

jh170045-NAJ

非均質・異方性材料中を伝搬する弾性波動解析手法の開発と 非破壊検査への応用

齋藤隆泰（群馬大学大学院理工学府・環境創生部門）

概要 近年、超音波を用いた非破壊検査法に注目が集まっている。一般に、超音波は固体中で弾性波の性質を示す。そのため、超音波非破壊検査で要求されるシミュレーションは、欠陥や材料界面等による弾性波動散乱問題へと帰着される。しかしながら、超音波の波長は非常に小さいため、その解析は一般的に大規模なものとなる。本研究では、非均質性や異方性といった複雑な性質を示す材料中の波動伝搬を模擬するために必要となる弾性波動解析手法の開発、その高速化、並列化、ならびにそれら材料中の欠陥を特定するための逆問題に取り組んだ。数値解析手法には、境界要素法(BEM)、有限要素法(FEM)、有限積分法(EFIT)のいずれかを、扱う問題の性質毎に選定した。FRP等の先進材料を対象に、開発した手法を適用することで、提案手法等の妥当性や有効性を検討した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

平成 29 年度の参加研究者の役割分担は下記の通りである。申請時の内容と概ね変更はない。

【齋藤隆泰・群馬大学・研究代表者】

研究代表者として、本研究を統括している。また、時間領域境界要素法の高速化や FRP 中の弾性波動散乱解析、並びに逆散乱解析を用いた欠陥形状再構成手法の開発、さらには Time-Reversal 法の実施にも携わっている。また、演算子積分時間領域境界要素法と有限要素法の結合解法の開発にも携わった。

【中畑和之・愛媛大学・副研究代表者】

研究代表者の齋藤と共に、副研究代表者として本研究を統括している。有限要素法や有限積分法を用いた大規模弾性波動解析手法の開発や、それらと境界要素法の結合解法の開発、Time-Reversal 法による逆伝搬解析にも携わった。

【古川陽・東京工業大学】

FRP 等の異方性材料に対する逆散乱解析を実行する際、高精度な順解析結果が必要となる。共同研究者の古川は、異方性弾性波動問題に対する境界要素法で学位を取得した若手研究者であり、異方性弾性波動問題に詳しい。そのため、異方性を示す FRP 材料中の弾性波動場を、演算子積分時間領域境界要素法と呼ばれる最新の時間領域境界要素法を用いて解析する役割を担った。また ACA(Adaptive Cross Approximation)を用いた境界要素法の高速化や、逆散乱解析手法の構築にも携った。

【紅露一寛・新潟大学】

共同研究者の紅露は、長年、境界要素法や有限要素法等の数値解析手法の研究に取り組んで来た。本研究では、それらの知見を活かし、演算子積分時間領域境界要素法と有限要素法の結合解法に関する研究や、境界要素法自体の高速化に関する研究にも携った。

【牛島省・京都大学】

自由度の大きい大規模弾性波動解析を実施するには、並列計算は欠かせない。共同研究の拠点大学（京都大学）側からの参加研究者として、解析コードの並列化等に協力している。また、スーパーコンピュータのシステムに精通しているため、

計算実行のアドバイザー的立場の役割も担った。

【小山田耕二・京都大学】

同じく、共同研究の拠点大学（京都大学）側からの参加研究者として、弾性波動解析結果を可視化する方法や、それらデータの効率的なポスト処理等に携わっている。また、京都大学の計算機を利用する上でのアドバイザー的立場の役割も担った。

【一色正晴・愛媛大学】

大規模弾性波動解析結果のデータは膨大なものとなるため、その計算結果をどのように効率良く可視化するかについて検討が必要である。そのため、様々な弾性波動解析結果のポスト処理に携わった。

【溝田裕久・愛媛大学大学院生】

研究副代表者の研究室所属の大学院生として、有限要素法や有限積分法を用いた大規模波動解析や Time-Reversal 法を用いた逆解析等の解析コード作成補助に携わっている。またプリ・ポスト等の補助としての役割等も担った。

