jh240035

課題代表者：斎藤隆泰（群馬大学）

NDE4.0加速のための 高性能波動解析・逆解析手法の開発

構成拠点：京都大学，東京工業大学，研究分野：大規模計算科学分野/Computational science
メンバー構成：東京工業大学（丸山泰蔵，松本安弘，山田純花），京都大学（岩下武史，深沢圭一郎）
愛媛大学（中畑和之，小林亮介，永易和弥，中村太一）

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，現場適用が比較的簡単であるため，最も広く利用されている．超音波は固体中で弾性波の特性を示すため，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．そのため，HPCI-JHPCNによる支援の下，2017年度から2020年度まで「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」に関する研究を行ってきた．その後，2021年度から2023年度まではデータサイエンスと計算力学を融合させた新しいUTの開発を目的として「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」に関する研究を行ってきた．2024年度からはUTのさらなる高度化を目指し，新たに研究課題を「NDE4.0加速のための高性能波動解析・逆解析手法の開発」と定め，研究を進めている．

2 共同研究として実施する必要性

金属を伝搬するMHz帯域の超音波の波長は数mm程度であるため，現実的なシミュレーションを実行するには代表波長の数十分の1程度の要素長や格子幅が要求される．そのため，数cm角の試験体に対する3次元シミュレーションでさえ，解析は大規模なものとなる．しかも，非均質材料や異方性を有する材料では，モデル化も複雑になり，場合によっては，モデルやデータのバラツキを考慮した確率論的アプローチも必要になろう．従って，解析は必然的に大規模かつ多数回実施することになる．また，本研究で主体となる研究者の中で地方国立大学に籍を置く者も多い．現状，ハード面でこれだけの挑戦的な課題を実施するには，大型計算機を有する拠点研究機関のサポートが必須である．本研究は，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になると考える．

3 研究の意義

我々，日本の研究者らの強みは，このJHPCNで培ってきた高性能計算技術と逆解析技術である．我々の研究グループでは，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となる．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，共同研究による技術の検証や改善は非常に大きな意義を持つ．そこで，データサイエンスを取り入れた新しいUTモデルの開発を目指し，これまでの数理的モデリングに加えてデータ駆動型のアプローチを含めた学際的な研究を行っている．

4 研究計画

(A-1) 深層学習を援用した新しい境界要素法の開発

一般的に境界要素法は，解析対象とする場の基本解またはグリーン関数を必要とする．特に，異方性弾性波動問題や半無限弾性波動問題では，それらは解析的に構成可能であるものの，その数値的評価が極めて複雑で，計算時間の面からもボトルネックとなる．この点が，境界要素法の実応用の足枷になっている．これまでのJHPCNの課題で試験的に人工的な基本解を作成し，境界要素法に応用する研究を実施し，一定の成果を得ている．そこで，本課題より，この内容を本格化し，深層学習を用いて人工的に作成した基本解やグリーン関数を用いた境界要素法の研究を実施する．令和6年度は，2次元異方性弾性波動問題を対象に，本手法の有効性等を検討する．深層学習にはGPUを利用することで計算の効率化を図る．

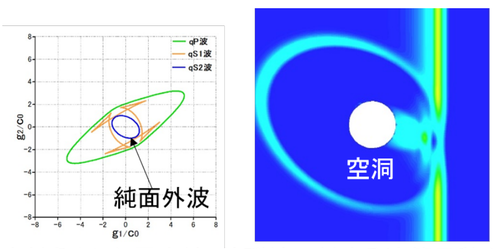

図1：純面外波を対象とした異方性・粘弾性に対する演算子積分時間領域境界要素法による数値解析例（左）群速度曲線，（右）空洞による散乱解析結果．

(A-2) 高速直接解法を用いた演算子積分時間領域境界要素法の高速化

これまでに新しい時間領域境界要素法（演算子積分時間領域境界要素法）を開発し，数々の問題に適用してきた．また，高速多重極法やH-matrixを適用した高速化に関する研究も行ってきた．演算子積分時間領域境界要素法の特徴として，解くべき最終方程式の右辺ベクトルは毎時間ステップ毎に更新する必要があるものの，左辺の係数行列は更新する必要がない点がある．この特徴は，近年，線型方程式の高速解法として注目を集めている高速直接解法と親和性が高い．直接解法であるため，反復法では収束性能の点で問題ある場合でも適用可能となり，実用性も向上できる可能性がある．令和6年度は，まずは2次元面外波動問題に対して，その適用性を検討する．

