

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23656121

研究課題名（和文）

局所動吸振構造を有するフォノンニック制振周期構造のシンセシス

研究課題名（英文）

Synthesis of phononic periodic structures with dynamic damping structure

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

研究成果の概要（和文）：

固体中に動吸振構造を有する別の材料定数を持つ固体を埋め込んだ周期構造により有効な振動遮断特性を有する構造を、数値計算の支援により創成するための方法論の開発を目的として、境界要素法による動弾性体の無限周期構造と有限周期構造に対して固有振動数を解析する方法、および動弾性体に対して形状の制御にレベルセット関数を用い、得られた境界を実際に要素分割して境界要素法により最適なトポロジーを得る方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

The present study intended to develop a numerical methodology that can be utilized for synthesizing the periodic structures shutting out the vibration. Such a structure might be realized by embedding substructures, which work as dynamic dampers, comprising different material properties from that of the matrix material. In the present research, we have to repeat calculating the wave transmission properties of infinite and/or finite periodic structures. Moreover, we have to optimize the shape and topology of the periodic structures by repeating the transmission and eigenfrequency analyses. Thus, we developed a fundamental computation algorithm for two-dimensional and three-dimensional problems using the boundary element method incorporated with the periodic boundary conditions. Because the final system matrix obtained by the boundary element method provides a nonlinear eigenvalue problem, standard eigensolver has not been used so far. In this study, we applied a contour integral method, so-called block SS-method, to solve this nonlinear eigenvalue problem.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：シミュレーション工学、振動解析、シンセシス、境界要素法、フォノンニック構造

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）に弾性波が入射すると，散乱波の干渉によって弾性波がすべて反射されて構造を通

過できない周波数帯（バンドギャップ）が存在することが知られている。

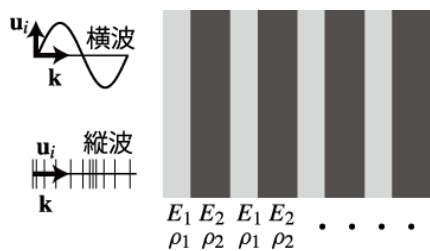


図1 一次元フォノンニック構造

たとえば、図1には最も単純な1次元のフォノンニック結晶構造を示す。弾性波や音波を特定の周波数について遮断できれば、高機能な防振・防音材料の開発が期待できるばかりでなく、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ことから、注目を集めていた。このような人工的な連続体からなる構造の設計には、有限要素法や境界要素法を用いた弾性波動解析が有効である。われわれは境界要素法による連続体の振動や設計感度解析について多くの研究成果をこれまで得ており、本研究の出発点においてこのようなフォノンニック構造の振動遮断特性の解析や設計に必要な有力な手段を手にしていった。

フォノンニック結晶・構造が遮断できる振動の周波数帯は、材料の剛性と密度の比の他に周期構造のスケール（サイズ）に依存するため、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。一方、建築構造物や機械構造物の振動では、補助質量を用いた動吸振器が制振によく用いられていることから、このような動吸振構造を周期構造として組み込むことにより、従来よりも格段に小さな構造のスケールで振動を遮断・吸収できる周期構造を作ることができると考えられている。そこで本研究課題では、周期構造中に母材と異なるヤング率と密度、減衰特性・粘弾性特性を有し、動吸振器と同様の原理に基づき弾性波の振動を格段に遮断する微小な周期構造単位を、境界要素法による弾性振動設計感度解析とトポロジー最適化手法を用いて創成するために必要な解析手法の基本アルゴリズムをまず開発する必要があった。

2. 研究の目的

フォノンニック結晶・構造が遮断できる振動の周波数帯は、材料の剛性と密度の比の他に周期構造のスケール（サイズ）に依存するため、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。一方、建築構造物や

