

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14166

研究課題名（和文）トポロジー最適化に基づく音響メタマテリアルのマルチスケール設計法の構築

研究課題名（英文）Multi-scale topology optimization of acoustic metamaterials

研究代表者

松島 慶（Matsushima, Kei）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60943537

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）：本研究の成果は以下である。(1) 散乱行列の計算手法の構築と音響メタマテリアルの最適設計手法を構築した。(2) 円形多層弾性体で構成される弾性体開放系の例外点の探索を行った。(3) Parity-Time対称を利用したクロージング構造の設計を行い、クロージング性能に空間非対称が生じることを明らかにした。(4) 海外の研究者との共同研究により、回折格子上を伝搬するRayleigh-Bloch波の分散解析を行う手法を新たに考案した。(5) 最適設計において問題となる数値不安定性を解消するための正則化法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、マイクロ・マクロ構造を独自のアルゴリズムによって同時に設計する方法が構築され、また近年応用物理学分野において盛んに研究されている非エルミート系に関連する物理現象を所望に操作するための手法として最適設計が有用であることも確認した。

社会的意義として、本研究によって開発した音響構造設計法によって、より高効率な静音・制振構造の実現が期待される。振動の制御は幅広い産業において重要な技術であり、これらの基盤となる技術への応用に繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The outcomes of this research are as follows: (1) We developed a method for calculating scattering matrices and developed an optimal design method for acoustic metamaterials. (2) We explored the exceptional points in open elastic systems composed of circular multilayered elastic bodies. (3) We designed a cloaking structure using parity-time symmetry and revealed that spatial asymmetry can occur in the cloaking performance. (4) Through collaborative research with international researchers, we devised a new method for dispersion analysis of Rayleigh-Bloch waves propagating on a diffraction grating. (5) We developed a regularization method to resolve numerical instabilities encountered in optimal design methods.

研究分野：計算力学

キーワード：音響メタマテリアル トポロジー最適化 マルチスケール 最適設計 散乱解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自然界の物質が有さない音響特性を示す人工材料である音響メタマテリアルは、負の質量密度・弾性率などの特異な性質の実現を可能にするとされ、例えば高効率な音響レンズやノイズ抑制・静音技術などの工学応用への発展が期待されている。

音響メタマテリアルは波長と比して微細な弾性体ミクロ構造を多数配列した構造であり、そのミクロ・マクロ構造を注意深く設計することでマクロな音響特性を自在に制御することができる。そのための設計手法としてトポロジー最適化が有用であると考えられており、関連する研究が現在広く行われている。

トポロジー最適化は、数理的な最適化理論に基づき構造物の最適な形状を設計する手法の一つであり、音響メタマテリアルの設計においてもその有用性が数多く報告されている。しかし、現在行われている先行研究は以下の問題を抱えている。

- 有効媒質近似・均質化法などの低周波かつ周期配列的な構造のみに有効な数値モデル・解析手法を用いており、高周波帯域での応用への適応が困難である点
- ミクロ構造の設計のみを対象としており、マクロ構造に起因する音響特性の議論が十分でないため、表面特性が重要となるメタサーフェスや導波路、表面波フィルターなどのデバイスの設計が困難である点

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、革新的な機能を有する音響メタマテリアルの設計のための新たなマルチスケールなトポロジー最適化アルゴリズムを構築することである。具体的には

- (1) 低周波かつ周期的な配列構造に限らない自由度の大きい大規模複雑構造の音響特性を解析するための数値計算手法の構築
- (2) 音響メタマテリアルを構成する単位構造(ミクロ構造)の形状とその配列(マクロ構造)を同時に設計するためのアルゴリズムの構築
- (3) (1)の計算手法に基づき、(2)で構築したアルゴリズムに必要な設計感度の計算法の確立を行い、所望な特性を有する音響構造の設計手法を開発する。

### 3. 研究の方法

本研究は、目的とする「革新的な機能を有する音響メタマテリアルの設計のための新たなマルチスケールなトポロジー最適化アルゴリズムの構築」のために、以下の研究に取り組む。

