

jh250070

NDE4.0 加速のための高性能波動解析・逆解析手法の開発

齋藤隆泰（群馬大学）

概要 近年、超音波を用いた非破壊検査法(UT)に注目が集まっている。一般的に、超音波は固体中で弾性波の性質を示す。そのため、超音波非破壊検査で要求されるシミュレーションは、欠陥による弾性波動散乱問題となる。弾性波動散乱問題の数値解析では、計算に必要な要素長やグリッドサイズは、超音波の波長に比べて小さく設定する必要がある。また、変位や応力等の物理量に対する自由度はスカラー波動の場合に比べ増大するため、計算は一般的に大規模なものとなる。本研究では、これまで開発してきた波動解析のための順解析手法や欠陥形状を再構成する逆解析手法等を、機械学習等のデータサイエンスと融合させて、Industry4.0 に準えて非破壊評価の分野で提唱された NDE4.0 を加速させる取組みを実施する。今年度は、異方性材料や多孔質材料、コンクリート材料に対する UT の高度化や地下空洞に対する非破壊検査に資する高性能波動解析・逆解析手法の開発に関する研究を行い、その有効性を確認した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京科学大学 情報基盤センター

京都大学 学術情報メディアセンター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

【齋藤隆泰(群馬大学)・研究代表者】

本研究を統括している。弾性波動解析や、逆解析手法の開発とその応用、深層学習や機械学習の活用まで携わる。

【丸山泰藏(東京科学大学)・副研究代表者】

弾性波動シミュレーターの高度化とコンクリートのマクロ材料定数の推定に携わる。

【中畑和之(愛媛大学)】

有限要素法や有限積分法を用いた大規模波動解析、地下空洞に対する欠陥イメージング等に携わる。

【岩下武史(京都大学)・深沢圭一郎(総合地球環境学研究所)】

拠点研究機関所属研究者として、本課題で開発す

る各種解析手法の並列化、高速化等に携わる。

【横田理央・松本安弘(東京科学大学)】

各種解析手法の並列化、高速直接解法の境界要素法への応用等に携わる。

【高橋知来・高石青空(愛媛大学)、山田純花・豊島直生(東京科学大学)】

参加研究者の研究室の学生であり、計算実行や、プリプロセス・ポストプロセス等のデータ整理、解析結果の可視化等にも携わる。

2. 研究の目的と意義

工業製品や構造・材料等の健全性評価を目的として、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: Ultrasonic Testing)は、現場での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。医療分野でも、人体の検査に超音波は欠かせない。一般的に、医療分野では人体の大部分が水で構成されているため、超音波をスカラー波としてモデル化できる。しかし、構造・材料(固体)中において、超音波は弾性波の性

質を示す。弾性波は方向特性を持つため、構造・材料に対する UT では、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となる。

UT のシミュレーションでは、弾性波動方程式を適切な初期条件・境界条件等の下で解く必要がある。しかし、UT で対象とする超音波の波長は数 mm 程度と短い。そのため、高精度な数値解析を行うために必要な計算要素長は、この短い波長の数十分の一程度に設定する必要がある。しかも、弾性波はスカラー波と異なり、変位や表面力等の物理量は方向成分を持つため 1 つの節点や要素に対し数倍の未知数を設定する必要がある。よって、僅か数センチ角の試験体に対する 3 次元解析でさえ、一般的には大規模計算が必要となる。

このような中、申請者らは、2017 年度から 2020 年度まで、JHPCN による支援の下、「非均質・異方性材料中を伝搬する弾性波動解析手法の開発と非破壊検査への応用」に関する研究を継続して行い、複雑材料に対する大規模波動解析手法を開発し、良好な審査結果を得てきた。また、2021 年度から、新たに研究課題を「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」と定め、データサイエンスと計算力学を融合させた新しい UT の開発を目的に研究を進め、同様に良好な審査結果を頂いている。しかしながら、データサイエンスの融合は等方性材料への応用等といった基礎的な内容に留まっていた。

そこで、2024 年度より、次節で述べる NDE4.0 の取組みを加速することを目的に、新たに標記課題を提案し、対象範囲をコンクリート等の複雑材料へ拡張して、実務的応用を見据えた研究をスタートさせた。その初年度も良好な審査結果を頂いている。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