【溝上尚弥・愛媛大学大学院生】

研究副代表者の研究室所属の大学院生であり、数値解析のためのプリ・ポスト等の補助としての役割等を担った。

【伊藤司・稲垣祐生・群馬大学大学院生】

研究代表者の研究室所属の大学院生であり、数値解析のためのプリ・ポスト等の補助としての役割等を担った。

2. 研究の目的と意義

近年、インフラ構造物等の老朽化に伴い、構造材料等の健全性を評価する非破壊検査に注目が集まっている。特に、波動論を利用した検査法である超音波非破壊検査法は、今日まで広く利用されてきた。超音波は固体中で弾性波として伝搬することから、弾性波の特性を把握し、活用することが超音波非破壊検査の高度化には重要である。

超音波非破壊検査は、均質な金属材料に対しては多くの検査実績がある。しかしながら、例えば、近年、航空宇宙や土木分野等で用いられつつある FRP (Fiber Reinforced Plastic) は、マイクロレベル

で多数の繊維から成る非均質材料であり、マクロレベルでは、その影響は音響異方性として波動伝搬特性に現れる。すなわち、金属材料中の波動伝搬特性とは全く異なる性質を示す。現状では、FRP に対する超音波非破壊検査は、金属材料と同様のアプローチが適用されているため、検査精度に問題がある。

そこで、本研究では、材料の非均質性や音響異方性を考慮した大規模弾性波動解析手法を開発し、現状の超音波非破壊検査で特に問題となっている、FRP 等の異方性や非均質性の性質を有する材料をターゲットとした実用的なシミュレーション技術を確立することを目的として研究を行った。

FRP は炭素繊維による CFRP、ガラスを母材とした GFRP 等、様々な材料が開発されている。しかしながら、これら材料の使用頻度は右肩上がりであること、金属のような等方性材料と全く異なる性質を示すことから考えても、金属材料に対する場合と異なる新しい超音波非破壊検査法を確立しなければならない。FRP は、その一部は軍事目的への転用等も危惧され、輸出規制も定められている重要な材料である。FRP の利用が進めば進む程、そのための維持管理手法の重要性は当然高まる。

このように、本研究では、異方性や非均質性といった超音波非破壊検査を複雑にさせる 2 つの要因を考慮できる、弾性波動解析手法の開発に焦点を当てる。現在、政府の科学技術総合会議は科学技術イノベーションが取り組むべき課題に新しいインフラ点検・診断技術の開発に関するテーマを掲げている。本研究は、最新の材料である FRP をもターゲットにいたった新しい超音波非破壊検査法の開発のための基礎を築くものであり、学術的新規性のみならず、社会的要請にも応じる時宜を得た研究である。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究に参画している研究者は、それぞれ得意な数値解析手法や特徴を有している。互いに非破壊検査の研究をしていても、用いる数値解析手法が異なると、解析対象も無限領域や異方性を対象

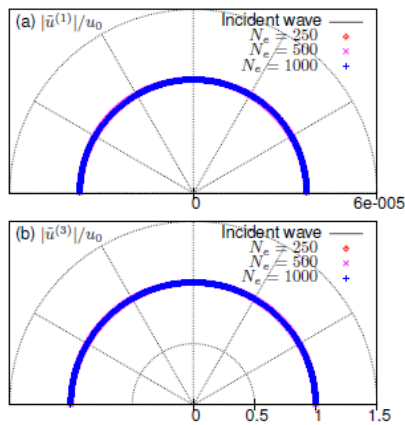


図 1: 円形空洞表面における(a)固体骨格部の変位の絶対値と(b)氷骨格部の変位の絶対値。

とする等, 異なる場合が多い. また, その可視化方法やデータの処理方法, 大規模計算のための並列化もいわば, 独自に行ってきた背景がある. さらに, 研究代表者・副代表者共に, 地方国立大学に在籍しているため, 大型計算機を使う環境が, 現状では本制度以外に存在しない. 研究室単位での並列計算機の維持管理は多大な労力も必要となるばかりか, セキュリティの関係上, 研究室単位で計算機をシェアし研究を進めることは難しいのが現状である. そのような中で, 共通の計算機の利用は互いの数値解析手法を共有でき, かつ互いの研究課題遂行を促進するのに役立っている. 実際, 以下で述べる FRP 中の超音波伝搬解析も, 本課題なしでは決して実施できなかったと考えられる.

