

jh180049

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

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に注目が集まっている。一般に、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、欠陥や材料界面等による弾性波動散乱問題へと帰着される。しかしながら、超音波の波長は非常に小さいため、その解析は一般的に大規模なものとなる。本研究では、非均質性や異方性といった複雑な性質を示す材料中の波動伝搬を模擬するために必要となる弾性波動解析手法の開発、その高速化、並列化、ならびにそれら材料中の欠陥を特定するための逆問題に取り組んだ。数値解析手法には、境界要素法(BEM)、有限要素法(FEM)、有限積分法(FIT)、粒子法(MPS)のいずれかを、扱う問題の性質毎に選定した。FRP等の先進材料を対象に、開発した手法を適用することで、提案手法等の妥当性や有効性を検討した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

平成 30 年度の参加研究者の役割分担は下記の通りである。申請時の内容と概ね変更はない。

【齋藤隆泰・群馬大学・研究代表者】

研究代表者として、本研究を統括している。また、時間領域境界要素法の効率化や FRP 中の弾性波動散乱解析、並びに逆散乱解析を用いた欠陥形状再構成手法の開発、さらには Time-Reversal 法の実施にも携わっている。有限要素法や粒子法を用いた大規模弾性波動解析手法の開発にも携った。

【中畑和之・愛媛大学・副研究代表者】

研究代表者の齋藤と共に、副研究代表者として本研究を統括している。有限要素法や有限積分法を用いた大規模弾性波動解析手法の開発や、それらと境界要素法の結合解法の開発、Time-Reversal 法による逆伝搬解析、粒子フィルタを用いた逆解析に関する研究等に携った。

【古川陽・東京工業大学】

異方性を示す FRP 材料中の弾性波動場を、演算子

積分時間領域境界要素法を用いて解析する役割や、各種逆解析に必要な順解析データの作成、Sinc 法を用いた新しい大規模波動問題のための境界要素法の開発等に携った。

【牛島省・京都大学】

自由度の大きい大規模弾性波動解析を実施するには、並列計算は欠かせない。共同研究の拠点大学(京都大学)側からの参加研究者として、解析コードの並列化等に協力している。また、スーパーコンピュータのシステムに精通しているため、計算実行のアドバイザー的立場の役割も担った。

【小山田耕二・京都大学】

同じく、共同研究の拠点大学(京都大学)側からの参加研究者として、弾性波動解析結果を可視化する方法や、それらデータの効率的なポスト処理等、アドバイザー的立場の役割も担った。

【一色正晴・愛媛大学】

大規模弾性波動解析結果のデータは膨大なものとなるため、その計算結果をどのように効率良く可視化するかについて検討が必要である。そのため、様々な弾性波動解析結果のポスト処理に携わった。

【その他学生】

研究代表者、副代表者の研究室学生として、数値解析のためのプリ・ポスト等の補助としての役

割等を担った。

2. 研究の目的と意義

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、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。しかしながら、航空宇宙分野等で近年盛んに用いられている Fiber Reinforced Plastic(FRP)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、申請者らのグループは、H29 年度より本研究課題：「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」に関する研究をスタートさせた。これまで、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い、後の審査においても良好な講評を頂いている。しかしながら、残された課題は依然として数多い。例えば、H29, 30 年度に開発した FRP 中の欠陥形状再構成手法は、現状、体積型欠陥を対象とした二次元の定式化に留まっている。また、時間反転法を用いた逆解析手法の構築等、改善すべき課題も数多く残されている。このような残された課題は、これまで同様、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、今年度もターゲット材料を非均質・異方性材料と定め、これら材料中の大規模弾性波動解析手法の開発と欠陥の性状を推定する逆解析やデータ同化の開発を目的に、研究を実施する。

現在、政府の科学技術イノベーション総合戦略では、2030 年までに我が国が達成すべきイノベーション技術として、新しい非破壊検査法の開発を目標に掲げている。検査の汎用性に鑑みれば、UT の高度化が検査業界に最もインパクトがあるだろう。しかしながら、FRP を代表とした、非均質性や異方性を示す材料を対象とした場合、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イノベーション技術の創出が不可欠である。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。例えば 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等、非破壊検査の実施を大きくアシストできる。さらに、本課題では、シミュレーションを UT に積極的に取り入れた逆解析手法を開発する。これらは、UT のブレイクスルーの起爆剤となり得るだろう。UT は、土木、航空宇宙分野等、様々な分野で必要とされている。従って、本研究は社会全体に大きく寄与する重要な研究課題であり、達成に対する波及効果は広く、研究の意義は極めて大きい。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

