

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04255

研究課題名(和文) 振動遮断構造を有するフォノンニックメタマテリアルの創成

研究課題名(英文) Studies on phononic metamaterials for vibration filtering

研究代表者

松本 敏郎 (Matsumoto, Toshiro)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10209645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：振動遮断特性を有するメタマテリアルの設計のため、バンドギャップの最大化を行うトポロジー最適化、周期境界という特殊な境界条件を考慮した、効率的で高精度な固有値解析法とフォノンニック構造の介在物材料に対するトポロジー導関数の計算法の開発、および固有振動数を目的関数とした周期構造のトポロジー最適化手法の開発を目的とし、周期単位構造の固有値の再配置をトポロジー最適化で行う方法、波動解析を多重極法の展開係数を疎行列を圧縮して直接法に基づく高速直接境界要素法、周期単位構造の波動解析における見かけの固有値の除去を行い、さらにこれらの方法を弾性波の変換デバイスの設計への応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特定の周波数帯の弾性波が周期構造中を伝播する際に遮断される現象は、振動遮断構造として期待されているもののまだ実用的ではない。本研究は単位周期構造中に弾性体と樹脂などの連続体からなる局所共振構造を作りこみ、数値計算を駆使することで振動を遮断する格段に小さい最適な3次元フォノンニックメタマテリアルを、シミュレーションによって創成する方法を開発する試みである。本研究を発展させ、振動遮断特性を有する格段に小さな3次元メタマテリアルを作ることができれば、将来の高速鉄道、航空機、自動車、その他の機械構造物の制振や騒音低減技術の一つとして卓越した成果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Designs of metamaterials which can filter vibrations are aimed. By means of topology optimization, band-gap of a periodic structure has been maximized. Then, a topological derivative has been obtained for a media with viscoelastic inclusion and three-dimensional topology optimization has been made using the boundary element method and level set approach. Also, to accelerate the BEM analysis for topology optimization, a direct solver which utilizes the condensed matrix of the multipole expansion coefficient has been proposed and its effectiveness has been demonstrated. As an application, an elastic wave converter device has been designed by topology optimization.

研究分野：計算力学、設計工学、材料力学

キーワード：phonic material boundary element method topology optimization

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

異なる材料定数(ヤング率, 密度など)を持つ異種材料が接合した構造を周期的に配置した人工的な構造(フォノンニック結晶・構造)に音波や弾性波が入射する際の弾性波や音波を遮断できる周波数帯であるバンドギャップが存在することが知られている。弾性波や音波を遮断できる周波数帯は, この周期構造の材料特性, 形状, サイズなどに関係し, 特定の用途に対してこのような周期構造からなる人工的な材料(メタマテリアル)を開発できれば, 高機能な防振・防音材料の開発が期待できるとともに, 構造のスケールによっては振動エネルギーや音響エネルギー, 熱エネルギーの流路をコントロールすることが可能となる。フォノンニック構造やフォノンニック結晶と呼ばれるものは, 周期構造による弾性波の複雑な散乱現象により, 特定の周波数帯において互いに波を打ち消しあい弾性波を遮断するものである。もともとこの現象は特定の周波数帯の電磁波を遮断することにより電磁波の伝播を制御できる可能性からフォトニック結晶の研究で注目を集めていた。しかしながら, このような現象は周期構造中を波動が伝播する場合すべてについて観察されるものであり, 弾性波の伝播についてはフォノンニック結晶として研究されるようになってきている。フォノンニック周期構造中の材料の形状や配置を求める研究が盛んになされるようになってきたが, このような周期構造の単位サイズは波の波長のオーダーとなり, 通常問題となる周波数の振動や音を遮断するには構造が数 10cm のオーダーになってしまう問題点があった。したがって, これまでフォトニック構造は振動遮断構造として期待されながら, 振動遮断構造として用いるには実用的でなかった。また, 母材中に配置する異種材料も単純な形状で単一なものを平面的に配置する場合がほとんどで, 実験的に特性を調べるような研究がほとんどであった。振動遮断特性を有するメタマテリアルの設計には, 周期境界という特殊な境界条件を考慮した, 効率的で高精度な固有値解析法とフォノンニック構造の介在物材料に対するトポロジー導関数の計算法の開発, および固有振動数を目的関数とした周期構造のトポロジー最適化手法の開発が必要であった。

