



齋藤隆泰(群馬大学大学院理工学府 環境創生部門)

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, 溝田裕久, 一色正晴, 唐川和輝, 天野裕維), 京都大学(牛島省, 小山田耕二), 群馬大学(伊藤司, 森川光, 野口豪気), 東京工業大学(古川陽)

1. 研究の背景と目的

工業部品や構造部材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 (Ultrasonic Testing, UT) は、広く利用されている検査手法である。均質な金属材料に対する内部検査等には多くの実績があり、検査精度やその信頼性は昔前に比べれば各段に向上している。しかしながら、コンクリートのような非均質材料や、FRP(Fiber Reinforced Plastic)のような異方性材料中の超音波は、非常に複雑な力学挙動を示すため、依然として数多くの課題を残しており、決定的なUTは確立されていない。このような材料への定量化には、効率的かつ実践的に研究するための大規模な数値シミュレーションが欠かせない。そこで、H29年度同様、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知られている。これらの材料を伝搬する弾性波を正確にモデル化するには、メソスケール構造をモデル化する必要があるが、差分法や有限要素法、境界要素法等の数値解析手法で数値的に離散化して解くとすれば大規模シミュレーションを避けることはできない。よって、非破壊検査を専門とする研究者のみならず、材料力学や波動論を専門とした研究者、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、分野横断的な協力体制の下、実施すべき必要性が高い研究であると考えた。

3. 研究の意義

コンクリートやFRP等は非均質や異方性の影響が強いため、これまでのUT技術では、検査精度の向上は見込めない。UTを高度化するためには計算技術と融合した新しいイノベーション技術(非破壊検査技術)の創出が必要不可欠である。その1つの要素技術となり得るのが、非均質・異方性を考慮した大規模波動解析技術である。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。さらに大規模数値シミュレーションをUT技術に積極的に取り込んでいく逆解析法、逆伝搬法、データ同化法の開発が本研究の大きな特徴である。UTは、土木や建築材料のみならず、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いる。このように本研究課題は社会全体に大きく寄与しており、本研究の意義は極めて大きいといえる。

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

超音波を利用した非破壊検査では、超音波の伝播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、そのためには境界要素法(BEM)による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。本研究では、異方性弾性波動問題に対する高速BEMの開発、また3次元解析による遠方場近似計算法へ拡張、またSinc法ベースBEMの2次元問題の扱いを行う。さらに提案手法の計算精度や計算効率を確認し、提案手法の有効性について検討する。並列化についてはCrayXC40によるOpenMP-MPIハイブリッド並列化を実装する。