研究題目にある NDE4.0 とは、Industry4.0 に準えて非破壊評価の分野で提唱された概念である。Industry4.0 と同様、デジタルライゼーションによる非破壊検査の高度化・効率化のための技術開発

や、データの交換・管理などの改革を描いたロードマップのことを指す。NDE4.0 の主導権を獲得するために、欧米では国家プロジェクトとして革新的技術の開発に取組みつつある。一方、我々、日本の研究者らの強みは、これまでの JHPCN 課題で培ってきた高性能波動解析技術と逆解析技術である。我々の研究グループでは、より現実的な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ングし、サイバー空間上にデジタルツインとして非破壊検査の様子を再現することで、検査の高度化だけでなく、予防保全にも資する技術を開発するシーズを持っていることとなる。また、数理に長けており、汎用ソフトを用いた単なるシミュレーションではなく、最新の理論やアルゴリズムを積極的に導入することができる。本研究で提案する革新的 UT 技術を、日本が掲げる NDE4.0 の目玉とするためには、様々な研究者と共同研究を実施し、技術検証や改善に取り組むことが非常に大きな意義を持つ。また、UT の関連学会の参加者は、産業界の研究者が多く、実務的応用への期待も大きい。

非破壊検査は、機械、土木、建築、電気等、様々な分野で実施されている。そのため、本研究で実施するような最先端のプロジェクトを掲げ、実行する場合、非破壊検査専門の研究者のみならず、材料や弾性波動理論を熟知した応用力学の研究者、それらを離散モデルとして扱える計算力学を専門とする研究者らが、共通の大型計算機を使用できる環境下で相互連携する必要がある。また、効率的な計算コードの開発にはハードウェアにも詳しく、コードチューニングを得意とする研究者や、プリ・ポスト処理の専門家の参画も必要である。

本研究で主体となる研究者 2 名は、地方国立大学に籍を置く。そのため応用力学や計算力学、弾性波動論、非破壊評価に詳しいものの、如何に大規模弾性波動解析を効率的に実施するかが課題となっている。実際、このような大規模波動解析を掲げた挑戦的な研究を実施するためには、スーパ

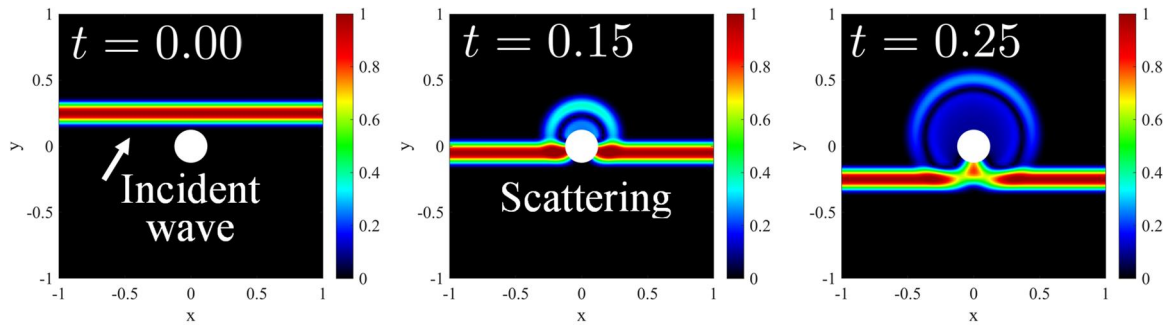


図 1：ニューラルネットワークを用いた 2 次元面外波動問題における空洞による入射波の散乱問題の解析結果（時間領域の場合）.（左）入射平面波が空洞に到達し（中央）空洞により散乱され（右）散乱波が無限遠へ伝搬していく様子を確認することができる.

一コンピューターを有する拠点研究機関のサポートが必須である. 一方, 拠点研究機関で協力を仰ぐ研究者は, 並列計算等, 高速で効率的な計算に詳しい. 本研究は, このような分野横断的な協力体制の下, 本公募型共同研究と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境下でのみ, 効率的かつ実践的な研究展開が可能となる. 本研究課題は, 現場のニーズも勘案し, AI やデータサイエンス等も取り入れて, Society5.0 等の社会的要請にも対応する内容となっており, 本研究を実施する意義は大きい.

