

jh210033-NAH

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

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。これまで、このような大規模計算を効率的に実施するために、HPCI-JHPCN の支援の下、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を行って来た。本年度より、これまで培ってきた波動解析手法と機械学習等のデータサイエンスを融合させ、Industry4.0 に準えて非破壊評価の分野で提唱された NDE4.0 の実現に向けた新しい波動解析技術・逆解析技術等の開発に取り組む。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する。逆解析には、時間反転法や逆散乱解析、トポロジー最適化、MUSIC アルゴリズム、FSAP 等を用いた。NDE4.0 に資する解析結果等を示し、提案手法の有効性を示した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

北海道大学, 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】

主に境界要素法の研究開発や有限要素法を用いたレーザー超音波シミュレーションに携わる。

【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。

【岩下武史・北海道大学】

境界要素法の並列化や大規模問題解析のための H-matrix 法の適用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。

【鈴木悠介, 竹田晴彦・(以上群馬大学), 松尾太聖・愛媛大学, 堀合孝太郎・北海道大学】

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

工業部品や構造物の健全度評価に非破壊検査が行われている。特に、超音波を用いた非破壊検査(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いる。超音波は固体中で弾性波の性質を示すため、弾性波の特性を把握し、有効活用することが UT の高度化に寄与することは言うまでもない。しかしながら、UT で対象とする超音波の波長は数 mm 程度であるため、高精度な数値解析を行うために必要な計算要素長は、この

数十分の一程度にする必要がある。よって、僅か数センチ角の試験体に対する 3 次元解析でさえ、一般的には大規模計算が必要となる。そのため、申請者らは、2017 年度から 2020 年度まで、HPCI-JHPCN による支援の下、「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」に関する研究を継続して行い、複雑材料に対する大規模波動解析手法を開発し、良好な審査結果を頂いてきた。最終年度である 2020 年度は、Society5.0 や、次節で説明する NDE4.0 等の概念が提唱され、データサイエンスの工学への応用に注目が集まっている点を踏まえ、試験的に機械学習を取り入れた AI 非破壊検査の基礎研究にも着手し、UT の効率化・高度化を目指す準備を行った。

以上の背景より、2021 年度から、新たに研究課題を「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」と定め、データサイエンスと計算力学を融合させた新しい UT の開発を目的に、以下の 5. で詳述するテーマの研究に取り組むこととした。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

NDE4.0とは、Industry4.0 に準えて非破壊評価の分野で提唱された概念である。Industry4.0 と同様、デジタルイゼーションによる非破壊検査の高度化・効率化のための技術開発やデータの交換・管理などの改革を描いたロードマップが NDE4.0 である。NDE4.0 の主導権を獲得するために、欧米では国家プロジェクトとして革新的技術の開発に取り組みつつある。我々、日本の研究者らの強みは、これまでの HPCI-JHPCN で培ってきた高性能計算技術と逆解析技術である。我々の研究グループでは、現実的な数値モデルを用いて大規模計算ができるため、実大実験が主流である今の非破壊検査に、デジタルツインを導入できることが最大の特徴である。つまり、現実世界の様々な機器や材料の状況をセンシングし、サイバー空間上にデジタルツインとして再現することで、検査の高度化だけでなく、予防保全にも資する技術となる。本研究で提案する革新的 UT 技術を、日本が

掲げる NDE4.0 の目玉とするためには、共同研究による技術の検証や改善は非常に大きな意義を持つ。

非破壊検査は、元来、機械、土木、建築、電気等、様々な分野で実施されている。そのため、本研究で実施するような最先端のプロジェクトを掲げ、実行する場合、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だろう。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る。NDE4.0 の実現には、データサイエンスに精通した研究者の協力も必要だろう。特に、次節で述べる我々の研究計画は、いくつかの研究項目が同時に進行するが、最終的なゴールは、いずれもデジタルツインとして実装可能な UT モデルの構築である。しかも、今年度から申請した新たな課題は、データサイエンスを取り入れた新しい UT モデルの開発も目指すこととし、これまでの数理的モデリングに加えてデータ駆動型のアプローチを含む学際的研究となる。