2. 研究の目的

有効な振動遮断特性を有するフォノンニックメタマテリアルの周期構造の開発に必要なトポロジー最適化の基礎的技術を開発することを目的とした。すなわち最適なフォノンニック構造の形状と組み合わせ, 配置する周期構造のトポロジーと形状, および材料定数を数値計算により最適化する手法を開発することを目的とした。振動遮断特性を有するメタマテリアルの設計のために, 周期境界という特殊な境界条件を考慮した, 効率的で高精度な固有値解析法とフォノンニック構造の介在物材料に対するトポロジー導関数の計算法の開発, および固有振動数を目的関数とした周期構造のトポロジー最適化手法の開発を目指した。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため, 以下の方法により研究を行なった。

- (1) 固有値の再配置によるバンドギャップの最大化を行うために, 境界要素法に Sakurai-Suigiura 法を用いた基づくトポロジー最適化を開発し, 周期構造のフルバンドギャップの最大化を図る。
- (2) トポロジー最適化では, 対象とする物理現象の問題の解と随伴問題の解を求めるため, 同じ係数行列に対して 2 回解く必要がある。多重極法の展開係数を疎行列として直接法に基づく高速直接境界要素法を開発する。
- (3) 異種材料からなる周期単位構造のトポロジー最適化を想定して, 弾性体中に別の弾性体や粘弾性体がある場合のトポロジー最適化を行うためのトポロジー導関数の導出とトポロジー最適化を行う。
- (4) 弾性波動問題に対する周期単位構造のトポロジー最適化においては, 境界要素法により波動問題を解析する際に見かけの固有値が発生する。これを除去するための Burton-Miller 法の適用について考察する。
- (5) 弾性波周期散乱問題のトポロジー最適化の応用として, 振動遮断以外に縦波と横波の変換デバイスの設計を検討する。

4. 研究成果

以下で, カギ括弧中の番号は発表した雑誌論文の番号を示す。

- (1) 固有値の再配置をトポロジー最適化で行うためには, レベルセット関数を目的関数のトポロジー導関数に比例させて発展させるレベルセット法を用いた。支配方程式が Helmholtz 方程式に対しては, トポロジー導関数 $T(x)$ は次式のように得られた[1]。

$$T(x) = -2|\nabla u(x)|^2 + \omega^2|u(x)|^2$$

ただし ω は角振動数, $u(x)$ は音圧である。以下に仮定した単位構造, 得られた最適構造, バンド図を順番に示す。仮定した単位構造ではバンドギャップが得られなかったが, 最適構造では, バンドギャップが得られていることがわかる。

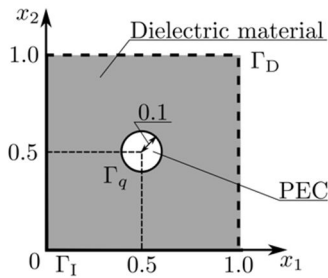


図 1

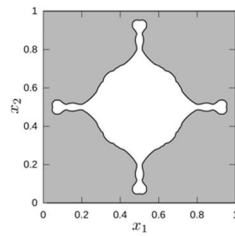


図 2

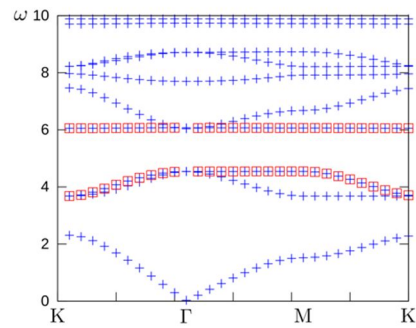


図 3

(2) 多重極法の展開係数を疎行列として直接法に基づく高速直接境界要素法を開発した。従来の高速多重極法と反復法である GMRES を用いた場合、提案した多重極法の展開係数を疎行列として直説法で解くことによりトポロジー最適化に用いたとき、高速化を図ることができた。また、その行列を Interactive Decomposition で圧縮すれば一桁高速化できることがわかった[2]。
 (3) 弾性体中に柔らかい材料が置かれているときのトポロジー導関数を導出し、それを用いてトポロジー最適化を行った。一例として、水中にシリコンボムが置かれているときに、下部の点音源からの疎密波の振幅の絶対値を物体上部の天球面上で最小化する形状を求めたものを図 4 に示す[4]。

