

jh200052-NAH

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



斎藤隆泰(群馬大学)

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



研究拠点: 京都大学, 研究分野: 超大規模数値計算系応用分野

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, 斎藤泰彦), 北海道大学(古川陽), 京都大学(牛島省, 小山田耕二), 群馬大学(田代匡彦, 鈴木悠介, 竹田晴彦)

1 研究の背景と目的

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、超音波を用いた非破壊検査(UT)は、現場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、コンクリートのような非均質材料や、航空宇宙分野等で応用が進むFRPといった非均質・異方性材料の超音波は複雑な伝搬挙動を示すため、それらに対する効率的なUT技術の開発が急務となる。この点に着目し、申請者らのグループは、複雑材料中の大規模弾性波動解析手法の開発等を行っており、過去の間審査等においても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。そこで、R2年度もターゲットを非均質・異方性材料と定め、次世代のUTに資する計算技術の開発を目的とする。

2 共同研究として実施する必要性

コンクリートやFRPは、要求性能に応じてそれぞれの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は、メソ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。このように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、それらを離散化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。

3 研究の意義

検査対象となる材料は複雑化の一途を辿る一方で、将来の検査技術者不足が懸念されている。このような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利用が欠かせない。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。また、コンクリート中の骨材分布や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に繋がりを、UTの実施を大きくアシストするだろう。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の意義は極めて大きい。

4 研究計画

(A-1) BEMを用いた弾性波動解析手法の開発

UTでは、超音波の伝搬距離に比べて欠陥の大きさは十分に小さい。そのため、解析モデルを無限弾性体中の欠陥による弾性波動散乱問題とすると便利であり、そのための大規模弾性波動解析手法の開発を模索することは有意義である。H29年度以降、高速多重極法を用いた高速化やSinc法を用いた高度化等を提案し、R元年度は3次元異方性弾性波動問題の新しい時間領域境界要素法を開発した。R2年度は、FRPの粘弾性効果を検討するため、粘弾性波動問題に対する3次元高速境界要素法の開発に着手する。

