

jh190073-NAH

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)

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となる。しかしながら、計算要素長は波長に比べて小さいため、その解析は一般的に大規模となる。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な弾性波動解析手法の開発、その効率化、並びに材料中の欠陥を同定する逆解析手法の開発に取り組んだ。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(FIT)、粒子法(MPS)のいずれかを、扱う問題の性質毎に選定した。逆解析には、時間反転法やトポロジー最適化、粒子フィルタ法等を用いた。FRP や粗大結晶粒を有する金属材料を対象に、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

2019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、本研究を統括した。また、境界要素法等による大規模弾性波動散乱解析のコード開発や、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、さらには時間反転法等を用いた欠陥形状再構成や、機械学習の UT への応用研究にも携わった。

【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た。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、粒子フィルタを用いた逆解析に関する研究等に携わった。

【古川陽・東京工業大学】

異方性や散逸性を示す 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等を用いて解析する役割や、逆散乱解析の開発等に携わった。

【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、2020年度から本格化する機械学習に関する研究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。

【その他】

研究代表者、副代表者の研究室の学生が数値解析に対するプリ・ポスト等の補助として参加した。

2. 研究の目的と意義

工業部品や構造物の健全度を評価するために非

破壊検査が行われている。特に、超音波を利用した非破壊検査(Ultrasonic Testing: UT)は、現場での適用が比較的容易であることから、最も広く利用されている。しかしながら、航空宇宙分野等で利用が進む炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)といった非均質・異方性材料に対する UT は、現在、精力的に研究が進められている。このような中、申請者らのグループは、2017 年度より本研究課題:「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」をスタートさせた。2019 年度まで、主に CFRP 中の欠陥を同定する逆解析手法の開発や、高精度な UT の開発に資する大規模弾性波動シミュレーションの開発を行い、良好な審査結果を頂いてきた。しかしながら、残された課題は依然として数多い。例えば、2018 年度に開発した CFRP 中の欠陥を同定するための時間反転法は、2 次元問題への応用に留まっている。医療で先行適用された光超音波の UT への応用や、非均質材料のモデル化手法の一つであるマイクロポーラー弾性波動論の UT への応用等、多くのことが未解決のままである。

そこで、今年度もターゲット材料を FRP 等の複雑材料と定め、これら材料に対する大規模弾性波動解析手法の開発と欠陥の性状を推定する逆解析やデータ同化の開発を目的に、研究を実施した。ただし、現代社会では、Society5.0 の提唱や、将来の UT 技術者不足から、UT の ICT 化が強く求められている。そのため、2020 年度は、機械学習の UT への応用研究にも本格的に着手する。

現在、政府の科学技術イノベーション総合戦略では、2030 年までに我が国が達成すべきイノベーション技術として、新しい非破壊検査法の開発を目標に掲げている。検査の汎用性を考えれば、UT の高度化が検査業界に最もインパクトがある。しかしながら、CFRP を代表とした、非均質性や異方性等を示す材料を対象とした場合、超音波伝搬自体が複雑なため、これまでの UT 技術では検査精度の向上は見込めない。UT の高度化には、計算技術と融合したイノベーションの創出が不可欠であ

る。その 1 つの要素技術となり得るのが、非均質・異方性を考慮した大規模波動解析手法の開発や、そのような複雑材料中の欠陥に対する逆解析手法の開発であろう。例えば CFRP におけるプリプレグの積層構造等をモデル化できれば、正確に超音波の伝搬方向を予測できる。現場の技術者では理解し難い複雑な音響異方性を視覚で判断できるようになり、検査精度の向上を見込める。そればかりか、超音波センサーの送受信位置や周波数の最適化等、UT の実施を大きくアシストできることにも繋がる。さらに、2019 年度より取り組む機械学習の UT への応用は、Society5.0 が提唱する未来社会の創造へ直結する非破壊検査分野での先駆的研究となるだろう。実際、意外にも機械学習の UT への応用は、ほとんど行われていないのが現状である。UT は、土木、建築、原子力、航空宇宙分野等、様々な業界で必要とされており、持続可能な社会を築くために必要不可欠な技術であり、SDGs が掲げるいくつかの目標にも合致する。したがって、本研究は社会全体に大きく寄与する重要な課題であり、達成に対する波及効果・研究の意義は極めて大きい。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

