design method based on topology optimization in order to develop a consistent structure design method for acoustic metamaterials and device structures using such metamaterials to solve the above-mentioned problems. That is, based on the topology optimization, we developed a methodology to design metamaterial structures using a high-frequency homogenization method. We also developed a multi-scale structure design method for acoustic metamaterials and acoustic devices.

研究分野：構造最適化

キーワード：音響メタマテリアル トポロジー最適化 構造創成 均質化法 CAE

### 1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルは、特異な形態・形状をもつマイクロ構造を周期的に配列することにより、自然界には存在しない物理特性を示す構造材料である。メタマテリアルは、対象とする物理領域の違いにより、様々な展開が進められている。音響メタマテリアルは、音響伝搬現象を対象に、特定の周波数において、負の体積弾性率や負の質量密度などの通常の物質が持たない物理特性を示す構造材料である。この音響メタマテリアルを利用すれば、音響ハイパーレンズ、音響フラットレンズ、音響導波路などの様々な高性能な音響デバイスを開発することができる。しかしながら、音響メタマテリアルの設計法は未だ確立されておらず、試行錯誤による形状作製と性能評価に留まっていた。

他方、トポロジー最適化は、構造の形状だけではなく穴の数の増減などの形態の変更も可能とする最も自由度の高い構造最適化の方法で、構造の性能の抜本的な改善を可能とするだけでなく、従来になかった革新的な機能をもつ構造を創成する方法として利用することも可能である。しかしながら、トポロジー最適化は機械産業などに広く利用されているが、産業界における応用は、主に構造力学の分野における剛性や固有振動数最大化などの構造の安定性を目指した設計への適用に限られていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、音響メタマテリアルとメタマテリアルに基づくデバイス構造の一貫した構造設計法を開発するため、トポロジー最適化に基づく構造創成設計法を構築することを目的とした。すなわち、音響メタマテリアルのマイクロレベルの共振現象のマクロレベルへの影響を高周波均質化法にて評価することにより、特定の共振モードを適切に利用して特異な振動特性を示す材料構造、すなわちメタマテリアルの構造を創成設計する方法論をトポロジー最適化に基づき構築し、さらにその方法論に基づき、マイクロ構造である音響メタマテリアルとマクロ構造である音響デバイスのマルチスケール構造最適設計法を構築した。

### 3. 研究の方法

①音響・構造振動の連成関係を統一的に表現できるモデルである二相材料モデルを構築し、その二相材料モデルにより、支配方程式の異なる空気と弾性体で構成される解析場において、パラメータを場に即して変更することにより、厳密に場の状態を解析できることを確認した。

②二相材料モデルによる状態解析のもと、マイクロレベルの共振現象のマクロレベルへの影響を高周波均質化法にて評価する方法を構築した。

③特定の共振モードを適切に利用して特異な音響・振動特性を示す材料構造、すなわちメタマテリアルの構造を創成設計する方法論を、高周波均質化法によるマイクロ構造のマクロ特性の評価結果に基づき最適化を行うトポロジー最適化最適設計法を構築した。

④ミクロスケールにおいて、異方性音響メタマテリアルの構造設計を行いながら、マクロスケールにおいて、適切な伝搬特性をもつマイクロ構造を適切に配置しながら、最適な音響伝搬経路を実現する音響デバイスの設計を行うことができるマルチスケール構造最適設計法を構築した。

### 4. 研究成果

①高周波均質化法によるマイクロ構造の物理特性の評価方法

図1に評価・設計領域を示す。周期構造をもつメタマテリアルの一つをユニットセルとして表現し、構造材料にアルミニウム、空洞材料に空気を想定している。まず、高周波均質化法の概要を説明する。音響伝搬問題の支配方程式たるヘルム方程式は次式となる。

$$\frac{1}{\rho^{(m)}} \frac{\partial^2 u^{(m)}}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{\omega^2}{K^{(m)}} u^{(m)} = 0 \quad (1)$$

この式に対して、次式に示すように変位と周波数に関して漸近展開をする。

$$u(\mathbf{X}, \xi) = \sum_k \epsilon^k u_k(\mathbf{X}, \xi) \quad (2)$$

$$\Omega^2 = \sum_k \epsilon^k \Omega_k^2$$

均質化法を適用すれば、次式に示す均質化された支配方程式を得る。

$$T_{ij} \frac{\partial^2 f_0(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_j} + \Omega_0^2 f_0(\mathbf{X}) = 0 \quad (3)$$