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

JHPCN の web サイト

[https://jhpcn-](https://jhpcn-kyoten.itc.utokyo.ac.jp/abstract/jh250070)

[kyoten.itc.utokyo.ac.jp/abstract/jh250070](https://jhpcn-kyoten.itc.utokyo.ac.jp/abstract/jh250070)

で公開しているように, 前年度も多くの成果を挙げている. 紙面の都合上, その全てについて解説することはできないが, 例えば前年度の課題で最終報告書作成後に査読論文として掲載された成果の一部について紹介しておく. なお, 本 4 節および 5 節で引用されている文献は, 上記の JHPCN の web サイトより, 著者名と雑誌名および西暦年で引用した.

○深層学習を援用した新しい境界要素法の開発

境界要素法は, 解析対象の境界表面のみの離散化だけで数値解を求められる方法であり, 無限遠を含む波動散乱問題に有効な数値解析手法として知られている. 本研究では, 境界要素法のように

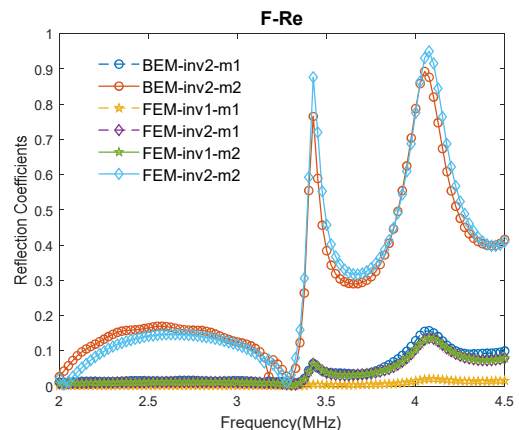


図 2: アルミニウム-鋼材の 2 層体中の接着部分の剥離を含む材料の反射係数の計算.

散乱体表面の離散化のみで波動散乱問題を解析できる深層学習を用いた波動解析手法等を提案した. 図 1 は, 時間領域における入射平面波の空洞によるスカラー波動散乱問題を解析した結果を示している. 詳細は省略するが, 解析結果は解析解とよく一致しており, 査読論文として最近公開されている (市野塚・齋藤, 計算数理工学論文集, 2025).

○高速直接解法を用いた演算子積分時間領域境界要素法的高速化

境界要素法の数値計算では, 解くべき線型方程式に対して, 異なる多数の右辺が存在する場合に対する効率的な解析手法が必要となる場合が多々ある. しかし, 周波数領域における波動問題の場合, その高速直接解法は発展途上であり, 未知数の数に計算時間が比例する計算オーダー $O(N)$ 型の解法は未だ提案されていない. 本研究では, 2 次元波動問題に対する高速直接解法を提案した. 簡

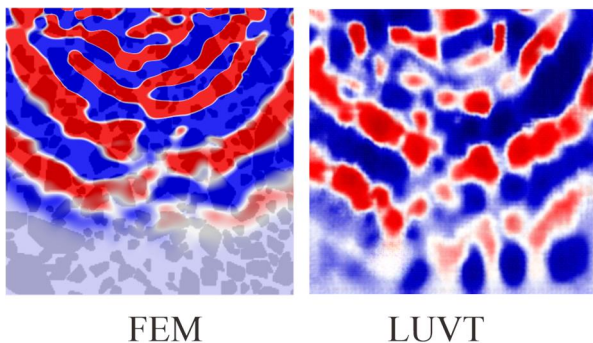


図 3: 有限要素法によるコンクリート中の超音波伝搬シミュレーション結果(左)と LUVT で得られた実際の超音波伝搬可視化結果(右)の比較. 両者の様相は異なる.

