



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

メンバ構成: 愛媛大学(中畑和之, 溝田裕久, 溝上尚弥, 一色正晴), 京都大学(牛島省, 小山田耕二), 新潟大学(紅露一寛), 群馬大学(稲垣祐生, 伊藤司), 東京工業大学(古川陽)

## 1. 研究の背景と目的

近年, 工業部品や構造部材の健全度を評価する非破壊検査の重要性が高まっている。特に, 波動や振動を利用した検査が有名であるが, これらは固体中で弾性波(超音波)として伝搬することから, 弾性波の特性を把握し, それを有効に活用することが非破壊検査の高度化に重要である。均質な金属材料に対しては多くの検査実績があり, 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に対する非破壊検査には依然として数多くの課題が残されており, その定量化には数値シミュレーションは欠かせない。そこで, 本研究では, 非均質・異方性材料中の弾性波動伝搬を正しく把握するための大規模波動解析手法や構造物内部の健全度や欠陥を評価する逆解析技術を開発することを目的とする。

## 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, 基本的には品質は均等でなく, 施工年月や使用環境においても劣化の度合いが異なる。FRPも補強方向やプリプレグの積層数によって全く異なる材料特性となる。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は避けられない。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り, 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, 弾性波動場が極めて複雑となる。しかしながら, 骨材やプリプレグの積層構造までを考慮したメソスケールの数値解析はこれまでほとんど例がなく, 多くの場合, 材料を均質化して考える場合がほとんどである。非破壊検査を高度化するためには材料のメソスケール構造を取り入れた弾性波のシミュレーション技術の開発が必須である。本技術が確立できれば, 検査に最適なセンサの設計(周波数, 素子サイズ), 入射弾性波の波形の選択, センサの送信・受信位置等を予め決定することができる。さらには計測した波形から擬似エコーを取り除き, 欠陥部を特定するために本技術を使用する等, 具体的な非破壊検査実施時における対応も見えてくる。このように本研究課題はインフラ構造物の長寿命化や次世代材料への対応といった社会的ニーズや緊急性も伴っている。

## 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

境界要素法は, 無限領域を容易に扱う事が可能であるため, 波動解析に有効な数値解析手法として知られている。近年, 従来時間領域境界要素法が持ついくつかの欠点を克服した新しい時間領域境界要素法(CQBEM: 演算子積分時間領域境界要素法)が開発され, さらに高速多重極法(FMM)やACA(Adaptive Cross Approximation)を適用することで, 大規模波動問題に対しても一定の成果を得ている。本研究では, これらの成果(例えば図1)を弾性波動問題へと拡張し, 非破壊検査のためのシミュレーションへ応用することを行う。