例えば FRP はプリプレグの積層角によって全く異なる材料特性を示す。したがって、均質な金属材料を対象とする場合と異なり、複数のモデル化を考慮しなければならない。また、超音波の波長は数 mm～数 cm オーダーであるため、精度の良い数値シミュレーションを実行するには要素サイズを代表波長の 50 分の 1 程度にする必要がある。そのため、さらに FRP 中の補強繊維までも厳密にモデル化するには、メゾスケール構造を考慮する必要がある。よって、いずれにしても本研究課題の実行には、大規模シミュレーションを避けることができない。問題の自由度を考えれば、単なる大規模計算に留まらず、メニーコアを有効に利用した並列化や、何らかの高速化アルゴリズムを適用した上で計算を実行することは必然である。以上を考慮すれば、H29 年度同様、本研究実施のためには、非破壊検査、材料や弾性波動、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。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ろう。このように、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ると考え，本申請に至った。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

H29 年度は主に以下の内容を実施した。

(A-1) 境界要素法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・紅露・古川)

境界要素法(BEM: Boundary Element Method)の効率化のために，ACA (Adaptive Cross Approximation)を適用する方法を試みた。ACA を第一段階として周波数領域の境界要素法に適用し，解析の効率化を試みた。適用例として，凍結した固体中の面外波動問題に対する BEM に ACA を実装し，本手法で得られた数値解が，解析解と一致していることを確認した。また，要素数(自由度)と計算時間の関係を示すことで，正しく高速化が行われていることを確認した。

(A-2) 有限要素法・有限積分法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑・溝田)

超音波非破壊検査では，扱う超音波の波長は数 mm のオーダーなので，数 cm 角の試験体に対しても，解くべき問題は大规模となる。ここでは，イメージベースモデリングを施した有限積分法(FIT: Finite Integration Technique)や有限要素法(FEM: Finite Element Method)コードを開発した。FRP は，様々な積層角を持って成形されるため，与えられた FRP に対して数値解析を行うには，まず，弾性定数を推定する必要がある。そこで，FRP の弾性定数を推定する方法を開発し，開発した方法を用いて得られた弾性定数を，先に開発した解析コードの入力として与えることで，FRP 中の超音波の弾性波動解析を行った。図 1 は本研究で行った解析の一例である。まず，プリプレグの弾性定数を求め，次に対応する積層角毎に弾性定数変換・決定し，それら各層の積層による CFRP を用意した。図 1 はこの CFRP 上面からの超音波伝搬シミュレーション結果を示している。ただし図 1 (上段)はシミュレーション結果を，図 1 (下段)は LDV による実験結果を示している。図 1 より，超音波を真下に送信したにも関わらず，異方性が