#### (1) 多数のミクロ構造から構成される複雑構造に対する音響散乱解析手法の構築

本研究はマクロ構造の音響特性を多重散乱理論に基づいて解析する。すなわち、通常の有効媒質近似や均質化法に代わって、配列されたミクロ構造間の波の相互作用を厳密に評価することで全体の散乱を解析する。具体的には、まず各々のミクロ構造(散乱体)の単一の散乱特性を散乱行列と呼ばれる代数的な行列で表現する。この散乱行列の数値計算に境界要素法を用いることで複雑形状を有するミクロ構造の厳密な数値解析を可能にする。ミクロ構造間の相互作用は散乱行列によって与えられる代数的連立方程式(多重散乱方程式)を解くことで計算できる。本手法は2次元問題に関しては本研究課題の開始前におおよそ構築が完了しており、得られた知見をもとに3次元構造の解析のための数値解析ソフトウェアの開発を行う。その後、感度解析を想定した問題設定で本手法のパフォーマンスを評価する。さらなる計算コストの低減の必要性が見込まれる場合は、高速多重極法などのアルゴリズムの適用を検討する。

#### (2) ミクロ構造の形状とその配列を同時に決定するための最適化アルゴリズムの構築

本研究は、音響メタマテリアルを多数のミクロ構造を配列した構造としてモデル化し、その形状と配列に関して最適化を施すことにより所望の音響特性を実現する。まず、形状と配列(配置)に関して、それぞれを独立に最適化するための方法を構築する。形状に関しては、レベルセット法に基づくトポロジー最適化アルゴリズムを採用し、明確な形状表現を利用することで設計対象の動的特性を正確に評価する。配列に関しては、配置位置と配置角をパラメータとする有次元パラメトリック最適化問題であり、非線形最適化問題に帰着される。本研究は、非線形最適化ソフトウェアである「IPOPT」を利用してこの最適化問題を解く。これら2つの最適化アルゴリズムを組み合わせることで、形状と配列を同時に最適化する設計手法を新たに考案する。

#### (3) 設計感度の導出

上記の(2)で開発する最適化アルゴリズムは勾配法であり、設定した目的関数の設計変数に関する勾配(設計感度)を適切に求める必要がある。特に形状に関する設計感度であるトポロジー導関数はその導出手順が問題に大きく依存し、偏微分方程式に関する考察が必要となる。

#### 4. 研究成果

本研究の主要な成果は以下である。

##### (1) 散乱行列の計算手法の構築と音響メタマテリアルの最適設計

まず、空気中の弾性材料の散乱特性を表す散乱行列について、その計算方法の検討を行った。特に、解析的に行列成分が計算できる例として円形形状の散乱体に関する議論を深く行った。このような系では散乱特性が形状変数に関して陽に書き表されることを明らかにし、これを利用した最適設計法を考案した。この提案法を用いて多方向音響クロッキング構造が実現できることを示し、その成果は論文誌 *Scientific Reports* に掲載された (図 1)。

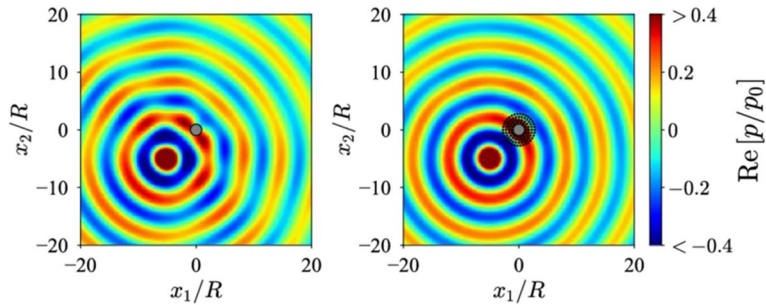


図 1 本研究で設計された音響構造による剛体円筒のクロッキング。Kei Matsushima et al., *Scientific Reports* 12, 16383 (2022) (Licensed under CC BY 4.0)

##### (2) 弾性体開放系の例外点の探索

上記の(1)で得られた知見に基づき、円形多層弾性体で構成される系の散乱極 (固有振動数) の考察を行った。具体的には、非線形固有値解析アルゴリズムを用いてこの系が特異的な固有値縮退を引き起こす例外点を示すことを数値的に明らかにし、また同時に固有モードの縮退が生じることを明らかにした。本成果は論文誌 *Physical Review B* に掲載された。