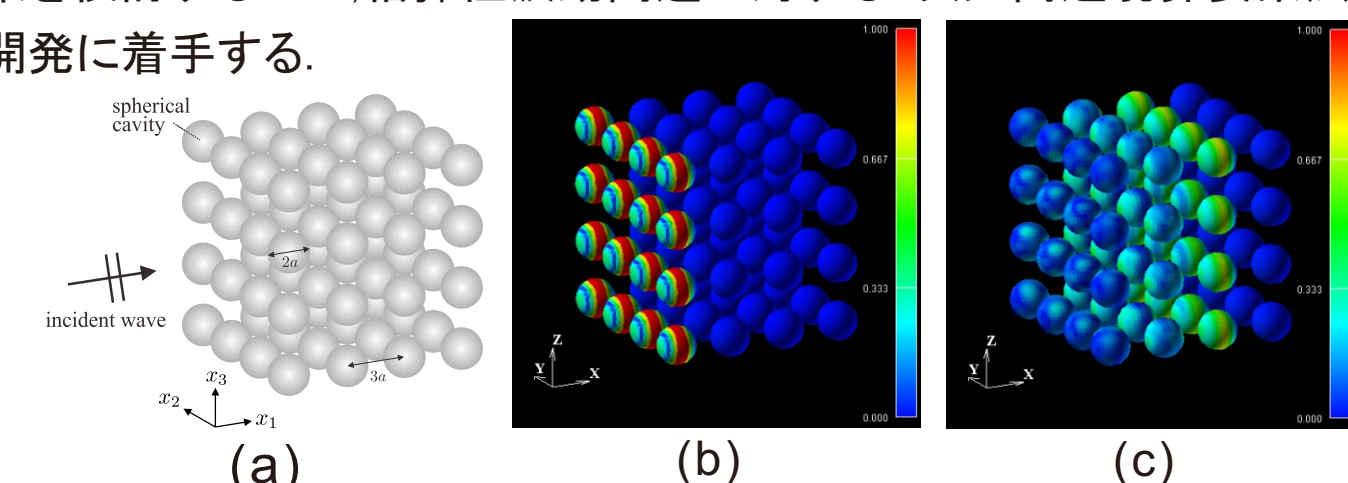


図1: 空洞群による大規模粘弾性波動解析結果(a)解析モデル, (b),(c)様々な時刻における粘弾性波動解析可視化結果。

(B-2) 光音響波を利用した開口合成法による欠陥イメージング

航空機産業で非破壊検査の需要が高まっており、完全非破壊で短時間での検査が望まれている。そこで、センサを片側に設置し、一方向アクセスでの検査ができれば便利である。これまでレーザー光を照射し、光音響効果によって発生した超音波を用いて、構造部材内部の欠陥をイメージングする試みに取り組んできた。CFRP等では、音響異方性のために波動音速が方向に依存するため、これらを考慮したイメージング法の構築が必要となる。ここでは、図4に示すように、時間域/周波数域開口合成法(SAFT)を利用して、特に表面直下欠陥の3次元イメージングの精度向上を図る。

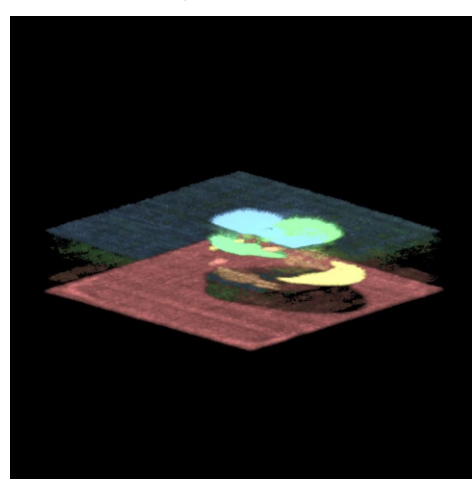


図4: 面波源SAFTによる映像化結果。

(A-2) FEM・FDMを用いた弾性波動解析手法の開発

境界要素法は、均質材料の波動伝搬解析には極めて有効な手法となるが、非均質材料の扱いは難しい。そのため、非均質性を考慮する場合は有限要素法(FEM)や有限差分法(FDM)を使用し、大規模弾性波動解析を実行してきた。R2年度では引き続き順解析手法の高度化に取り組むと共に、新たに水-固体-気体の連成や、マイクロポーラーや粘弾性を考慮した解析手法に拡張する。さらに開発した波動解析手法を用いて、受信センサの設置位置や適切な超音波送受信方法の選定等も実施する。

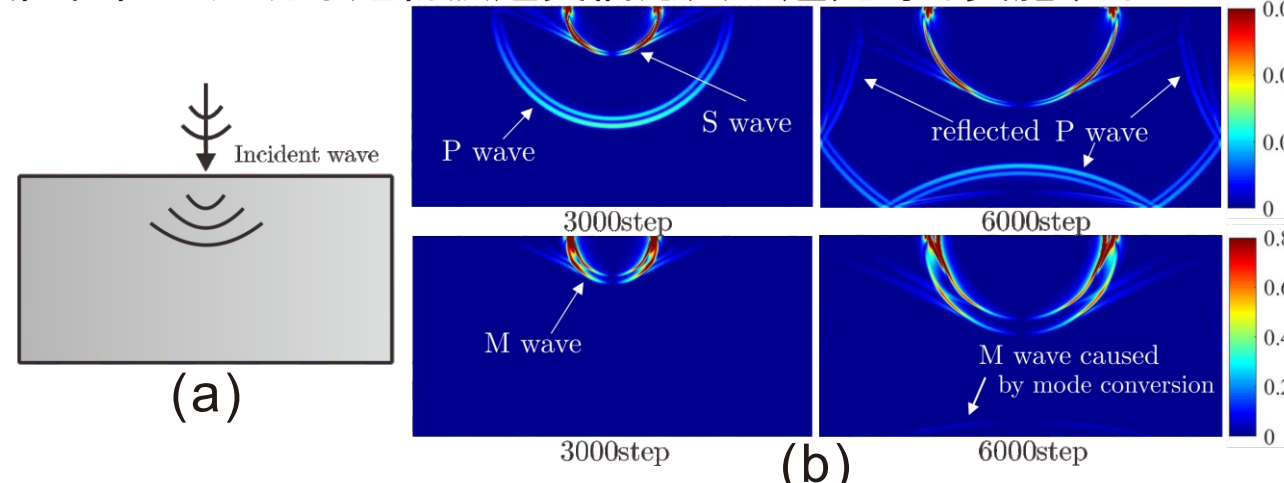
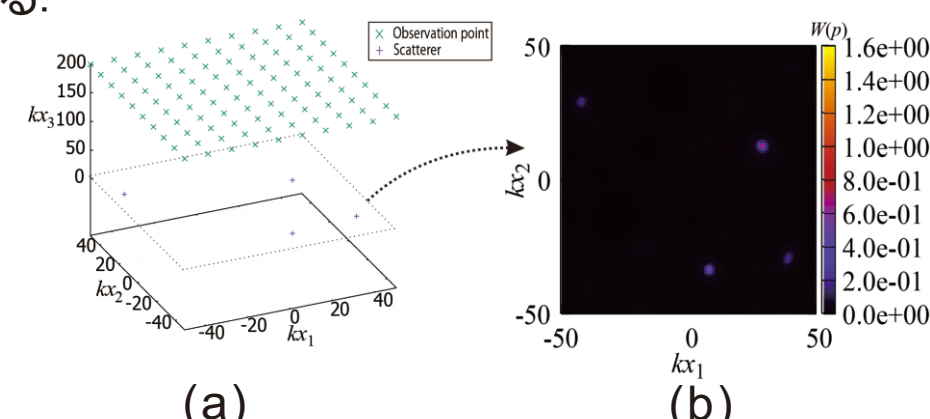


