

jh200052-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(UT)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、MUSIC アルゴリズム等を用いた。また 2017 年度から行った本研究の最終年度として、2021 年度以降の新たな研究展開を視野に AI の活用も行い、その有効性も示した。

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

【齋藤隆泰・群馬大学・研究代表者】

本研究を統括している。境界要素法等を用いた大規模弾性波動解析や逆解析手法の開発、機械学習の応用に携わる。

【中畑和之・愛媛大学・副研究代表者】

有限要素法や有限積分法を用いた大規模波動解析、欠陥イメージング、機械学習の応用に関する研究に携わる。

【古川陽・北海道大学】

境界要素法の研究開発に携わっている。

【加藤毅・群馬大学】

機械学習の非破壊評価への応用に携わる。

【丸山泰蔵・愛媛大学】

境界要素法に関する研究やスパースモデリングの欠陥イメージングに関する研究に携わる。

【牛島省・小山田耕二・京都大学】

並列化や計算結果のポスト処理の効率化、機械学習に関する有益な助言を頂いている。

【一色正晴・愛媛大学】

大規模データの取り扱いや、計算結果の可視化の一部、機械学習の応用に携わる。

【田代匡彦・鈴木悠介・竹田晴彦(以上群馬大学)、三木陽大・齋藤泰彦(以上愛媛大学)】

計算実行、解析結果のデータ整理等に携わる。

2. 研究の目的と意義

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。特に超音波非破壊検査(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きた。しかし、コンクリートのような非均質材料や、繊維強化プラスチックといった非均質・異方性材料中の超音波伝搬挙動は極めて複雑なため、それらに対する UT は確立されていない。このような中、申請者らは、H29 年度より非均質・異方性材料中の欠陥に対する順解析や逆解析手法の開発に関する研究を行い、計算力学を駆使した新しい非破壊検査法を提案してきた。しかしながら、残された課題は数多い。R2 年度は引き続きターゲットを非均質・異方性材料と定めつつ、これまで行ってこなかった、マイクロポーラー弾性波動論の適用や、粘弾性材料への応用も試みた。一方で、非破壊検査業界では、将来の検査技術者

不足が懸念されている。そこで、R2 年度は近年のトレンドである機械学習やスパースモデリングを取り入れた UT の高度化に資する研究を試験的に実施することを試みた。すなわち、本年度の研究目的、内容は後の 5 節で示すように決定した。

近年は、検査対象となる材料は複雑化の一途を辿る。将来の検査技術者不足が懸念される中で、このような検査すら難しい現状を打開するブレイクスルーの創出には、Society5.0 で提唱されるようなシミュレーションや情報技術の積極的な利用を欠かすことはできない。実際、FRP の持つ音響異方性は、現場の技術者が容易に想定できない波動伝搬を引き起こすことから、本研究で取り組んで来た超音波伝搬の映像化が定量的 UT に大きく貢献する。実際、例えばコンクリート中の骨材分布は、横回転波と呼ばれる特殊な波動を発生させるとの指摘もある。また FRP におけるプリプレグの積層構造等のモデル化の実現は、超音波センサの送受信位置や周波数の最適化、精度の良い欠陥再構成手法の開発へ繋がり、UT の実施を大きくアシストすると思われる。R2 年度は、このような非均質・異方性材料に対する波動伝播解析と非破壊検査への応用に関する研究の最終年度とし、今後必須となる機械学習までを UT に取り入れて、3 年間に渡った本研究課題を総括する。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。したがって、土木や建築、航空宇宙や自動車産業、原子力機器に至る様々な分野で必要とされる UT の高度化に資する本研究が、社会的に重要な課題であることは自明であるが、5 節で示す最新の数値解析手法やアルゴリズムの開発は、学術的新規性をも多く含んだ学際的な研究であると言える。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

コンクリートや FRP は、要求性能に応じてそれぞれ配合や含有繊維の配向等が変化する。そのため対象材料に合わせた詳細モデルを作成することになる。また、超音波の波長は数 mm 程度である