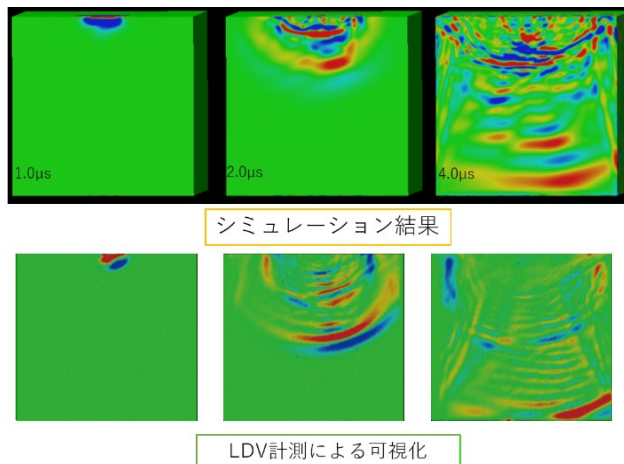


図 1 積層構造を考慮した CFRP 中の超音波伝搬解析結果(上段)シミュレーション結果(下段)LDV 計測による可視化結果。

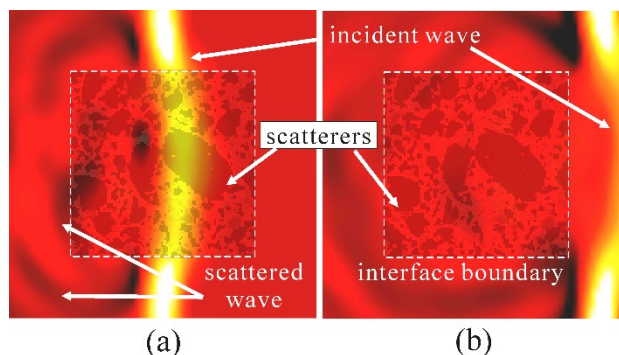


図 2 BEM-FEM 結合解法で求めた非均質領域周辺の弾性波動場(a),(b)は異なる時刻の結果。

原因で超音波が右下方向へ伝搬する性質を良く再現できている。よって，開発したコードや FRP の弾性定数推定法の妥当性が確かめられた。また，静铸造ステンレス鋼中の超音波伝搬シミュレーション等も実行し，査読付き論文に投稿している(業績((1)-H)。

(A-3) BEM と FEM の結合解法による非破壊検査シミュレーション (斎藤・中畑・紅露)

一般的に，BEM は無限または半無限領域を含む波動解析に威力を発揮し，FEM は閉領域の解析に威力を発揮する。また，BEM は均質な波動場における散乱問題に強いが，非均質領域の解析は苦手である。一方，FEM は，非均質領域における波動解析を比較的得意としている。そこで，本研究では，従来法に比べて数値安定な最新の BEM である，演算子積分時間領域 BEM (CQBEM) を FEM と結合させる新しい方法を開発した。図 2 は提案手法による解析結果の一例を示している。図中の白点線は両者

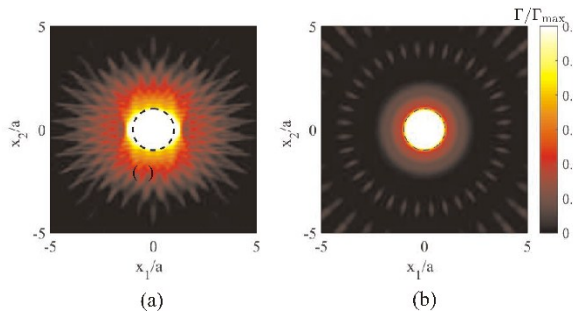


図 3 空洞に対する逆散乱解析結果(a)CFRP(b)等方性材料の場合。

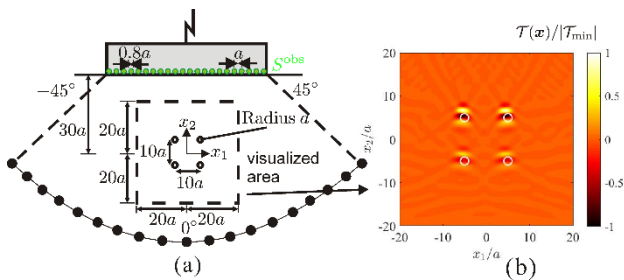


図 4 時間反転法の欠陥検出指標にトポロジー感度を用いた場合の欠陥位置推定結果(a)フェーズドレイ探傷解析モデル(b)欠陥位置推定結果。

の仮想的な結合境界を示しており、内側を FEM、外側を CQBEM で解析している。内側領域は非均質領域とし、散乱体のモデル化には X 線 CT スキャン画像によるイメージベースモデリングを採用した。図 2 より、水平方向に伝搬する入射平面波は、散乱体に散乱されながら伝搬している様子を見て取れる。また、散乱波が無限遠方に伝搬し、結合境界で無用な波動の乱れも生じないことから、正しく解析を実行できていることがわかった。