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き、応用力学や計算力学、弾性波動論、非破壊評価には詳しいものの、大型計算機を各自の所属大学で利用できない者が多い。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、大型計算機を有する拠点研究機関のサポートが必須であろう。一方、拠点研究機関で協力を仰ぐ研究者は、ハード面やデータサイエンス等に詳しい。本研究は、このような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

該当しない。

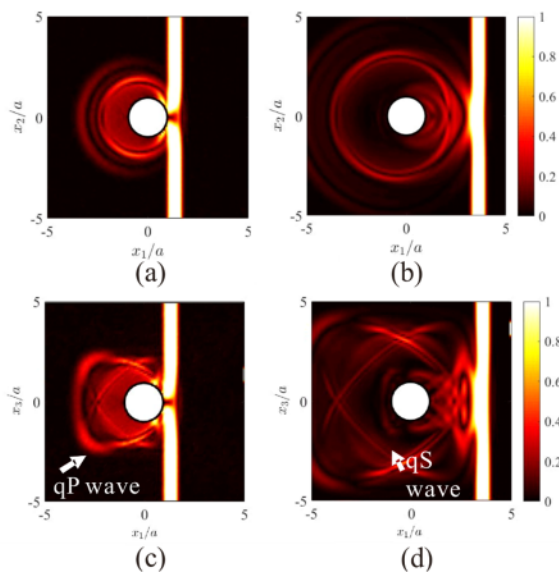


図 1: オステナイト系鋼材中の空洞による入射波の散乱解析結果(a),(b) x_1 - x_2 平面 (c),(d) x_1 - x_3 平面の結果.

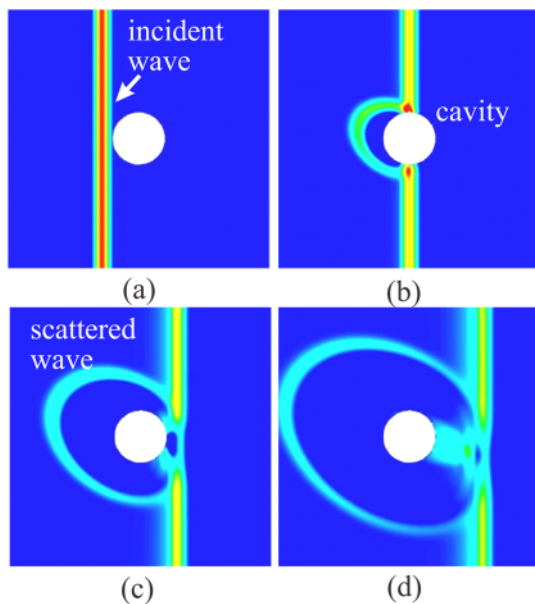


図 2: 異方性主軸が 45 度傾いたグラファイトエポキシ中の空洞による入射波の散乱解析結果.

5. 今年度の研究成果の詳細

今年度の研究計画は下記のように (A)-(C) に分類される. それぞれの計画に対する成果を区分して紹介する.

(A) 弾性波動シミュレーターの高度化

A-1) 異方性および粘弾性を考慮した新しい時間領域境界要素法の開発 (斎藤・古川・丸山・牛島・岩下)

本年度は, 著者らが開発を続けてきた演算子積

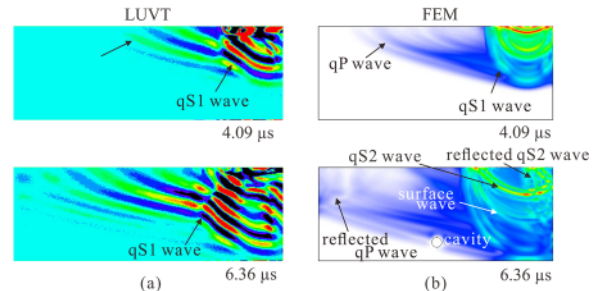


図 3: LUVT と求めた弾性定数を入力データとして与えた有限要素法による CFRP 内部の波動伝搬解析結果の例(a) LUVT 結果(b) 有限要素法結果.