例えば CFRP はプリプレグの積層角によって全く異なる材料特性を示す。したがって、金属のような等方均質な材料を対象とする場合と異なり、複数のモデル化を考慮しなければならない。また、超音波の波長は数 mm~数 cm オーダーであるため、精度の良い数値シミュレーションを実行するには要素サイズを代表波長の 50 分の 1 程度にする必要がある。さらに CFRP 中の補強繊維までも厳密にモデル化する場合、メゾスケール構造を考慮する必要がある。いずれせよ、本研究課題では、大規模波動解析の実行を避けられない。大規模波動解析を効率良く実行するには、OpenMP や MPI 並列化が有効であろう。このような点を総合的に考えれば、本研究を効率的に実施するには、材料力学や弾性波動論、計算力学を専門とする研究者らや、大規模並列化やコードチューニング、プリ・

ポスト処理の専門家の参画・連携が必要であろう。そのためには、大規模計算を実行可能な計算機環境を整える必要がある。また、解析コードの相互利用には、研究者の計算機環境が統一されていた方が、研究を円滑に実施できるだろう。一方で、本研究の実働に携わる数名の研究者は、地方国立大学に所属している。本拠点公募型研究としてでなければ、同等の計算機環境を常に利用することは実質的に難しい。

以上を考慮し、分野横断的な協力体制の下、本公募型共同研究として実施すべき必要性が高い研究であると考え、本研究申請に至った。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

2018 年度までは主に以下の内容を実施した。

(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・古川)

波動解析に有効な数値解析手法である境界要素法の効率化に資する研究を続けてきた。積分核に依存しない高速多重極法の面外波動問題への応用や、H-matrix 法における ACA を用いた高速解法の開発やその応用研究を行ってきた。2018 年度は、Sinc 法を用いた境界要素法の高速度化や、基本解に遠方場近似を用いることで、解析領域内部の弾性波を効率的に解析する方法の検討等を行ってきた。

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

境界要素法は、均質な異方性材料中の波動伝搬解析には極めて有効な手法となるが、非均質な異方性材料を扱うことは難しい。一方で、有限要素法 (FEM) や動弾性有限積分法 (EFIT) は、非均質材料の取り扱いを苦にしない。そのため、非均質材料中の大規模弾性波動解析を実施する場合、FEM や EFIT の利用が有力となる。このような観点から、拠点研究機関である京都大学のプログラム高度化支援事業等の支援の下、EFIT 等を用いた場合の並列化効率を向上させる研究等に取り組んできた。また、2018 年度は、粒子法を用いた弾性波動解析も試験的に実施し、近年注目されている非線形超音波のシミュレーションも行っている。

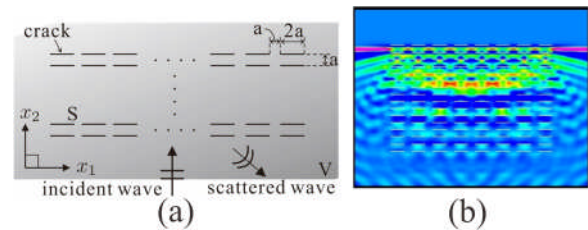


図 1: 時間領域境界要素法を用いた CFRP 中のき裂群による異方性弾性波動散乱解析結果(a) 解析モデル(b)き裂群周辺のある時刻における散乱波動場の解析例。

(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)