##### (3) Parity-Time 対称を利用した非対称クロッキング構造の設計

開放系と同様によく知られる非エルミート系の一種である Parity-Time 対称系に着目し、この対称性に基づくクロッキング構造のトポロジー最適化を行った。具体的には、利得と損失が空間対称的に配置されるような設計領域の設定の下で、与えられた入射波の散乱断面積が最小となるようにトポロジー最適化を行った。得られた構造は入射方向の反転に対して非対称性を示すことを明らかにした。これは利得と損失がない通常の散乱系では理論的に生じ得ない現象であり、Parity-Time 対称性に起因する特異的な現象であることを発見した。本成果は論文誌 *Optics Letters* に掲載された。

##### (4) 回折格子上を伝搬する Rayleigh-Bloch 波の分散解析

周期構造中を伝搬する波の数値計算手法の構築および境界積分方程式に基づく構造最適化手法の開発に取り組んだ。具体的には、2次元 Helmholtz 方程式と Bloch 条件に支配される境界値問題の固有モード解析に関する研究を海外の研究者との共同により実施した。この系の固有モードの遠方での境界条件が通常用いられている放射条件では不十分であることを発見し、Green 関数の考察に基づいて新たな定式化を提唱した。これによって、従来議論されていた固有モード解析が限定的なモードのみを扱っていたことを示し、本研究はより一般的な条件下でモード解析を行う手法を構築した。本研究成果は国際誌に投稿中である。

##### (5) 最適設計における正則化法に関する研究

上記のような最適設計に際し、度々問題となる数値不安定性の原因が設計感度の正則性の不足に由来することを考察し、形状最適化に関して適切な正則化と離散化を施す方法を考案した。具体的には、有限要素法に基づく構造最適化で経験的によく知られる数値不安定性が境界積分方程式法(境界要素法)においても発生することを確認し、これが形状導関数(Fréchet 微分)の正則性に由来することを明らかにした。これに基づき、新たな正則化法を適用することで数値不安定性を回避する手法を提案した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsushima Kei, Noguchi Yuki, Yamada Takayuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Omnidirectional acoustic cloaking against airborne sound realized by a locally resonant sonic material	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16383
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-20591-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Matsushima Kei, Noguchi Yuki, Yamada Takayuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Unidirectional invisibility in a PT-symmetric structure designed by topology optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3315 ~ 3315
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.460488	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 松島慶、野口悠暉、山田崇恭	4. 巻 22
2. 論文標題 Dirichlet-to-Neumann有限要素法とSakurai-Sugiura法に基づく3次元音響導波路の複素固有値解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 73 ~ 80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Matsushima Kei, Noguchi Yuki, Yamada Takayuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Exceptional points in cylindrical elastic media with radiation loss	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.107.144104	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 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kei Matsushima, Yuki Noguchi, Takayuki Yamada
2. 発表標題 Design of an omnidirectional acoustic cloaking device based on a multiple scattering theory
3. 学会等名 ACSMO2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松島慶, 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 局所共振材料の最適設計による全方向音響クローキングの実現
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Matsushima, Yuki Noguchi, Takayuki Yamada
2. 発表標題 A coupled-mode theory for exterior scattering problems based on a non-orthogonal modal expansion
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松島慶, 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 パリティ時間対称性を有する誘電体構造のトポロジー最適化
3. 学会等名 第32回設計工学システム部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松島慶
2. 発表標題 FreeFEMを用いた外部Helmholtz問題のmode-matching有限要素解析について
3. 学会等名 日本応用数理学会 2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Matsushima
2. 発表標題 Tailoring acoustic and electromagnetic waves based on structural optimization
3. 学会等名 K02Wavinars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松島慶, 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 Dirichlet-to-Neumann有限要素法を用いた光学デバイスのトポロジー最適化
3. 学会等名 第14回最適化シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松島慶, 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 時間域境界要素法を用いた外部散乱問題の複素固有値の考察
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Matsushima
2. 発表標題 Computation and optimization of multiple wave scattering using boundary integral formulation
3. 学会等名 Seminar at Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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			
オーストラリア	The University of Adelaide			
ドイツ	University of Augsburg			