分時間領域境界要素法を 3 次元粘弾性波動問題および 3 次元異方性弾性波動問題に拡張した. それぞれ, 空洞による散乱解析結果を示すことで, 本手法の妥当性を示した(図 1). なお, これら 3 次元解析手法の一部は, 超特異積分方程式を解く必要がある, き裂による弾性波動散乱解析へも拡張した. 一方で, 粘弾性および異方性の両者を考慮した演算子積分時間領域境界要素法は, これまでに例はない. そこで, 本研究では, その初めての試みとして, 2 次元純面外波動問題を対象に, 異方性および粘弾性の両者を考慮した演算子積分時間領域境界要素法を開発した. 空洞による入射平面波の散乱問題を解くことで, 提案手法の有効性等を示した(図 2). なお, ここでは, 牛島の助言により過去に拠点研究機関に並列化を施して頂いたコードを一部参考に, 並列化を実装した.

A-2) 有限要素法・有限差分法を用いたレーザー超音波シミュレーション (斎藤・中畑・丸山・古川)

NDE4.0 では遠隔検査の導入が目標として掲げられており, レーザー超音波はそれを実現できる技術の 1 つである. 本研究では有限要素法や有限差分法を用いてレーザー超音波により励起される超音波を解析する手法の開発を行った. 図 3(a)に, レーザー超音波を用いて CFRP 試験体表面の超音波伝搬を可視化(LUVT)した結果を, 図 3(b)に有限要素法で解析した結果を示す. なお, 解析が必要となる CFRP の弾性定数は, 機械学習により求められている. 図 3 より, LUVT における受信側探触子のモデル化を行ってないため, 励起されている波動の数に若干の差異はあるものの, CFRP 中の波動伝搬の波面はよく一致していることがわかる.

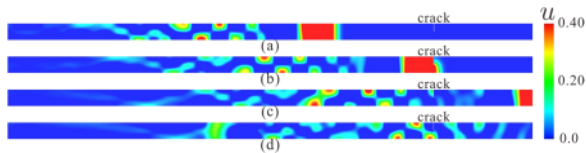


図 4: 有限要素法を用いた板内部の欠陥による板波の散乱解析結果(順解析).

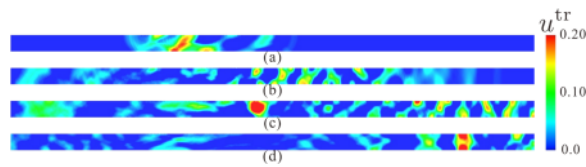


図 5: 有限要素法を用いた板内部の欠陥による板波の時間反転解析結果(逆解析).

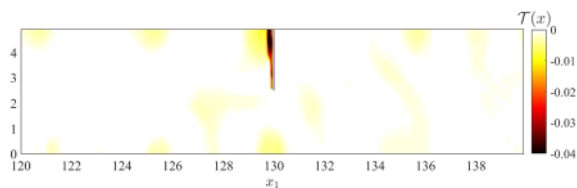


図 6: トポロジー感度を用いた表面き裂の再構成結果.

(B) 逆解析の高度化とセンシング計測データの応用

B-1) 時間反転法を用いた欠陥形状再構成手法の開発 (斎藤・中畑・丸山)

デジタルツイン非破壊評価では、実際と同等の試験体を仮想空間で作成する。本研究では、計測波形を時間反転させ、仮想空間上で再入射させることで、再入射した波動の集束位置より欠陥を検出する時間反転法をデジタルツイン UT における第一の逆解析手法として検討することを行った。その際、近年機械工学の分野で注目を集めているトポロジー最適化の概念を取り入れて、材料内部の欠陥形状を再構成する方法について検討した。ここでは、まず、厚板中の欠陥に対する解析を行い、次に、板波が発生する薄板中の欠陥を対象とした検討を実施することで、提案手法の有効性を示した。図 4-6 に板波中の表面き裂を映像化した結果の一例を示す。図 4 で示すように、有限要素解析により、表面き裂による散乱波動場を求める。次に、図 5 のように得られた散乱波形を時間反転させ、薄板中に再入射させる時間反転解析を実施し、トポロジー感度を計算することで、図 6 のよ