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

H29 年度新規課題のため, 該当しない.

5. 今年度の研究成果の詳細

2. で述べた研究目的を達成するために, H29 年度は, 主に以下の内容について実施した.

(A-1) 境界要素法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・紅露・古川)

境界要素法を用いた弾性波動解析の効率化のために, 本研究では ACA (Adaptive Cross Approximation) を適用する方法を試みた. 具体的には, ACA を演算子積分時間領域境界要素法と呼ばれる最新の時間領域境界要素法に適用した. 本

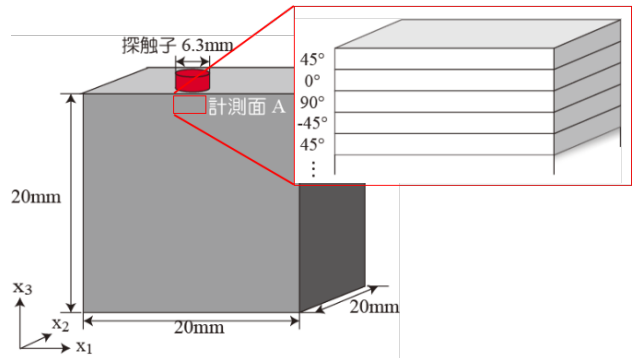


図 2: 積層構造を考慮した CFRP 中の超音波伝搬解析モデル.

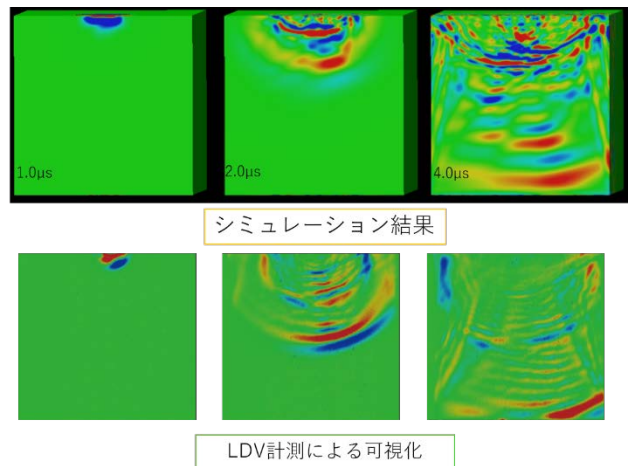


図 3: 積層構造を考慮した CFRP 中の超音波伝搬解析結果(上段)シミュレーション結果(下段)LDV 計測による可視化結果.

研究に関連し, ここでは凍結した固体中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に ACA の実装を行った. 図 1 は, 提案手法を用いて円形空洞に対する入射波の散乱問題を解いた場合の, 円形空洞表面における (a) 固体骨格部の変位 (b) 氷骨格部の変位の絶対値を示しており, 図 1 (a) (b) 中の実線は, 解析解を示してある. いずれの要素数 N_e に対しても, 提案手法による解析結果は, 解析解と一致しており, ただしく解析を実行できていることが確かめられた. なお, この成果は, 例えば 7 節の研究成果リスト (1) 学術論文 f) で既に発表しており, 計算効率を向上させた結果についても言及されている.