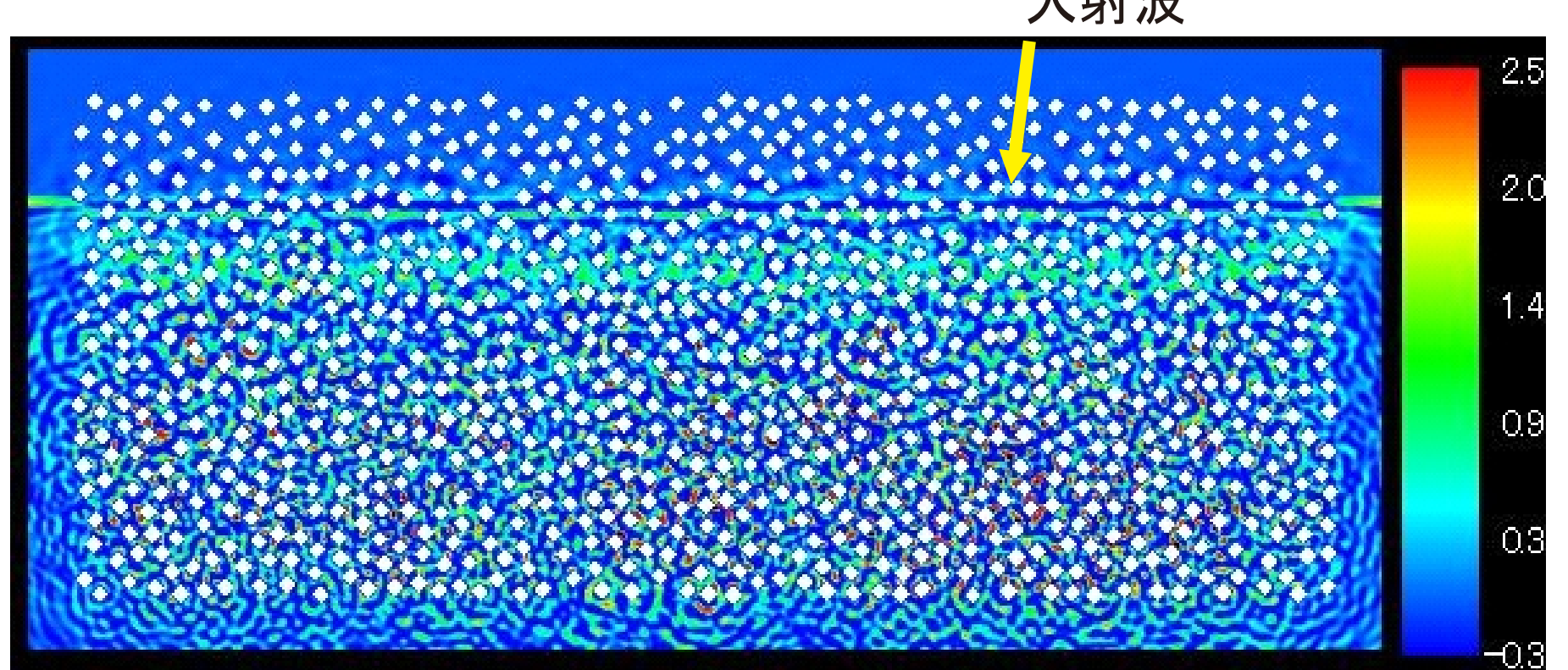


図1: 2次元面外波動問題における1000個の空洞群による入射波の大規模多重散乱解析。演算子積分時間領域境界要素法(CQBEM)+高速多重極法(FMM)+OpenMP-MPI使用。未知数は1億程度。

A-2) FEM・FIT・MPS法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。現状では、CrayXC40のXeonPhiKNLの利用による並列化効率の向上やFRPの様々な積層パターンに対する弾性波動散乱特性の考察が不十分であり、FEMやFITはき裂の扱いが境界要素法に比べて精度で劣るという問題がある。そこで本研究では、FEMとFITの並列化計算を効率を向上させることを行う。FRPに関しては擬似等方積層FRPについての大規模弾性波動解析を実行する。また、微小き裂開口と非線形超音波特性を明らかにするために粒子法(MPS法)を用いた大規模弾性波動解析手法の開発も実施する。