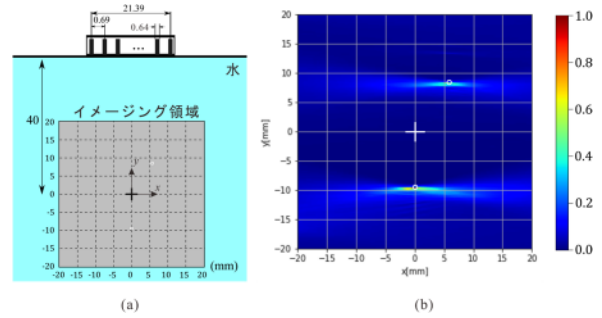


図 7: 水中の 2 つの散乱源に対するリニアアレイ探触子の実測データを入力とした複数周波数 MUSIC による超音波イメージング結果(a) 解析モデル (b) イメージング結果.

うな表面き裂の映像化を行っている。

B-2) 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手法の開発 (中畑・丸山)

センシング技術の進歩によって、多点で大量の散乱波データが得られるようになった。しかし、闇雲なデータセンシングは問題を ill-posed にすることに繋がる懸念がある。ここでは、大量のデータから主要因となるデータを抽出する技術であるスパースモデリングを用いた欠陥イメージング手法を検討する。ここでは、Multiple Signal Classification (MUSIC) と呼ばれる逆解析手法を 3 次元弾性波動場に拡張した新しい MUSIC アルゴリズムを開発した。その結果の一例を図 7 に示す。図 7 は、水中の 2 つの散乱体に対するリニアアレイ探触子の実測データを入力とした複数周波数 MUSIC による (a) 解析モデルと (b) 超音波イメージング結果である。なお、図 7 (b) 中の白丸は、実際の散乱体を示している。開発した MUSIC アルゴリズムにより、正しく 2 つの散乱体をイメージングできていることがわかる。

(C) AI の UT への応用

C-1) 転移学習を用いた人工知能レーザー超音波非破壊評価手法の開発 (斎藤・中畑・一色)

医療の分野では、AI を用いた画像診断が積極的に検討されている。しかし UT の場合、材料や欠陥種別に多様性があること、画像の規格も現場によって様々であること等が要因で、機械学習に必要な数多くの計測データを集めることは容易ではない。そこで、本研究ではレーザー超音波非破壊

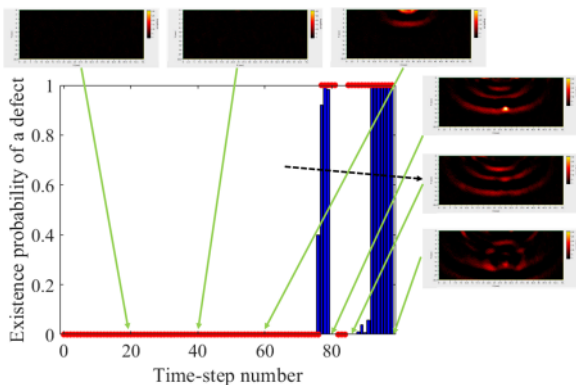


図 8 : LUVT と AI を用いたアルミニウム試験体中の欠陥の検出例.

