

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656275

研究課題名(和文)フォノンニック結晶の性質を利用した新しい超音波非破壊評価への挑戦

研究課題名(英文)Development of innovative ultrasonic nondestructive evaluation considering properties of phononic crystal

研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE, SOHICHI)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：00156712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フォノンニック結晶中の超音波伝搬挙動の解析に適した新しい数値解析手法の開発とフォノンニック結晶の影響を受けた超音波伝搬解析及び次世代非破壊評価の検討を目的として以下の成果を得た。高速多重極法やACAを境界要素法に適用したフォノンニック結晶に対する高速波動伝搬シミュレーション手法を開発した。様々なフォノンニック結晶に対するバンド構造を解析するプログラムコードを作成し、特異な波動伝搬が発生する周波数帯を特定することを可能とした。開発した波動伝搬シミュレーション手法を応用することで、特定の周波数で発生するストップバンドのような特異な波動伝搬・散乱現象を再現することができた。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this research project is to develop innovative numerical methods for analyses of ultrasonic wave propagation in phononic crystal and to apply numerical results of the wave propagation analysis to investigate a next-generation ultrasonic nondestructive evaluation technique. The following results were obtained. 1. The fast simulation method for ultrasonic wave propagation in phononic crystal was developed on the basis of a boundary element method in conjunction with fast multipole method and adaptive cross approximation. 2. The program code for the analysis of band structures of phononic crystal was created to make it possible to clarify the frequency band of peculiar wave propagation. 3. The developed code was applied to simulate wave propagation and scattering of elastic waves including unusual phenomena like stop band generated at specific frequencies.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：超音波シミュレーション フォノンニック結晶 超音波非破壊評価 境界要素法

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設された土木構造物が建設後 50 年余り経過する中、それらをいかに効率よく維持管理するかが社会的、経済的にも求められており、非破壊評価の役割は重要なものとなっている。研究代表者および分担者は超音波非破壊評価の研究にこれまで携わってきたが、コンクリートに代表される非均質材料からなる大規模な構造物の検査においては、より大振幅でかつ分解能の高い超音波を用いる必要性があると思われる。その解決策の一つの手法は複数の素子から発せられた超音波をある一点に集束させるアレイ技術を利用することである。これによって局所的に大振幅な超音波を発生することができる。すでに医療分野では集束超音波による治療が行われていることはよく知られている。しかし、一般にアレイ装置は高価であり、土木構造物への適用は現在の所、あまり進んでいないのが現状である。このような中、最近、弾性定数や密度の異なる様々な材料を周期的に配置した人工結晶であるフォニック結晶が注目を集めている。フォニック結晶を伝搬する波動は、特異な性質を示すことが知られている。例えば、ある特定の周波数を持った波動の伝搬を妨げるフォニックバンドギャップと呼ばれる性質を持つ。また、従来波動論の常識を覆し、スネルの法則から導かれる通常の屈折とは逆方向へ屈折する負の屈折を有する性質も持つ。このような性質を利用して、光学分野では曲率を持たない平面レンズの研究が進められ、ある結晶構造の下では、波動をある一点に集束させることができると言われている。したがって、このようなフォニック結晶の性質を明らかにし、かつ超音波送信へ応用すれば、大振幅で分解の高い超音波を発生させることができる可能性がある。

2. 研究の目的

上記のような研究の背景を踏まえた本研究の目的は、大きく分けて次の 2 つに分類される。

- A: フォニック結晶中の超音波伝搬挙動の解析に適した新しい数値解析手法の開発
- B: 開発したシミュレーション手法を援用したフォニック結晶の影響を受けた超音波伝搬の再現および次世代非破壊評価への応用の検討

ただし、ここで意図する新しい数値解析手法の開発とは、フォニック結晶による波動散乱現象の取り扱いに適した波動解析手法を定式化し、プログラムコードを開発することであり、汎用コードの作成や販売等は含まれない。

3. 研究の方法

本研究では、将来的にフォニック結晶の

性質を利用した超音波非破壊評価法が可能となるかを検討することに主眼を置いている。そのため、本研究段階では具体的な超音波送信機器の作成や実験による実証は行わず、全て理論的な考察と数値シミュレーションを用いて研究を実施することとした。研究目的 A, B を達成するための具体的な方法と、そのような方策を取った理由は以下の通りである。