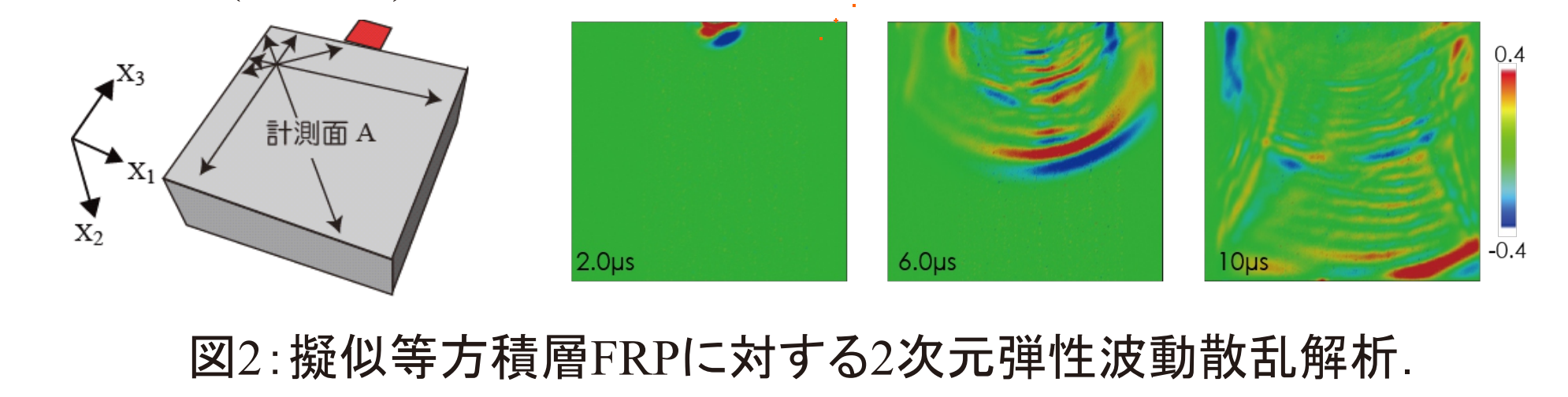


図2: 擬似等方積層FRPに対する2次元弾性波動散乱解析。

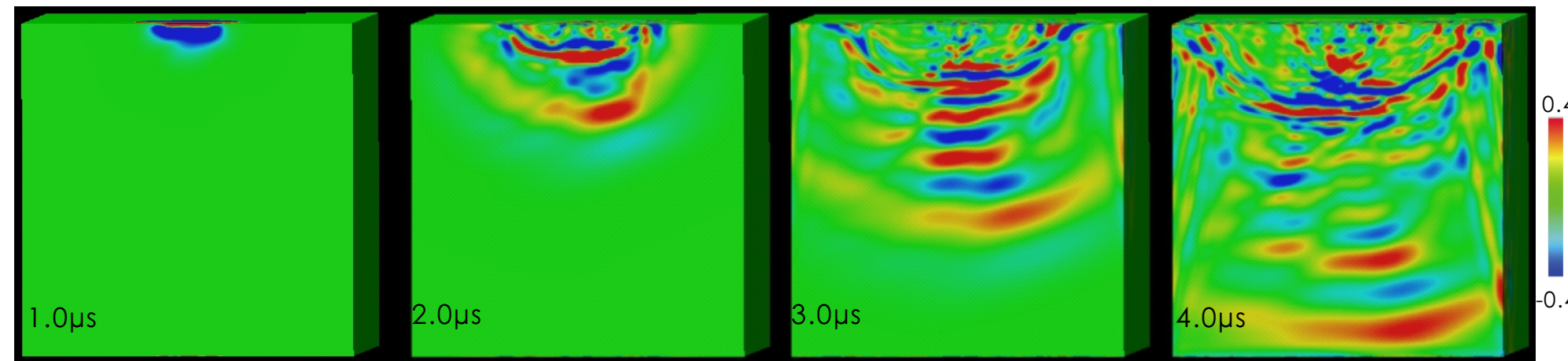


図3: 擬似等方積層FRPに対する3次元弾性波動散乱解析。京都大学のスーパーコンピュータの256プロセス並列(Flat MPI)。

B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析

FRPのような異方性を示す材料では、波動は等方に拡がらないため、現状のUTで利用されているTime of flight等の波線理論を直接適用できない。現状では、欠陥の対象を空洞やスリットを対象とした場合に限定されている。FRPの供用期間中の問題は、面内き裂による破壊をいかに防ごうかが問題となる。そこでH30年度は、面内波動問題での異方性材料中のき裂に対する逆散乱解析の開発を目指す。