評価(LUVT)をターゲットに、AI を組み込むことを考える。申請者らは、レーザーを用いて試験体表面の超音波伝搬を計測実験により直接可視化し、時系列データとして画像化できる。ここでは、(A) 等で開発した境界要素法や有限要素法による弾性波動解析手法を用いてレーザー超音波の数値シミュレーションを実施し、その波動伝搬を深層学習することで、LUVT に対する AI のプロトタイプを作成した。その後、深層学習のアルゴリズムを改良し、転移学習を行うことで、AI の精度を向上させる試みを行った。結果の一例を図 8 に示す。図 8 は、開発した AI を用いて LUVT で得られる時系列超音波伝搬画像中の欠陥の有無を判定した結果であり、横軸が時系列番号、縦軸が欠陥存在確率を示している。また、周囲に代表的な時間ステップにおける LUVT 画像を示している。超音波が欠陥に到達するまでは、散乱波が発生しないため、欠陥の存在確率はゼロとなっている。しかしながら、超音波が発生し、人間の目で散乱波を確認できる状態(70 ステップ後半)になると、欠陥の存在確率が上昇していることがわかる。

C-2) 機械学習を利用した画像補完による超音波イメージングの高精度化 (中畑・丸山・小山田)

水等を介して超音波を固体内部に送信し、固体内部の欠陥を映像化する場面が、特に遠隔検査において数多く存在する。その際、水と固体の界面で超音波が屈折するため、正しく界面形状を捕捉しないと内部欠陥の映像化精度が格段に劣ることが問題となる。そこで、本研究では、機械学習を

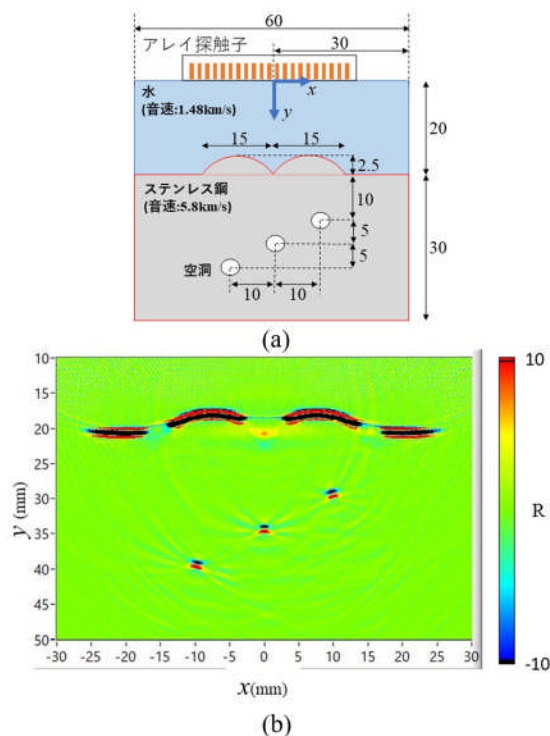


図 9 : 粒子フィルタを用いたアダプティブ FSAP 方式の高精度化(a)解析モデル (b)イメージング結果.

導入することにより、界面を正確に補完する技術を開発した。学習データセットを増やすためにデジタルツインを作成し、シミュレーションを援用した AI 開発を試みた。解析の一例を図 9 に示す。図 9(a)のような水とステンレス鋼から成る二層体中のステンレス鋼側に存在する 3 つの空洞をイメージングする。その際、2 層体の界面形状を機械学習と粒子フィルタで最適化しながら、内部欠陥の形状の再構成精度を向上させる。図 9(b)より、界面形状と欠陥の両者を、共に正しくイメージングできていることがわかる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

5 章と同様に、今年度の進捗状況と今後の展望を (A)-(C) に区分して説明する。なお、本研究は R4 年度の継続研究課題として採択されている。また、本研究成果等に関する招待講演を 6. (6) に示した。関連学会で本研究における成果を数多く発表している。

(A) 弾性波動シミュレーターの高度化

A-1) 異方性および粘弾性を考慮した新しい時間領域境界要素法の開発 (斎藤・古川・丸山・牛島・

岩下)