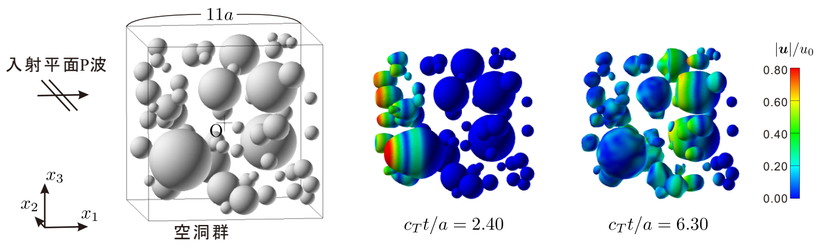

図2：3次元弾性波動問題に対する演算子積分時間領域境界要素法を用いた空洞群による散乱解析例

(A-3) 解析的仮想境界を考慮した有限要素法の開発

有限要素法は，構造解析のデファクトスタンダードな手法であるが，無限遠を考慮する必要のある波動問題は苦手である．無限領域を扱う場合，仮想境界等を設ける必要があるが，様々な波動に万能な手法は提案されていない．特に非破壊検査で度々モデル化の対象となる無限薄板中の弾性波動問題は対応が難しい．そこで本研究では，無限薄板中の弾性波動問題を対象に，板内部の波動伝搬理論をベースとした解析的仮想境界を考慮した新しい有限要素法を開発する．提案する解析的仮想境界は，有限要素法のみならず，境界要素法にも統一的に適用できる定式化を検討している．2021～2023年度に精力的に取組んできた欠陥形状再構成手法である時間反転法にも応用可能であり，デジタルツイン非破壊検査の実用性の向上に資するテーマでもある．

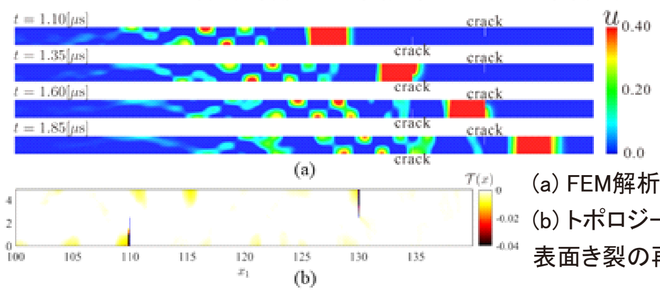

図3：薄板中の表面き裂の再構成
(a) FEM解析結果
(b) トポロジー感度を用いた表面き裂の再構成結果．

(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の逆解析

コンクリートは非均質材料であり，ミクロスケールでは細骨材や気泡，メゾスケールでは粗骨材を含有している．超音波の伝搬はそれらによる多重散乱や散乱減衰の影響を強く受けるため，マクロな材料定数は周波数依存かつ確率的な値となる．しかしながら，将来の非破壊検査を考えると，それらを自動計測できる技術を開発することが望ましい．例えば，コンクリート打設時に既知である非均質性の情報を用いて欠陥の有無について確率的なリスク評価の枠組みを構築できれば有用であり実用性に資する．そこで，ここではEffective Field Method (EFM)を用いて，様々な方向に伝搬する平面波を入射波として与え，局所的に散乱体が分布する無限領域での散乱問題を解くことで，平均的な波動場を支配するマクロ材料定数を推定する．必要となる散乱解析手法には，無限領域の扱いに優れた境界要素法を用いる．EFMでは加振項（入射波）のみを変化させた場合の散乱問題を繰り返し解く必要があるため，(A-2)で開発する高速直接解法をアレンジすることで対応する．

