



齋藤隆泰(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, 天野裕維, 齋藤泰彦), 京都大学(牛島省, 小山田耕二), 群馬大学(小野寺貴, 前原佑, 井上拓海, 田代匡彦), 東京工業大学(古川陽)

## 1 研究の背景と目的

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(UT: Ultrasonic Testing)は、最も広く利用されている。しかしながら、繊維強化プラスチック(FRP: Fiber Reinforced Plastic)といった非均質・異方性材料に対するUTは確立されていない。このような中、申請者の研究グループは、H29年度より本研究課題に関する研究をスタートさせた。これまでにFRP中の欠陥形状再構成手法の開発や、大規模弾性波動解析手法の開発等を行ってきたが、残された課題は依然として数多い。故に、これまで同様、大規模波動解析が実施できる環境が必要であり、そのような環境下でのみ、効率的かつ実践的に研究展開が可能となるものばかりである。そこで、今年度も、非均質・異方性材料中の大規模弾性波動解析手法の開発と欠陥の形状を推定する逆解析やデータ同化の開発を目的とする。

## 2 共同研究として実施する必要性

コンクリートは、要求性能に合わせて、骨材とセメントの種類や配合を変更する必要があるため、基本的にその数値解析モデルは一意に定まらない。FRPもプリプレグの積層角によって全く異なる材料特性となることが知られている。したがって、モデル化自体を複数考慮しなければならない他、精度の良い数値シミュレーションを実行するためには要素サイズを代表波長の1/20程度にする必要があり、解析の自由度は必然的に膨大になる。効率よく研究を実施するためには、単なる大規模計算に留まらず、OpenMPやMPI並列化はもちろん、何らかの高速化アルゴリズムの開発も必要である。以上より、本研究実施のためには、非破壊検査を専門とする研究者のみならず、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のできる計算力学を専門とする研究者らが、大規模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

FRPのように非均質性や音響異方性を示す材料を対象とした場合、UTの高度化には効率の良い計算、情報技術を融合させたイノベーション技術の創出が不可欠であり、延いては検査技術者の人材不足を解消する手段とも成り得る。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をもモデル化できれば、正確に超音波の伝搬方向を予測できるだろう。その結果は、超音波センサーの送受信位置や周波数の最適化、精度の良い欠陥形状再構成手法の開発へと繋がり、非破壊検査の実施を大きくアシストするだろう。UTは機械構造材料のみならず、原子力といった最重要機器に至る様々な分野で必要とされており、社会全体に大きく寄与する重大な研究課題である。また、本研究で行う、種々の数値解析手法による、弾性波動解析や逆解析は学術的要素が高く、研究の意義は極めて大きい。

## 4 研究計画

### (A-1) BEMによる大規模弾性波動解析手法の開発

UTシミュレーションでは、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、そのための境界要素法(BEM)による大規模弾性波動解析手法の開発(図1)を模索することは、有意義である。H31年度は3次元異方性弾性波動解析手法の開発、FRP中の面外波動解析のための周波数領域高速境界要素法の開発に取り組む。並列化についてはCray40によるOpenMP-MPIハイブリッド並列化を実装する。