CFRP のような異方性を示す材料では、波動は等方に拡がらないため、現状の UT で利用されている Time of flight 等の波線理論を直接適用できない。そこで、音速の方向依存性を考慮した Born 近似や Kirchhoff 近似に基づく異方性材料に対する逆散乱解析法を提案し、2 次元空洞やき裂に対する有効性を示してきた。

(B-2) 逆伝搬解析 (Time Reversal 法) に基づく AE (アコースティックエミッション) 震源の同定 (斎藤・中畑)

UT では欠陥が存在する可能性のある箇所近傍に超音波センサーを設置し、得られた散乱波形から欠陥の有無等を判断する。一方、構造物の供用期間中に予め弾性波を受信するセンサーを複数設置し、破壊により生じる弾性波を受信することで、破壊源を推定する AE 法がある。AE 法では、弾性波が破壊源からどのように伝搬するかを把握することが重要となるが、非均質・異方性材料の場合、この路程推定が困難であった。そこで、2018 年度より、(A-1)、(A-2) で開発を続けている超音波シミュレーション技術と 2017 年度に開発した時間反転法を用いて、超音波センサーで得られた波形を時間反転させることで、破壊源を推定する方法の検討を行ってきた。

(B-3) 粒子フィルタを用いた散乱波からの欠陥の性状判別 (中畑)

数値シミュレーションに実際の計測値をマージしながらモデルの精度を向上させるために、データ同化手法の 1 つである粒子フィルタを UT に応

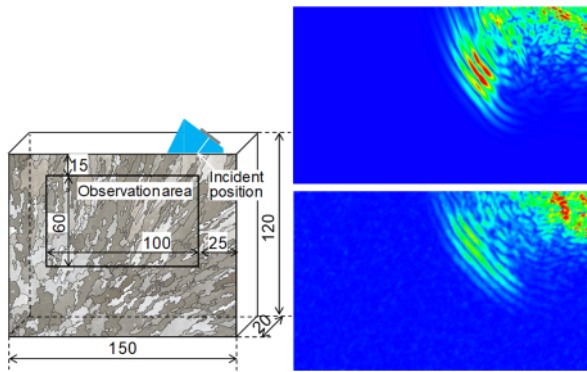


図 2: (左) CAFE 法によって作成した結晶粒成長モデル, (右上) FEM で計算した可視化結果, (右下) LDV を用いた可視化結果. 両結果の傾向は概ね一致している.

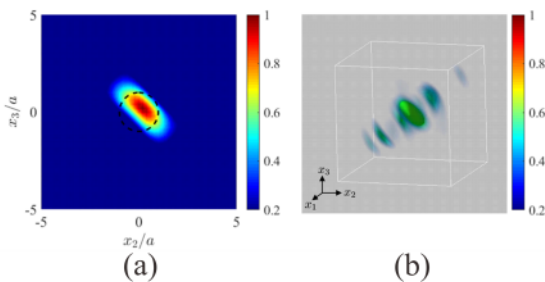


図 3: 3 次元無限粘弾性体中の欠陥に対する逆散乱解析結果(a) x_2 - x_3 断面(b)3 次元可視化における再構成像の一例.

用する研究を行ってきた. 2018 年度は 1 測点の欠陥エコーから空洞欠陥の位置と大きさを推定する研究を試みた. ここでは, (A-2)で開発を行っている有限積分法によるシミュレーション波形を用いた. この結果, 粒子フィルタを用いて欠陥の位置・大きさ推定が良好に実施できることを確認した. なお, 尤度計算に用いる物理量を適切に選定した方が, フィルタリング精度を向上させることがわかった.

5. 今年度の研究成果の詳細

(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・古川)

これまでに開発を続けてきた二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を京都大学の Cray XC40 を用いて MPI-OpenMP ハイブリッド並列化を施し, 計算効率を大幅に削減させることに成功した[M, S, Z]. また, 3 次元異方性弾性波動解析手法を開発し, 一方向 FRP やオステナイト系鋼材に適用し, 一定の成果を得た.

