

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760418

研究課題名(和文)異方性材料に対する新しい波動解析手法の開発と超音波非破壊評価への適用に関する研究

研究課題名(英文)Development of wave analysis method for anisotropic solid and its application to ultrasonic nondestructive evaluation

研究代表者

斎藤 隆泰(Saitoh, Takahiro)

群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号：00535114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：異方性材料に対して超音波を入射させると、超音波は通常の等方性材料とは異なる波動伝搬・散乱挙動を示すことで知られている。したがって、超音波非破壊評価法を用いて欠陥を検出しようとした場合、異方性が欠陥検出精度の低下を招く危険性がある。超音波シミュレーション手法として、古くから境界要素法が利用されてきたが、異方性材料を対象とした時間領域境界要素法はこれまでほとんど行われてこなかった。そこで本研究では、これまでの時間領域境界要素法の欠点を克服した、異方性材料中に対する新しい波動解析手法を開発し、超音波非破壊評価法を対象とした解析モデルに対して適用することで、開発した手法の有効性等を示すことを行った。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research is to development of new wave analysis methods for elastic wave scattering in anisotropic solids. In general, ultrasonic wave scattering in anisotropic solids are different from that in isotropic ones. Therefore, anisotropic properties may cause decrease of inspection accuracy of ultrasonic nondestructive evaluation which is one of the NDE for detecting a defect in materials. The boundary element method (BEM) is known as an effective numerical approach for transient wave analysis. However, the conventional time-domain BEM has not been applied to the simulation of ultrasonic wave scattering in anisotropic solids because the fundamental solutions for anisotropic elastodynamics are very complex and classical time marching scheme sometimes causes numerical instability for small time step size. Therefore, in this research, a new time-domain boundary element method was developed for anisotropic elastodynamics.

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：異方性弾性波動問題 超音波非破壊評価 時間領域境界要素法 演算子積分法 群速度曲線

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設された全国各地の土木構造物は、建設後、半世紀が経過し、老朽化による供用停止やおもわぬ事故などの危険性が懸念されている。昨今の我国における経済状況や、重要構造物の供用停止によるインフラへの影響を考えれば、いかに土木構造物の欠陥を早期に発見し、適切な補修を施し、長寿命化させるかを多方面から検討することが重要となってくる。実際、橋梁や原子力機器等に対して、超音波を用いて材料内部の欠陥の有無やその大きさ、形状等を評価する超音波非破壊検査法が用いられている。しかしながら、あらゆる構造材料に対して、超音波非破壊検査法が精度良く容易にできるわけではない。等方性材料に対しては、単純に波線理論等の理論的考察や数値シミュレーションの援用により比較的簡単に超音波伝搬経路を特定できるため、ある程度、欠陥の位置や形状を予想することができる。しかしながら、例えば異方性材料に超音波を入射させると、音響異方性の影響により試験者の意図と反して超音波が入射・散乱されるため、得られた結果に大きな誤差が生じることとなる。このような超音波の散乱現象を理論的に追跡するためには、数値シミュレーションに頼らざるを得ない。しかしながら、超音波非破壊評価法の数値シミュレーションに有効な数値解析手法として知られている境界要素法の時間領域異方性弾性波動解析(超音波は固体中で弾性波動の性質を示す)は、これまでほとんど行われておらず、非常に難解であることが知られている。事実、異方性弾性波動問題における基本解(グリーン関数)は閉じた形で求まっておらず、その導出も1990年代に入ってからであり、研究の歴史も浅い。このような中、近年、研究代表者らにより、従来の時間領域境界要素法に比べて安定な新しい時間領域境界要素法(演算子積分時間領域境界要素法)が開発され、スカラー波動問題や、等方性材料中の弾性波動解析に応用されて、一定の成果を得るに至っている。

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大きな目的は、大きく分けて次の2つに分類される。

- A:異方性材料に対する超音波非破壊評価のための新しい時間領域境界要素法の開発
- B:開発手法の理論およびハード両面からの高速化

である。ただし、ここで意図する新たな時間領域境界要素法とは、新しい定式化を導き、実際に数値解析コードを作成し、いくつかのモデルを解析することで提案手法の妥当性を確認するものであり、汎用コードの作成や販売は、今回の研究内容に含まれない。

3. 研究の方法

本研究で扱う数値解析モデルは、超音波非破壊評価の数値シミュレーションにおいて基礎的な、均質で異方性材料中の複数空洞やき裂による超音波の散乱問題等を扱う。比較的簡単なモデルではあるが、領域の大きさと扱う超音波の波長を考慮すれば、解析は必然的に規模の大きいものとなる。加えて、波速が方向に依存して大きく異なる異方性弾性波動問題を扱う本研究では、通常の数値安定条件を満たすことが難しい。このような理由から、本研究では、ベースとなる数値解析手法として、解析領域内部をメッシュ分割する必要のない時間領域境界要素法を選択した。