今年度の主な目標は、3次元粘弾性波動問題および3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開発し、具体的な大規模波動解析を実行すること、および2次元純面外異方性粘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することであった。3次元粘弾性波動解析については、国際学術論文[2]で、3次元異方性弾性波動解析については論文[7]のように採択されており、一定の成果を出すことができた。いずれも拠点研究機関の計算機によるハイブリッド並列化を実施している。H-matrix法の適用については、若干の数値誤差が見られるため、引き続き岩下と意見交換し検討する。一方、粘弾性かつ異方性を示す純面外波動解析についても、論文[3]で採択され、十分な成果を残せたと考えている。今後は、2次元純面内波動問題へと拡張する予定であるが、定式化は終わっており、簡単な解析例を国際会議[12]で発表する予定となっている。

A-2) 有限要素法・有限差分法を用いたレーザー超音波シミュレーション(斎藤・中畑・丸山・古川)

有限要素法・有限差分法を用いたレーザー超音波シミュレーションを予定通り実行した。有限差分法を用いた場合の解析例は国内会議[18]で発表している。また、有限要素法を用いた場合の解析例は、同様に国内会議[20]で発表を予定している。なお、有限要素法の3次元解析例は、国際会議[11]での発表が決まっており、順調に成果を挙げている。今後は、有限差分法を用いた場合の3次元解析例の発表や、これら結果の論文掲載を目指す。

(B) 逆解析の高度化とセンシング計測データの応用**B-1) 時間反転法を用いた欠陥形状再構成手法の開発(斎藤・中畑・丸山)**

予定通り、厚板と薄板の両者を対象に、時間反転法にトポロジー最適化の概念を取り入れた欠陥形状再構成手法を開発した。厚板を想定した解析例は、国内会議[17]で発表している。一方、薄板を対象とした場合は、解析の対象とする周波数とモードの関係を十分に把握しておくことが重要で

ある。そのため、まず、薄板内部に発生する分散性について検討し[8]、後に薄板中のSH板波を用いた場合の数値解析例を示した。この結果は、国際学術論文[5]に採択されている。なお、無限領域を想定した場合の3次元解析の基礎的検討結果は国内論文[1]で採択されている。また、論文[5]を面内波動問題へと拡張した場合の簡単な数値解析例については、国内学会[21]で発表することが決まっている。今後は、実際の計測波形を用いた場合の欠陥形状再構成についても検討を進めるとともに、3次元問題への拡張を検討する。

B-2) 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手法の開発(中畑・丸山)

今年度の目標は、深層学習と対極にある、スパースモデリングを用いた欠陥イメージング手法の開発であった。予定通り、弾性波動場を対象にMUSICアルゴリズムによる多チャンネル欠陥イメージング手法を開発した。ここでの解析例は、国内学会[14][15]で発表している。なお、これらの計算は、数値解析だけでなく、実際の計測実験で得られた波形に対しても実施し、その有効性を示している。今後は、これらの成果を学術論文へ投稿することとなる。また、スパースモデリングを用いた場合の、欠陥形状再構成精度を定量的に評価することも今後の課題である。

(C) AIのUTへの応用**C-1) 転移学習を用いた人工知能レーザー超音波非破壊評価手法の開発(斎藤・中畑・一色)**

今年度は実際のLUVT非破壊評価のAI化を目指し、実際のLUVT計測で得られた画像に対する深層学習、LUVT画像に相当する数値解析結果に対する深層学習を実施した後、両者を組み合わせた転移学習を実施することを目標に掲げた。まず、LUVT画像に相当する数値解析結果に対する深層学習は、国内査読付き論文[3]にまとめている。一方、実際のLUVT計測で得られた画像に対しては、例えば国内学会発表[22]を行っている。また、両者を組み合わせた転移学習を用いた基礎的な結果は、招待講演[28]等で発表している。詳細な検討は今後の課題であるが、概ね予定通り研究を進め

ることができている。今後は、本手法の詳細を査読付き論文に投稿すること、転移学習の欠陥形状再構成への応用等を行う予定である。

C-2) 機械学習を利用した画像補完による超音波イメージングの高精度化 (中畑・丸山・小山田)