(A-2) 有限要素法・有限積分法・粒子法による

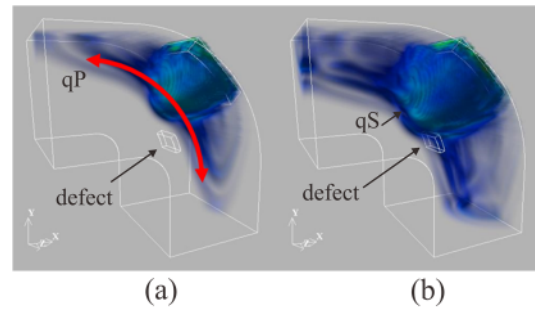


図 4: 異なる時刻における CFRP 中の欠陥に対する 3 次元弾性波動解析結果(a)qP 波が欠陥に到達(b)qS 波も欠陥に到達. qP 波の波面は繊維方向 (両赤矢印曲線) に沿って伝搬していることがわかる.

大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑・溝田)

ステンレス鋼は原子力施設の配管等に多用されており, UT 試験の高度化が急務である. ここでは, 試験体を製作することなく製造条件からステンレス鋼の凝固組織の 3 次元的な分布を予測し, 予測した凝固組織をボクセルベースの陽的更新有限要素法に基づいて, 大規模な超音波伝搬解析を実施する手法を確立した. セルラーオートマトン (CA) 法と有限要素 (FE) 法を組み合わせた静铸造ステンレス鋼の凝固組織を予測する方法 (CAFE 法) を採用し, 優先成長方位を考慮した結晶粒モデルを作成した. CAFE 法により予測した凝固組織を陽解法有限要素法コードに適用し, 3 次元超音波伝搬解析を実施した結果を図 2 に示す. レーザードップラー振動計 (LDV) を用いた計測と比較した結果, 両者は良好な一致を示した. 一方で, 有限積分法や粒子法の大規模計算コードの開発も引き続き行っている. 特に有限積分法は, 予定通りマイクロポーラー弾性波動問題への拡張[U]を, 粒子法は MPI-OpenMP 並列化を施した大規模非線形超音波散乱解析を実行し, 一定の成果を得た.

(B-1) 非均質・異方性・粘弾性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

2018 年度まで開発を続けてきた 2 次元異方性弾性体中の欠陥に対する逆散乱解析法を 3 次元解析へと拡張した. 計算負荷が大きいため, 数値解析例は, 単純なモデルに限定されるが, 一定の成果を得ている. 一方, 今年度より, 粘弾性の性質を

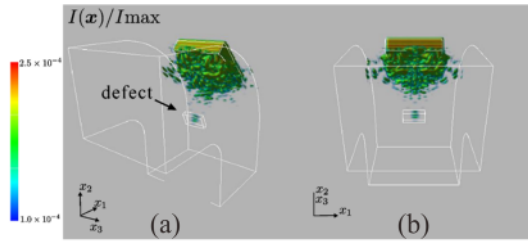


図 5：異なる角度から見た L 字型 CFRP 中の欠陥位置推定結果(a),(b)いずれの可視化結果からわかるように、欠陥位置を正しく推定できていることがわかる。

考慮した場合の逆散乱解析手法の開発に着手した。研究当初は 2 次元問題から取り組む予定としていたが、扱う特殊関数の容易さから、先行して 3 次元解析を行った[V]。図 3 は、無限粘弾性体中の空洞の欠陥形状再構成結果の一例であり、図中の (a), (b) は同一の結果を、それぞれ x_2 - x_3 断面、3 次元可視化で示した結果である。実際の空洞は各図の中央に存在するが、逆散乱解析における欠陥像も中央付近に現れており、粘弾性の影響が加わっても正しく再構成できていることがわかる。

(B-2) 時間反転法やトポロジー最適化による欠陥形状再構成 (斎藤)