図2: FDMによるマイクロポーラー弾性体中の弾性波動解析(a)解析モデル, (b)速度場の可視化結果(上段はP-wave, S-wave, 下段はM-wave)。

(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

近年の物理計測技術の進歩によって、多点で散乱波や振動データが得られるようになった。それを解析すれば、高精度で欠陥の評価が可能となるが、むやみに計測点を増やせばデータ解析に要する時間や計測に必要な機器に係る経費が増加する。そこで、本年度から新たに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て欠陥イメージングに着手する。現在、その手始めに、図5のようなMultiple Signal Classification(MUSIC)の応用を行っており、これと圧縮センシングを組み合わせた新たな手法を開発する。

図5: MUSICを用いた超音波非破壊イメージング(a)点散乱源と観測点の位置, (b)点散乱源位置推定結果。



(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

時間反転法とトポロジー感度法を用いて、得られた超音波散乱波形データから結果位置を推定する方法を開発し、FRPに対する有効性は既に示した。しかし現状では、欠陥位置の推定のみに留まっている。そこで、本年度は、トポロジー感度の計算過程に近年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、欠陥形状をも再構成する手法を開発する。さらに二次元弾性波動問題に対して、どの程度の波形データが集まれば欠陥形状再構成が可能となるか等を検討する。

