13th Symposium

jh210033-NAH

Joint Usage / Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures



斎藤隆泰(群馬大学)

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

研究拠点:京都大学,北海道大学,研究分野:超大規模数值計算系応用分野

メンバー構成:愛媛大学(中畑和之,一色正晴,丸山泰蔵,三木陽大,齋藤泰彦,松尾太聖),京都大学(牛島省,小山田耕二) 北海道大学(岩下武史,古川陽,堀合孝太郎),群馬大学(鈴木悠介,竹田晴彦)

研究の背景と目的 2 共同研究として実施する必要性 3研究の意義 我々,日本の研究者らの強みは、このJHPCNで培ってきた高性能 金属を伝搬するMHz帯域の超音波の波長は数mm程度であるため、現実的 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 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 超音波を用いた非破壊検査(UT)は,現場適用が比較的簡単であるため,なシミュレーションを実行するには代表波長の数十分の1程度の要素長や 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 最も広く利用されている. 超音波は固体中で弾性波の特性を示すため, 弾┃格子幅が要求される. そのため, 数cm角の試験体に対する3次元シミュレ 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 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┃ションでさえ,解析は大規模なものとなる.しかも,非均質材料や異方性を有 言うまでもない. そのため, 2017年度から2020年度まで, HPCI-JHPCNによ。する材料では, モデル化も複雑になり, 場合によっては, モデルやデータの 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 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」バラツキを考慮した確率論的アプローチも必要になろう、従って、解析は必 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 発と非破壊検査への応用」に関する研究を継続して行ってきた.一方で,┃然的に大規模かつ多数回実施することになる.また,本研究で主体となる研 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 2020年度は本2021年度への新課題への取組を視野に、試験的に機械学 究者達は、主に地方国立大学に籍を置く.現状、ハード面でこれだけの挑戦 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、 習を取り入れ,将来のAI非破壊検査を視野に入れた基礎的研究にも着手┃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 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. してきた.そこで2021年度より,新たに研究課題を「NDE4.0の実現に向けた 必須である.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 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し、こ 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 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 スと計算力学を融合させた新しいUTの開発を目的とする む学際的な研究となる 境下でのみ、効率的かつ実践的な研究展開が可能になると考える。



(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

異方性や粘弾性を考慮した時間領域境界要素法は,近年,演算子積 分法を適用することで進展した.しかし,両者を考慮した時間領域境界 要素法は見当たらない.本研究では、二次元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 法を開発する.加えて、三次元粘弾性体や異方性弾性体中のき裂によ る散乱問題を解析する演算子積分時間領域境界要素法の解析コード の開発やH-matrix法を演算子積分時間領域境界要素法に適用する方



図1:純面外波を対象とした異方性・粘弾性に対する演算子積分時間領域 境界要素法による数値解析例(左)群速度曲線,(右)空洞による散乱解析結果



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.本研究では、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.昨年度に着手したMUltiple SIgnal Classification(MUSIC)はスカラー 波動場において基礎検討が終わった(図8)ので、本年度は3次元弾性 波動場に拡張したMUSICアルゴリズムを検討する.



(A-2)有限要素法や有限差分法を 用いたレーザー超音波シミュレーション

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. レーザー超音波では、レー ザー光の照射による熱膨張効果で超音波が発生する. レーザーの波長 やパルス幅によって発生する超音波の性質が異なるため、これらの制御 を目的とし、本研究では有限要素法や有限差分法を用いて熱弾性効果 を取り入れた弾性波動シミュレーション手法を開発する.



(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

本研究ではレーザー超音波非破壊評価をターゲットに、AIを組み込むことを考える. 我々は、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(図7). 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. その後、この学習結果を実際のレーザー超音波可視化試 験結果による深層学習に転移させることで、学習に必要な画像データを数 値シミュレーションで補完したAIによるレーザー超音波UTの開発を試みる.



(B-1)時間反転法を用いた 欠陥形状再構成手法の開発

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. ここでは、実際の計測で得られたデータを時間反転させ、仮 想空間上で再入射させることで、再入射した波動の収束位置より欠陥 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. 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する.



図3:フォーカス入射を用いた場合の時間反転法による欠陥形状再構成 (左)解析モデル,(右)欠陥形状再構成結果.



水などを介して超音波を固体内部に送信する場合,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きずの映像 化精度が格段に劣ることが問題となる.この形状捕捉のためにフェーズ ドアレイ探触子による映像化を行うが,界面が凹凸を有する場合は,一 部の界面が映像化されない.ここで,機械学習を導入することにより,界 面を正確に補完する技術を開発する.



図4:複数周波数を用いたMUSICによる空洞のイメージング結果. (アレイ探触子を想定した数値シミュレーション波形を使用)

図5:CFRP中の欠陥検出のための転移学習における数値解析結果

(大量の画像を学習し,実験画像と融合)

5これまでの研究成果

研究代表者らは、2017年度から2020年度の4年間に 「非均質・異方性材料中を伝搬する弾性波動解析手 法の開発と非均質への応用」という題目で、HPCI-JHPCNの支援を受けてきた. 音響異方性の性質を示 すCFRP中の超音波シミュレーション(図7)や、コンク リートのような非均質材料中の超音波シミュレーション 手法を開発し、非破壊検査へと応用してきた. また、実 務への応用を想定し、センシング計測データを用いた 材料内部の欠陥形状再構成手法(図8)等も行ってき た. ここで開発した超音波シミュレーション手法や、逆 解析手法は引き続き本研究でも利用される.



Japan High Performance Computing and Networking plus Large-scale Data Analyzing and Information Systems

2021年7月9日