機械構造物の振動では、補助質量を用いた動吸振器が制振によく用いられていることから、このような動吸振構造を周期構造として組み込むことにより、従来よりも格段に小さな構造のスケールで振動を遮断・吸収できる周期構造を作ることができると考えられる。そこで本研究では、周期構造中に母材と異なるヤング率と密度、減衰特性・粘弾性特性を有し、動吸振器と同様の原理に基づき弾性波の振動を格段に遮断する微小な周期構造単位を、境界要素法による弾性振動設計感度解析とトポロジー最適化手法を用いて創成するための数値解析アルゴリズムの開発を試みることを目的とした。解析法としては、高精度な振動解析を行うことができる境界要素法を適用することとした。境界要素法を用いたトポロジー最適化は、まだ試みられていない。また、局所動吸振構造を有する周期構造の振動問題に対してトポロジー最適化を行うためには、まず、境界要素法による周期構造の周波数応答解析法、および固有振動数の解析法を開発する必要がある。

周期構造により、特定の周波数帯の弾性波が遮断される現象は、電磁波におけるフォトンニック結晶におけるバンドギャップの弾性版である。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動吸振構造を作りこみ、数値シミュレーションを駆使することにより、振動を遮断する格段に小さい周期構造のシンセシスに必要なものであり、フォノンニック構造のみならずフォトンニック結晶など他の波動伝播現象全般にも応用できるものである。

3. 研究の方法

まず基本周期構造の簡便解析による特性解析の試行のために、2次元の有限要素法に基づく単位周期構造の弾性振動応答解析ソフトウェアを作り、周期構造のバンドギャップの計算を行った。バンドギャップの計算には高精度な固有振動数解析が必要であり、また、問題が基本的には開領域問題となることもある。このような問題の振動解析には境界要素法が特に有効であると考えられるが、バンドギャップの計算に必要な代数方程式を境界要素法で導出すると非線形固有値問題となるため、従来有効な解析法は存在していなかった。本研究では、経路積分により非線形固有値問題を計算する方法が存在することに着目し、境界要素法にこの方法を適用して、高精度に固有値を計算するための考察を行った。

また、境界要素法による振動解析法をレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法と組み合わせることにより、基本周期構造の形状のシンセシスを行うためのアルゴリズムの開発を行った。

これらを列挙すると以下のようになる。

- (1) 2次元ヘルムホルツ方程式に対して、境界要素法による固有振動数をブロック SS 法で解析するための定式化と数値実験
- (2) 3次元のヘルムホルツ方程式に対して、上記の方法の有効性の検討
- (3) ブロック SS 法の周期構造に対する適用方法の定式化と有効性の検証
- (4) 基本周期構造のトポロジー最適化を行う上で必要となる、レベルセット関数から境界要素の生成アルゴリズムの開発。
- (5) 静弾性問題の剛性最大化問題で、従来のトポロジー最適化法と比較することによる境界要素法に基づく方法の検証。
- (6) 動弾性体のトポロジー導関数の導出とトポロジー最適化のための境界要素法に基づく基本ソフトウェアの開発。

4. 研究成果

2次元及び3次元のヘルムホルツ方程式に対して、境界要素法による固有振動数をブロック SS 法で解析するための定式化と数値実験を行い、有効性を検証した。

境界要素法における固有値問題の係数行列は、次式のように波数を与えて積分した形で求まり、非線形の固有値問題に帰着する。

$$\mathbf{A}(k)\mathbf{x} = \mathbf{0}$$

本研究ではブロック SS 法により、この係数行列から波数の複素平面上に設けたジョルダン曲線上の経路積分で計算されるモーメントを成分を持つハンケル行列による標準固有値問題に帰着させて、固有値を計算する方法を試した。その結果、境界要素法を用いて固有値を求める場合でも、ブロック SS 法を適用することにより、高精度に固有値が計算できることがわかった。たとえば、正方形領域に対して、小さい方から6番目以降の5個の固有値とその誤差を示すと次の表のようになる。

表1 正方形領域の波数の固有値と誤差

No.	固有値	誤差[%]
6	7.2055	0.061
7	7.2698	0.031
8	8.8845	0.015
9	9.4230	0.019
10	9.4280	0.034

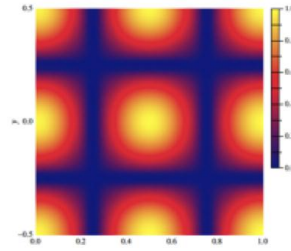


図1 8番目の固有値の固有モード

以上のように、きわめて高精度に固有値が計算できることがわかった。また、次の図に8番目の固有値に対応する固有モードを示す。このように固有モードも正しく計算できることがわかった。