(A-2) 有限要素法・有限積分法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑・溝田)

本課題 (A-2) は, 課題申込時点では, 中畑・溝田

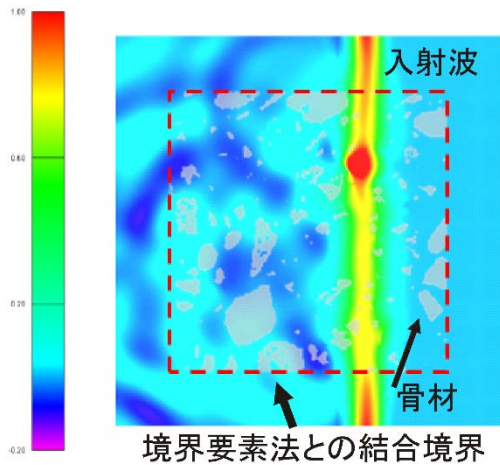


図 4：BEM-FEM 結合解法で求めた非均質領域周辺の弾性波動場。

の担当であったが、研究代表者の齋藤も参画した。超音波非破壊検査では、扱う超音波の波長は数 mm のオーダーなので、数 cm 角の試験体に対しても、解くべき問題は大規模となる。ここでは、Image-based モデリングを施した有限積分法や有限要素法コードを開発した。FRP は、様々な積層角を持って成形されるため、与えられた FRP に対して数値解析を施すには、まず、弾性定数を推定する必要がある。そこで、FRP の弾性定数を推定する方法を開発し、開発した方法を用いて得られた弾性定数を先に開発した解析コードの入力として与えることで、FRP 中の超音波の弾性波動解析を行った。図 2 は本研究で行った解析モデルの一例であり、プリプレグの弾性定数を求め、対応する積層角毎に弾性定数を定めている。それら各層をモデル化した場合の、CFRP 上面からの超音波伝搬のシミュレーション結果を図 3 に示す。図 3 (上段) はシミュレーション結果を、図 3 (下段) は LDV による実験結果を示している。解析に用いたパラメータ等の詳細は省略するが、シミュレーション結果は LDV の実験結果と比較的良く一致している。特に、超音波が右下方向へ伝搬する音響異方性の影響を良く再現できていることが見て取れる。よって、開発したコードや FRP の弾性定数推定法の妥当性が確かめられた。これらの結果は、例えば査読付学術雑誌に投稿され、既に採択されている(7 節研究成果リスト(1)学術論文 d), g))。また、本研究の成

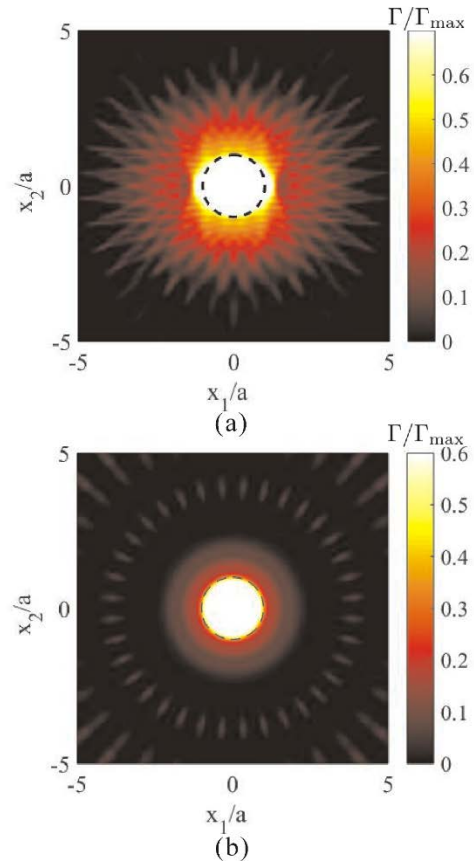


図 5：逆散乱解析結果(a)CFRP(b)等方性鋼材の場合。

果の一部は、H29 年度安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウムにて大学院生が発表し、新進賞を受賞している。

(A-3) 境界要素法と有限積分法・有限要素法の結合による非破壊検査シミュレーション (齋藤・中畑・紅露)

一般的に、境界要素法は無限または半無限領域を含む波動解析に威力を発揮し、有限要素法は閉領域の解析に威力を発揮する。また、境界要素法は均質な波動場における散乱問題に強いが、非均質領域の解析は苦手である。一方、有限要素法は、非均質領域における波動解析を比較的得意としている。そこで、本研究では、従来法に比べて数値安定な最新の時間領域境界要素法である、演算子積分時間領域境界要素法を有限要素法と結合させる新しい数値解析手法の開発を試みた。具体的には、局所的に非均質性を有する固体(非均質部分はコンクリートを想定)に対する弾性波動解析手法を開発した。なお、非均質なコンクリート部分