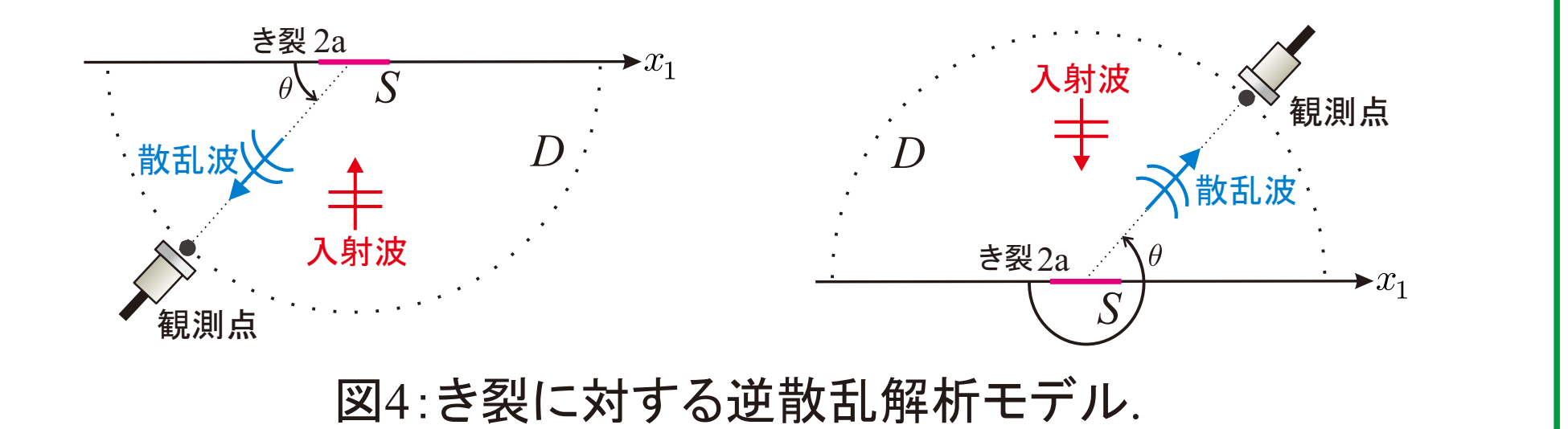


図4: き裂に対する逆散乱解析モデル。

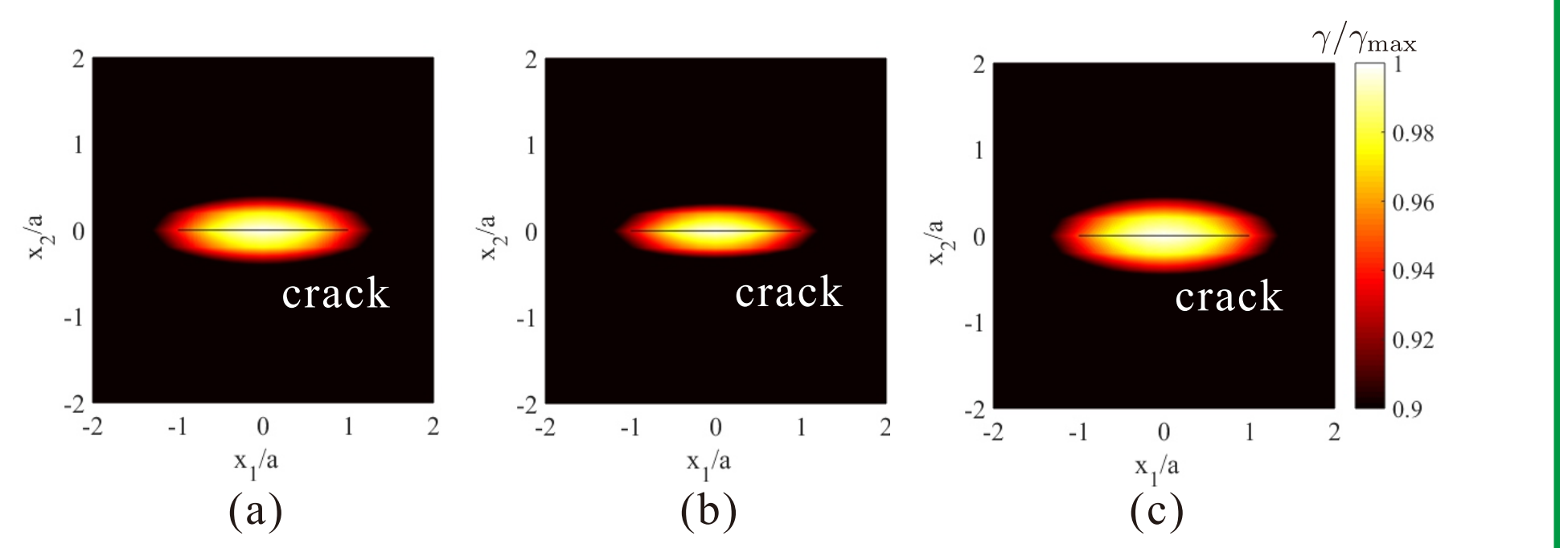


図5: 純面外波を利用した異方性弾性体中のき裂に対する逆散乱解析結果。(a) 等方性鋼材 (b) 一方向CFRP (c) オーステナイト系鋼材。

B-2) Time-Reversalに基づくAE震源の同定

非均質・異方性材料の場合、AE震源からの波動伝搬の把握が困難である。本研究では、Time-Reversal法と呼ばれる波動の可逆性に基づく理論を実装したイメージベースFEM・FITを用いて、アレイ各素子で実際に受信した欠陥エコーをシミュレーションで逆伝搬させ、波動場の可視化結果からAE震源の推定を行う。また、逆伝搬させた波動場を随伴場と考えることでトポロジー理論を適用し、AE震源を推定する方法を開発する。