ただし、時間領域境界要素法を用いたとしても、先に述べたように、通常の時間領域境界要素法では、安定性やその他の面で、実用的な手法としては不十分であると思われる。そこで、本研究では、研究代表者が独自に異方性弾性波動問題に対する新しい時間領域境界要素法を開発・定式化し、数値解析コードも作成する。時間領域境界要素法は、時間領域境界積分方程式を時間・空間に関して離散化することで、数値解を求める。本研究では、時間領域境界要素法における時間ステップ解析を安定に進めるための方法として、Lubich が提案した演算子積分法(CQM: Convolution Quadrature Method)と呼ばれる畳み込み積分を精度良く、安定に計算する方法を、時間領域境界要素法に適用することで、時間領域境界要素法の数値安定性を大幅に向上させる。一方、開発した新しい時間領域境界要素法を効率化するために、近年注目を集めている GPU 等の並列化手法の適用や、高速多重極法、ACA 等といった、境界要素法の代表的な高速解法を適用する方法についても検討した。

4. 研究成果

まず、研究代表者らがこれまでに開発したスカラー波動や弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法を、2次元異方性弾性波動解析へと拡張することを行った。対称となる欠陥のモデルは空洞およびき裂であるが、時間領域境界要素法の性質上、それらの定式化は異なっている。そのため、空洞および、き裂のそれぞれに対する超音波の散乱現象を解析するための演算子積分時間領域境界要素法を開発した。空洞を対象とする場合は、空洞変位を未知量とした積分方程式を、き裂を扱う場合は、き裂開口変位を未知量として時間領域境界積分方程式を構成した。いずれの場合においても時間に関する離散化には演算子積分法を用いている。

まず、欠陥として空洞を考慮した場合の異方性材料中の弾性波動散乱解析結果の一例を示す。ただし、空間方向の離散化には、一定要素を用いている。また、異方性材料とし

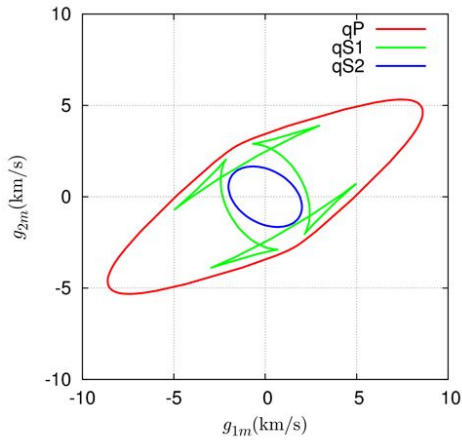


図 1 : グラファイトエポキシの群速度曲線

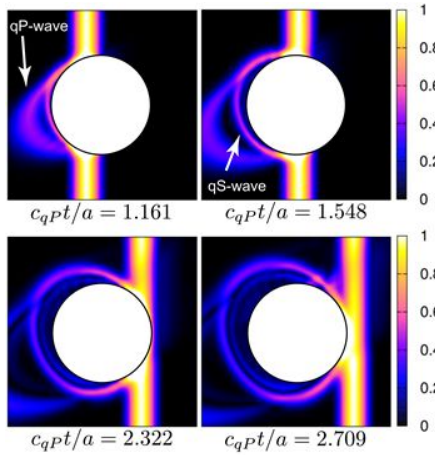


図 2 : グラファイトエポキシ中の空洞による入射波の散乱解析結果

てグラファイトエポキシを使用している。なお、グラファイトエポキシの群速度曲線は図 1 のように求まる。すなわち、縦波 (qP 波) は斜め方向に最も速く伝搬し、横波 (qS1 波) は複雑な波面を形成している。図 2 は、グラファイトエポキシ中の空洞による入射波の散乱解析結果の一部を示している。図 2 より、空洞による散乱波は、図 1 の群速度曲線に従って、まず斜め方向に最も速く伝搬していることが見て取れる。同様に、群速度曲線に従って、横波が発生していることも見て取れる。

次に、き裂による入射波の散乱解析結果を図 3 に示す。この場合は、空間の離散化については Galerkin 法を採用している。境界要素法では、有限要素法や差分法と比べて、より数学的なき裂を容易に表現できる点で優位である。また、要素分割もき裂表面のみを行えば良いことから、解析におけるプリプロセス等の手間も省くことができる。図 3 より、図 2 の結果と同様に、図 1 の群速度曲線に従って散乱波が発生していることが見て取れる。なお、その他にも木材 (直交異方性) や堆積地盤 (横等方性) に対する解析等も本研究で行っており、いずれも良好な結果が得られている。