(B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

まず(A-1)で開発した CQBEM を 2 次元面内異方性弾性波動問題へ拡張し、CFRP および原子力機器等に用いられているオーステナイト系鋼材および CFRP 中の欠陥による弾性波動散乱解析を行った。次に、これら材料中の空洞に対する欠陥形状再構成のための逆散乱解析法の開発を行った。先の解析で求めた弾性波動散乱解析結果を用いて欠陥形状を再構成した結果を図 3 に示す。ただし、図 3(a) は CFRP 中の空洞を、図 3(b) は比較のため等方性材料中の空洞を再構成した結果を示してある。図 3(a) より CFRP の場合の結果は、やや横長に再構成されているものの、異方性の影響を受けても概ね

真円を再構成できていることがわかる。

(B-2) Time-Reversal 法に基づく逆伝搬解析 (斎藤・中畑・溝田)

Time-Reversal 法は、グリーン関数の相反性等の性質を用いて、受信散乱波を時間反転させることで散乱源を推定する方法である。しかしながら、時間反転波の収束位置を如何に定量的に評価するかが難しい。本研究ではトポロジー感度を時間反転法の欠陥検出指標に用いる方法を開発した。図 4 に Time-Reversal 法を用いて二次元等方弾性体内部の 4 つの空洞を再構成した結果を示す。解析では図 4(a) に示すように、64 素子から成るフェーズドレイ探触子を用いた場合を想定している。図 4(b) は、図 4(a) 中の点線内の領域について欠陥位置を推定した結果を示しており、位相差をつけて超音波を入射させることで、下側の 2 つの欠陥位置も正しく推定できていることがわかる。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (牛島・小山田・一色)

上記 (A-1)-(B-2) に至る数値解析コードの OpenMP, MPI 並列化や、その計算結果に対するポスト処理等で連携し、解析自体や可視化技術に関する効率化を行った。

5. 今年度の研究成果の詳細

前節で述べた前年度の成果を踏まえ、今年度は以下の研究を行った。

(A-1) 境界要素法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・古川)

H29 年度の ACA に続き、BEM による大規模波動解

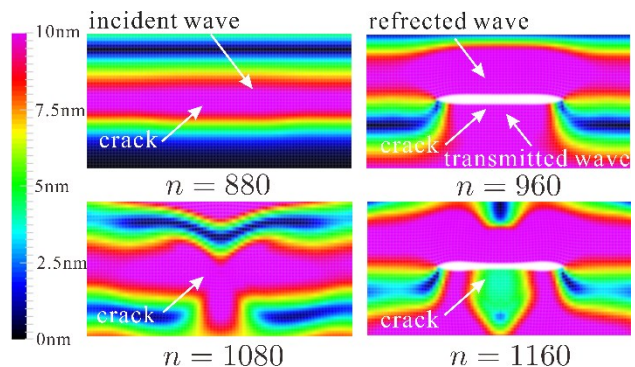


図 5 粒子法を用いた非線形超音波法のシミュレーション (様々な時刻におけるき裂周辺の変位場)。

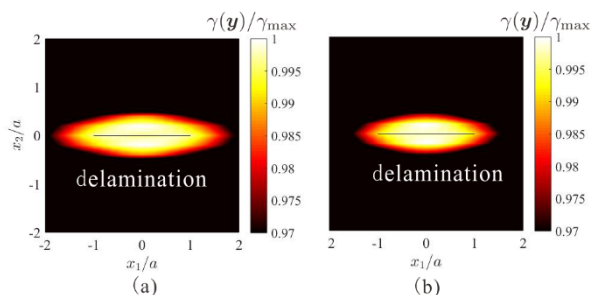


図 6 CFRP 中の層間剥離に対する逆散乱解析結果 (a)一方向 CFRP(b)擬似等方積層 CFRP の場合.

析手法の開発を行った. H30 年度前期は Sinc 法を用いた BEM の定式化(業績(3)-C), BEM で用いる基本解の遠方場近似の導出(業績(3)-E), (4)-A)を行い, その有効性を示した. 後期は, Sinc 法を用いた数値解析例を示した論文を執筆し, 採択されている(業績(1)-D). また, 2次元面外異方性弾性波動問題において, MPI と OpenMP による並列化を施す研究を行い, 高速化性能についても確認した.