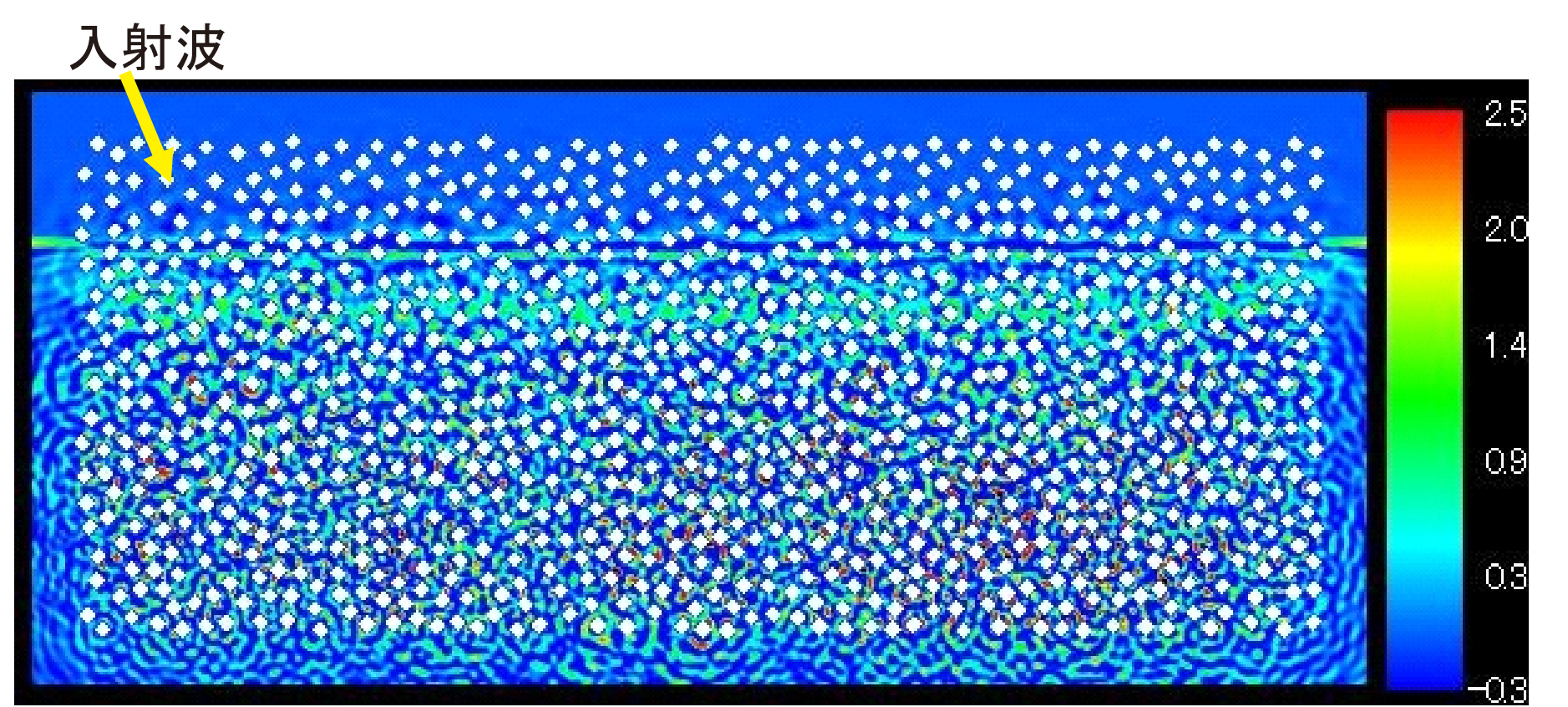


図1: 2次元面外波動問題における1000個の空洞群による入射波の大規模多重散乱解析。演算子積分時間領域境界要素法(CQBEM)+高速多重極法(FMM)+OpenMP-MPI使用。未知数は1億程度

### A-2) FEM・FITによる大規模弾性波動解析手法の開発

有限要素法(FEM)や有限積分法(FIT)は, 閉じた領域の波動伝搬解析には極めて有効であり, 解析コードの汎用化も比較的容易である。解析時間も境界要素法に比べて比較的短く, パラメトリック解析にも適している。しかしながら, 境界要素法に比べて解くべき問題の未知数は多くなる傾向にあることから, メソスケール構造の解析には大型計算機を用いた並列化は必須となる。そこでこれまで開発したコード(図3)にXeon Phi等の利用を視野に入れたコードのチューニングを行う。開発した手法は, コンクリートやFRPを伝搬する弾性波動解析へと応用される。