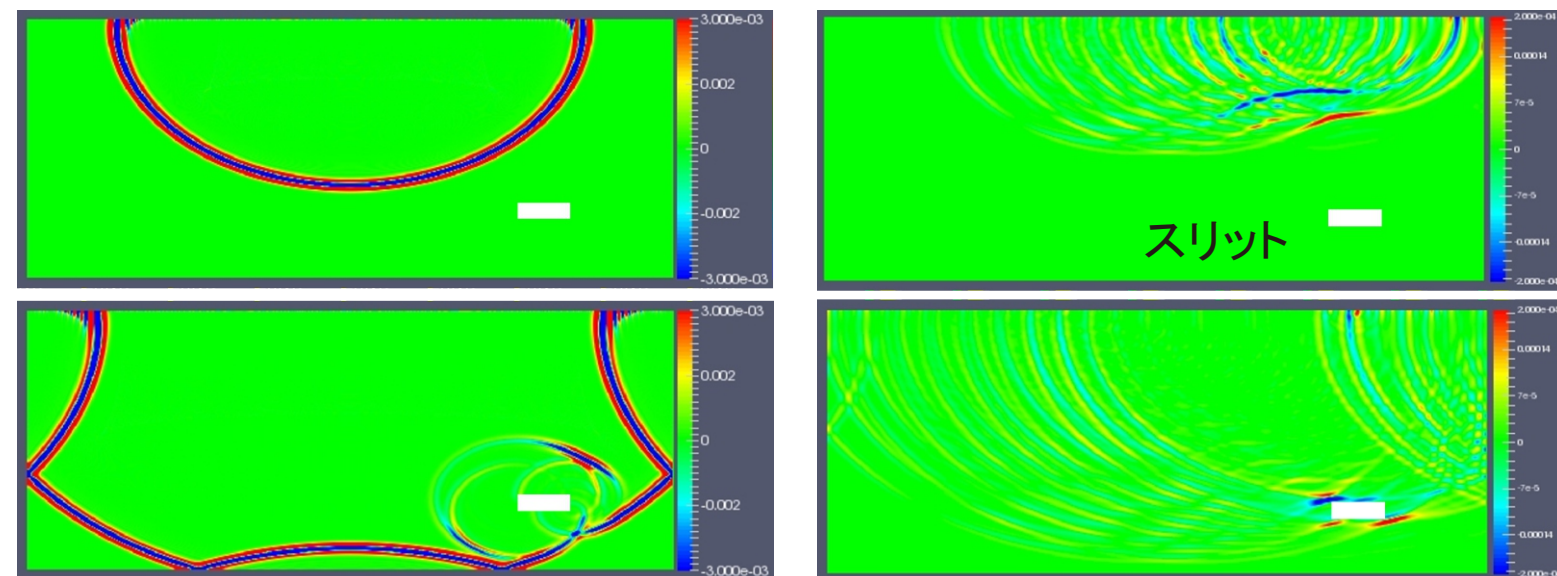


図6: CFRP中のスリットに対する(左段)面外波動散乱解析結果(右段)逆伝搬解析結果。逆伝搬解析で用いた波動はスリット位置に収束している。

B-3) 粒子フィルタを用いた散乱波からの欠陥の性状判別

H30年度は研究計画(A-1, 2)の散乱波の大規模・高速解析技術でデータ同化に応用する研究を開始する。ここでは、非線形非ガウス状態空間モデルを扱うことのできる粒子フィルタを適用する。研究計画(B-1, 2)は欠陥の位置や形に着目していることに対して、粒子フィルタでは状態量として欠陥内部の音速や密度等を対象とする。