2019 年度は、前年度までに開発を行ってきた時間反転法の高度化に関する研究を行った。まず、2018 年度に行った 2 次元 L 字型 CFRP 中の欠陥形状再構成問題を 3 次元問題へ拡張した。なお、このシミュレーションで用いた弾性定数は、前年度までに開発を続けてきた異方性弾性定数推定法 [A,D] を使って求めた結果である。図 4 は、(A-2) で開発を続けている 3 次元有限要素法を用いて L 字型一方向 CFRP 中の弾性波動伝搬を可視化した結果の一例を示している。図 4 より、弾性波は等方に伝搬せず、繊維に沿って伝搬することがわかる。

一方、図 4 で得られた散乱波形を時間反転させ、時間反転波の収束位置の決定にクロススペクトルを用いた場合の欠陥位置推定結果を図 5 に示す [B]。図 5 より、欠陥近傍でクロススペクトルの値は大きくなっており、正しく欠陥を推定できていることがわかる。しかしながら、超音波センサー近傍でもクロススペクトルの値は大きい。そのた

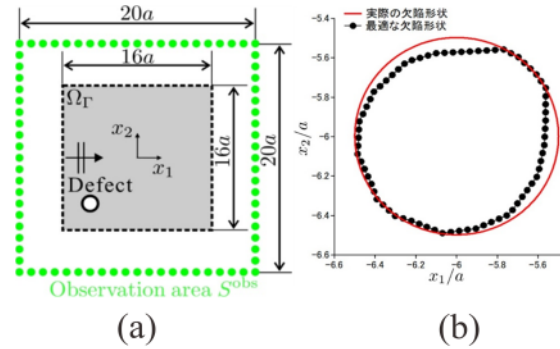


図 6：トポロジー最適化を応用した欠陥形状再構成結果の例(a)解析モデル(b)欠陥形状再構成結果。赤線が正解空洞、黒点線が形状最適化結果を示している。

め、欠陥が超音波センサー近傍にある場合、欠陥を正しく検出できない可能性がある。

一方、欠陥位置のみならず、欠陥の形状もわかれば、破壊力学を駆使した欠陥の進展予測も可能となる可能性がある。そこで、今年度は機械工学の分野で近年注目を集めているトポロジー最適化の利用を試みた。結果の一例を図 6 に示す。図 6(a) の上下、左右から入射波を送信し、散乱波を緑点で受信した後、トポロジー最適化を用いて図 6(a) の欠陥形状を再構成した結果が図 6(b) である。欠陥が固定設計領域の左下に存在するため、散乱波の観測点が欠陥から離れた欠陥右側でやや欠陥形状最適化の精度が劣るものの、概ね、欠陥形状を再構成できていることがわかる。

(B-3) センシングデータを利用した欠陥諸量の推定 (斎藤・中畑)

当初の予定では、中畑が大規模な粒子フィルタの実施と深層学習の適用を実施する予定であったが、斎藤と行った後者の研究成果が良好であったため、ここでは UT に深層学習を適用した一例を報告する。ここでは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による深層学習技術を、Wavefield 可視化 [F] を用いた欠陥の自動判定に適用した。CNN による深層学習の自動判定の精度を上げるには、ラベル付けされた大量の学習データが必要となる。UT の場合、そのような欠陥を含む被検体を数多く用意することは一般に容易ではない。ここでは、(A-1), (A-2) で開発を続ける波動伝搬シ

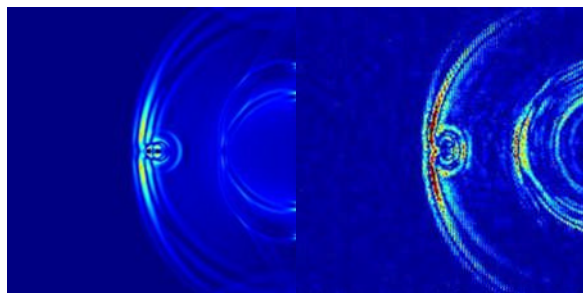


図 7: (左)有限積分法で計算した超音波の可視化 (右) 計測実験で得られた Wavefield 可視化結果.