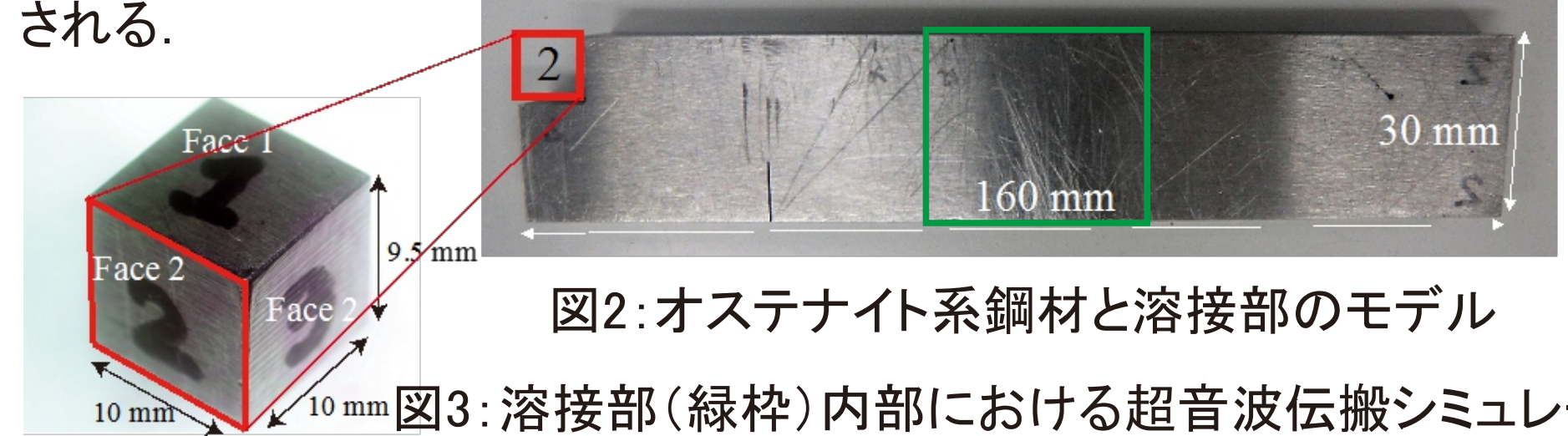


図2: オステナイト系鋼材と溶接部のモデル

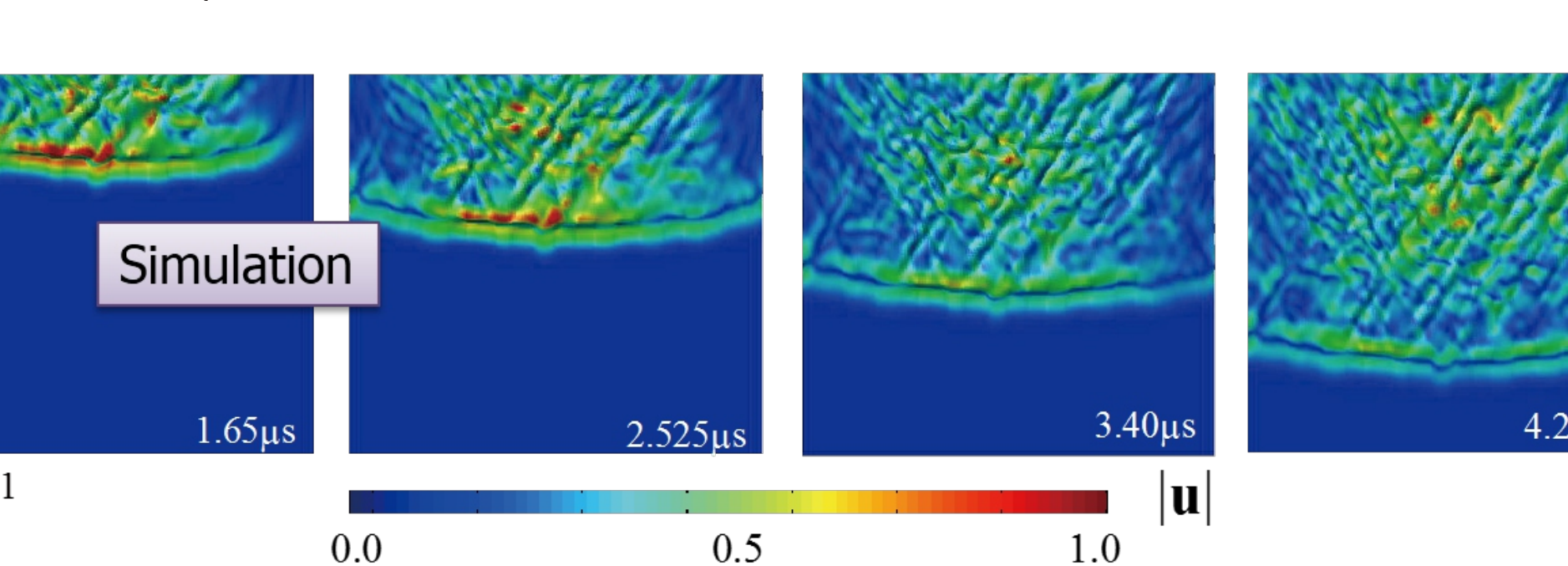


図3: 溶接部(緑枠)内部における超音波伝搬シミュレーション

### A-3) BEMとFEM・FITの結合による非破壊検査シミュレーション

境界要素法(BEM)は無限遠を含む波動解析を得意にしているが, 非均質材料の解析は苦手である。一方, 有限要素法(FEM)や有限積分法(FIT)は無限遠を含む波動解析は苦手であるが, 非均質領域の解析は得意である。有限要素法や有限積分法にPML等の無反射境界を取り入れることも可能ではあるが, どのような波動に対しても万能に無反射境界を考慮することは現状では難しいと考えられる。そこで本研究では, 境界要素法と有限要素法や有限積分法の両者の長所を活かすべく, それらの結合解法を開発し, 非破壊検査における弾性波動伝搬シミュレーションに応用することを行う。