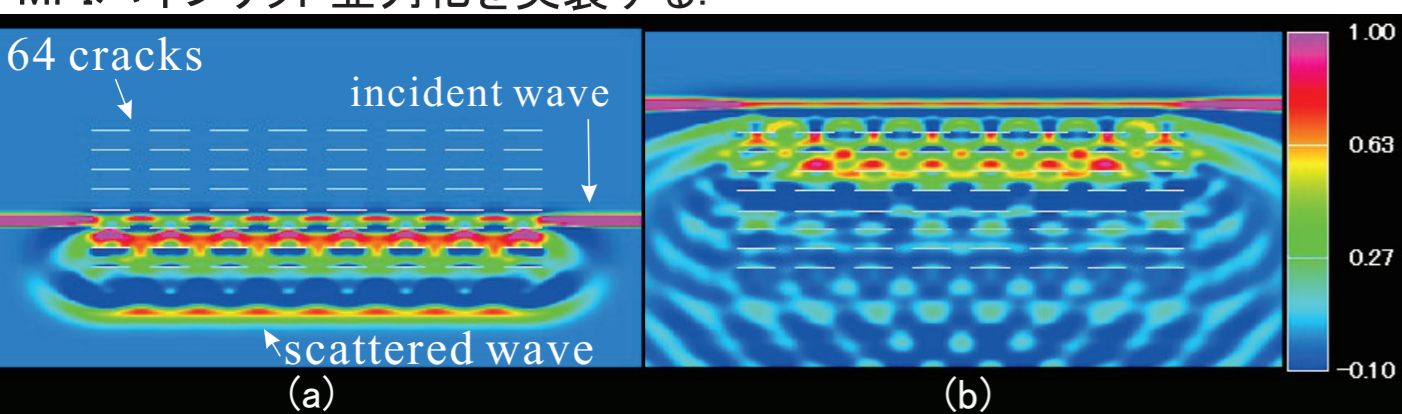


図1: BEMを用いた異方性弾性体中のき裂群に対する大規模多重散乱解析(a),(b)様々な時刻における多重散乱解析可視化結果。

### (A-2) FEM・FIT・MPSによる大規模弾性波動解析手法の開発

非均質材料を扱う場合は有限要素法(FEM)や有限積分法(FIT)を使用する。H31年度はFITを用いた非均質材料中の弾性波シミュレーションをマイクロロー理論を用いて定式化する。また、粒子法(MPS)(図2)については、MPI-OpenMPハイブリッド並列化による大規模非線形超音波シミュレーションの開発を行う。FRPについては、一方向繊維強化FRPのみならず、擬似等方積層FRPについての大規模弾性波動解析を実行する。