まず、研究目的 A における新しい数値解析手法の開発についてであるが、ベースとなる数値解析手法として境界要素法を選択した。境界要素法は、波動解析に有効な手法として知られ、古くから超音波非破壊評価法の数値シミュレーション手法として用いられており、その計算精度は差分法や有限要素法に勝ることで知られる。また、本研究で扱うフォニック結晶モデルを解析するためには、数多くの散乱体を扱う必要がある。したがって、その解析モデルは、事実上、多重散乱解析へと帰着され、必然的に大規模な波動問題を扱う必要が生じる。しかしながら、境界要素法であれば、領域全体を離散化する必要はなく、散乱体表面のみを離散化すれば十分なため、比較的、解くべき問題の自由度を少なくすることが可能である。しかしながら、境界要素法は密行列を扱うため、多くの記憶容量が必要となること、時間依存の解析を行うとなれば、全解析時間にわたって解析が安定であることが望まれる。そこで、本研究では、高速多重極法(FMM: Fast Multipole Method)と呼ばれる大規模問題を効率的に解くアルゴリズムや ACA(Adaptive Cross Approximation)と呼ばれる境界要素法における影響係数行列を圧縮近似する方法を適用することで記憶容量を大幅に削減し、効率的に数値解を求める方法について検討した。また、時間領域での解析を安定に実行するために、近年 Lubich により提案された演算子積分法(CQM: Convolution Quadrature Method)と呼ばれる畳み込み積分を精度良く、安定に計算する手法を時間領域境界要素法の境界積分方程式に表れる畳み込み積分に適用することで、時間ステップ解析を安定かつ容易に行う方法について検討した。また、実際のプログラムコードの作成段階においては、ACA等の理論的な効率化手法を適用するだけでなく、OpenMP や GPU 等といったハード面における並列化手法も計算のボトルネック箇所に適用することで高速化を図る。

一方、研究目的 B を達成するためには、まず、どのような状況下で、特異な波動伝搬が生じるかについて明らかにする必要がある。そのためには、様々なフォニック結晶構造に対するバンド構造を求める必要がある。バンド構造を求めるための方法として、時間領域差分法や境界要素法を用いることも可能であるが、本研究では Bragg の条件および Brillouin zone を考慮した平面波展開法を用いることでフォニック結晶に対するバン

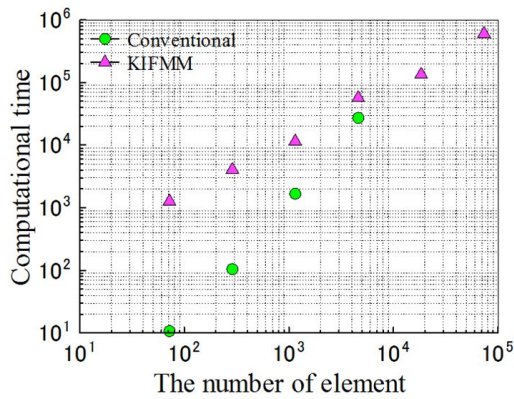


図 1: KIFMM を用いた時間領域境界要素法の要素数と計算時間の関係

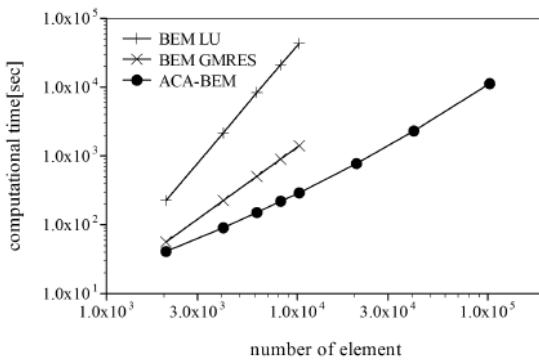


図 2: ACA を用いた周波数領域境界要素法の要素数と計算時間の関係

ド構造を明らかにする方法について検討した。また、研究目的 A で開発した手法を用いて、実際にいくつかのモデルに対してシミュレーションを実行することで、特異な波動伝搬現象を再現し、次世代の非破壊評価への応用について検討した。

4. 研究成果

以下、本研究成果の概要を示す。なお、解析の詳細については発表論文等を参照されたい。

まず、フォノン結晶中の波動伝搬現象を追跡するための時間領域、周波数領域それぞれの問題に対する境界要素法を開発した。境界要素法では、基本解(グリーン関数)の使用が必須であるが、基本解が複雑な場合は計算効率の低下を招く原因となるだけでなく、定式化も煩雑となる。そこで、基本解の形式に依存せずに、多重極係数を求める手順を踏む新しい高速多重極法(KIFMM: Kernel Independent FMM)や ACA といった方法を境界要素法に適用することで、多重散乱解析の計算効率を大幅に削減することができた。その結果の例を示す。図 1 は KIFMM および CQM を用いた時間領域境界要素法の要素数と計算時間の関係を示している。比較のため、KIFMM を用いない場合の結果も○印で示してある。