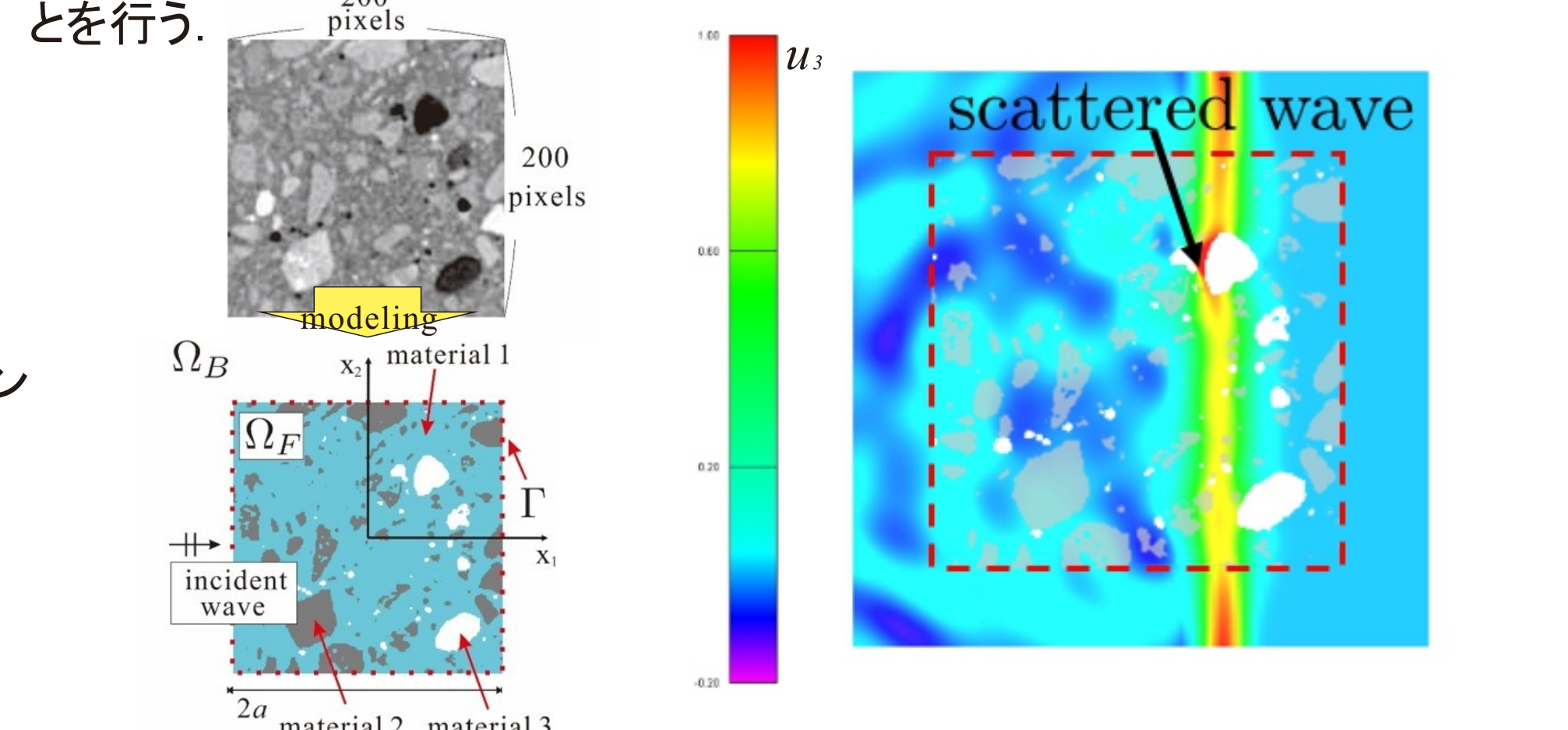


図4: 演算子積分時間領域境界要素法・イメージベース有限要素法結合解法による局所的な非均質領域を伝搬する面外波動散乱解析。局所的な非均質部分のモデル化はコンクリートのX線CT画像を用いた。

### B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析

代表的な非破壊検査手法の一つである超音波探傷試験によって非均質・異方性材料中の欠陥の探傷を行う場合, 超音波はその非均質性, 異方性の影響を強く受け, 複雑に伝搬するため, 探傷精度の低下を引き起こす可能性がある。弾性波動理論に基づき, 超音波探傷試験によって得られる欠陥エコーを利用して欠陥の形状を再構成する手法(逆散乱解析)が確立されれば, 探傷精度の向上が望める。図5は結果の一例であり, CQBEMによってオステナイト系鋼材中の空洞欠陥による超音波散乱波形データを用意し, その結果を用いた逆散乱解析結果が図6に示す通りである。