にはボクセル有限要素法を採用し、コンクリートのモデル化には X 線 CT スキャン画像を用いた。また、これら非均質領域における散乱波の計算には、演算子積分時間領域境界要素法を用いた。図 4 は、本研究で行った解析結果の一例を示している（例えば 7 節研究成果リスト(1) 学術論文 c)）。図 4 中の赤点線は、有限要素法と境界要素法の結合境界を示している。図 4 より、水平方向に伝搬する入射平面波は、骨材等に散乱されながら伝搬していることがわかる。また、非均質領域により散乱された超音波が、無限遠方に伝搬している様子を見て取ることができる。すなわち、開領域を境界要素法で解析しているため、無限遠方を容易に扱う事が可能となった。

(B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

本研究では、まず(A-1)で開発している演算子積分時間領域境界要素法を 2 次元面内異方性弾性波動問題へ拡張した。解析対象として、現在、原子力機器等に用いられているオーステナイト系鋼材および CFRP を選定した。これらはいずれもミクロな支点から見れば非均質な性質を示しているが、超音波の波長によっては均一な異方性と扱って問題ないであろう。そこで、いわば均質化された弾性定数を用いて、これら材料中の異方性弾性波動解析を実施した。現状ではこれら材料に対する定量的な超音波非破壊検査法は確立されていない。まず、オーステナイト系鋼材、CFRP 材料を想定し、入射平面波に対する欠陥の散乱問題を解析した。次に、これら異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析の定式化を行った。定式化は、一般の異方性材料に適用できるよう工夫した。逆散乱解析における欠陥形状再構成には、欠陥からの散乱波形が必要となる。ここでは、先の解析で求めた平面波を想定した場合の数値シミュレーションによる散乱模擬波形を用いて欠陥形状を再構成することを行った。図 5(a)に CFRP 中の欠陥に対する逆散乱解析結果を示す。比較のため等方性材料に対する結果も図 5(b)に示してある。CFRP は繊維方向に強い異方性の性質を示すことで知られているが、そ

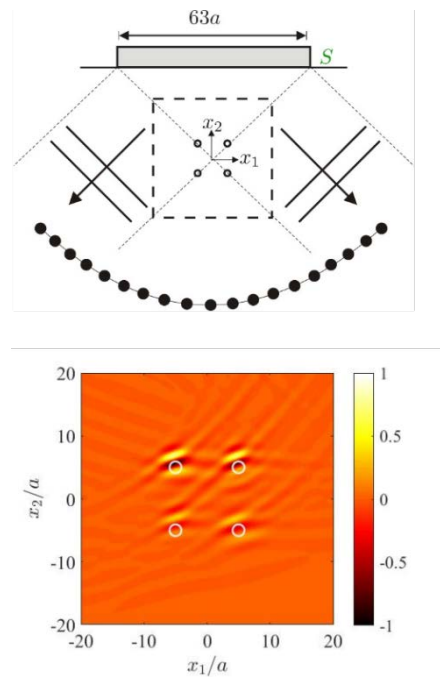


図 6：時間反転法による欠陥の同定（上段）
解析モデル（下段）解析結果。

のような強異方性材料に対しても、欠陥形状を再構成できていることがわかる。なお、図 5(a)に示す CFRP の場合の結果は、真円の空洞がやや横長に再構成されている。これは、本解析で取り扱った CFRP は、一方向繊維強化 CFRP であり、水平方向の弾性波速度が極めて速いためであり、散乱波の受信方向によって再構成に用いるデータ数が異なる事が原因の一つとして考えられる。なお、この成果は、既に査読付き論文に投稿している（7 節研究成果リスト(1) 学術論文 a)）。

(B-2) Time-Reversal 法に基づく逆伝搬解析 (斎藤・中畑・溝田)