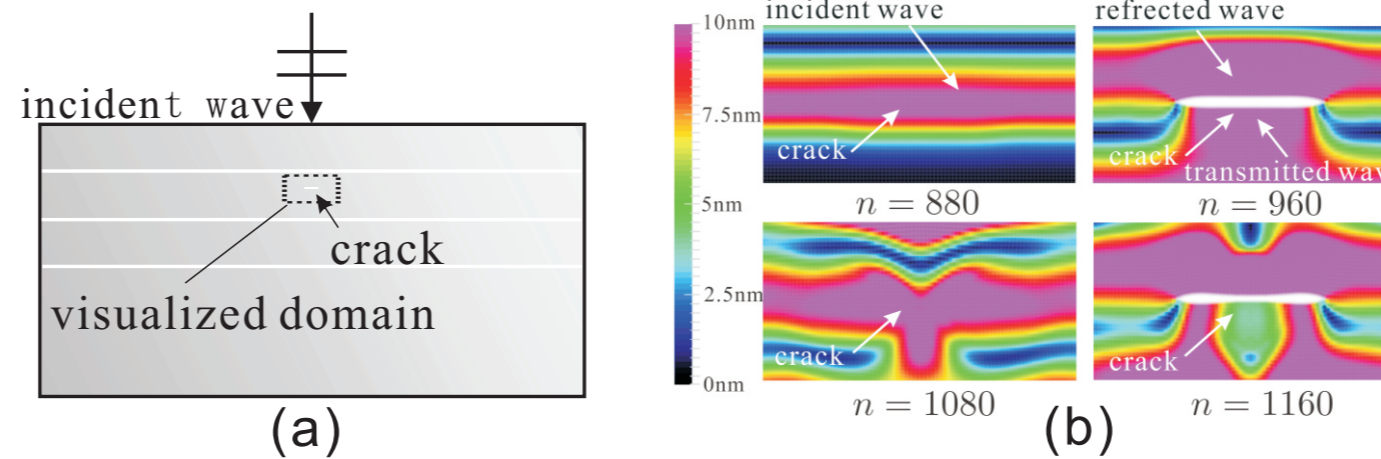


図2: MPSを用いた非線形超音波シミュレーション(a)解析モデル、(b)様々な時刻におけるき裂周辺変位場の可視化結果。

### (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

FRPはマクロレベルで強い異方性を示すため、古典的なTime of flight等の波線理論を直接適用できない。H31年度は、FRP中の空洞や層間剥離を再構成(図3)するための3次元逆散乱解析の開発に挑戦する。また、FRPは一部、粘弾性の性質を示すことも知られていることから、粘弾性体中の欠陥を再構成する新しい2次元逆散乱解析手法の開発も行う。

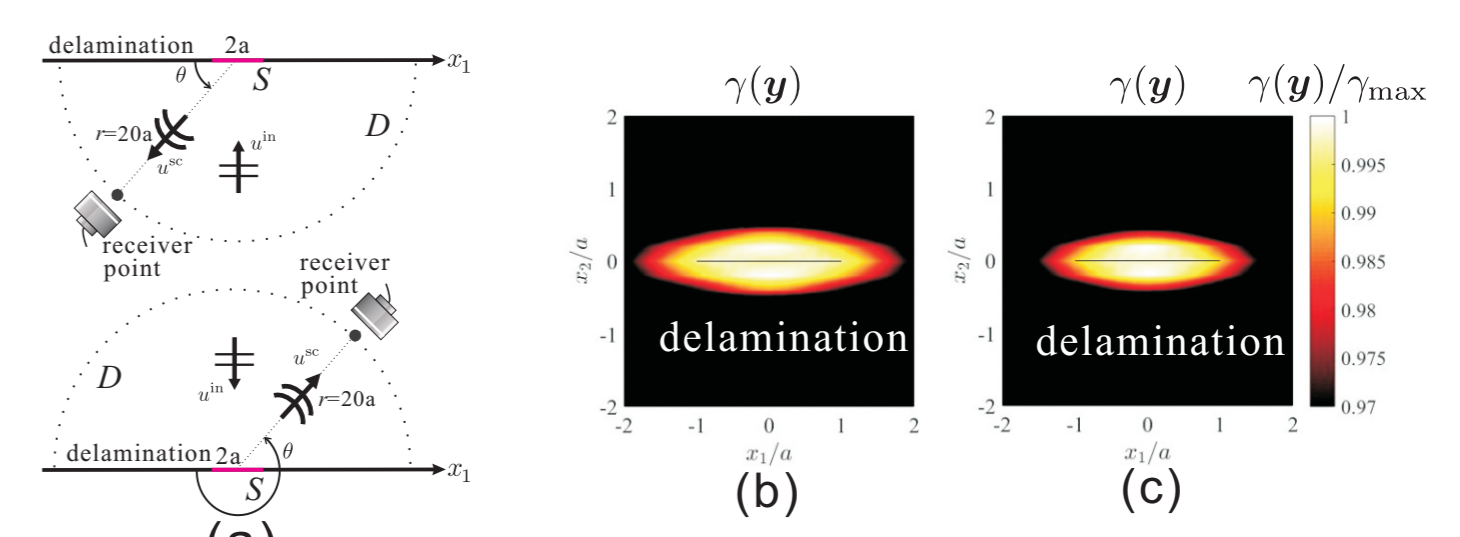


図3: CFRP中の層間剥離に対する逆散乱解析結果 (a)解析モデル、(b)一方向CFRP、(c)擬似等方積層CFRP。

### (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

近年の非破壊評価法では、欠陥の存在を明らかにするだけでなく、欠陥の形状までを再構成することが求められている。しかしながら、異方性主軸が変化するL字型FRP等(図4)に対しては、(B-1)で開発する逆散乱解析法は適用できない。そこでH31年度は、時間反転法を用いて欠陥の位置を特定し、かつトポロジー最適化を非破壊評価へと応用した欠陥形状再構成手法を開発する。