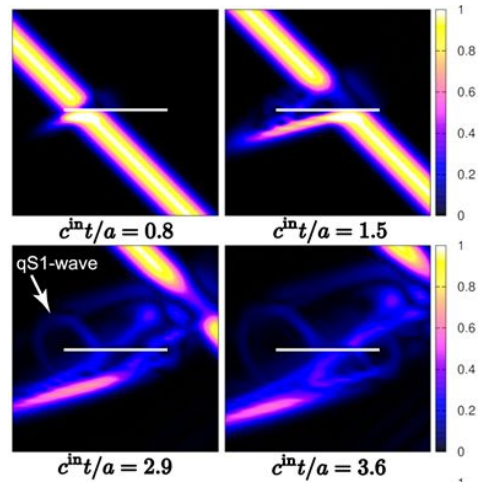


図 3 : グラファイトエポキシ中のき裂による入射波の散乱解析結果

なお、本研究で開発した新しい時間領域境界要素法の定式化は、弾性定数を含む形式で導かれている。そのため、本手法を用いるにあたって、その弾性定数に等方性材料の弾性定数を用いれば、結果は等方性材料に対するものと一致する。そのため、本報告ではその詳細は割愛するが、実際に等方性材料に対する弾性定数を用いることで、本手法の計算精度を確認している。なお、演算子積分法を用いたことで、数値解の安定性も大幅に改善された。事実、従来の時間領域境界要素法では、時間増分を小さく取った場合や、き裂や空洞が複数並んでいる場合の解析、また、総時間ステップ数を多く取った場合に数値解が不安定になりやすいことで知られる。しかしながら、いずれの場合においても数値解は発散することなく、安定に解を導出することができた。

一方、異方性弾性波動問題に対する基本解は、単位円周上の積分を含む形式で求まっている。そのため、数値解析に当たっては、この単位円周上の積分を如何に高速に処理するかが、本手法の実用性を向上させるためのポイントとなる。そこで、本研究では、開発した手法をより高速に計算するために、OpenMP、MPI、GPU を適用することを行った。OpenMP は MPI と併用し、近年注目を集めている GPU については、その効果にのみ着目するために単独で適用した。なお、計算にはいずれも東京工業大学におけるスーパーコンピュータ-TSUBAME2.0 を使用した。

まず OpenMP、MPI を併用したハイブリッド解法では、境界要素法における影響関数行列を各 MPI プロセスに対応するよう分割し、分割して得られた小行列成分それぞれを OpenMP で計算することで高速化を図った。その結果、およそ 16 倍程度の高速化を実現することが出来た。

一方、GPU を用いて高速化した結果についても言及しておく。GPU を用いた場合はおよそ 20 倍程度の高速化が実現出来た。しかし

ながら、MPI は使用していないため、メモリ削減は行っていない。これについては今後、検討する必要がある。

また、本研究に関連して、異方性飽和多孔質弾性体における解析や、差分法や有限要素法を用いた場合の空洞のモデル化が計算精度に及ぼす影響等も考察した。異方性弾性波動問題の基本解は、陽な形で求まらない。そこで、高速多重極法を適用して開発した手法を高速化するために、積分核の形式に依存せずに多重極展開を実行できる高速多重極法の適用についても検討した。

以上、まとめて、本研究で得られた成果は、次の通りである。

超音波非破壊評価におけるシミュレーションのための異方性弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法を開発した。この成果は研究目的 A と関連する。開発した手法に MPI や GPU 等の高速化を適用することでハード面からの高速化を実現した。これは研究目的 B と関連する。開発した手法の計算精度を、等方性材料の弾性定数を用いることで、通常の等方性弾性波動解析結果と比較して行った。解析精度は良好であった。演算子積分法を適用したことにより、数値安定性を改善することができた。

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。

異方性弾性波動問題を理論的に高速化するには、高速多重極法や ACA(Adaptive Cross Method)の適用が必須である。これらを適用し、効率的な結果を得るにはまだ多くの改善点が残されている。演算子積分法の性能の問題と思われるが、時間ステップ後半で数値解の誤差が増加する 경우가多々ある。さらなる検討が必要である。本研究で開発した手法を用いて順解析を行えば、欠陥形状を再構成するために必要な受信波形を得られる。そのため、この結果を基に逆解析を行い、欠陥形状や位置を正確に求めるための逆解析手法を確立することが急務であると思われる。飽和多孔質弾性体等、関連する異方性弾性波動問題に対する本手法の拡張を行うことは有意義である。

今後は、これらの課題を解決する方法について検討を続けていく予定である。

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 9 件)

A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Con-

volution quadrature time-domain boundary element method for 2-D and 3-D elastodynamic analyses in general anisotropic elastic solids, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol.39,pp.64-74(2014), 査読有