課題申請時点では、Time-Reversal 法は中畑・溝田の分担であったが、H29 年度開始前に、本研究の前段階として行った斎藤の Time-Reversal 法に関する研究が第 44 回土木学会関東支部で講演賞を受賞（発表は大学院生）したため、本研究には研究代表者の斎藤も参画している。図 6 に Time-reversal 法を用いて等方弾性体内部の 4 つの空洞を再構成した結果を示す。解析では図 6 (上段)で示すように、64 素子から成るリニアアレイ探触子を用いた場合の超音波非破壊検査を想定したシミュレーションを実施している。図 6 (下段)は、図

6 (上段) の点線内の領域について解析結果を可視化した結果を示しており、リニアアレイ探触子の各素子からの超音波発信時間を制御することで、斜め 30° に超音波を送信している。図 6 (下段) より、4 つの空洞の位置を概ね特定できていることが見て取れる。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (牛島・小山田・一色)

上記 (A-1)-(B-2) に至る数値解析コードの OpenMP, MPI 並列化や、その計算結果に対するポスト処理等で連携し、解析自体や可視化技術に関する効率化を行った。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の進捗状況は概ね良好であったと考えられる。5 節で述べた (A-1)-(B-2) はいずれも課題申込時点での予定研究内容であり、いずれの項目も中間報告の時点で既にいくつかの結果を導くことができしており、予定通り研究を進めることができた。今後は、それぞれの研究内容に対して、下記の点に留意して研究を進める必要がある。

(A-1) 境界要素法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・紅露・古川)

H29 年度は境界要素法を高速化するための ACA コードの開発を行い、いくつかのパラメータ解析や検証を行った上で査読付論文にも投稿している。しかしながら、解析対象とした波動場は、2 次元であること、弾性波動問題への適用や異方性弾性波動問題への適用等、今後適用すべき問題は数多い。そのため、今後は解析対象範囲を広げ、それぞれ定式化を行い、解析を行っていく必要がある。特に、異方性弾性波動問題の高速化は、今後の大きな課題である。高速多重極法や ACA を適用するだけでなく、例えばプログラム高度化共同研究課題プログラム等への公募申請についても検討し、解析コードを高度化することも検討している。将来的には MPI や OpenMP の並列化のみならず、GPU を用いた高速化についても検討が必要であろう。

(A-2) 有限要素法・有限積分法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑・溝田)

並列化を施した大規模弾性波動解析手法を開発し、FRP に適用することで一定の成果を得ている。しかしながら、GPU を活かした超大規模計算や最新の XeonPhi 等を活かした高速計算には至っていない。引き続き開発したコードの改良を行いながら、これらハードウェアを利用した超大規模弾性波動解析への応用課題が残されていると考えられる。

(A-3) 境界要素法と有限積分法・有限要素法の結合による非破壊検査シミュレーション (斎藤・中畑・紅露)

時間領域境界要素法と有限要素法の結合解法の開発には成功しているため、一定の成果を残せていると言える。国内学会発表も行っているため、次のステップとして解析結果をまとめ、海外の査読付論文に投稿することを検討している。ただし、解析は、現状では 2 次元弾性波動問題に留まっている。そのため、3 次元問題への拡張も残された課題である。特に、3 次元問題を扱う場合は、問題の自由度が大きいため、計算負荷の大きい境界要素法の解析部分には、高速多重極法や ACA 等を取り入れて計算を高速化する検討も必要であると考えられる。一方で、有限積分法と時間領域境界要素法の結合解法の開発については、引き続き検討を行っていく予定である。

(B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

2 次元面外波動問題、面内波動問題を扱った場合の異方性材料中の空洞欠陥に対する逆散乱解析は、既に定式化を行い、一定の成果を示したことで、査読付論文にもアクセプトされた。しかしながら、一般的に CFRP は層間剥離が問題となるため、欠陥の形状はき裂に近いものが対象となる。逆散乱解析は、積分方程式を基礎とした定式化であるが、欠陥の対象がき裂であるか、空洞であるかによって、定式化が異なる。そのため、今後は、異方性材料中のき裂を対象とした欠陥形状再構成手法を開発することが必要となると考えられる。また、3 次元問題への拡張も今後、取り組むべき課題である。そのためには、3 次元異方性弾性波動問題に対