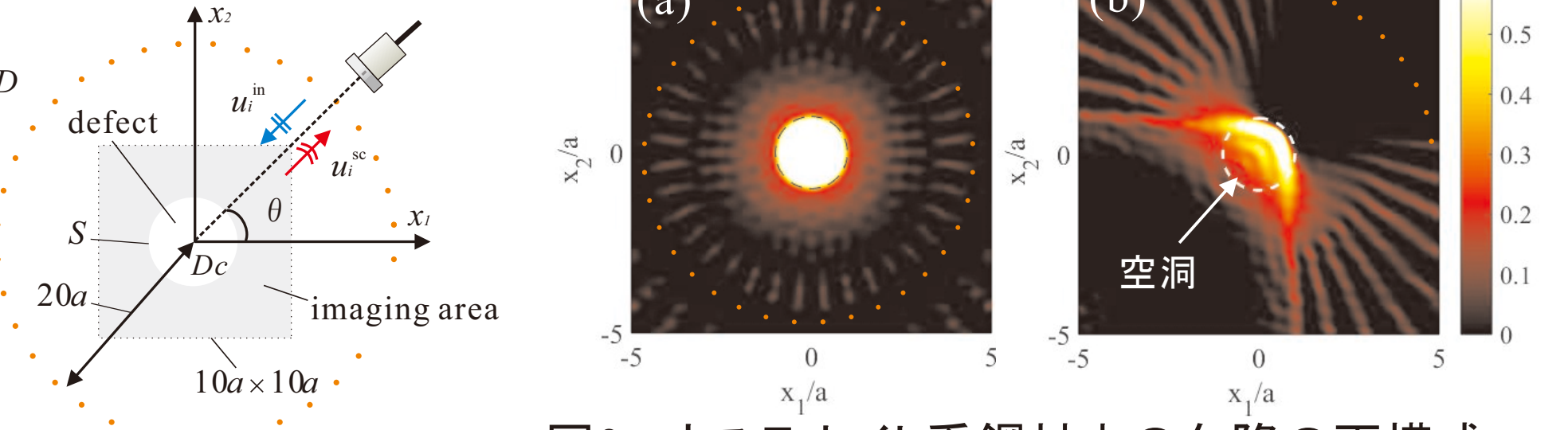


図5: 逆散乱解析モデル



図6: オステナイト系鋼材中の欠陥の再構成。超音波受信点位置(a)全周方向 (b)半周方向

### B-2) Time-Reversal法に基づく逆伝搬解析

Time-Reversal法は, 弾性波伝搬の時間に対する可逆性を利用したものである。Time-Reversal法ではアレイの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中で逆伝搬させ, 波動場の可視化結果から損傷位置を推定する方法である。可逆性によれば, 散乱波は波動の発生源に戻るはずであり, 逆伝搬波の収束点から欠陥位置を特定することが可能であると考えられる。