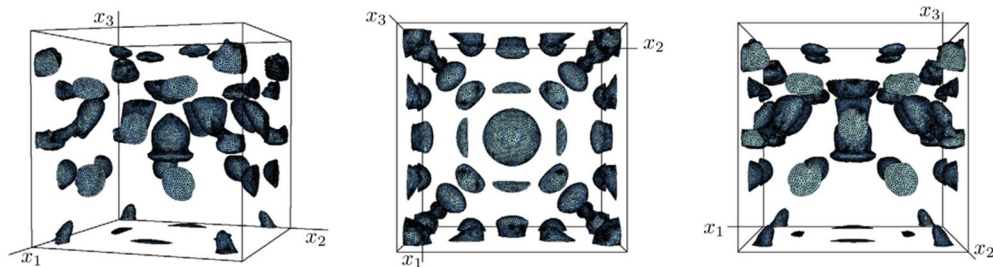


図 4

(4) 単位周期構造であるユニットセルとして鋼中に空洞がある場合を考え、ユニットセルの下部から一様な P 波を入射させ、上部の遠方で S 波として抜けるような空洞の形状を求める方法を考えた。目的関数は、弾性波の平面は展開を用いて上部無限遠で横波の振幅の絶対値が最大になるように定義し、トポロジー導関数を導出した。図 5 に得られたユニットセル形状を図 6 に、またこのユニットセルに対して P 波の入射波と、S 波の散乱波の方向を示す[8]。

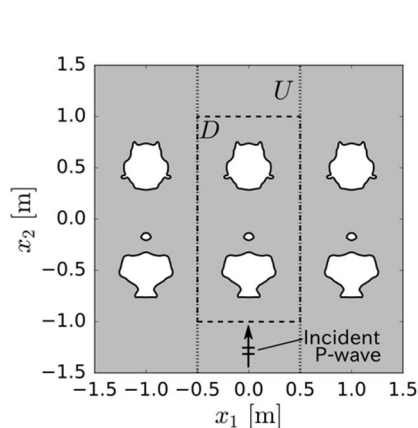


図 5

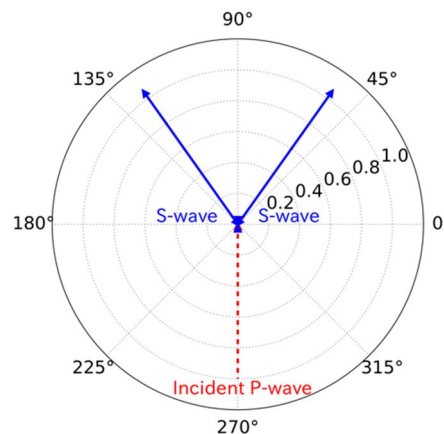


図 6

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- (1) Matsushima K., Isakari H., Takahashi T., Matsumoto T., An application of topology optimisation to defect identification in two-dimensional elastodynamics with the BEM and H-matrix method, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, (査読有), Vol.6, 2018, pp.1033-1042.
- (2) Matsushima K., Isakari H., Takahashi T., Matsumoto T., An investigation of

eigenfrequencies of boundary integral equations and the Burton-Miller formulation in two-dimensional elastodynamics, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, (査読有), Vol.6, 2018, pp.1127-1137.

- (3) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2次元弾性波周期散乱解析のための境界要素法とそのトポロジー最適化への応用, 計算数理工学論文集, (査読有), Vol.18, 2018, pp.35-40.
- (4) Isakari H., Kondo T., Takahashi T. and Matsumoto T., A level-set-based topology optimisation for acoustic-elastic coupled problems with a fast BEM-FEM solver, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (査読有), Vol.315, 2017, pp.501-521, doi:10.1016/j.cma.2016.11.006.
- (5) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 粘弾性介在物を用いた弾性波エネルギー吸収体のトポロジー最適化, 計算数理工学論文集, (査読有), Vol.17, 2017, pp.77-82.
- (6) 釜堀瑞生, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, SS法と境界要素法に基づくトポロジー最適化を用いた周期構造のフルバンドギャップの最大化, 計算数理工学論文集, (査読有), Vol.16, 2016, pp.85-90.
- (7) 杉原宗一郎, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 多重極法に基づく高速直接境界要素法を用いた2次元音場のトポロジー最適化について, 計算数理工学論文集, (査読有), Vol.16, 2016, pp.103-108.
- (8) 松本敏郎, 飯盛浩司, 境界要素法によるトポロジー最適化, シミュレーション, (査読有), Vol.35, 2016, pp.128-135.