ため、精度の良い数値シミュレーションの実行には代表波長の 20 分の 1 程度の要素長が要求される。しかも FRP 中の補強繊維まで厳密にモデル化する場合、メゾスケール構造も考慮しなければならない。よって、解析は必然的に大規模なものとなる。このような研究の効率化には、OpenMP や MPI を用いた並列化は欠かせない。また、解析前後のプリ・ポストプロセスの効率化も重要であろう。一方、学術的に高いレベルでの成果を創出するには、非破壊検査専門の研究者のみならず、材料や弾性波動を熟知した力学の研究者、そして、それらを離散モデルとして扱うことができる計算力学を専門とする研究者らが、大型計算機を使用できる環境下で相互連携して研究を行う必要がある。また、効率的な計算コードの開発にはハードウェアにも詳しく、コードチューニングを得意とする研究者やプリ・ポスト処理の専門家の参画も必要であろう。機械学習を取り入れるには、情報系の研究者も必要となる。本研究で主体となる研究者達は、主に地方国立大学に籍を置く。各研究室単位で、クラスター計算機を用意し、管理・運営し続けることは、経済的にも難しく、時間も取られる。しかも、例えば研究代表者の所属機関である群馬大学では、学外からの研究室サーバーの接続は VPN 接続が必須で、学内の講習会を受講した学内の研究者、研究室の学生に限られる。そのため、現状、ハード面でこれだけの挑戦的な課題を実施するには、拠点研究機関のサポートが必須であろう。このように、本研究は、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り、大規模波動解析が実施できる環境下でのみ、効率的かつ実践的な研究展開が可能となると考え、本申請に至った。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本年度同様に、前年度までの研究は 5 節で示すように、(A) 順解析手法の開発 (B) 逆解析手法の開発 (C) 並列化や効率化に関する研究に大別される。2017 年度から続いた (A)-(C) に対する主な研究成果はそれぞれ下記の通りである。

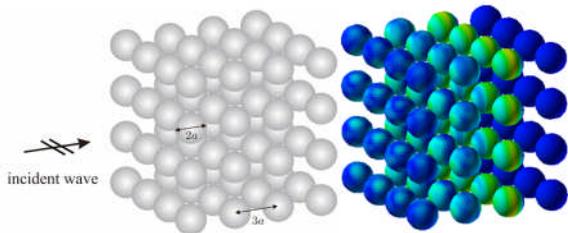


図 1: 3次元粘弾性波動場における入射波の散乱問題解析結果(左) 解析モデル(右) ある時刻における空洞群の変位の可視化結果。

(A) 順解析手法の開発

非均質・異方性材料に対する様々な弾性波動解析手法を開発した。具体的には、無限遠を扱う必要がある波動問題に対しては、2次元、3次元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の開発、Sinc法を用いた新しい境界要素法の開発を行った。また、一部の波動問題には高速多重極法等の高速化アルゴリズムを取り入れて、大規模問題への対応を行った。一方、時間領域有限要素法や有限積分法(FIT)についても、異方性問題への適用や、時間領域境界要素法との結合解法を開発し、提案手法の妥当性を示した。粒子法については、二次元弾性波動問題に対する粒子法コードを開発し、新しい非破壊検査手法である非線形超音波法へ適用することで、その有効性を示した。なお、ここで開発した順解析手法は、(B)の逆解析手法の妥当性を検証するための波形データを作成するためにも数多く利用された。

(B) 逆解析手法の開発

一般的に UT の最終目的は、欠陥の位置や形状等を推定することである。これまでの研究で数々の逆解析手法を開発した。例えば、Born 近似や Kirchhoff 近似をベースとした 2次元異方性弾性体中の空洞やき裂に対する逆散乱解析手法を開発した。また粘弾性波動問題に対しては、3次元問題まで定式化を行い、既に解析結果を示している。また、時間反転法を用いた異方性弾性体中の欠陥形状再構成手法の開発や、トポロジー感度法と時間反転法を組み合わせた逆解析手法の開発も、2次元、3次元スカラー波動問題を対象に定式化を示