今年度掲げた目標は、水と固体の界面において、界面が凹凸を含む場合に、その界面を捕捉し、かつ固体中の欠陥形状を再構成する方法を検討することであった。ここではシミュレーション結果を援用した機械学習を実施することで、本目的を達成した。これまでに開発したデータ同化を応用した再構成手法について、国内発表[19]を行った一方で、機械学習を組み合わせた本研究内容を国内査読付き論文[6]にまとめている。そのため、本年度掲げた目標を十分に達成できていると考える。今後は、小山田の助言の下、機械学習の高精度化を進めつつ、現場への応用を検討する。

7. 研究業績一覧

(1) 学術論文 (査読あり)

- [1] 斎藤隆泰・田代匡彦・木本和志：トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた 3 次元動弾性時間反転解析による欠陥形状再構成, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 77(2), I_69-I_79, (2021)
- [2] T. Saitoh and H. Takeda: Convolution quadrature time-domain boundary element method for viscoelastic wave scattering by many cavities in 3-D infinite space, *Int. J. Computational Methods*, pp. 2141020-1,2141020-15, (2021)
- [3] 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, pp.272-279, Vol.70(7), (2021)
- [4] 斎藤隆泰・竹田晴彦・古川陽・廣瀬壮一: 2次元純面外異方性・粘弾性波動問題における演算子積分時間領域境界要素法, 計算数理工学論文集, vol.21, pp.9-16, (2021)
- [5] T. Saitoh and A. Ishiguro: Surface crack detection in a thin plate using time reversal analysis of SH guided waves, *Int. J. Structural Engineering and Mechanics*, Vol.80(3), pp.243-251, (2021)

- [6] 中畑和之・都築雪乃・牧田陽行・林恭平・丸山泰蔵: 機械学習による界面補完を援用した二層体に対するアレイ超音波イメージング, *AI・データサイエンス論文集*, vol.2(J2), pp.466-474, (2021)
- [7] 斎藤隆泰・古川陽・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異方性弾性体中の空洞による 3 次元弾性波動散乱解析, 計算数理工学論文集, vol.21, pp.81-88,(2021)
- [8] K. Kanda and T. Maruyama: Theoretical analysis of the dispersion of Lamb waves forming a wave packet of finite-bandwidth using the method of multiple scales, *Int. J. Solids and Structures*, vol.234-235, 111268, (2022)
- [9] M. Nagai, S. Lin and K. Nakahata: Ultrasonic wave propagation analysis in cast stainless steel with solidification grain structure predicted by cellular automation finite element approach, *J. Pressure Vessel Technology*, Transactions of the ASME, Vol.143(5), 051503, (2021)
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
- [10] H. Takeda, T. Saitoh and S. Hirose: 3-D forward and inverse scattering analyses for cavity in viscoelastic media using convolution quadrature time-domain boundary element method, *Proc. 4th Int. conf. Numerical modelling in Engineering*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol.217, pp. 41-58, (2021)
- (3) 国際会議発表 (査読なし)
- [11] S. Toyoda, T. Saitoh, K. Nakahata and S. Hirose: Development of a new elastic constant estimation method for uni-directional CFRP using LUVT and machine learning, 7th US-Japan NDT Symposium, Waikoloa, HI, 2022 年 8 月発表予定
- [12] T. Saitoh, A. Furukawa and S. Hirose: Convolution quadrature time-domain boundary element method for 2-D pure inplane anisotropic viscoelastodynamics, 15th World congress on computational mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational mechanics (APCOM-VIII), 2022 年 7 月発表予定
- [13] T. Saitoh, K. Kato and S. Hirose: Deep-learning for wave propagation images in CFRP and its application

to laser ultrasonic non-destructive testing, Mechanistic Machine Learning and Digital Twins for Computational Science, Engineering & Technology MMLDT-2021 2021 年 9 月 26-30 日(オンライン)