本研究では, イメージベースFEM/FITを用いたTime-Reversal法を実装することを行う。

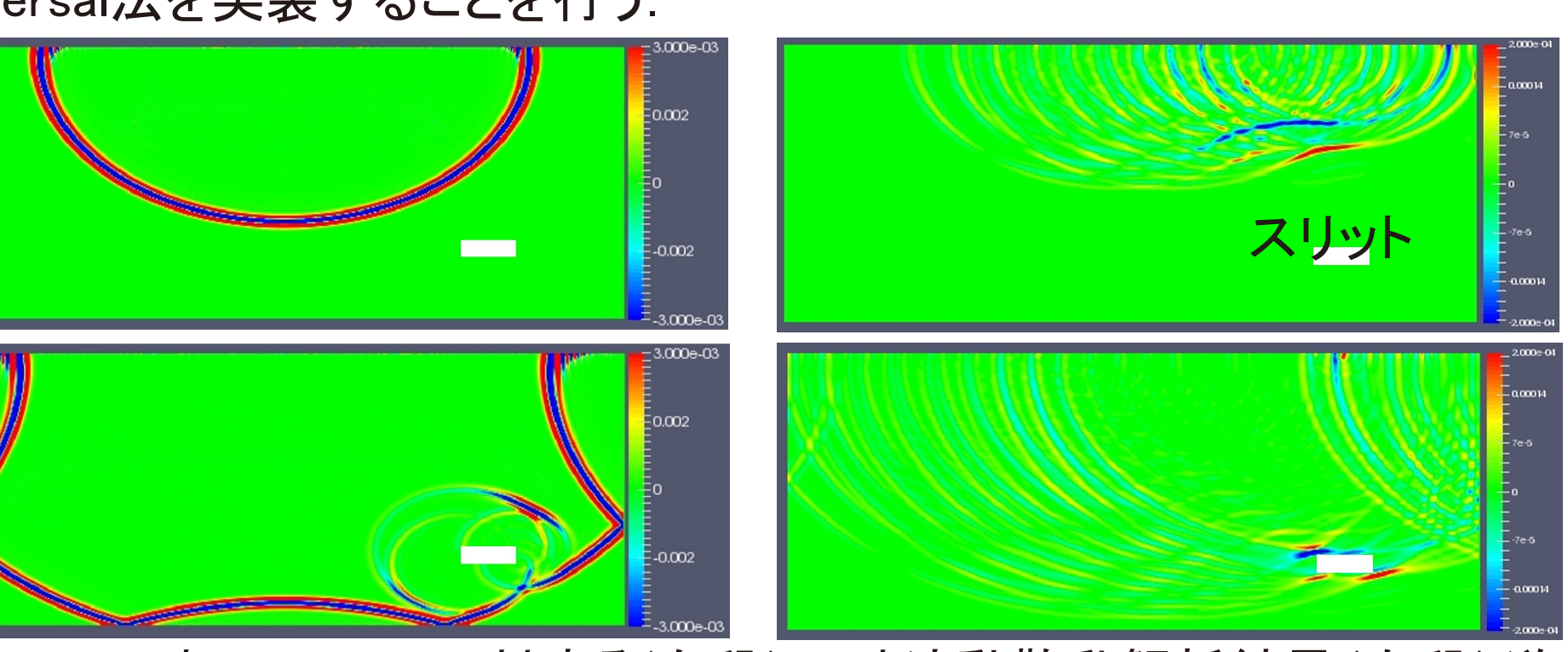


図7: CFRP中のスリットに対する(左段)面外波動散乱解析結果(右段)逆伝搬解析結果。逆伝搬解析で用いた波動はスリット位置に収束している。

### 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-1,2,3)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。そこで本研究では, 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。