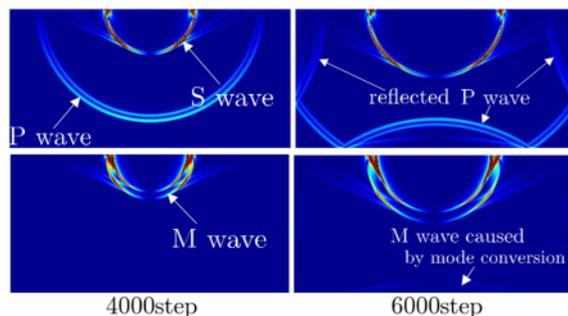


図 2: 動弾性有限要素法を用いたマイクロポラー弾性体中の波動伝搬の可視化結果(上段)通常の縦波,横波の伝搬(下段)横回転波の伝搬の可視化結果。

し、妥当な結果が得られている。さらに、粒子フィルタを用いた散乱波からの欠陥の性状判別や、光音響イメージングによる CFRP 内部の可視化を行い、それらの妥当性も示してきた。

(C) 並列化や効率化に関する研究

(A)や(B)で開発した数値解析手法を拠点研究先の計算機を用いて並列化する研究を行った。例えば(A)で開発した異方性弾性波動問題に対する時間領域境界要素法は、計算負荷が極めて大きい。また、UTにおける逆解析手法も、同様に計算不可が大きい。現場での欠陥の可視化を考えれば、用いる逆解析手法は高速である方が望ましい。以上のことから、拠点研究先と連携し、これらのプログラムの高度化等についての研究を実施した。いずれの場合も、計算時間は大幅に短縮された。また、並列化だけでなく、計算結果の効率的な可視化手法についても検討した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(A) 弾性波動の順解析と大規模問題への応用

(A-1) 境界要素法による弾性波動解析手法の開発 (斎藤・古川・丸山)

予定通り 3次元粘弾性波動問題に対する時間領域境界要素法の開発に関する研究に着手した。また拠点研究機関の計算機を効果的に利用し、図 1 に示すような大規模問題を解析することで、その有効性を確認した。図 1 は、空洞群に入射平面波が水平方向に入射した場合の空洞群周辺の変位を可視化した結果である。入射波の到達と共に、空

洞周辺の変位が大きくなるのがわかる。なお、この計算は、自由度が大きく、通常の計算機では実行できない。そのため、拠点研究機関のシステム A を用いたスーパーコンピューター集中利用時に、MPI と OpenMP のハイブリッド並列化を用いて解析した。

(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)

これまでに開発してきた有限要素法等を用いた弾性波動解析手法のコードを洗練しつつ、予定通りマイクロポーラー弾性波動問題への拡張等を行った。図 2 は動弾性有限積分法(EFIT)を用いて、マイクロポーラー弾性体中を伝搬する弾性波動場を可視化した結果の一例を示している。マイクロポーラー弾性体では、正弦波を一波入射させる等すると、それに伴い、図 2 下段のように、横回転波(M-wave)と呼ばれる波動が発生する。通常の固体中では、図 2 上段のように、縦波(P-wave)と横波(S-wave)しか発生しない。なお、図 2 右下の図では、縦波が底面に到達した後に、モード変換による横回転波の発生を見ることができる。

(B) 弾性波動の逆解析と非破壊検査への応用

(B-1) トポロジー感度法と時間反転法を組み合わせた欠陥形状再構成(斎藤)