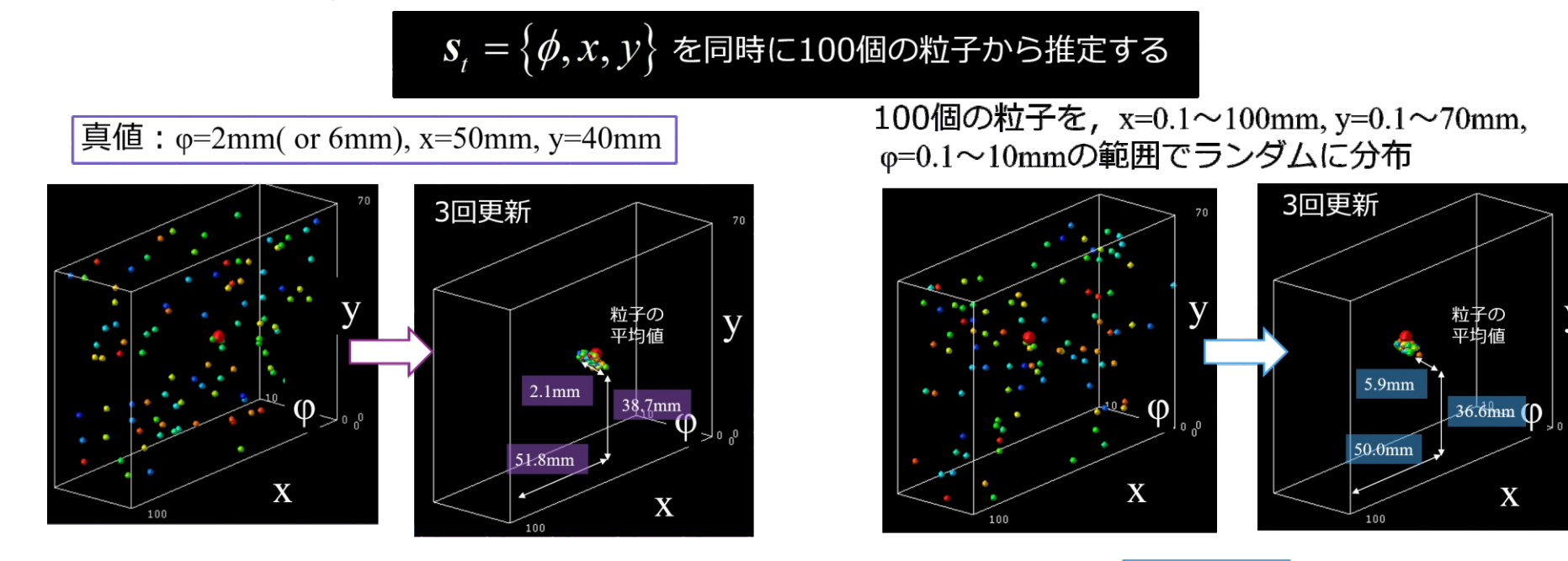


図7: 粒子フィルタの実行結果。

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)の波動伝搬解析は、メソスケール構造を考慮する故に大規模なものとなる。研究拠点である京都大学はメインシステムを一新し、Xeon Phi KMLを搭載している。またスカラとベクトル両方の性能が改善されメモリバンド幅の性能も向上している。そこでH30年度も引き続きこの新システムの性能を最大限に活かして開発する手法の並列化を実施する。また、図8のような3次元弾性波動場に対する解析結果の可視化は出力データが膨大となるため、効率的な可視化方法についても検討することを行う。