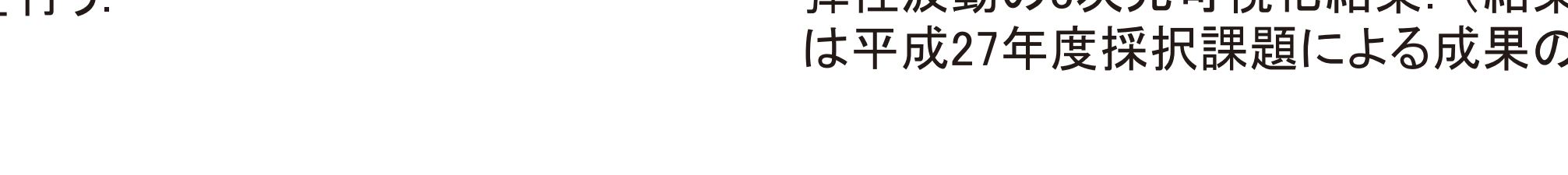


図8: 動弾性有限積分法(EFIT)による弾性波動の3次元可視化結果。(結果は平成27年度採択課題による成果)

## 5. これまでの研究成果

本研究課題に関連し, 例えばH27年度に非破壊検査に関するJHPCNの共同研究(京都大学)が採択されている。また, 本研究課題代表者によるH28年度JHPCN萌芽型共同研究課題(京都大学)として, 波動問題に対する新しい境界要素法に関する研究も採択されている。本研究課題は, これらの成果(その一部を右に示す)を進展させ, 非均質・異方性材料への解析に応用するものである。