これまで開発を続けてきたスカラー波動問題を対象としたトポロジー感度法と時間反転法を組み合わせた欠陥形状再構成手法を、2次元弾性波動問題へと拡張した。一方で、さらに、近年機械工学の分野で発展を続けているトポロジー最適化法を取り入れて、単に欠陥の位置のみを推定するだけでなく、与えられた条件化で、どの程度欠陥形状までを再構成できるかについても検討した。結果の一例を、図 3 に示す。図 3 の再構成結果は、正解の空洞を各図に示す左下の赤丸とし、空洞の初期形状を中央に配置した場合の各トポロジー最適化ステップにおける欠陥形状再構成結果を示している。この図より、3 ステップ目では、初期位置の空洞が小さくなると同時に、正解欠陥位置に空洞が発生していることがわかる。10 ステップ目では、初期位置に配置した空洞は消滅し、正解位置

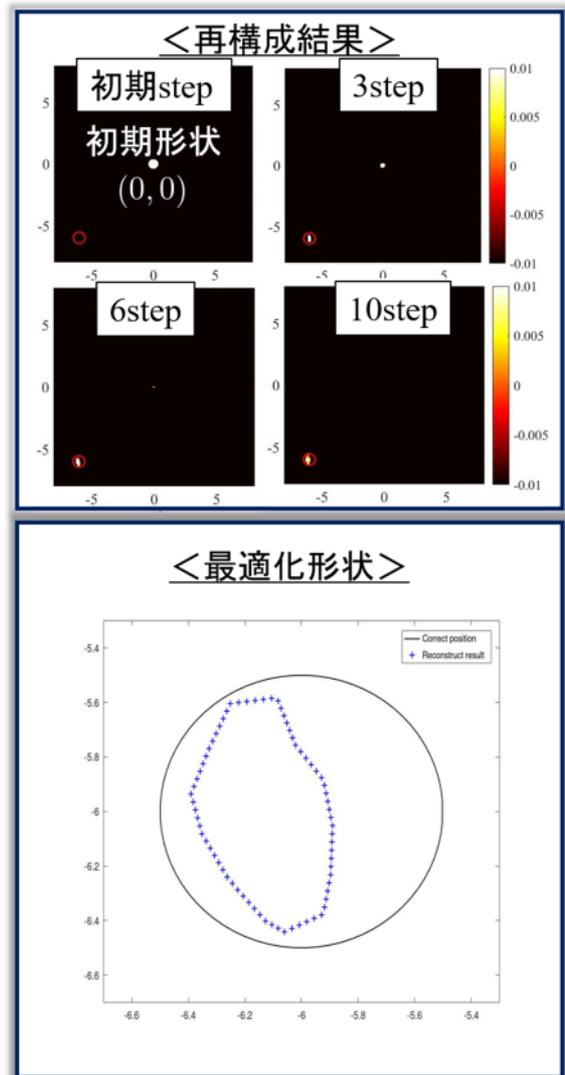


図 3:2 次元弾性波動問題における時間反転法とトポロジー最適化を用いた欠陥形状再構成結果の一例。上段図は各最適化ステップにおける欠陥形状再構成結果、下段図は 10 ステップ目における欠陥形状再構成結果の拡大図を示している。

に空洞が出現している。また、10 ステップ目の空洞最適化形状の拡大図を図 3 の下段に示す。なお、黒実線は正解の空洞を示していることに注意されたい。ここで示した解析結果では、入射平面波を左側から送信し、可視化領域の四方で取得した散乱波を用いて欠陥形状を再構成している。そのため、入射波が欠陥に直接当たる左側は、比較的、欠陥形状に近い形に再構成されていることがわかる。

(B-2) 光音響効果を利用した開口合成法による欠陥イメージング(中畑)