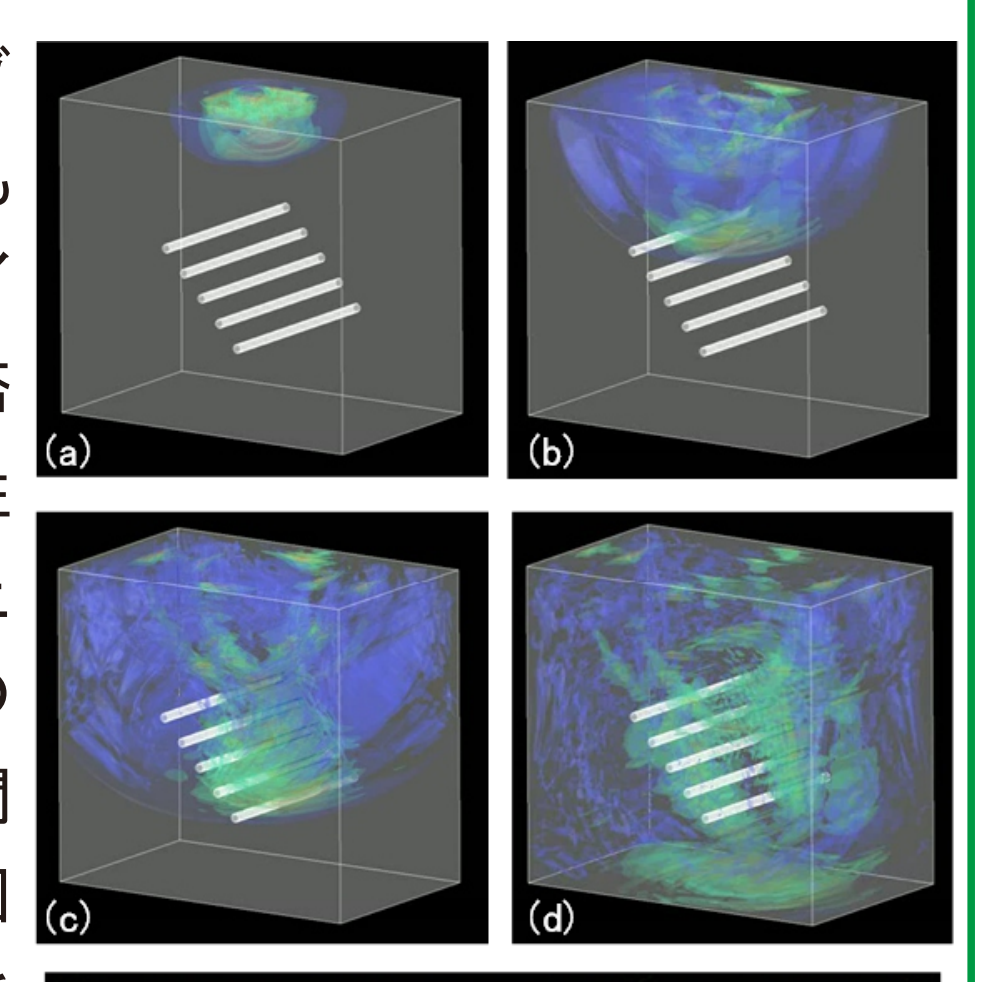


図8: 動弾性有限積分法(EFIT)による弾性波動の3次元可視化結果。

5. これまでの研究成果

H29年度は一方向CFRPやコンクリートに対する大規模弾性波動解析を実施した。一方向CFRP中の空洞に対して、演算子積分時間領域境界要素法(CQBEM)を用いた波動散乱解析(順解析)を行った。また、順解析で得られた散乱波より、空洞を再構成する逆散乱解析手法を開発した(図9)。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10)。