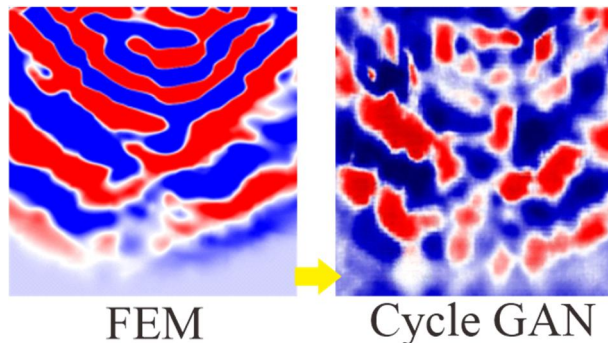


図 4: 有限要素法シミュレーション結果に対する Cycle GAN 適用の一例. Cycle GAN により有限要素法の様相は図 3(右)のような実際の LUVT の様相に近づいたことがわかる.

単な数値解析例と共に、提案手法の有効性を示した。計算結果は、最近論文として掲載されている (Matsumoto and Maruyama, Engineering with Computers, 2026)。

○解析的仮想境界を考慮した有限要素法の開発

有限要素法や差分法等を用いて、無限薄板中の波動散乱解析を効率的に実行するための数値解析手法は、未だ決定版と言われるものが確立されていない。無限薄板中の波動解析では、境界要素法を用いたとしても、薄板の両端に無限遠での弾性波動の振舞いを処理する特別な境界条件が必要である。本研究では、薄板の両端において、無限遠での波動の振舞いを満足する解析的な境界条件を作り出し、実際に SH 波に対する有限要素法や境界要素法に適用することで、提案手法の有効性を示した。図 2 はアルミニウム-鋼材の 2 層体中の接着部分の剥離に対する板波の散乱解析を行い、反射係数を求めた結果を示している。有限要素法および境界要素法で解いた結果はおよそ一致している。これらの成果は、2025 年末に論文(廣瀬・斎藤, 計算数理工学論文集, 2025)として掲載された。

○コンクリート中を伝搬する弾性波動解析手法の開発や AI・データサイエンスの活用

コンクリートは多数の骨材を含むが、骨材の粒度、配置は多様性があるため、通常の汎用の数値解析ソフトウェア等で解析モデルを作ることは難しい。そのため、実際に多数回、有限要素法解析を行ったとしても、有限要素法解析と実際の計測

実験における超音波伝搬には、その様相に、やや乖離が見られる (図 3)。実際には、計測ノイズ等を多く含むだけでなく、骨材による散乱減衰の影響も受けるためである。そこで、このようなギャップを埋めるために、有限要素法解析結果に、Cycle GAN を適用し、この解析と実験の乖離を埋めることを行った。その結果の一例を図 4 に示す。定性的ではあるが、有限要素法解析結果は Cycle GAN により変換され、図 3 右の実際の LUVT 結果の様相に近づいていることがわかる。この成果は、最近、論文(斎藤・廣瀬, 非破壊検査, 2025)として掲載された。

このように、年度終盤に行われた内容は、その翌年にきちんと論文として成果を公表している。

5. 今年度の研究成果の詳細

今年度の研究も、主に順解析手法の開発に関する研究 A) と逆解析手法の開発に関する研究 B) に大別できる。複雑な構造・材料中を伝搬する弾性波動シミュレーション (順解析) をターゲットとする一方で、非破壊評価の最終目的は欠陥の大きさや位置等を推定する逆問題であることから、A)、B) の研究を並列に実施する。また、A)、B) はそれぞれサブテーマを持つ。4 節同様、サブテーマ毎にまとめた成果は下記の通りである。

A) 弾性波動シミュレーターの高度化

A-1) 3 次元異方性・粘弾性波動問題に対する時間領域境界要素法の開発 (斎藤・松本・岩下・深沢)