本年度は理化学研究所が開発した小型レーザー

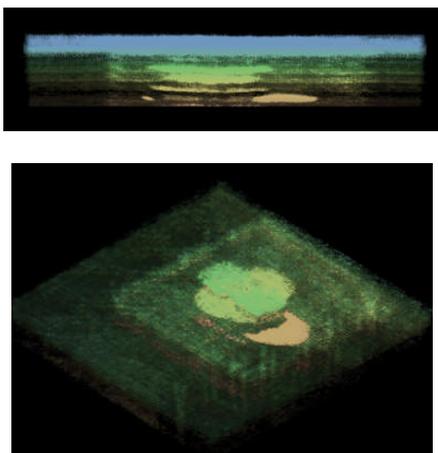


図 4：理化学研究所の小型レーザ光源を用いた CFRP 中の打痕きずの 3 次元映像化（上：断面図，下：鳥瞰図）。

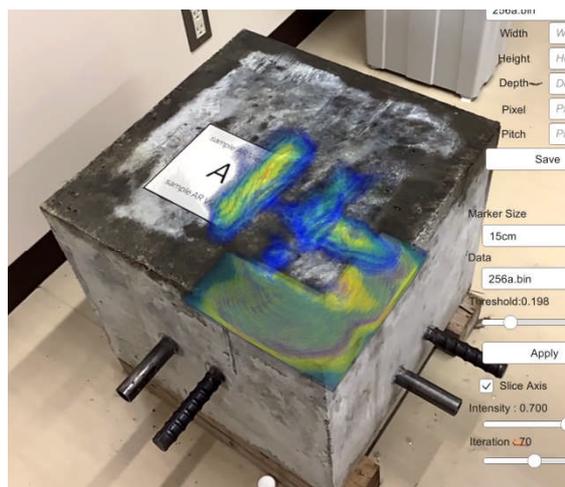


図 6：欠陥イメージング結果の AR 表示。

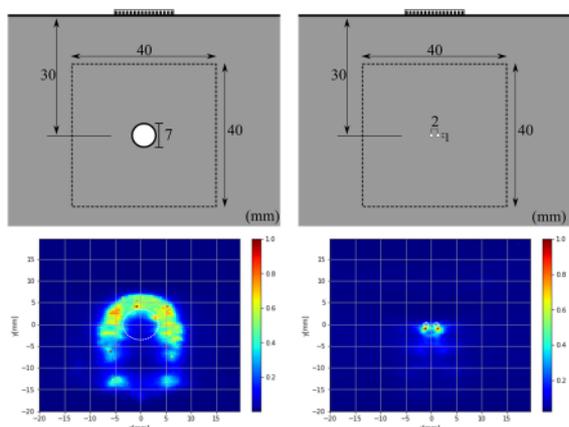


図 5：複数周波数を用いた MUSIC アルゴリズムによる超音波アレイイメージング結果（上）解析モデル（下）イメージング結果。

を用いて検証を行った。R2 年度の中間報告以降に、開口合成法のマルチ GPU 並列計算への実装が完了しており、図 4 はその高速解法による映像化結果である。CFRP では、図 4 上段に示すように、層間剥離きずが問題となる。図 4 は CFRP 中の打痕きずの 3D 映像化結果であり、良好に内部きずがイメージングされている。

(B-3) スパースモデリングを利用した多チャンネル欠陥イメージング（中畑・丸山）

2 次元スカラー波動場に対する複数周波数を用いた MUSIC アルゴリズムによるイメージング手法を構築し、数値波形を用いた精度検証を行った結果の一例を図 5 に示す。図 5 はアレイ探触子を用いた試験体中央に大きいきずが 1 つ（左列）、小さいきずが 2 つ（右列）存在する場合のイメー

ジング結果を示している。単一周波数の場合に比べてイメージング結果画像のシャープさは落ちるものの、安定かつ良好なイメージングが可能であることが確認された。

(C-1) 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）

京都大学学術情報メディアセンターの牛島・小山田らと連携し、波動解析の並列化やポスト処理の助言を頂いた。また、近年、盛んに研究が行われている AR 技術をポスト処理に実装した。コンクリート中の鉄筋イメージングを実際の被検体にマージさせた AR 可視化結果の一例を図 6 に示す。図 6 より、AR による可視化結果は、実際の鉄筋配置位置の上部に示されており、UT による結果を検査員が容易に確認できるような工夫を施すことができた。