イ) BEMによる大規模弾性波動解析手法の開発と非破壊評価への応用

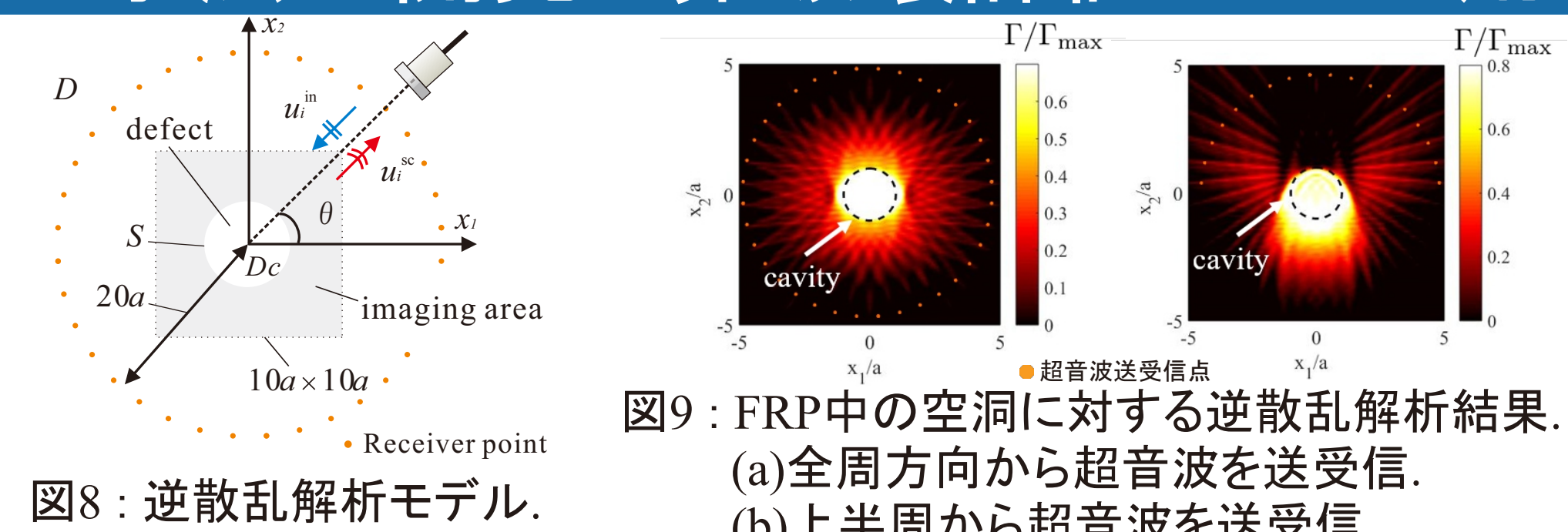


図9: FRP中の空洞に対する逆散乱解析結果。(a) 全周方向から超音波を送受信。(b) 上半周から超音波を送受信。

ロ) FEM・FITによる大規模弾性波動解析手法の開発と非破壊評価への応用

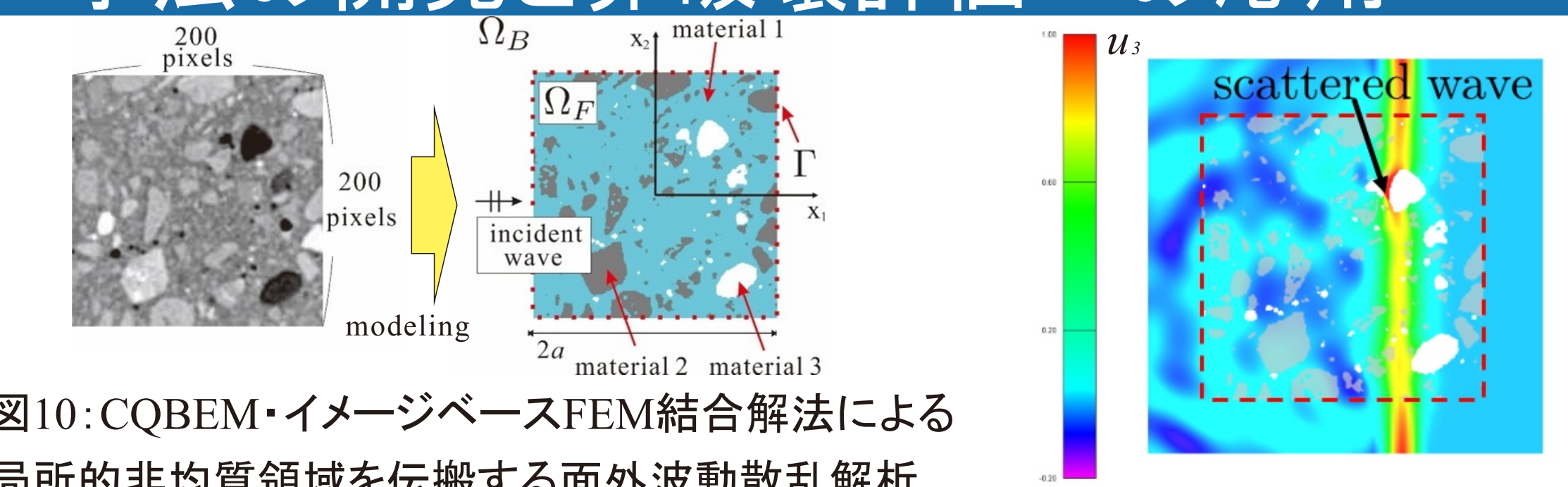


図10: CQBEM・イメージベースFEM結合解法による局所的な非均質領域を伝搬する面外波動散乱解析。