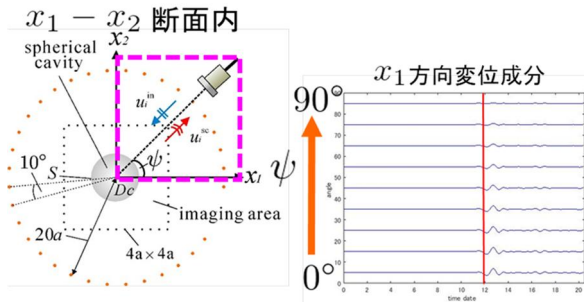


図 5: 開発手法で計算した遠方の観測点での散乱波形成分の一例。

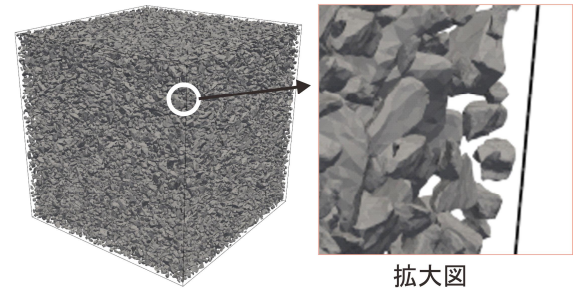


図 6: ボロノイ分割等を用いたコンクリートの 3 次元モデル化。

境界要素法における係数行列成分は、基本解の数値積分によって計算される。しかしながら、3次元異方性・粘弾性波動問題に対する時間領域境界要素法では、その複雑さから、そもそも基本解が解析的に求まらないことが問題となっている。そこで、本研究では、3次元異方性・粘弾性波動問題に対するラプラス変換域基本解を導き、演算子積分法を適用して時間領域の数値解を求める定式化を行った。図 5 は本研究で開発した手法で求めた 3次元空洞の周辺で得られた散乱波形をプロットした一例である。詳細は省略するが、正しく時間領域の波形を得られている。今後は、計算結果をまとめ、論文投稿を進める予定である。

A-2) 2次元面内波動問題に対する高速領域積分方程式法の開発 (斎藤・丸山・松本・横田)

昨年度より継続して研究を行っている内容であり、中間報告の段階で既にいくつかの結果を学会等で発表している (豊島・丸山, 第 30 回計算工学講演会, 2025)。年度後半では、前年度までの OpenMP によるスレッド並列の計算を MPI/OpenMP によるハイブリッド並列実装に拡張した。これにより、1 ノードにはメモリが収まりきらない大規模問題も解くことができるようになった。ハイブリッド並列版を用いた成果は SIAM PP26 の発表 (Matsumoto, T Maruyama, Ma and Yokota, SIAM PP26, 2026) でも使用している。また、MPI/OpenMP ハイブリッド実装の開発に伴いジョブ投入スクリプトを見直し、一連の計算条件セットに対して利用ノード数ごとのスクリプトファイルの手動での準備を不要とした。これにより、強弱スケール性能の評

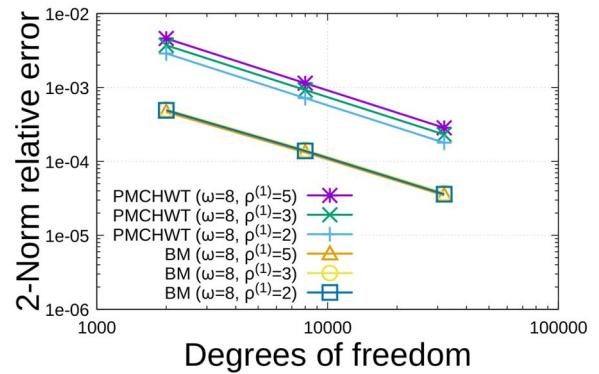


図 7: 開発した手法の自由度と相対誤差の関係。

価の手間を軽減できた。

A-3) 多孔質セラミックス材料中の波動解析のための境界要素法の開発 (斎藤・丸山・松本)

多孔質セラミックス材料中の波動伝搬は、アルミニウム等の通常の等方・均質な弾性体と比べて、特異な性質を示すことが知られている。多孔質セラミックス材料は、マイクロレベルで非均質な材料であり、その影響が巨視的にどのように現れるかを検討することが重要である。近年、そのような非均質材料に対して、従来の力学理論で検討されてきた局所理論ではなく、非局所理論と呼ばれる力学理論の適用の重要性が指摘されている。本研究では、そのような非局所理論を取り入れた新しい波動解析手法を開発した。研究成果は、論文 (Furukawa, Maruyama, Saitoh, Hirose, et al., Engineering Analysis with Boundary Elements, 2025) に投稿し、掲載されている。現在は 2次元面内波動問題への拡張を行っている。

B) 逆解析の高度化と実応用への展開

B-1) コンクリート中を伝搬する波動解析のためのマクロ材料定数推定法の開発 (斎藤・丸山・松本)