する基本解の遠方場近似を求める等、解決すべきいくつかの問題が残されているので、これら課題を1つずつ解決していく予定である。

(B-2) Time-Reversal 法に基づく逆伝搬解析 (斎藤・中畑・溝田)

2次元異方性弾性波動問題を対象に成果を出し、いくつかの口頭発表を行っている。しかしながら、時間反転法は、受信波形を解析対象の波動場に再入射させて、如何にして定量的に欠陥位置を示すかに課題が残されている。すなわち、時間反転された波動は時間領域であるため、再入射された複数の波動が収束する箇所を時間と共に追跡する必要があるが、現状では、その追跡方法は、必ずしも定量化されていない。今後は、例えば時間反転法にトポロジー感度の概念を取り入れて、欠陥位置を定量的に推定する方法等を検討している。また、2次元異方性弾性波動問題へと拡張し、査読付論文に投稿できるよう、解析結果をまとめていく必要もあるだろう。本研究では、超音波非破壊評価法を想定し、時間反転法の利用を検討したが、時間反転法を用いて AE(アコースティックエミッション)法等、弾性波計測の類似分野における時間反転法の応用を行うことも考えている。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (牛島・小山田・一色)

(A-1)-(B-2)に渡る関連項目について、引き続き、並列化およびポスト処理の効率化について検討する予定である。特に、Xeon Phi や GPU 等の利用と超大規模問題への応用は今後、検討すべき事項である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- a) 稲垣祐生・斎藤隆泰・古川陽・廣瀬壮一：一方向炭素繊維強化 CFRP 中の欠陥に対する逆散乱解析, 計算数理工学論文集, vol. 17, pp. 13-18, (2017)
- b) An ultrasonic testing method for homogeneous anisotropic materials, H. Mizota, Y. Nagashima, K. Nakahata, Insight, Vol.59, No.7, pp.351-357,(2017), DOI:10.1784/insi.2017.59.7.351.

c) 森川光・藤縄和宏・市川諒・斎藤隆泰：2次元弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法・イメージベース有限要素法結合解法の開発, 第22回計算工学講演会論文集, Vol. 22, CD-ROM 収録, (2017)

d) 溝上尚弥・中畑和之・黄木景二・堤三佳・森亜也華・斎藤隆泰：レーザーキャンによる音響異方性を有する CFRP 中の超音波の可視化と弾性スティフネスの推定, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 73, pp. I-343-I354, (2017)

e) T. Maruyama, T. Saitoh and S. Hirose : Numerical study on sub-harmonic generation due to interior and surface breaking cracks with contact boundary conditions using time-domain boundary element method, International Journal of Solids and Structures, vol.126-127, pp.74-89, (2017)

f) 古川陽・斎藤隆泰・廣瀬壮一：周波数領域境界要素法と ACA による凍結した多孔質体内部の介在物による波動散乱解析, 計算数理工学論文集, vol. 17, pp. 83-88, (2017)

g) T. Saitoh and A. Mori: Development of new elastic constant estimation method using the laser ultrasonic visualization testing, Civil, Architecture and Environmental Engineering, vol.1, pp. 669-674, (2017), DOI: 10.1201/9781315116259-118

(2) 国際会議プロシーディングス

a) Numerical simulation of ultrasonic wave propagation in fiber reinforced plastic using image-based modeling, N. Mizokami, K. Nakahata, K. Ogi, H. Yamawaki, M. Shiwa, AIP Conference Proceedings, Vol.1806, (2017) pp.150005, DOI: 10.1063/1.4974729

b) K. Nakahata, K. Ogi, T. Namita, K. Ohira, M. Maruyama, T. Shiina: Photoacoustic microscopic imaging of surface and subsurface damages in CFRP, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Testing, AIP Conference Proceedings, now printing.