(B-2) データサイエンスを活用したマクロ材料定数推定の逆解析

(B-1)は理論的な面からコンクリートのマクロ材料定数を推定するものである．一方，近年では，コンクリート相手でも多点計測により短時間で数多くの波形データを収集できるようになってきた．そこで，(B-1)とは別のアプローチとして，機械学習・深層学習を用いてコンクリートのマクロ材料定数を推定することを試みる．実際に推定結果を入力とした大規模超音波シミュレーションを実行することで本手法の有効性を検討する．また，(B-1)の結果と比較することで，本手法の有効性を検討する．本項目においてもGPUを利用する．なお，(B-1)で実施する境界要素法の大部分の計算は，この(B-2)でも利用することとなる．

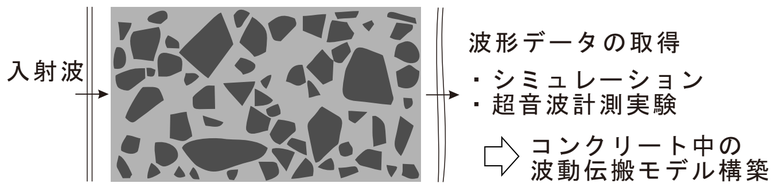

図4：コンクリート中を伝搬する弾性波動のためのマクロ材料定数推定のイメージ．

5 これまでの研究成果

研究代表者らは，2017年度から2020年度の4年間は「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」，2021年度から2023年度の3年間は「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」という題目で，HPCI-JHPCNの支援を受けてきた．2024年度より，新たにさらなるUTの高度化を目的に本研究課題を実施している．前研究課題では，（A）弾性波動シミュレーターの高度化，（B）逆解析の高度化とセンシングデータの応用，（C）AIのUTへの応用の3つの大テーマについて研究を実施し，複雑な弾性波動問題に対する数値解析手法やセンシングデータによる欠陥の検出技術の開発などを行った．ここではその成果の一部を紹介する．

AIのUTへの応用

レーザ超音波可視化試験に対する学習データをシミュレータによって大量に生成する．ここで，実測データに近い学習データとするためにStyle変換を用いた．

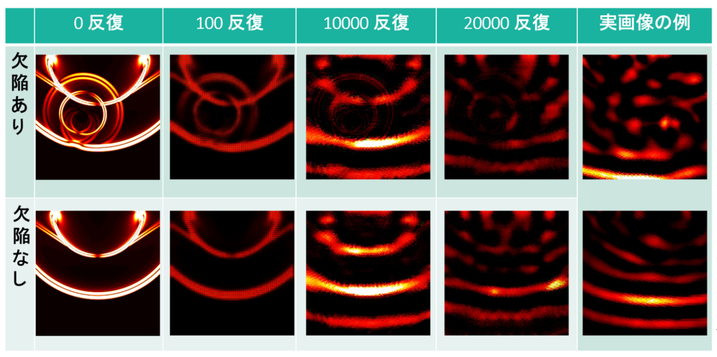

図5：時間領域差分法で求めたLUVT可視化試験に対するシミュレーション結果にStyle変換を適用した一例．上段は欠陥有り，下段は欠陥無しの場合．Style変換によりシミュレーションで得られた画像は徐々に実際のLUVT画像の様態に近づいている．

センシングデータの応用

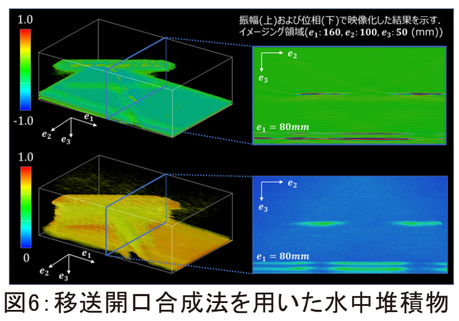

図6：移送開口合成法を用いた水中堆積物を模擬した試験体の映像化結果の一例．

超音波アレイプローブを用いて，液体中の欠陥や堆積物を移送型開口合成法である全波形サンプリング処理(FSAP)で映像化を試みた．散乱波の位相情報を用いる場合，堆積物のラテラル表面の再構成能の向上がみられた．