ミュレーターを援用し、学習用の波動の可視化データを数値的に作成した。図 7 に、有限積分法で計算した結果と、計測で得られた Wavefield 可視化図を示す。ここで、数値的に作成した可視化図を学習データとして CNN モデルを構築した結果、計測データだけを学習させた場合に比べて、欠陥の判定精度の向上が確認できた。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (斎藤・中畑・牛島・小山田・一色)

これまで開発を続けてきた(A-1)における二次元異方性面外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並列化効率を向上させることを行った。並列化には OpenMP-MPI ハイブリッド並列化を行った。拠点研究機関の牛島らの支援の下、計算時間はおよそ 1/8 程度に短縮された[M]。

一方、今後の UT において、機械学習は検査員不足を補う有力な手段になると考えられる。その際、数値シミュレーション結果を如何に効率良く可視化し、機械学習のためのデータへ転用できるかが重要となる。そこで、今年度は、手始めに機械学習の中で画像データと相性の良い深層学習の活用を視野に入れて、弾性波動場の効率的可視化方法を検討した。図 8 は、(A-1)で開発を続ける時間領域境界要素法を用いて、き裂による散乱問題を解析し、き裂周辺の弾性波動場を可視化した結果の一例である。ただし、左上から行読みで右下まで順に、代表的な時間ステップでの結果を示している。このような弾性波動場の可視化画像をビッグデータとして大量に準備し、2020 年度の本格的な深層学習の応用研究に役立てるための効率的

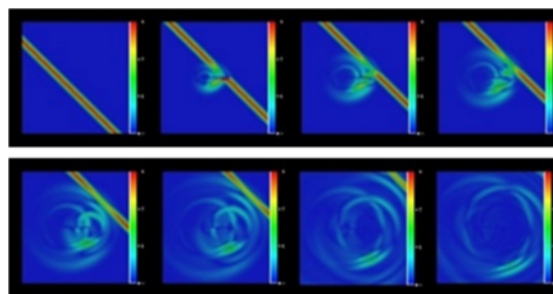


図 8: (A-1)で開発を続ける弾性波動解析シミュレーターを用いた、き裂による入射平面波の散乱画像。入射波は斜め 45 度方向に伝搬。効率的に可視化するシステムを開発した。

可視化方法等について検討した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(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・古川)

本年度開発した 3 次元異方性弾性波動解析手法がやや数値不安定であり、異方性が強くなると数値解が発散する傾向にある。2020 年度はこの点を改善する必要がある。その他は予定通り進展したため、研究成果を論文にまとめる。また、3 次元粘弾性波動問題に対する高速境界要素法の開発に取り組む予定である。

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

これまでに開発した陽的更新有限要素法を実際のモデルに適用することを試みた。2 次元解析では表現できなかった結晶粒の散乱による林状エコーの発生が 3 次元解析では再現できたことは非常に有用な成果である。今後は、粒界散乱による減衰の定量評価を行いたい。また、マイクロポーラー弾性波動問題に対する有限積分法の開発等、その他の成果も解析例を増やし、適宜論文に投稿する。

(B-1) 非均質・異方性・粘弾性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

粘弾性を考慮した解析は、今年度から初めて取り組んでいるが、概ね良好な結果が得られた。定式化の容易さから 3 次元問題を先に取り組んだが、残された 2 次元面内粘弾性波動問題への拡張や、粘弾性を考慮した場合の大規模波動解析手法の開

発等、未解決の多くの課題が残されている。今後は、それらに取り組むこと、今年度の成果を論文にまとめることを行う。

(B-2) 時間反転法やトポロジー最適化による欠陥形状再構成 (斎藤)