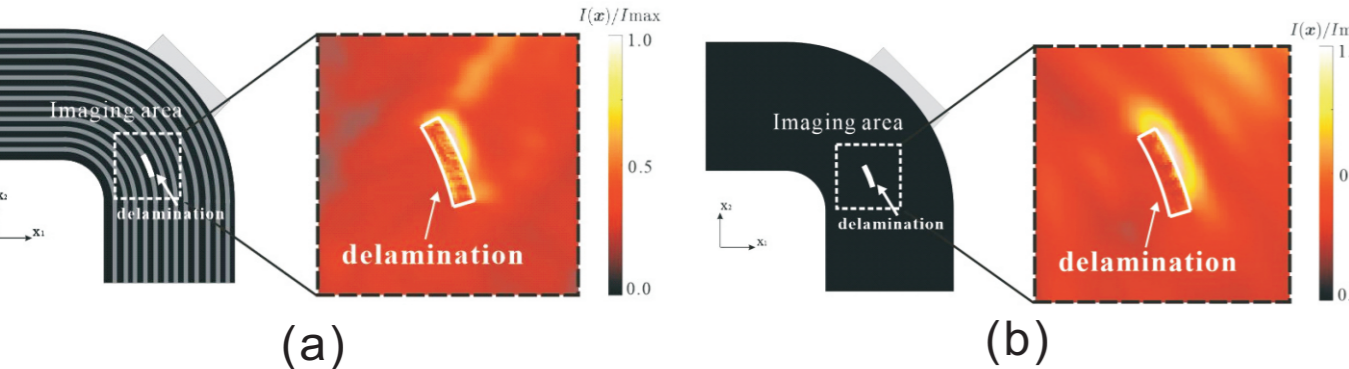


図4: 時間反転法にクロススペクトルを用いたL字型CFRP中の欠陥形状再構成結果 (a)一方向CFRP、(b)等方性材料。

### (B-3) センシングデータを利用した欠陥諸量の推定

H30年度はデータ同化手法である粒子フィルタを適用し、センシングデータと融合して空洞欠陥の位置と大きさを推定した(図5)。H31年度は、より高度な非破壊検査パラメータ推定(介在物の密度、含有率等)のために大規模な粒子フィルタ解析を行う。一方で非破壊検査の最終目的は欠陥の検出である。そこで、欠陥判定の意思決定を自動化するための深層学習の導入を試み、大規模センシングデータと大規模解析の融合を図る。