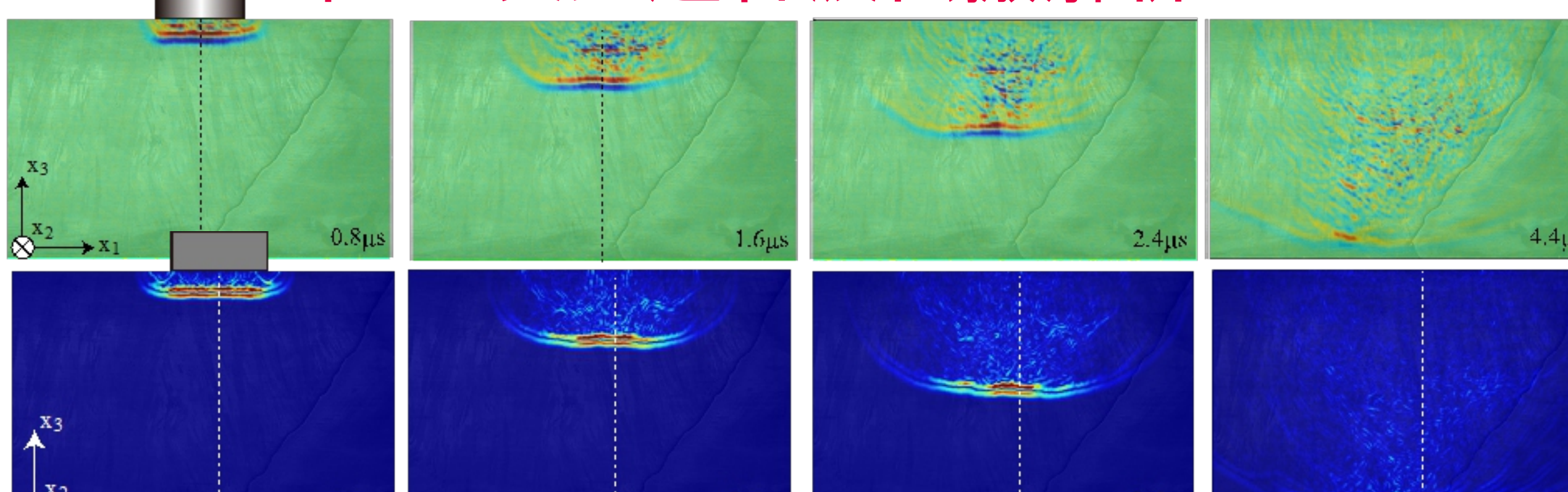


図9: (上段)レーザードップラー計測による弾性波動場の可視化(下段)シミュレーション結果。両者は概ね一致している。

### イ) 粗大金属粒を有する鉄鋼材料中の3次元超音波伝搬解析

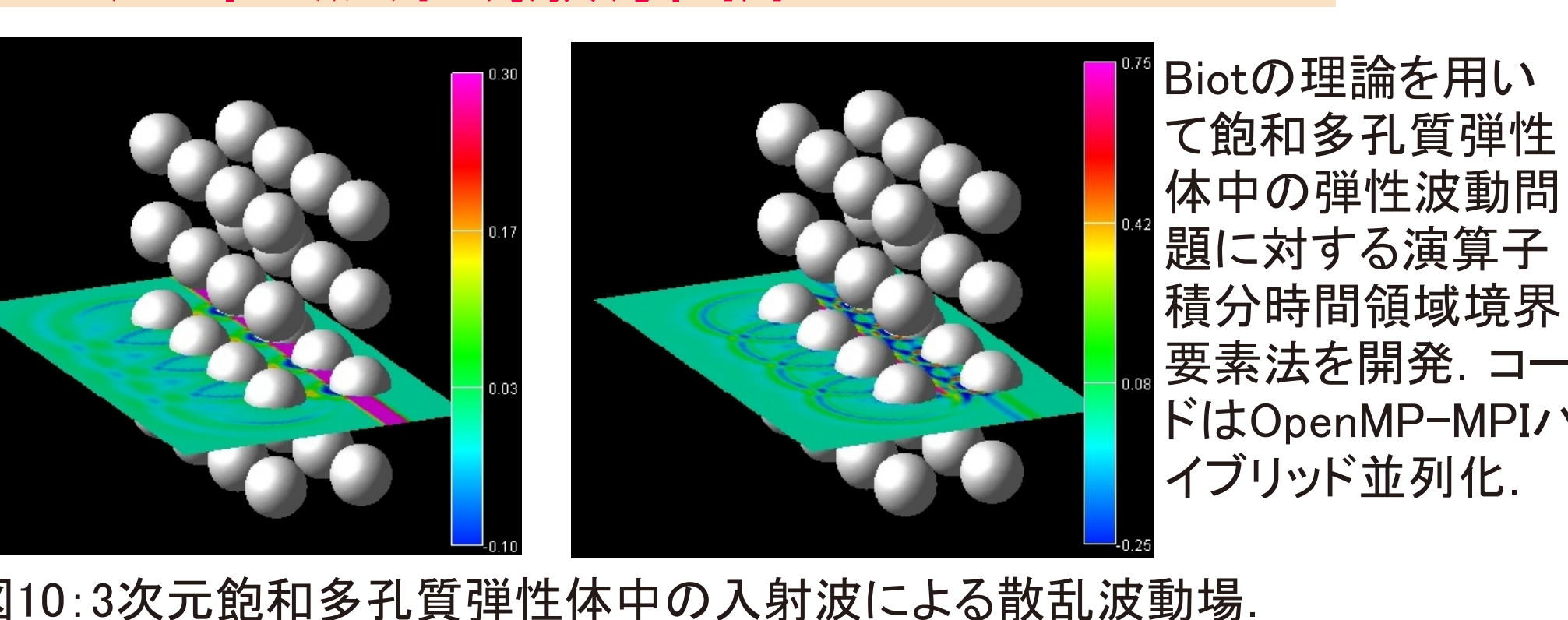


図10: 3次元飽和多孔質弾性体中の入射波による散乱波動場。