(C-2) 機械学習への応用（斎藤・中畑・加藤・小山田・一色）

レーザー超音波可視化試験 (LUVT) では、レーザー照射面の超音波伝搬を可視化することができる。この可視化結果から、照射面近傍に欠陥がある場合は、散乱波の発生を検査員が目で確認することで、欠陥の有無を判断できる。しかしながら、この確認をもし AI に代替できれば、検査の一部を効率的に実施できる可能性がある。本研究では、まず、有限積分法や境界要素法等の数値解析手法を用いて LUVT と同等の超音波伝搬画像を作成した。

図 7 はそれら結果の一例を示している。図 7(左) は EFIT で得られた結果，図 7(右) は実際の LUVT で得られた結果を示しており，両者はよく一致している。このような LUVT やシミュレーションにより作成された画像を深層学習させ，AI のプロトタイプを作成した。画像中の欠陥の有無を判定する分類問題を解くことで，欠陥の有無を精度良く判定することができた。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(A) 弾性波動の順解析と大規模問題への応用

(A-1) 境界要素法による弾性波動解析手法の開発 (斎藤・古川・丸山)

(A-1)で掲げた目的は，大規模な粘弾性波動解析手法の開発である。本研究の一部は国際会議[10]で発表している。また，逆解析への応用は査読付論文[2]で発表している。複数散乱体への応用結果は，査読を経て Springer 社の Lecture Notes シリーズに掲載が決定した[7]。また，図 1 に示したような大規模計算の結果は Int. J. computational methods に投稿し，現在査読中であることから，今年度は概ね予定通り研究が進んだと言える。今後は，高速多重極法を適用した場合の計算効率の確認を行い，H-matrix 法等の他の高速化手法との比較を行い，開発手法のさらなる高度化を目指す予定である。

(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)

(A-2)の最大の目標であるマイクロポーラー弾性体中の波動解析手法の開発は，図 2 で示すように EFIT を用いて成し遂げられた。この結果は国際会議[8]で発表している。また，実際の欠陥を想定した場合の解析結果や，マイクロポーラー弾性波動場における分散特性に関する考察は，R3 年度の国際会議[11]で発表することが決まっております。順調に目的を達成した。今後は，境界要素法等の他の数値解析手法を用いた場合のマイクロポーラー弾性波動問題の定式化を目指す。また，粒子法を用いた弾性波動場の大規模解析結果も文献[18]で示した。なお，文献[18]でも，拠点研究機関にお

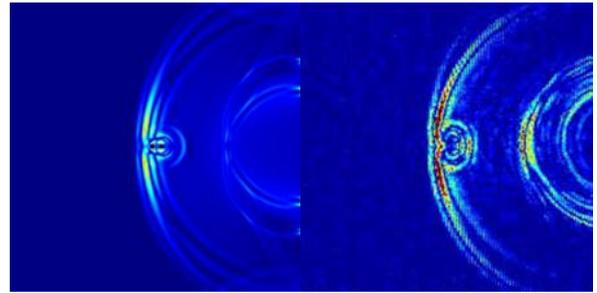


図 7: (左)有限積分法で計算した超音波の可視化 (右) 計測実験で得られた Wavefield 可視化結果。

ける集中利用期間に MPI と OpenMP のハイブリッド並列を施した。

(B) 弾性波動の逆解析と非破壊検査への応用

(B-1) トポロジー感度法と時間反転法を組み合わせた欠陥形状再構成 (斎藤)

当初の予定通り，2次元弾性波動問題におけるトポロジー感度法と時間反転法を組み合わせた欠陥形状再構成手法を開発し，目的を達成した。実際，トポロジー感度のみを用いた場合の結果は，国内会議[14]や国際会議[9]，査読付き論文[1]で発表している。薄板中の欠陥に対する適用例は，9月に Structural Engineering and Mechanics に投稿し，現在査読中である。トポロジー最適化を用いた欠陥形状再構成も，年末に完成し，年度末に国内会議[15]で発表している。以上より，当初の目的は順調に達成したため，R3 年度以降，成果を論文化する。今後は 3次元弾性波動問題への拡張や，実験で得られた波形の適応を検討している。