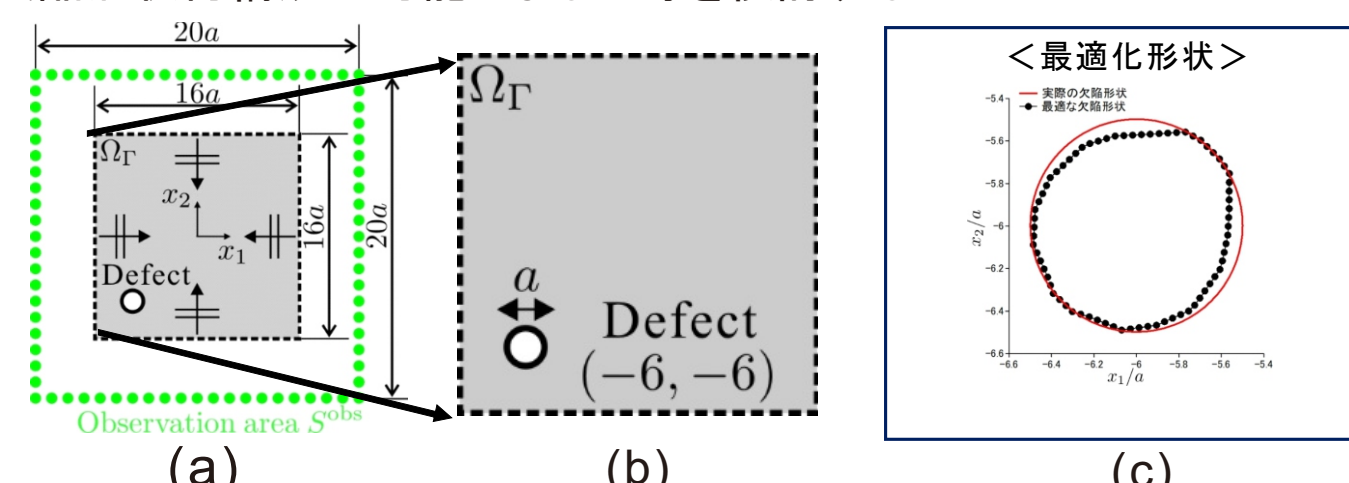


図3: 等方弾性体中の円形空洞を再構成する数値解析例(a)逆解析モデル, (b)可視化領域, (c)欠陥形状再構成結果。

(C) 波動伝搬解析の高速化とICT技術への融合

R2年度も引き続き高速並列計算処理の高度化を実施する。また、機械学習の応用として、R元年度は試験的に超音波散乱波形を深層学習させ欠陥の有無等を判定させることを行った。R2年度ではこの試みを深化させ、(A)で開発した大規模弾性波動解析手法により仮想的な弾性波動場を多数作成し、それらを深層学習に应用する。最終的に散乱波動場の形態から欠陥の有無や種別を判定することを試みる。

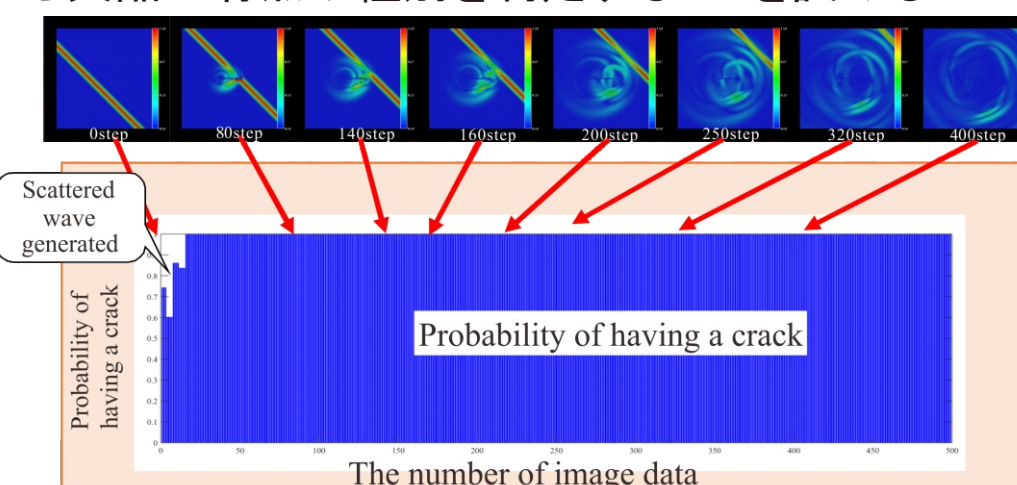


図6: 未知の超音波伝搬画像に対する各時間ステップ毎の欠陥存在確率。

5 これまでの研究成果

研究計画(A)では順解析に焦点を当て、BEMやFEMの高度化に取り組んできた。高速多重極法等の高速化手法の適用(図7)や、その非線形超音波シミュレーションの応用、FEMの大規模並列化によるFRP中の超音波伝搬シミュレーションを実施してきた。(A)で開発した手法は(B)の逆解析へ応用され、時間反転法(図8)や高精度SAFT等の欠陥再構成技術の開発をサポートしてきた。これらと並行し(C)では計算手法やプリポストの効率化を行ってきた。さらにR元年度から機械学習のUTへの応用(図9)もスタートさせ新境地を開いている。