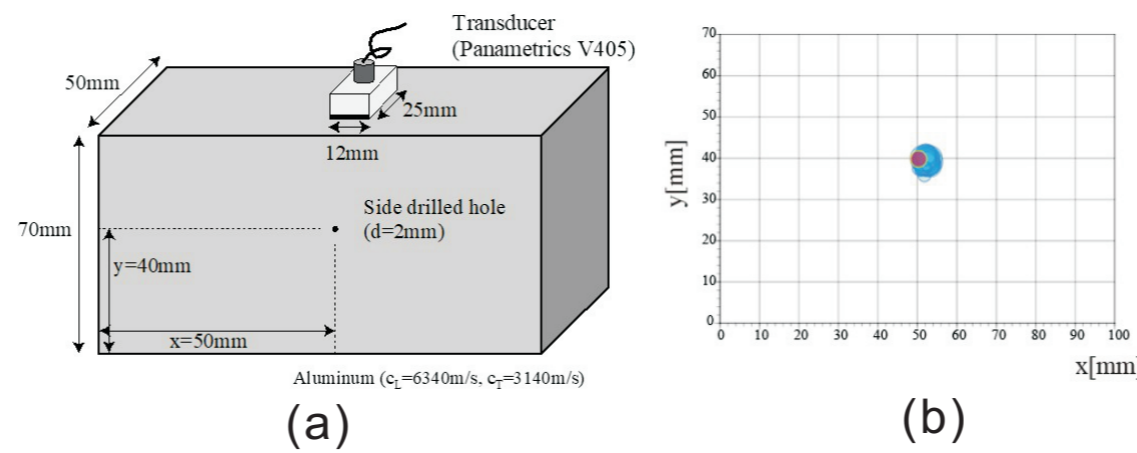


図5: 粒子フィルタを用いた欠陥の推定(a)実験概要、(b)欠陥推定結果。

### (C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化

研究計画(A-1,2)の波動解析は、大規模なものとなる。そこでH31年度も引き続き高速並列計算処理について検討する(図6)。数値解析コードのOpenMP, MPI並列化、およびそれらのハイブリッド並列化を行う。また、時間領域の波動解析では時々刻々と解析結果が出力されるため、その計算結果に対するポスト処理や、可視化技術に関する効率化を検討する。

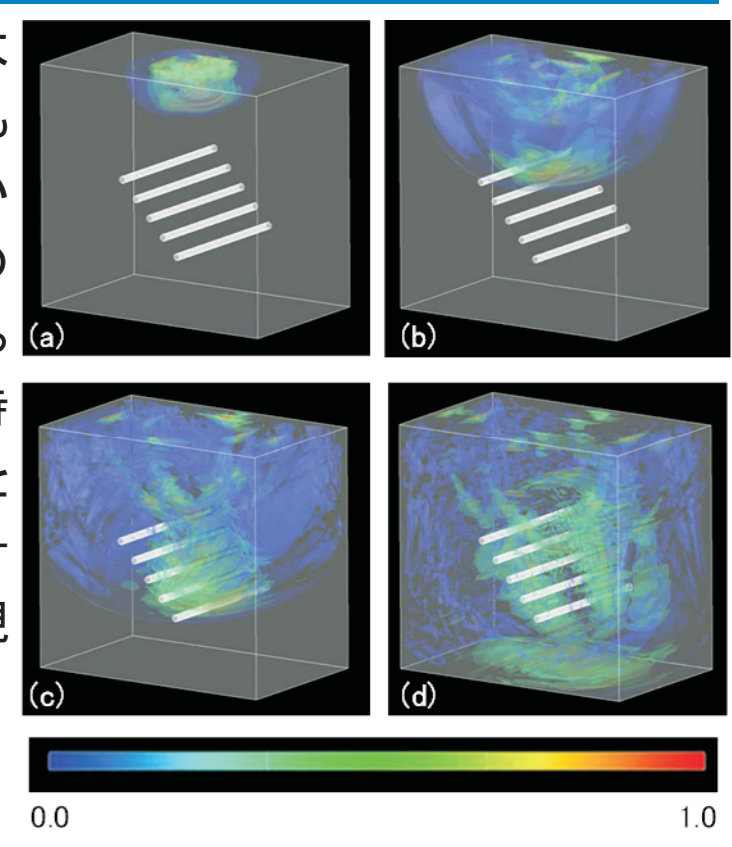


図6: 弾性有限積分法(EFIT)を用いた様々な時刻における3次元弾性波動解析 (a),(b),(c),(d)は様々な時刻における弾性波動場可視化結果。

## 5 これまでの研究成果

H30年度は擬似等方積層FRPに対する大規模弾性波動解析を実施した(図7)。この計算には、京都大学のスーパーコンピュータ256プロセス並列(Flat MPI)を用いた。コンクリートに関しては、FEMとCQBEMの結合解法を開発した。無限領域と、骨材による非均質領域を効率的に解き、大規模波動散乱解析を実行した(図8)。また、時間反転法の欠陥検出指標にトポロジー感度を用いた、超音波フェーズドアレイ探傷への応用を行った(図9)。この順解析には、演算子積分時間領域境界要素法(CQBEM)を用いている。