コンクリート中を伝搬する波動解析を実施するには、2通りの戦略が考えられる。1つ目の戦略は、コンクリート中の骨材等をモデリングして、有限要素法等を実施する戦略である。2つ目の戦略は、骨材等を直接モデリングするのではなく、数理的な手法で骨材の影響を定式化の中に取り入れる戦略である。本研究で取り組んだ1つ目の戦略に関する結果の一例を図6に示す。ここでは、ボロノイ分割と呼ばれる手法を用いて自動的にコンクリートを3次元モデリングする手法を開発した。図6に示すように、拡大図によりコンクリート中の骨材がモデル化されていることがわかる。また、2つ目の戦略として、コンクリート中の波動場を効率的に解析する手法の開発を行った。この計算はA-2)で開発した手法をベースとしている。ここではPMCHWT定式化(丸山・松本, 計算数理工学論文集, 2025)等を適用し、境界要素係数行列の性質を利用した計算の効率化、その精度検証、解析手法の高度化等を図った。図7は、簡単な波動散乱問題における計算精度の検証を、横軸に未知数の数、縦軸に相対誤差を取りプロットした結果である。提案手法は高精度に計算できていることがわかる。

B-2) 多点センシングデータを活用した大規模3D逆解析の実装 (斎藤・中畑・松本)

今年度は構造・材料を対象とした非破壊検査の対象を、地下空間へ拡張した。地下に埋設された管路や空洞等を逆解析するために、電磁波を送受信するアンテナを車輻に搭載し、走行しながら通過断面の再構成像を合成していき、最終的に地下空間全体の3D像を出力する方法を考えた。図8は地下空間内部の空洞や介在物を開発したモノスタティック開口合成法で映像化した結果である。詳細は省略するが、正しく実際の空洞等を映像化できていることがわかる。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

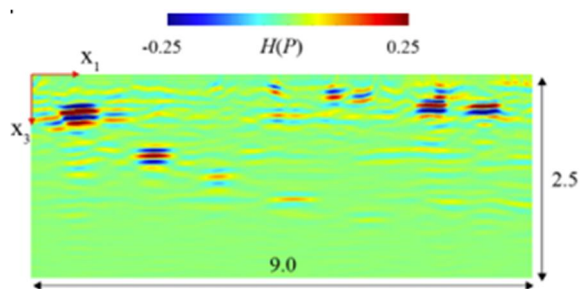


図8: モノスタティック開口合成法による地中内部の空洞及び介在物の映像化結果。

現在までの進捗状況の自己評価と今後の展望は下記の通りである。4節最後に述べたように、年度終盤に得られた結果は、前年度同様、適宜、論文へ投稿する予定である。

A) 弾性波動シミュレーターの高度化

A-1) 3次元異方性・粘弾性波動問題に対する時間領域境界要素法の開発

今年度は、時間領域境界要素法に必須な基本解の計算の定式化、そのコード化に集中した。複雑な基本解の計算には、OpenMP並列化やニューラルネットワークを用いた計算等を検討した。現在では、算法の複雑さと計算負荷の観点から、1つの3次元空洞による散乱問題を解析できる程度に留まっている。今後は、開発した手法の高度化を進めると共に、逆散乱解析への応用等を実施する予定である。

A-2) 2次元面内波動問題に対する高速領域積分方程式法の開発

前年度に行った内容を2次元面内波動問題へと拡張した研究課題であり、引き続き成果を残すことができた。一方で、MPI/OpenMPの並列化も行い、高速化を試みたものの、その計算効率等については、まだ改善の余地が残されている。なお、本研究は2026年度課題において、弾性波動問題に対する高速積分方程式法の開発、として継続される。並列化効率の改善のみならず、効率的な前処理を施した反復解法の開発にも取り組む予定である。数理的な側面が強い研究ではあるが、開発した計算コードを応用して、実際の非破壊検査における計算にも着実に応用できている(図9)。今後も、