(イ) BEMによる高速化手法の適用

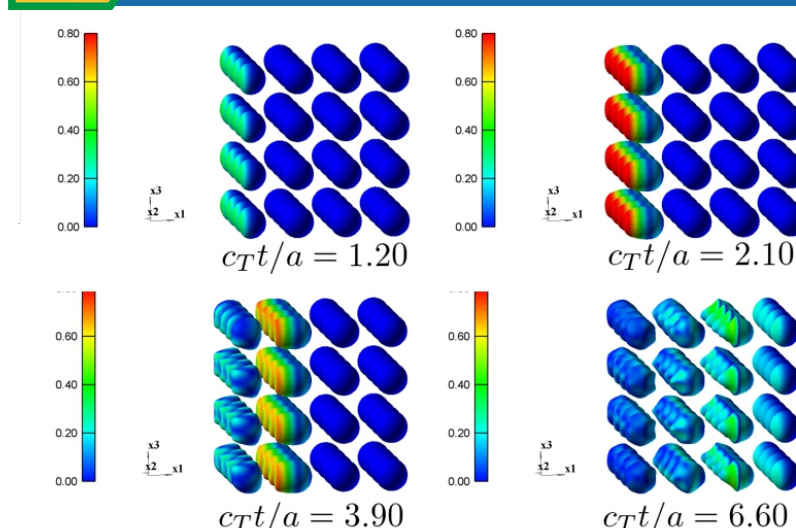


図7: 高速多重極法を適用した新しい時間領域境界要素法による空洞群による弾性波の散乱解析結果。

(ロ) FEMによる逆解析への応用

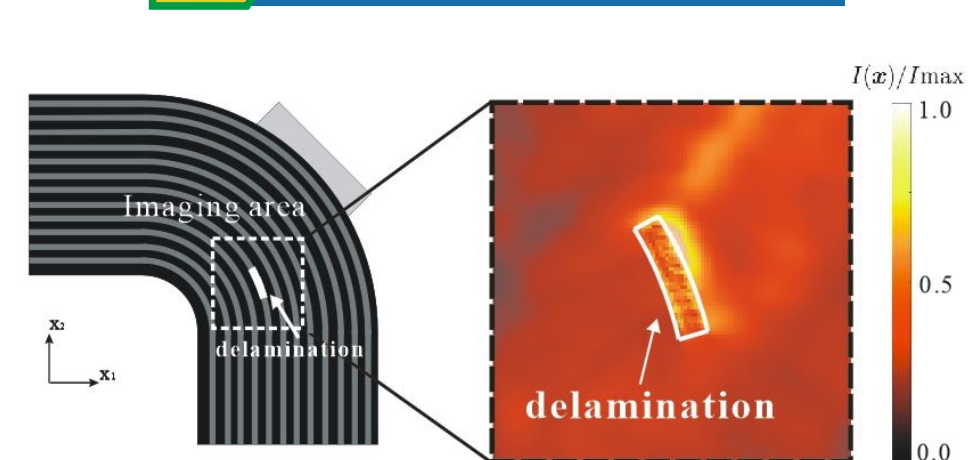


図8: 時間反転法にクロススペクトルを用いた屈曲一方向CFRP中の欠陥形状再構成結果。

(ハ) 機械学習のUTへの応用

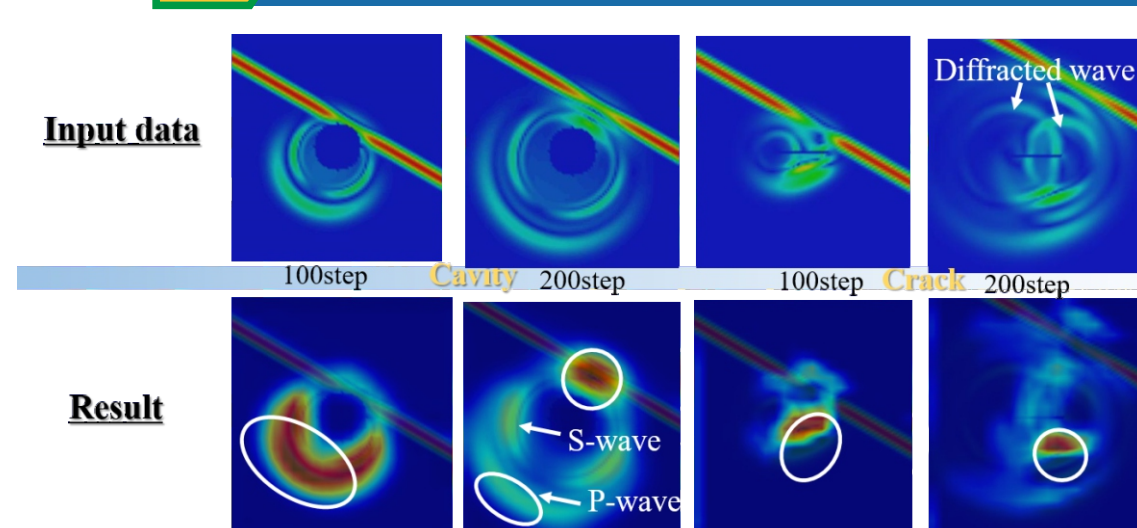


図9: 弾性波動場の深層学習のトライアル結果の一例。左二列分、右二列分は空洞およびき裂の場合の結果。