予定していた L 字型 CFRP 中の欠陥に対する 3 次元時間反転解析[L]や、トポロジー最適化の UT への応用に関する研究を行い、一定の成果を得た。ただし、トポロジー最適化は最も簡単な 2 次元スカラー波動問題に対する応用に留まっている。また、時間反転法における時間反転波の収束には主にクロススペクトルを用いている。そのため、今後は、2 次元弾性波動問題への拡張、トポロジー感度の時間反転法への応用[E,T]の高精度化等を行う必要があるだろう。

(B-3) センシングデータを利用した欠陥諸量の推定 (斎藤・中畑)

ここでは、主にセンシングと数値解析の融合として機械学習への応用に取り組んだ。欠陥の自動判定率を上げるには、学習データを増やす必要がある、そのためにはシミュレーションデータの活用は非常に有用である。今回、計算した波動場は 2D としたが、この場合、面外波が発生しないため、実測データとは若干異なる。このため、精度を上げるには、詳細な 3D モデリングが必要であろう。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (斎藤・中畑・牛島・小山田・一色)

研究は予定通り進んだ。2020 年度は、機械学習の UT への応用が本格化することから、可視化画像を作成する過程の一部をパッケージ化することが必要だろう。また、今年度、演算子積分時間領域境界要素法にした並列化技術は、引き続き、3 次元解析等へも、随時、適応する予定である。

7. 研究業績一覧 (発表予定も含む)

(1) 学術論文 (査読あり)

A. T. Saitoh, A. Mori, K. Ooashi and K. Nakahata : Development of a new dynamic elastic constant estimation method for FRP and its validation using the FDTD method, *Insight, Nondestructive*

Testing and Condition Monitoring, Vol.61(3), pp.162-165, 2019

B. 前原佑, 斎藤隆泰 : 有限要素法を用いた屈曲 CFRP 中の欠陥に対する 3 次元順解析および時間反転解析, *計算数理工学論文集*, Vol.19, pp.103-108, 2019

C. A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose : SH wave scattering by a frozen porous inclusion in fluid-saturated porous media using two approaches: wave function expansion and boundary element method, *Geophys. J. Int.* vol.219, pp.2187-2197, 2019

D. K. Nakahata, Y.Amano, K.Ogi, K.Mizukami and T.Saitoh: Three-dimensional ultrasonic wave simulation in laminated CFRP using elastic parameters determined from wavefield data, *Composites, PartB*, Vol.176, 107018, DOI: 10.1016/j.compositesb. 2019.107018, 2019

E. 斎藤隆泰, 田代匡彦, 森川光, 木本和志 : トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた時間反転法の 3 次元マトリクスアレイ探傷法への応用, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol.75(2), pp.41-49, 2019

F. 中畑和之, 天野裕維, 溝田裕久, 斎藤隆泰, 木本和志 : Wavefield データを利用した数値モデルの構築と時間反転イメージングへの応用, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol.75(2), pp.71-81, 2019

G. K. Nakahata, K. Karakawa, K.Ogi, K. Mizukami, S. Wada, T. Namita, T. Shiina: Three-dimensional SAFT imaging for anisotropic materials using photoacoustic microscopy, *Ultrasonics*, Vol.98, pp. 82-87, DOI:10.1016/j.ultras. 2019.05.006, 2019