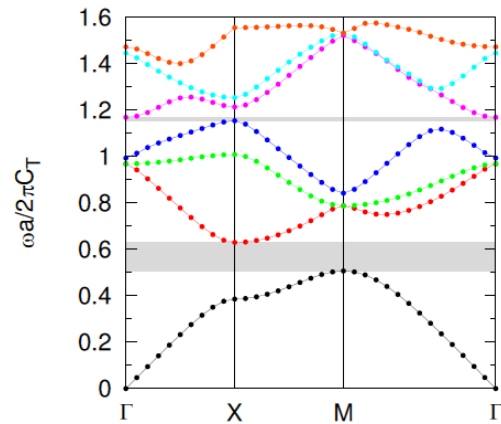


図 3: Al-Ni ロッドの SH 波に対する 2 次元正方格子フォノン結晶のフォノンバンド構造

要素数 5 千程度で、KIFMM を用いた方が高速に計算を実行できていることが見て取れる。また、図 2 は周波数域の境界要素法に ACA を適用した場合の結果を示している。この場合は要素数 2 千程度で ACA を用いた方がより高速に計算を実行できていることがわかる。このように KIFMM や ACA を用いることによって、フォノン結晶に対する波動伝搬シミュレーションを実行する際に必然となる計算時間を削減することができた。なお、本報告ではその詳細は割愛するが、記憶容量についても大幅に削減することに成功している。開発した手法の計算精度についても、解析解が求まる簡単な波動散乱問題に対して検証を行い、妥当な結果を得ることができた。

次に、様々なフォノン結晶に対するバンド構造を解析することを行った。一例として、Al 母材中に Ni ロッドが存在する場合 (Al-Ni) の SH 波に対する 2 次元正方格子フォノン結晶のフォノンバンド構造の解析結果を図 3 に示す。なお、図 3 の縦軸は周波数を示していることに注意されたい。図 3 の灰色部分はフォノンバンドギャップを表しており、これらの周波数帯では、フォノン結晶中を SH 波が伝搬できないことを示している。例として Al-Ni の組み合わせを示したが、これらの組み合わせを替えた様々なフォノンバンド構造を得ることができた。

次に、本研究で開発したフォノン結晶における波動伝搬シミュレーション手法を用いて特異な波動現象を再現した結果の一例を示す。図 4、5 はそれぞれ水平右向きに周波数 $f=400, 600\text{kHz}$ の SH 波を、アルミニウム母材中に作成した空洞によるプリズムモデルに対して入射させた場合の全変位場を示している。図 4 より、入射波はプリズムモデル後方にはほとんど伝搬していないことが見て取れる。しかしながら、図 5 の場合、全変位場はプリズムモデルの上下方向で大きい値を示していることがわかる。例えば、プリズムモデルの下側では、全変位場の等値

面は入射方向である左側に傾きを持って形成されている。このような屈折は、通常のスネルの法則では説明が難しく、極めて特異な状況であると言える。このように、波動が特定の方向に強め合う(弱め合う)性質等を利用し、実際にフォニック結晶を具体的に作成することができれば、大振幅かつ分解能の高い超音波を発生させられることができると思われる。

以上、まとめて本研究で得られた成果は、次の通りである。

- (1) 高速多重極法やACAを境界要素法に適用したフォニック結晶に対する高速波動伝搬シミュレーション手法を開発した。
- (2) 様々なフォニック結晶に対するバンド構造を解析するプログラムコードを開発した。これにより特異な波動伝搬が発生する周波数帯を特定することが可能となった。
- (3) 開発した波動伝搬シミュレーションを応用することで、特定の周波数で発生するストップバンドのような特異な波動伝搬・散乱現象を再現することができた。

また、本研究終了にあたり考えられる次の課題は下記の通りである。

- (1) 本研究で開発した手法を用いて、弾性定数が大きく異なる様々な母材と介在物の組み合わせに対して数多くのシミュレーションを行い、如何なるフォニック構造が超音波非破壊評価に適用する可能性があるか、より詳細に検討する必要がある。
- (2) フォニック結晶による波動伝搬は特定の周波数帯で起こる。しかしながら、実際の超音波非破壊検査では対象とする材料により扱う周波数帯が異なる。よって、どのような状況下にて、本研究で得られた知見を応用できるか慎重に検討する必要がある。
- (3) 本研究は全て数値シミュレーションで行っている。結果の妥当性を示すためにも、実際にモデル試験体を作成しつつ、結果を検証する必要があると思われる。

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6件)