### (イ) FEM・FITによる大規模弾性波動解析手法の開発と非破壊検査への応用

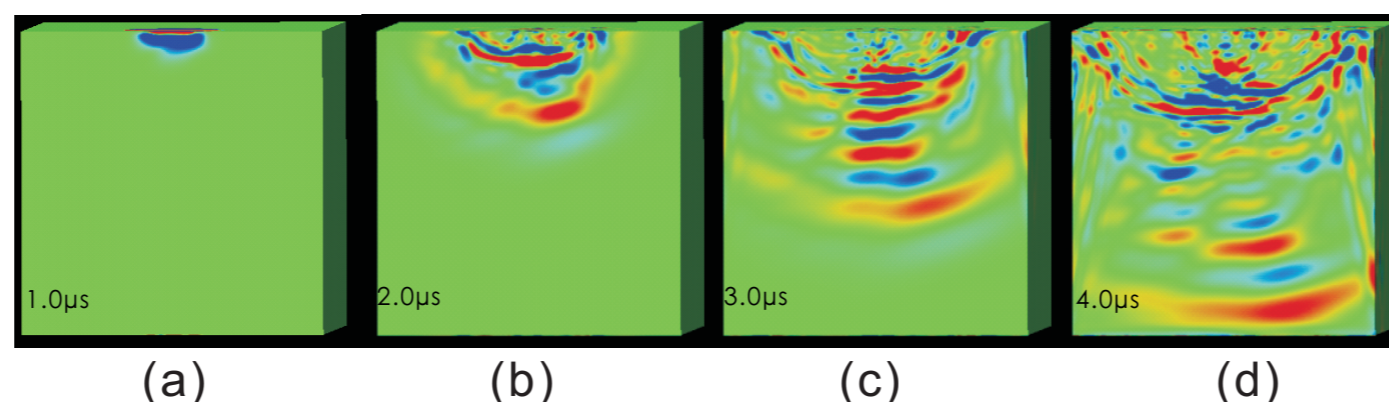


図7: 擬似等方積層FRPに対する3次元大規模弾性波動解析 (a),(b),(c),(d)は様々な時刻における弾性波動場可視化結果。

### (ロ) BEMによる大規模弾性波動解析手法の開発と非破壊検査への応用

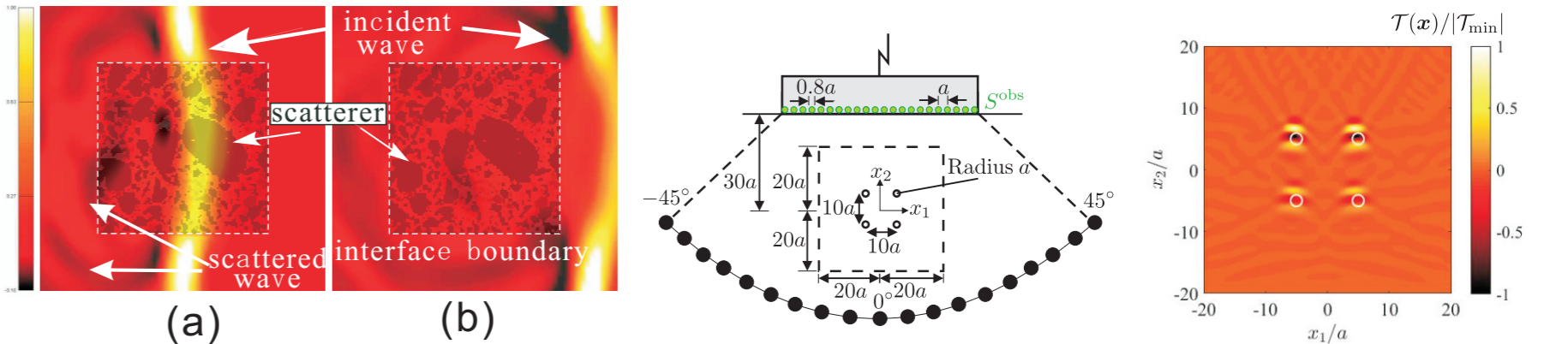


図8: CQBEMとFEMの結合解法 (a),(b)は様々な時刻における (a)解析モデル、(b)欠陥形状再構成結果。