ここで、

$$T_{ij} = \frac{t_{ij}}{\sum_{m=a,b} \int_{\Omega_m} \frac{1}{\tilde{K}^{(m)}} U_0^{(m)2} d\Omega}, \quad t_{ij} = \left( \sum_{m=a,b} \int_{\Omega_m} \frac{1}{\tilde{\rho}^{(m)}} U_0^{(m)2} d\Omega \right) \delta_{ij} + \sum_{m=a,b} \int_{\Omega_m} \frac{1}{\tilde{\rho}^{(m)}} \left( U_0^{(m)} \frac{\partial U_{ij}^{(m)}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial U_0^{(m)}}{\partial \xi_i} U_{ij}^{(m)} \right) d\Omega \quad (4)$$

である。上式の関係から、以下の式が得られる。

$$T_{11}\kappa_1^2 + T_{22}\kappa_2^2 \approx \Omega^2 - \Omega_0^2. \quad (5)$$

この  $T_{ij}$  の値によりメタマテリアルの特性を設定することができる。すなわち、 $T_{11} > 0, T_{22} > 0$  のように同符号であれば楕円型の分散関係、あるいは  $T_{11} < 0, T_{22} > 0$  のように異符号であれば双曲型の分散関係、 $T_{11} < 0, T_{22} = 0$  のように一方がゼロであれば放物型の分散関係を示す。したがって、最適化によりこの二つの変数を、所望の値に設定できれば、所望の分散関係を示す音響メタマテリアルを設計することができる。

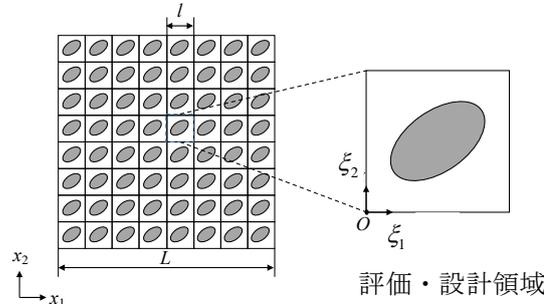


図1 メタマテリアルの評価・設計領域

### ② トポロジー最適化により構造創成された音響メタマテリアル構造

図2に①に示した方法により、得られた音響メタマテリアル構造とそのメタマテリアルを平面上に並べ、音源中心に2030.6Hzの音波を発生させたときの音波伝搬状況を示す。なお、ここでは、固体材料としてアルミニウムを想定している。また、最適化時に周波数の設定を行えるように制約を設け、全て2030.6Hzにて特異な分散関係を示すように最適化を図っている。これより、Case1では双曲型、Case2では放物型、Case3では双曲型の分散特性を示すメタマテリアル構造を創成できていることがわかる。すなわち、提案する方法論で、特定の分散関係を示す音響メタマテリアル構造を創成可能なことがわかった。