[学会発表](計 38 件)

- (1) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 負の屈折率を有する弾性体周期構造のトポロジー最適化, 日本機械学会東海支部第68期総会・講演会, (2019).
- (2) 鈴木淳仁, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 二次元音場におけるインピーダンスモデルを用いた吸音材のトポロジー最適化, 日本機械学会東海支部第68期総会・講演会, (2019).
- (3) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2次元動弾性学における1周期境界値問題に対するGreen関数の数値計算, 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会, (2018).
- (4) Hiroshi Isakari, Mizuki Kamahori, Toru Takahashi and Toshiro Matsumoto, A topology optimisation for photonic crystals using a fast boundary element method, IABEM2018, (2018).
- (5) Kenta Nakamoto, Hiroshi Isakari, Toru Takahashi and Toshiro Matsumoto, A shape and topology optimisation using the BEM and an explicit boundary expression with the level set method, IABEM2018, (2018).
- (6) Kei Matsushima, Hiroshi Isakari, Toru Takahashi and Toshiro Matsumoto, A topology optimisation of elastic wave absorber with the BEM and H-matrix method, IABEM2018, (2018).
- (7) 飯盛浩司, 釜堀瑞生, 高橋徹, 松本敏郎, 階層型行列を用いた高速境界要素法によるフォトニック結晶のトポロジー最適化, 第23回計算工学講演会, (2018).
- (8) 中本謙太, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, レベルセット法に基づく形状・トポロジー最適化, 第23回計算工学講演会, (2018).
- (9) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, Hマトリクス法を用いた2次元動弾性周期境界値問題に対する高速境界要素法について, 第23回計算工学講演会, (2018).
- (10) 飯盛浩司, 松島慶, 高橋徹, 松本敏郎, 音響ダイオードのトポロジー最適化について, 日本機械学会第13回最適化シンポジウム2018 (OPTIS 2018), (2018).
- (11) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 周期弾性波散乱の遠方場特性のトポロジー最適化について, 日本機械学会第13回最適化シンポジウム2018 (OPTIS 2018), (2018).
- (12) 中本謙太, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 形状導関数とトポロジー導関数を同時に用いた構造最適化手法の開発, 日本機械学会第13回最適化シンポジウム2018 (OPTIS 2018), (2018).
- (13) 飯盛浩司, 釜堀瑞生, 高橋徹, 松本敏郎, フォトニック結晶のトポロジー最適化について, 電気学会A部門電磁界理論研究会, (2018).
- (14) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 弾性波散乱問題における周期複合材料のトポロジー最適化について, 日本機械学会第28回設計工学・システム部門講演会, (2018).
- (15) 飯盛浩司, 釜堀瑞生, 高橋徹, 松本敏郎, 2次元Helmholtz方程式の1周期境界値問題におけるトポロジー最適化について, 第31回計算力学講演会 (CMD2018), (2018).
- (16) 堺光徳, 松本敏郎, 飯盛浩司, 高橋徹, 弾性体の固有振動数の再配置を目的としたトポロジー最適化, 第31回計算力学講演会 (CMD2018), (2018).
- (17) 永井勇毅, 松田祐輔, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, Bスプライン曲面のレベルセットに基づくトポロジー最適化の固有振動数の制御への応用, 第31回計算力学講演会 (CMD2018), (2018).
- (18) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 境界要素法を用いた周期弾性波エネルギー吸収体のトポロジー最適化, 第31回計算力学講演会 (CMD2018), (2018).
- (19) 花田萌美, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2次元音場・弾性場の連成問題における弾性体形状