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[14] 松尾太聖・丸山泰蔵・中畑和之：複数周波数を用いた MUSIC 法の超音波イメージングへの応用に関する研究, 日本機械学会 2021 年度年次大会, 2021 年 9 月 5 日-8 日 (オンライン)

[15] 松尾太聖・丸山泰蔵・中畑和之：複数の周波数を利用した MUSIC 法による超音波イメージングの基礎的検討, 令和 3 年度土木学会四国支部第 27 回技術研究発表会, 2021 年 5 月 29 日 (オンライン)

[16] 鈴木悠介・斎藤隆泰: 演算子積分時間領域境界要素法を用いたき裂による 3 次元粘弾性波動散乱解析, 日本機械学会 2021 年茨城講演会講演論文集, OS1-(1)-101, 2021 年 8 月 19 日 (オンライン)

[17]丸山泰蔵・片桐凜久・中畑和之・斎藤隆泰: トポロジー感度に基づいた超音波イメージングの基礎的検討, 日本非破壊検査協会, 2021 年度秋季講演大会, 2021 年 11 月 10-11 日 (オンライン)

[18] 三木陽大・丸山泰蔵・中畑和之: 動弾性・音響有限積分法によるレーザー超音波の数値シミュレーション, 第 29 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2022 年 1 月 24-25 日 (オンライン)

[19] 斎藤泰彦・林恭平・丸山泰蔵・中畑和之: データ同化を利用したアダプティブ FSAP の精度向上に関する検討, 第 29 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2022 年 1 月 24-25 日(オンライン)

[20] 豊田哲志・斎藤隆泰・中畑和之: 機械学習を用いた一方向 CFRP に対する新しい弾性定数推定法の開発, 第 66 回理論応用力学講演会, 2022 年 6 月発表予定

[21] 豊田哲志・斎藤隆泰・木本和志: トポロジー感度を用いた薄板中の表面き裂に対する 2 次元動弾性時間反転解析, 第 27 回計算工学講演会, 2022 年 6 月発表予定

[22] 加藤毅・小西裕貴・斎藤隆泰: 深層学習を用いたレーザー超音波可視化試験における欠陥検出

と位置推定, 第 29 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 2022 年 1 月 24-25 日 (オンライン)

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (招待講演)

[23] T. Saitoh: Convolution quadrature based time-domain boundary element method for wave propagation, IUTAM symposium, Computational methods for large-scale and complex wave problems, 2021 年 6 月 25 日発表 (オンライン)

[24] 斎藤隆泰:NDE4.0 へ向けた応用力学・計算力学とデータサイエンス, 令和 3 年度土木学会全国大会, 研究討論会, 2021 年 9 月 7 日発表 (オンライン)

[25] 斎藤隆泰:波動解析と人工知能 -非破壊検査への応用を中心に-, 京都大学学術情報メディアセンターセミナー「超並列計算の地震・工学設計への応用例と AI を利用する計算力学の展望」, 2021 年 12 月 14 日発表 (ハイブリッド, 京都大学)

[26] T. Saitoh: Forward and inverse scattering analyses for defects in anisotropic and viscoelastic solids, Theory and practice in inverse problems, 京都大学 RIMS 研究集会, 2022 年 1 月 7 日発表 (オンライン)

[27] T. Saitoh: Inverse scattering for a cavity in 2-D anisotropic and viscoelastic solids, Practical inverse problems and their prospects, 九州大学 Math for industry 研究所, 2022 年 3 月 3 日発表 (オンライン)

[28] 斎藤隆泰:計算力学や AI を活かしたデジタルツイン非破壊評価に対する展望, 2022 年日本音響学会春季研究発表会, スペシャルセッション-非破壊検査における AI と ICT 活用の動向-, 2022 年 3 月 9 日発表 (オンライン)

[29] 中畑和之: 非破壊検査の DX-NDE4.0 の概念とアカデミーの貢献-, 2022 年日本音響学会秋季研究発表会, スペシャルセッション-非破壊検査における AI と ICT 活用の動向-2022 年 3 月 9 日発表 (オンライン)