斎藤隆泰・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界要素法, 計算数理工学論文集, pp.121-126, (2013), 査読有

古川陽・斎藤隆泰・廣瀬壮一:異方性媒質中のき裂による2次元散乱解析に対する演算子積分時間領域 Galerkin 境界要素法, 計算数理工学論文集, vol.12, pp.49-54, (2012), 査読有

古川陽・田中遊雲・斎藤隆泰・廣瀬壮一：2次元異方性弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法, 土木学会論文集 A2 応用力学), vol.68,pp.269-278, (2012), 査読有

T. Saitoh and S. Hirose : New time-domain boundary element method based on the convolution quadrature method for 2-D wave propagation problems, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, vol.60, pp.307-315, (2012), 査読有

斎藤隆泰・瀬川尚揮・石田貴之・廣瀬壮一：並列化された演算子積分時間領域高速多重極境界要素法を用いた大規模多重散乱解析, 計算数理工学論文集, vol.11, pp.95-100,(2011), 査読有

[学会発表](計 28 件)

A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Convolution quadrature BEM for wave analysis in general anisotropic fluid-saturated porous solid and its GPU acceleration, ICCM2014, 2014, Cambridge, England(発表予定,採択決定済)
古川陽・斎藤隆泰・廣瀬壮一:異方性材料の面外波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法,平成 25 年度土木学会全国大会,日本大学津田沼キャンパス,2013,0903,CD-ROM 収録

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),2013,0903,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,2013,0903,日本大学津田沼キャンパス

中畑和之・齋藤隆泰・廣瀬壮一:非均質異方性材料中の超音波伝搬の有限要素・差分モデルに関する検討,第19回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集,2013,0127,東京工業大学

A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Two-dimensional elastic wave scattering analysis by a crack for general anisotropy using convolution quadrature boundary element method, 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), Nov.28, 2012, Crowne Plaza, Gold Coast, Australia, (CD-ROM収録)

古川陽・齋藤隆泰・廣瀬壮一: Galerkin法を適用した演算子積分時間領域境界要素法による2次元異方性弾性体中のき裂による波動散乱解析,第25回機械学会計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.599-601,2012,1008,神戸ポートアイランド南地区

A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Convolution quadrature boundary element method for two-dimensional wave scattering analysis by a crack, International workshop on information & computation in civil & environmental engineering (ICCEE2012), pp.1-2, Sept.19, 2012, Ehime, Japan.

T. Saitoh, A. Furukawa and S. Hirose: Parallelization of convolution quadrature based boundary element method for general anisotropy, EC-COMAS2012, Austria, Sept.11,2012, (CD-ROM収録)

齋藤隆泰・古川陽・田中遊雲・廣瀬壮一: 2次元異方性弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法の開発,平成24年度土木学会全国大会,2012,0905,名古屋大学 (CD-ROM収録)

古川陽・齋藤隆泰・廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を用いた2次元異方性弾性体中のき裂による散乱解析,日本応用数理学会2012年度年会講演予稿集, pp.129-130, 2012,0829,稚内全日空ホテル

A. Furukawa, Y. Tanaka, T. Saitoh, S. Hirose and Ch. Zhang: Convolution quadrature boundary element method for 3D elastodynamic analysis of gen-

eral anisotropic elastic solids, 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), Aug.21, 2012 (CD-ROM収録)

古川陽・齋藤隆泰・廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を用いたき裂による波動散乱解析,第17回計算工学講演会論文集 vol.17,CD-ROM収録,2012,05,30,京都教育文化センター

増村佳大・齋藤隆泰:GPUを用いた境界要素法の高速度化,第40回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM収録),2012,0314,宇都宮大学

古川陽・齋藤隆泰・廣瀬壮一: 2次元演算子積分時間領域 Galerkin 境界要素法を用いたき裂による散乱解析,第61回理論応用力学講演会(CD-ROM収録),2012,0308,東京大学

A. Furukawa, T. Saitoh, Y. Tanaka and S. Hirose: Convolution Quadrature Based Boundary Element Method for Elastic Wave Propagation in General Anisotropic Media, Third international symposium on computational mechanics (ISCM), Second symposium on computational structural engineering (CSE), pp.460-461, Dec.5,2011, Taipei, TAIWAN

田中遊雲・古川陽・齋藤隆泰・廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を用いた異方性材料の波動解析,日本応用数理学会2011年度年会講演予稿集, pp.275-276,(2011), 2011,0916,同志社大学

齋藤隆泰・田中遊雲・廣瀬壮一: 3次元異方性弾性波動解析のための演算子積分時間領域境界要素法,平成23年度土木学会全国大会(CD-ROM収録),2011,0906,愛媛大学

〔その他〕

ホームページ等

http://civil.ees.st.gunma-u.ac.jp/~appl_mech/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