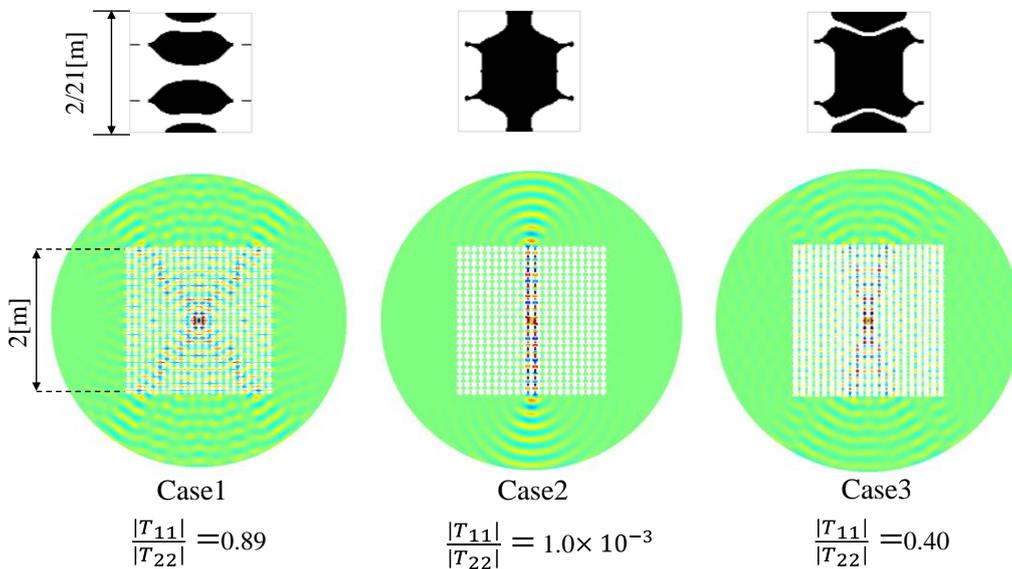


図2 メタマテリアルの最適構造と音波伝搬状況

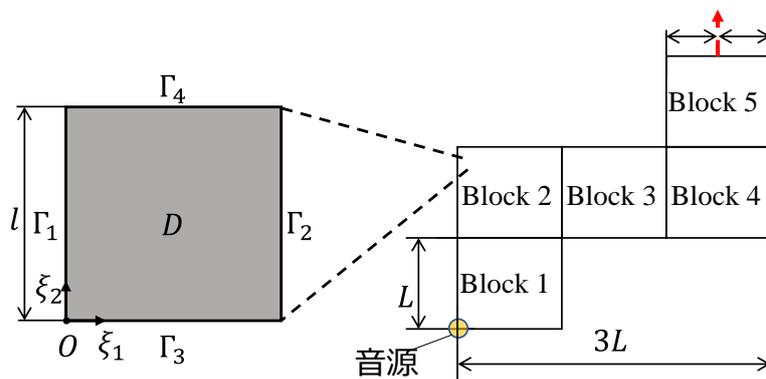
### ③ マルチスケール構造最適設計法による導波路設計

図3に導波路設計のための設計領域を示す。図に示すように、マクロ構造たる導波路内の左側下に1776.8Hzの音源を置き、右側上辺から最短経路で音波が伝搬するように、適切な形状のマイクロ構造たる音響メタマテリアルを配置する。配置する際に、設計領域を5ブロックに分割し、各ブロック内においては同一形状のマイクロ構造を配置する。マイクロ構造の設計領域は、図に示したように、ユニットセルとして最適化を図った。

図4に、最適化により得られた5つのブロックの最適構造を示す。なおここでも、固体材料としてアルミニウムを想定している。また、図5にマクロ構造たる音響導波路のない音波伝搬状況を示す。これより、音波が最短経路にて伝搬していることがわかる。