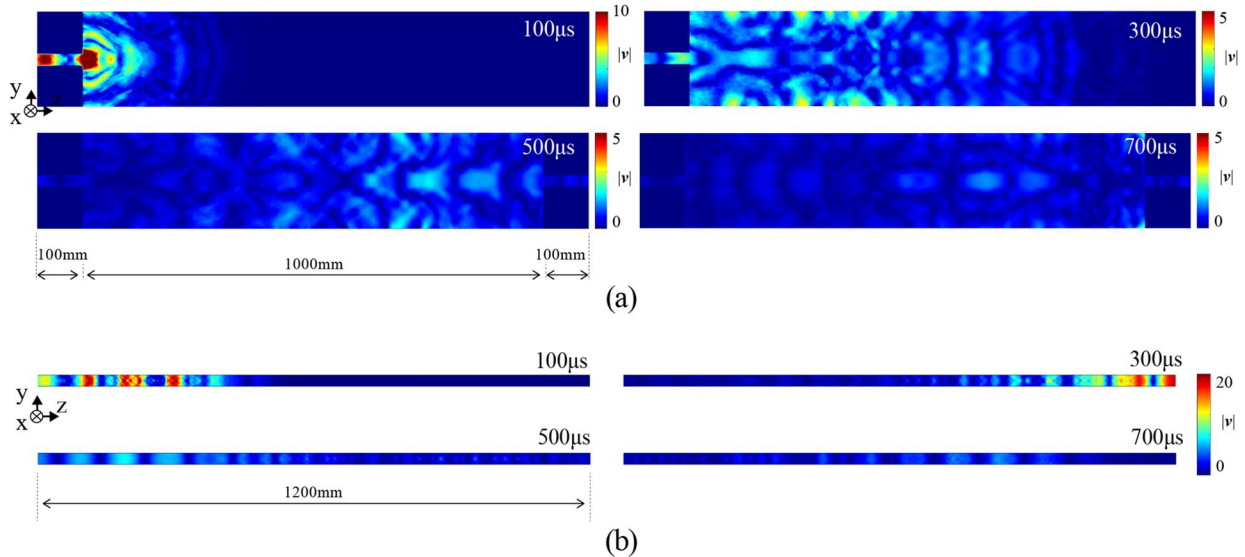


図 9：コンクリート内部を伝搬する超音波シミュレーション結果の一例(a)コンクリート及び鉄筋を伝搬する超音波の可視化結果(b)鉄筋部分を伝搬する超音波の可視化結果. 鉄筋を伝搬する超音波はコンクリートへ漏洩していることがわかる.

開発したコードを実問題（中畑・丸山ら，構造工学論文集，2026）へ活かしながら研究を行う予定である。

A-3) 多孔質セラミックス材料中の波動解析のための境界要素法の開発

多孔質セラミックス材料中の波動解析手法を開発した。非局所理論を応用し，論文（Furukawa, Maruyama, Saitoh, Hirose, et al., Engineering Analysis with Boundary Elements, 2025）に掲載されており，一定の成果を残せたと考えている。2026 年度課題においては，セラミックスに限定せず，マイクロポーラー弾性波動問題として一般化した問題への研究に取り組む予定となっている。計算時間を短縮するために OpenMP/MPI ハイブリッド並列化を適用した計算時間の短縮および大規模問題への対応も今後の課題である。

B) 逆解析の高度化と実応用への展開

B-1) コンクリート中を伝搬する波動解析のためのマクロ材料定数推定法の開発

境界要素法や有限要素法を利用してコンクリートのモデル化から超音波シミュレーションに及ぶ一連の計算を，骨材の直接モデリングからマクロ弾性定数を求めて均質化し，計算する方法まで様々なアプローチによる研究を進めた。本研究は

2026 年度も継続することとなっている。Effective Field Method や PMCHWT 定式化等を適用しつつ，開発手法の高度化を図りながら，物理的な妥当性を計測実験の結果と比較しながら研究を進める予定である。

B-2) 多点センシングデータを活用した大規模 3D 逆解析の実装

地下埋設管や地下空洞等を検出するために，大規模電磁波シミュレーションや，得られた受信波形を用いた開口合成法による逆解析等を進め，一定の成果を得ることができた。ここで開発した手法は，もちろん超音波を用いた場合にも利用できる（Nakahata et al, e-Journal of Nondestructive Testing, 2025）。本課題も 2026 年度に継続する予定となっている。2026 年度は機械学習を利用しながら，さらなる高度化を図る予定である。