(B-2) 光音響効果を利用した開口合成法による欠陥イメージング (中畑)

マルチ GPU 計算法の導入について，予定通り遂行できたので，今後は，周波数 SAFT のコーディングにも着手したい。また，エアプローブを用いた完全非接触の開口合成イメージング法の開発を進め，成果を論文化する予定である。

(B-3) スパースモデリングを利用した多チャンネル欠陥イメージング (中畑・丸山)

文献[16]で発表したように，MUSIC アルゴリズムを用いた欠陥イメージング手法を開発することができた。しかしながら，R2 年度は，高速化に着

手できなかったため、次年度以降は、まずは共有メモリ型解法を実装する。次に、MPI を適用したハイブリット並列化や、GPU の利用も検討する予定である。また、実験波形を取り入れて、提案手法の妥当性の確認も行う予定である。

なお、(A)、(B)のテーマで開発した順解析や逆解析手法の一部は、拠点研究機関における伝統ある雑誌（文献[21]）で紹介した。

(C-1) 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)

引き続き並列化及びポスト処理の効率化に取り組む予定である。また図 6 で示した AR への応用は、今後様々な UT への応用が期待できる。

(C-2) 機械学習への応用(斎藤・中畑・加藤・小山田・一色)

当初の目標であった波動場の形態から、欠陥の有無や種別を判定することができた。その結果の一部は文献[19]で発表している。本研究により、検査員同様に、AI は欠陥からの散乱波を追跡して欠陥の有無や種別を推定していることがわかった。また、実際の LUVT で得られた画像中の欠陥の有無の判定については論文[20]で、時間領域境界要素法で得られた画像を用いて欠陥種別の判定までを行った結果は論文[5]で、LUVT 実験と有限積分法の両画像を用いて AI のプロトタイプを作成した結果は論文[3]で発表しており、当初の目的は十分達成されたと考える。今後は、AI の高精度化、欠陥形状再構成問題への応用等を行う予定である。また、AI やデジタルツイン等を活かした今後の展望についても文献[4]で示した。

なお、今年度は、2017 年度から開始した本研究課題の最終年度に当たる。4 年間で非均質・異方性材料に対する様々な順解析手法・逆解析手法の開発を行い、UT に応用してきた。今後は、引き続き、それら開発手法の高度化に取り組むと共に、AI を用いたそれら手法や UT 自体の高度化、デジタルツインを活かした UT 検査への応用が期待される。2021 年度は、本研究課題を基礎とした新たな研究課題「NDE4.0 の実現に向けた高性能波動解析技術とデータサイエンスの融合」の採択が決まり、既

に研究を開始している。引き続き、拠点研究機関と連携し、本研究課題、新研究課題における成果を創出する予定である。

7. 研究業績一覧（発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない）

(1) 学術論文（査読あり）

- [1] 田代匡彦・斎藤隆泰・木本和志: トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた二次元動弾性時間反転解析とリニアアレイ探傷法への応用, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 76, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 22), p. I_15-I_24, (2020)
 - [2] 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粘弾性体中の空洞に対する 3 次元順解析および逆散乱解析, 計算数理工学論文集, vol. 20, pp. 1-6, (2020)
 - [3] 都築幸乃・斎藤泰彦・中畑和之・蓑輪里歩・斎藤隆泰: 畳み込みニューラルネットワークを用いた Wavefield データからの表面欠陥の自動検出, AI・データサイエンスシンポジウム論文集, vol. 1 J1 号 pp. 339-348, (2020)
 - [4] 斎藤隆泰・石黒明日海・蓑輪里歩: シミュレーションを活用したデジタルツイン非破壊評価に対する展望, 非破壊検査, vol. 70, No. 2, pp. 59-64, (2021)
 - [5] 斎藤隆泰・加藤毅・廣瀬壮一: 時間領域境界要素法で求めた散乱波動場の深層学習と欠陥種別の判定の試み, 非破壊検査, (2021) (掲載決定済)
 - [6] K. Nakahata, T. Maruyama, S. Hirose: Application of a Particle Filter to Flaw Identification for Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Assimilation of Simulated and Measured Data, Journal of Nondestructive Evaluation (40), pp.34-45, (2021)
- ### (2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）
- [7] H. Takeda and T. Saitoh: 3-D forward and inverse scattering analyses for cavity in viscoelastic media using convolution quadrature time-domain boundary element method, Lecture notes in Civil Engineering, Springer (掲載決定済), (2021)