伊海田明宏・齋藤隆泰・廣瀬壮一: ACAによる演算子積分時間領域境界要素法の効率化, 計算数理工学論文集, (2013), pp. 127-132, 査読有
 齋藤隆泰・増村佳大・廣瀬壮一: 2次元波動伝搬問題に対する積分核に依存しない演算子積分時間領域高速多重極境

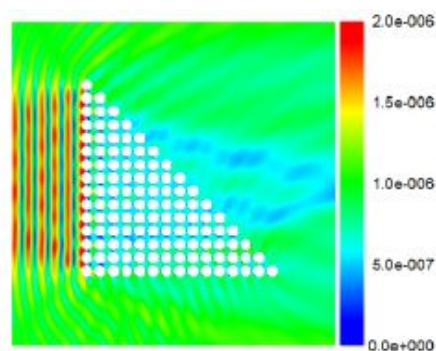


図 4: プリズムモデルによる波動散乱解析結果 (f=400kHz)

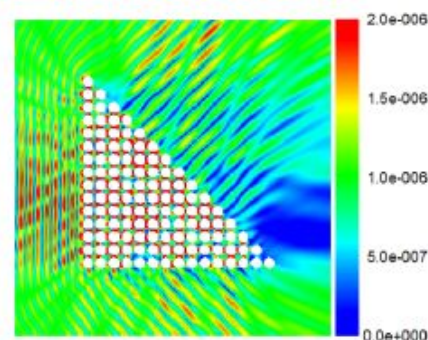


図 5: プリズムモデルによる波動散乱解析結果 (f=600kHz)

界要素法, 計算数理工学論文集, (2013), pp. 121-126, 査読有
 伊海田明宏・齋藤隆泰・廣瀬壮一: ACA境界要素法を用いた時間調和 SH 波の多重散乱解析, 計算数理工学論文集, vol. 12, pp. 85-90, (2012), 査読有
 齋藤隆泰: 構造物の診断と超音波非破壊評価, 北関東産官学研究会技術情報誌 HiKaLO, No. 44, pp. 8, (2012), 査読無
 他 2 件 .

[学会発表](計16件)

Y. Masumura, T. Saitoh and S. Hirose: Large scale multiple scattering analysis using a kernel independent fast multipole boundary element method based on the convolution quadrature method, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp. 760-761, Apr. 16, (2014), Sendai international center, Japan
 A. Ikaida, T. Saitoh and S. Hirose: Hierarchical fast boundary element method for 2-D SH wave propagation in time-domain, 5th Asia pacific congress on computational

mechanics & 4th international symposium on computational mechanics(APCOM2013) CD-ROM 収録, Dec,13, (2013), InterContinental Hotel, Singapore

伊海田明宏・齋藤隆泰・廣瀬壯一: ACA を用いた演算子積分時間領域境界要素法の効率化と波動解析への応用, 第26回機械学会計算力学講演会, (CD-ROM) 収録, 2013年11月4日, 佐賀大学

伊海田明宏・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 2次元多重散乱解析に対する演算子積分時間領域境界要素法の ACA による効率化, 平成 25 年度土木学会全国大会, CD-ROM 収録, 2013年9月3日, 日本大学津田沼キャンパス

増村佳大・齋藤隆泰: 3次元音響問題に対する演算子積分時間領域境界要素法の GPU 高速化, 平成 25 年度土木学会全国大会, CD-ROM 収録, 2013年9月3日, 日本大学津田沼キャンパス

齋藤隆泰・増村佳大: 積分核に依存しない高速多重極法および時間領域境界要素法への適用, 平成 25 年度土木学会全国大会, CD-ROM 収録, 2013年9月3日, 日本大学津田沼キャンパス

伊海田明宏・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 演算子積分時間領域 ACA 境界要素法を用いた 2次元多重散乱解析, 第62回理論応用力学講演会, 0S15-16, USB 収録, 2013年3月7日, 東京工業大学大岡山キャンパス

T. Saitoh, T. Maruyama, A. Ikaida and S. Hirose: Fast multipole boundary element method and adaptive cross approximation simulation of ultrasonic NDE, International workshop on information & computation in civil & environmental engineering (IC-CEE2012), pp.9-10, Sept.19, (2012), Ehime, Japan

他 8 件

{その他}

ホームページ等

研究代表者 HP:

<http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/>

研究分担者 HP:

<http://civil.ees.st.gunma-u.ac.jp/~applmech/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 壯一 (HIROSE, SOHICHI)

東京工業大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 00156712

(2) 研究分担者

齋藤 隆泰 (SAITOH, TAKAHIRO)

群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号: 00535114