H. 高橋葉太, 中畑和之 : 相反性を用いた構造部材の動的挙動の可視化と選択的波動モードによる欠陥検出, *構造工学論文集*, Vol.65A, pp.264-274, 2019

I. 中畑和之, 黄木景二, 水上孝一, 大平克己, 丸山真幸, 和田智之, 浪田 健, 椎名 毅 : 光音響法による炭素繊維補強樹脂の表面直下剥離の

- 3 次元イメージング, 電気学会論文誌 C, Vol.139(2), pp.142-148, 2019
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
該当なし
- (3) 国際会議発表 (査読なし)
- J. T. Saitoh, M. Tashiro and S. Hirose: Inverse scattering based on topology sensitivity for defect detection using convolution quadrature time-domain BEM for 3-D elastodynamics, ICOM2019, Dalian, China, 2019
- K. A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Time-domain finite element method for wave propagation in fluid-saturated porous solid, APCOM2019, Taipei, Taiwan, 2019
- L. Y. Maehara and T. Saitoh: Reconstruction of delamination in L-shaped unidirectional CFRP using 3-D time-reversal method, APCOM2019, Taipei, Taiwan, 2019
- M. T. Saitoh, T. Onodera, Y. Suzuki and Y. Ito: Large-scale elastic wave propagation in anisotropic materials using parallelized convolution quadrature time-domain boundary element method APCOM2019, Taipei, Taiwan, 2019
- (4) 国内会議発表 (査読なし)
- N. T. Saitoh: Application of various forward and inverse scattering techniques to non-destructive testing, 京都大学数理解析研究所, 偏微分方程式による逆問題解析とその周辺, 京都大学, 2020 年 1 月 10 日 (招待講演)
- O. 田代匡彦, 森川光, 斎藤隆泰: 超音波マトリクスアレイ探触子の利用を想定したトポロジー感度法による散乱体決定解析, 第 24 回計算工学講演会, 大宮ソニックシティ, 2019 年 5 月 29 日
- P. 前原佑, 斎藤隆泰: L 字 CFRP 中の層間剥離に対する 3 次元時間反転解析, 第 24 回計算工学講演会, 大宮ソニックシティ, 2019 年 5 月 29 日
- Q. 前原佑, 斎藤隆泰: 時間反転法を用いた L 字型 CFRP 中の欠陥に対する三次元逆散乱解析, 第 22 回応用力学シンポジウム・第 65 回理論応用力学講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2019 年 6 月 29 日
- R. 中畑和之, 天野裕維, 溝田裕久, 斎藤隆泰, 木本和志: Wavefield データを利用した数値モデルの構築と時間反転イメージングへの応用, 第 22 回応用力学シンポジウム・第 65 回理論応用力学講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2019 年 6 月 30 日
- S. 小野寺貴, 斎藤隆泰: 並列化された演算子積分時間領域境界要素法を用いた異方性弾性体中のき裂群に対する 2 次元大規模多重散乱解析, 日本機械学会 2019 年茨城講演会, 茨城大学日立キャンパス, 2019 年 8 月 22 日
- T. 石黒明日海, 田代匡彦, 斎藤隆泰: トポロジー感度と二次元時間反転法を用いた欠陥の推定, 2019 年度非破壊検査協会秋季講演大会, 広島 RCC 文化センター, 2019 年 11 月 12 日
- U. 鈴木悠介, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: FDTD 法を用いたマイクロポーラー弾性体中の 2 次元弾性波動解析, 土木学会関東支部 第 47 回技術研究発表会, 講演番号 I-14, 日本大学理工学部船橋キャンパス, 2020 年 3 月 4 日
- V. 竹田晴彦, 斎藤隆泰: 演算子積分時間領域境界要素法を用いた 3 次元粘弾性波動解析, 土木学会関東支部 第 47 回技術研究発表会, 講演番号 I-13, 日本大学理工学部船橋キャンパス, 2020 年 3 月 4 日
- (5) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)
- W. 斎藤隆泰: 波動解析と時間領域境界要素法, 計算工学, Vol.24(3), pp.13-16, 2019 (日本計算工学会誌の特集記事)
- X. 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を用いた様々な材料の波動解析, 計算工学, Vol.24(3), pp.9-12, 2019 (日本計算工学会誌の特集記事)
- Y. 斎藤隆泰: 音響異方性材料中の超音波伝搬シミュレーション, 非破壊検査, Vol.68(2), pp.78-83, 2019 (非破壊検査協会誌の解説記事)
- Z. 斎藤隆泰: 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高性能化, 京都大学学術情報メディアセンター全国共同利用版[広報], Vol.18(1), pp.37-40, 2019