- のトポロジー最適化, 日本機械学会東海支部第 66 回総会・講演会, (2017).
- (20) 杉原宗一郎, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, トポロジー最適化を用いたフォノンニック結晶に基づく音響ダイオードの設計について, 日本機械学会東海支部第 66 回総会・講演会, (2017).
 - (21) 釜堀瑞生, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 周期構造の固有値問題に対する境界要素法の H-matrix 法による高速化, 日本機械学会東海支部第 66 回総会・講演会, 2017 年 03 月 14 日~2017 年 03 月 15 日, 静岡大学浜松キャンパス.
 - (22) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2 次元動弾性問題に対する H マトリクス法とその効率化, 機械学会東海支部第 66 回総会・講演会, (2017).
 - (23) Hiroshi Isakari, Toru Takahashi, Toshiro Matsumoto, A gradient-based topology optimisation for radar cross sections in two-dimensional acoustics, WCSMO12: 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation, (2017).
 - (24) 松田祐輔, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2 次元動弾性学の固有値問題に関連したトポロジー最適化, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会, (2017).
 - (25) 湯培俊, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 二次元動弾性問題における応力に関する目的関数のトポロジー導関数, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会, (2017).
 - (26) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, H マトリクス法により高速化された境界要素法を用いた 2 次元動弾性問題におけるトポロジー最適化, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会, (2017).
 - (27) 釜堀瑞生, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2 次元 Helmholtz 方程式の 2 周期固有値問題に対する境界要素法の H-matrix 法に基づく高速化, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会, (2017).
 - (28) 飯盛浩司, 花田萌美, 高橋徹, 松本敏郎, 二次元音響構造連成場におけるトポロジー適化について, 日本機械学会第 27 回設計工学・システム部門講演会, (2017).
 - (29) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 境界要素法と H マトリクス法による 2 次元動弾性問題におけるトポロジー最適化, 日本機械学会 2017 年度年次大会, (2017).
 - (30) 飯盛浩司, 花田萌美, 高橋徹, 松本敏郎, 二次元音響構造連成場におけるトポロジー導関数について, 第 22 回計算工学講演会, (2017).
 - (31) 松島慶, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, H マトリクス法で高速化された境界要素法による 2 次元動弾性問題のトポロジー最適化, 第 22 回計算工学講演会, (2017).
 - (32) Hiroshi Isakari, Toyohiro Kondo and Toshiro Matsumoto, A topology optimisation for acoustic-elastic coupled problem with a fast BEM-FEM solver, ACSMO 2016, (2016).
 - (33) Soichiro Sugihara, Hiroshi Isakari, Toru Takahashi, Toshiro Matsumoto, A topology optimisation in 2D acoustics with a fast direct boundary element method, WCCM & APCOM 2016, (2016).
 - (34) Hiroshi Isakari, Toyohiro Kondo, Toru Takahashi and Toshiro Matsumoto, A topology optimisation in acoustic-structure interaction problems with a BEM-FEM coupled solver, WCCM & APCOM 2016, (2016).
 - (35) 杉原宗一郎, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 2 次元 Helmholtz 方程式の 2 周期 Transmission 問題における境界要素法に基づく SS 法の性能評価, 第 29 回計算力学講演会, (2016).
 - (36) 飯盛浩司, 近藤豊大, 花田萌美, 高橋徹, 松本敏郎, 3 次元音響構造連成系におけるトポロジー適化について, 第 29 回計算力学講演会, (2016).
 - (37) 飯盛浩司, 池田拓人, 高橋徹, 松本敏郎, 3 次元音響問題における境界上で定義される目的関数のトポロジー導関数について, 第 26 回設計工学・システム部門講演会, (2016).
 - (38) 釜堀瑞生, 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎, 境界要素法と Sakurai-Sugiura 法を用いた周期構造のトポロジー最適設計の高速化, 第 12 回最適化シンポジウム, (2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：飯盛 浩司
ローマ字氏名：ISAKARI, Hiroshi
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：工学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：50638773

研究分担者氏名：山田 崇恭
ローマ字氏名：YAMADA, Takayuki
所属研究機関名：京都大学
部局名：工学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：30598222

研究分担者氏名：高木 賢太郎
ローマ字氏名：TAKAGI, Kentaro
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：60392007

研究分担者氏名：田地 宏一
ローマ字氏名：TAJI, Kouichi
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：00252833

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。