さらに、本方法を3次元のヘルムホルツ方程式に対しても適用した結果、同様に高精度な固有値解析が可能であることがわかった。

次に、上記の境界要素法とブロック SS 法に基づく固有値解析法を周期構造に適用するための方法を開発した。

図2に示すような N 個の周期構造を有する構造を考える。この構造の左端からは疎密波が入射するものとし、右端の領域内の+印の点でそれを観測するものとする。まず、この周期構造が無制限連続している場合について、本研究課題で開発した方法で固有振動数を計算した。その結果をバンド図として図3に示す。塗りつぶした領域は、バンドギャップであり、無限周期構造ではこの周波数帯において振動が遮断されることがわかる。

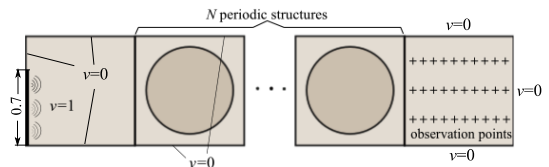


図2 N 個の周期構造を有する構造

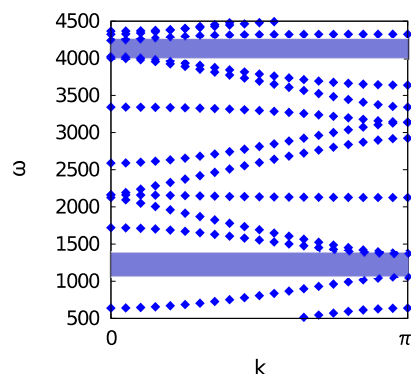


図3 無限周期構造に対して、境界要素法とブロック SS 法により得られたバンド構造とバンドギャップ

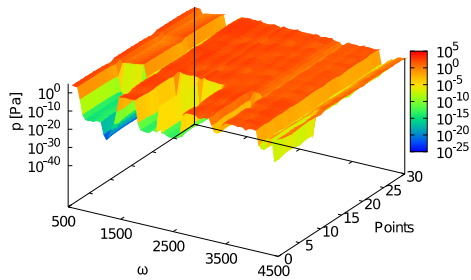


図4 有限周期構造 (N=50) に対する波の透過特性

次に、この構造で周期構造の領域を 50 層としたときの波の透過特性を図 4 に示す。無限周期構造のバンドギャップの周波数に対して透過率が低くなる結果が得られ、本研究の方法の有効性が示された。

次に、周期構造の最適化を図る上で必要となるトポロジー最適化法について検討した。

本研究では、領域内の点に対してスカラー値を取るレベルセット関数を用いて、形状のコントロールを行った。レベルセット関数は、点が領域の内部にあるときは正、境界上では 0、外部では負の値を取る関数であり、レベルセット関数の値の変化率が、目的汎関数のトポロジー導関数に比例するようにレベルセット関数の分布を更新しながら求め、トポロジーの変化を許容しながら最終形状を求める方法を開発した。ここで境界要素法を解析に用いるためには、レベルセット関数の 0 等値面から境界要素を生成する必要が生じる。本研究では、図 5(a) のように設計領域を立方体の格子でまず分割して、その格子点でレベルセット関数値を補完した。その中の一つの立方体に着目すると、図 5(b) のように、格子点で正と負のレベルセット関数の値を持っている場合がある。このような場合、立方体の辺状でレベルセット関数値が 0 となる点を容易に計算することができるから、このような点を組み合わせることにより、レベルセット関数値が 0 となる三角形のパッチを求めることができる。このパッチを集めることにより、境界要素を構成した。

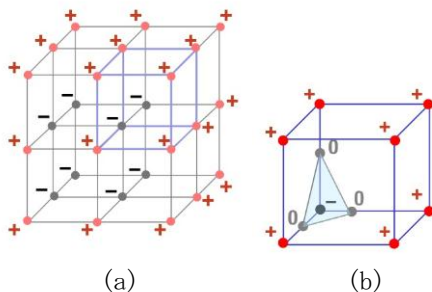


図5 N 個の周期構造を有する構造

以上のように、境界要素法の要素を生成することとし、次の手順でトポロジー最適化を行った。

- (a) レベルセット関数値の初期化
- (b) 境界要素の生成
- (c) 目的汎関数の計算
- (d) 境界要素法による変位場と随伴問題の変位場の計算
- (e) 収束していればここで終了
- (f) トポロジー導関数の計算
- (g) レベルセット関数の分布を更新し(b)へ戻る