(3) 国際会議発表

a) T. Saitoh, Y. Inagaki, A. Furukawa and S. Hirose: 2-D inverse scattering analysis for a defect in authentic

stainless steels, The 8th International conference on computational methods (ICCM2017), ID2747, (2017)

(4) 国内会議発表

a) 溝上尚弥・中畑和之・斎藤隆泰：レーザー超音波法による超音波伝搬の可視化と弾性定数推定の試み, 平成 29 年度土木学会全国大会, 九州大学, CD-ROM 収録, 番号 I-376, pp. 751-752, (2017)

b) 稲垣祐生・斎藤隆泰：オーステナイト系鋼材中の欠陥に対する 2 次元順解析および逆散乱解析, 平成 29 年度土木学会全国大会, 九州大学, CD-ROM 収録, 番号 I-119, pp. 237-238, (2017)

c) 大芦健太・斎藤隆泰：時間反転法を用いた FRP 中の欠陥形状再構成に関する研究, 平成 29 年度土木学会全国大会, 九州大学, CD-ROM 収録, 番号 I-126, pp. 251-252, (2017)

d) 中畑和之：革新的な非破壊検査技術開発への取り組み, 日本保全学会 第 14 回学術講演会要旨集, 特別企画, pp. 5-12, (2017)

e) 斎藤隆泰・今井済・佐藤明良：有限要素法を用いた L 字型 CFRP 中の超音波伝搬シミュレーション, 平成 29 年度非破壊検査協会秋季講演大会, 福岡国際会議場, pp. 9-10, (2017)

f) 溝上尚弥・中畑和之・黄木景二・堤三佳・森亜也華・斎藤隆泰：レーザー超音波法を用いた CFRP 中の波動場の可視化と数理モデルの構築, 第 64 回理論応用力学講演会講演論文集, 機械振興会館, USB 収録, (2017)

g) 大芦健太・斎藤隆泰：時間反転法を用いたオーステナイト系鋼材中の欠陥形状再構成に関する研究, 第 64 回理論応用力学講演会講演論文集, 機械振興会館, USB 収録, (2017)

h) 稲垣祐生・斎藤隆泰：逆散乱解析によるオーステナイト系鋼材中の欠陥形状再構成, 第 64 回理論応用力学講演会講演論文集, 機械振興会館, USB 収録, (2017)

i) 大芦健太・斎藤隆泰・中畑和之：レーザー超音波可視化試験を用いた擬似等方積層板に対する弾性定数の推定と FDTD 法による検証, 平成 29 年度安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技

術シンポジウム, 愛媛大学, pp. 77-78, (2018)

j) 前原佑・斎藤隆泰・今井済・佐藤明良：有限要素法を用いた L 字型 CFRP 中の三次元超音波伝搬シミュレーション, 第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京都立産業技術センター, pp. 133-134, (2018)

k) 中畑和之：FRP を伝搬する超音波のモデル化と表層きずの光音響イメージング, H29 年度安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, pp. i-viii, (2018)

l) 森川光・斎藤隆泰：トポロジー感度を用いた 2 次元等方性材料中の欠陥形状再構成に関する研究, 第 45 回土木学会関東支部技術発表会 講演概要集, CD-ROM 収録, I-34, , 山梨大学

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

a) 中畑和之・小澤耀生・大平克己・小川健三：低周波アレイ探触子を用いたコンクリート深部の埋設物の高速映像化, 検査技術, 第 22 巻, 第 10 号, pp. 6-10, (2017)

b) 中畑和之・黄木景二・斎藤隆泰：炭素繊維強化樹脂中を伝搬する超音波の可視化計測とシミュレーション, 超音波 TECHNO, 第 29 巻, 第 4 号, pp. 69-74, (2017)

c) 斎藤隆泰：逆散乱解析法を用いたオーステナイト系鋼材中の欠陥形状再構成, 超音波 TECHNO, 第 30 巻, No. 2, pp. 85-89, (2018)