以上より、提案するマルチスケール構造最適設計法により、マイクロ構造とマクロ構造の同

時最適化が達成できることがわかった。



マイクロ構造の設計領域

マクロ構造の設計流域

図3 マルチスケール設計のための設計領域

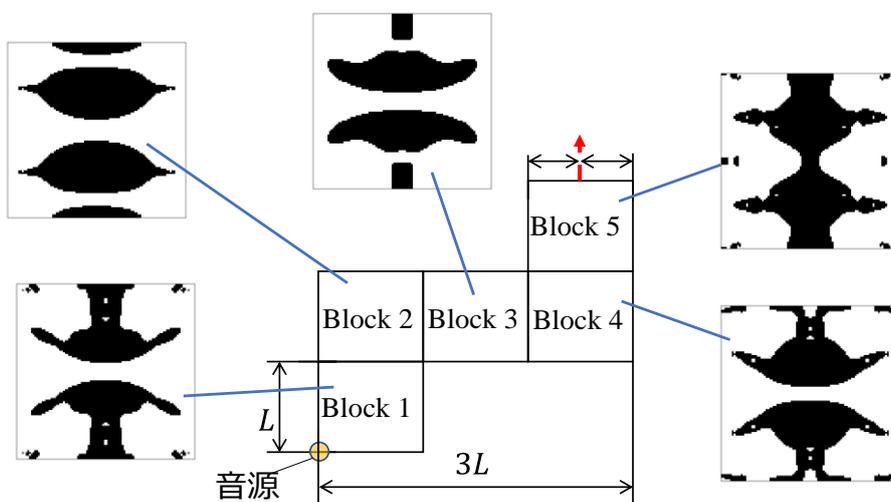


図4 ミクロ構造たる音響メタマテリアルの最適構造

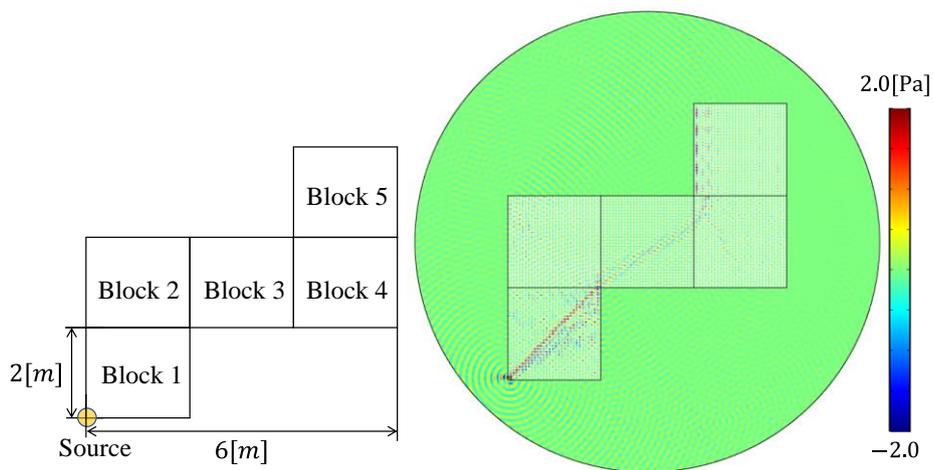


図5 マクロ構造たる音響導波路の最適構造

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., and Nishiwaki, S.	4. 巻 113
2. 論文標題 Optimum Design of an Acoustic Metamaterial with Negative Bulk Modulus in an Acoustic-Elastic Coupled System Using a Level Set-based Topology Optimization Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 1130-1339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.5616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyata, K., Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., and Nishiwaki, S.	4. 巻 331
2. 論文標題 Optimum Design of a Multi-Functional Acoustic Metasurface Using Topology Optimization Based on Zwicker's Loudness Model,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 116-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cma.2017.11.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., and Nishiwaki, S.	4. 巻 335
2. 論文標題 Topology Optimization for Hyperbolic Acoustic Metamaterials Using a High-frequency Homogenization Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 419-471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cma.2018.02.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 栗岡洋大, 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇真二
2. 発表標題 高周波均質化法に基づく異方性音響メタマテリアルのマルチスケールトポロジー最適化
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗岡洋大, 野口悠暉, 泉井一浩, 山田崇恭, 西脇真二
2. 発表標題 高周波均質化法に基づく伝搬方向規定を用いた異方性音響メタマテリアルのマルチスケルトポロジー最適化設計法
3. 学会等名 日本機械学会第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kurioka, H., Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S.
2. 発表標題 Multi-Scale Design Method of Acoustic Metamaterials Using Topology Optimization,
3. 学会等名 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIV), (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小高 良介 , 山本 崇史
2. 発表標題 底面を薄膜化したレゾネータを用いた二重壁音響メタマテリアルの寸法最適化
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小高良介, 山本崇史
2. 発表標題 底面を薄膜化したレゾネータによる二重壁音響メタマテリアルの音響透過損失の向上検討
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., and Nishiwaki, S.
2. 発表標題 Optimum design of anisotropic acoustic metamaterials based on high-frequency homogenization method
3. 学会等名 The Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2018, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 高周波均質化法に基づく異方性音響メタマテリアルのトポロジー最適化
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 高周波均質化法に基づく所望の分散特性を持つ音響メタマテリアルのトポロジー最適化
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 動弾性方程式を対象とした高周波均質化法に基づく弾性体メタマテリアルの最適設計
3. 学会等名 第13回最適化シンポジウム2018
4. 発表年 2018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
研究分担者	野口 悠暉 (Noguchi Yuki) (00845448)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教  (12601)	
研究分担者	山田 崇恭 (Yamada Takayuki) (30598222)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授  (12601)	
研究分担者	山本 崇史 (Yamamoto Takashi) (30613640)	工学院大学・工学部・教授  (32613)	
研究分担者	泉井 一浩 (Izui Kazuhiro) (90314228)	京都大学・工学研究科・准教授  (14301)	

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