以上の方法の有効性を検証するために、図 6 のような中央に周期荷重を受け、両端が固定された 3 次元構造を考え、荷重点の変位が最小となるような構造を、開発したトポロジー最適化アルゴリズムに基づくソフトウェアで解析した。図 7 に得られた最適構造を示す。本解析は、レベルセット関数の分布が変化する度ごとに境界要素を生成しており、境界における自由表面の条件を初めて厳密に取り入れることが可能となった。これにより、振動遮断特性を最大化する実際の周期構造のトポロジー最適化に適用する準備ができたと考えられる。

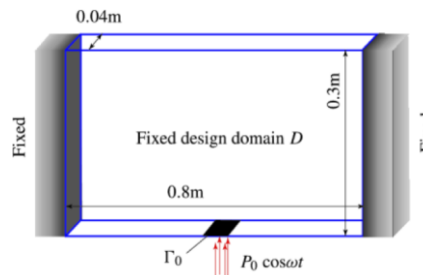


図6 中央に周期荷重を受け、両端が固定された 3 次元構造



図7 トポロジー最適化により得られた荷重点で変位が最小となる構造

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Toshiro Matsumoto, Takayuki Yamada, Shinichiro Shichi, Toru Takahashi, A study on topology optimization using the level-set function and BEM, Boundary Elements and Other Mesh

Reduction Methods, 査読有, Vol.34, pp.123-133, 2012.

- ② Haifeng Gao, Toshiro Matsumoto, Toru Takahashi, Hiroshi Isakari, Analysis of acoustic transmission for one directional periodic bounded structure in 2D by BEM, Transactions of JASCOME, 査読有, Vol. 12, Paper No.12-121212, pp.67-72, 2012.
- ③ 志知晋一郎, 山田崇恭, 鈴木皓久, 松本敏郎, 高橋徹, 三次元境界要素法を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 78巻785号, pp.228-239, 2012.
- ④ 志知晋一郎, 山田崇恭, 松本敏郎, 高橋徹, レベルセット法に基づく境界要素法を用いた定常動弾性問題のトポロジー最適化, 計算数理工学論文集, 査読有, 12巻, pp.1-6, 2012.

[学会発表] (計5件)

- ① Haifeng Gao, Toshiro Matsumoto, Toru Takahashi, Hiroshi Isakari, Analysis of Band Structure for 2D Elastic Phononic Crystals by BEM, 第62回理論応用力学講演会, 2013年03月06日~2013年03月08日, 東京工業大学, 東京都
- ② 高海峰, 松本敏郎, 高橋徹, BEMとブロックSS法による3次元弾性体の自由振動解析, 日本機械学会第25回計算力学講演会, 2012年10月06日~2012年10月08日, 神戸ポートアイランド南地区, 兵庫県
- ③ 高海峰, 松本敏郎, 高橋徹, 山田崇恭, BEMに基づく2次元音響フォノンニック結晶のバンドギャップ解析, 日本機械学会第25回計算力学講演会, 2012年10月06日~2012年10月08日, 神戸ポートアイランド南地区, 兵庫県.
- ④ Toshiro Matsumoto, Heifeng Gao, Toru Takahashi, Takayuki Yamada, BEM-based eigenfrequency analysis for plane acoustic problems using a path integral method, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012年07月08日~2012年07月12日, Sao Paulo, Brazil.
- ⑤ 山田崇恭, 松本敏郎, 高橋徹, レベルセット法による形状表現に基づく局所動吸振フォノンニック構造のトポロジー最適化に関する一考察, 日本機械学会第24回計算力学講演会, 2011年10月8日-10日, 岡山大学, 岡山県.

[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
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 敏郎 (MATSUMOTO TOSHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10209645

(2) 研究分担者

高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)
名古屋大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 90360578

(3) 連携研究者

山田 崇恭 (YAMADA TAKAYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30598222