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [8] Y. Suzuki and T. Saitoh: Time-domain analysis of wave propagation in micropolar elastic solids using 2-D EFIT, The world congress on advances in civil, environmental & materials research, Seoul, Korea, 2020 年 8 月 27 日発表 (オンライン)
- [9] A. Ishiguro and T. Saitoh: Surface crack detection in thin plate using time reversal analysis of SH guided waves, The world congress on advances in civil, environmental & materials research, Seoul, Korea, 2020 年 8 月 27 日発表 (オンライン)
- [10] H. Takeda and T. Saitoh: 3-D inverse scattering analysis for defect in viscoelastic media using convolution quadrature time-domain boundary element method, WCCM-ECCOMAS, 2021 年 1 月 11 日-15 日発表 (オンライン)
- [11] Y. Suzuki, T. Saitoh and S. Hirose: Analysis of transient elastic wave scattering by cavity in micropolar elastic solids using 2-D M-EFIT, ICCM 2021 年 7 月発表予定, 採択決定済

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [12] 鈴木悠介・斎藤隆泰・廣瀬壮一: 2次元動弾性有限積分法を用いたマイクロポーラー弾性体中の時間領域波動解析, 第 23 回応用力学シンポジウム, S02C-03, 2020 年 5 月 16 日発表 (オンライン, 第一著者の修士学生が応用力学シンポジウム講演賞を授賞)
- [13] 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球状空洞に対する 3 次元粘弾性波動散乱解析, 令和 2 年度土木学会全国大会, 2020 年 9 月 7 日-11 日発表 (オンライン, 発表者の修士学生が土木学会全国大会優秀論文賞を授賞)
- [14] 石黒明日海・斎藤隆泰・中畑和之: 時間反転法とトポロジー感度を用いた薄板表面欠陥の検出, 2020 年度非破壊検査秋季講演大会 2020 年 10 月 29 日発表 (オンライン, 発表者の修士学生が土木学会全国大会優秀論文賞を授賞)
- [15] 田代匡彦・山崎文也・斎藤隆泰: 二次元等方弾性体中におけるトポロジー最適化を用いた欠

陥形状再構成, 土木学会関東支部 第 48 回技術研究発表会, 2021 年 3 月 2 日発表(オンライン)

- [16] 松尾太聖・丸山泰蔵・中畑和之: MUSIC 法によるアレイ超音波イメージングの基礎的検討, 第 28 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2021 年 1 月 25 日-26 日発表 (オンライン)
- [17] 竹田晴彦・松原江里・斎藤隆泰: レーザー超音波可視化試験を用いた CFRP-コンクリートの未接着部分の検討, 令和 3 年度安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム, 2021 年 3 月 29 日発表 (オンライン, 発表者の学生が非破壊検査協会新進賞を授賞)
- [18] 井上拓海・斎藤隆泰: MPI 並列化された粒子法による 2 次元等方性弾性波動解析, 日本機械学会 2020 年茨城講演会, 2020 年 8 月 21 日発表 (オンライン)

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)

- [19] 斎藤隆泰・蓑輪里歩: 超音波伝搬に対する深層学習の試み, 超音波 TECHNO, vol. 32(3), pp. 42-47, (2020)
- [20] 蓑輪里歩・斎藤隆泰・加藤毅: レーザ超音波可視化試験に対する深層学習, 検査技術, vol. 25(6), pp. 1-7, (2020)
- [21] 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講究録 2174, RIMS 共同研究 (公開型), pp. 93-107, (2021)