(A-2) 有限要素法・有限積分法・粒子法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑)

H29 年度に引き続き大規模波動問題に対する FEM と FIT の高度化を行った. 応用例として, 前期に FIT を用いた非線形超音波シミュレーション, 擬似等方積層 CFRP 等の H29 年度とは異なる積層パターンから成る CFRP 中の大規模弾性波動解析(業績(3)-F)を行った. 結果は各種逆問題へ応用し, 論文にも採択されている. 一方, 後期には, 粒子法を用いた大規模弾性波動解析手法の開発(業績(1)-B)およびその並列化を行い, き裂面の接触状態により生じる高調波シミュレーションを行った. 図 5 は解析例の一例であり, 接触を考慮したき裂周辺の変位場の絶対値をプロットした結果を示している. 図 5 より, 時間ステップ $n=880, 1080$ の場合, き裂は閉口しているものの, $n=960, 1160$ の場合, 大振幅超音波により, き裂が開口している様子を確認できる. このようなき裂の開閉口に伴い, 非線形超音波が誘発される. また, 二次元問題であるが, 解析領域間を列分割することで, OpenMP-MPI ハイブリッド並列化を施すことで, 計算を高速化した.

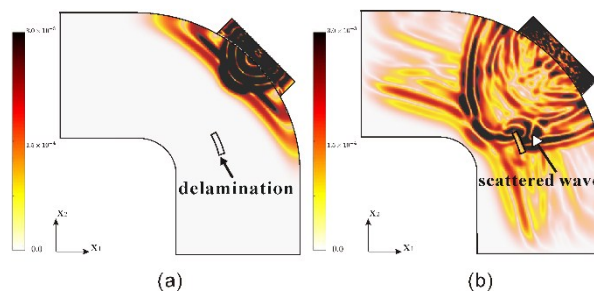


図 7 FEM を用いた L 字型 CFRP 中の層間剥離による弾性波動散乱解析(a),(b)は異なる時刻の結果.

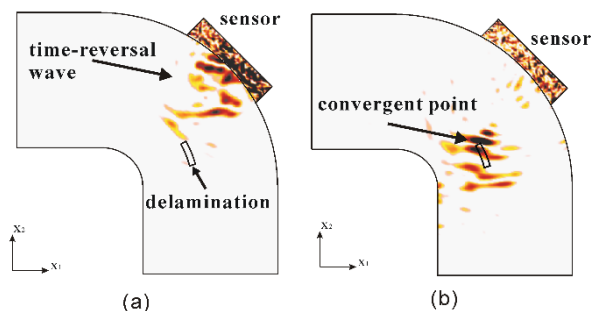


図 8 図 7 で得られた受信波形の逆伝搬解析結果 (a),(b)は異なる時刻での結果.

(B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

H29 年度に引き続き行った研究テーマであり, H30 年度は, H29 年度に開発した 2次元逆散乱解析手法を異方性弾性体中のき裂(層間剥離)へ適用すべく, 改良を施した. まず前期は, (A-1)で開発している CQBEM を用いて, き裂等からの散乱波を求めた. 次に, 二次元純面外波動場に対するき裂による逆散乱解析の定式化を行い, その有効性について検討した(業績(1)-F, (2)-A, (3)-D). 一方, 後期は, 前期に開発した手法を二次元面内波動場に対する場合へ拡張することを行った. 図 6 は本研究で開発した 2次元面外波動場における層間剥離の逆散乱解析結果(業績(1)-C)を示している. ただし図 6 中の(a), (b)はそれぞれ一方向 CFRP, 擬似等方積層 CFRP に対する結果である. 異方性の影響が大きい一方向 CFRP の場合, 再構成像はやや大きめにでているものの, 概ね層間剥離の位置を推定できていることがわかる.

(B-2) 逆伝搬解析に基づく AE 震源の同定 (斎藤・中畑)

H30 年度より, 逆伝搬解析を用いた震源の同定

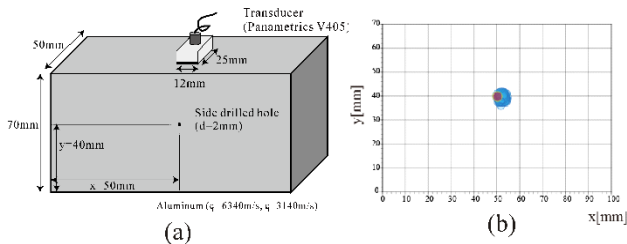


図 9 粒子フィルタを用いた欠陥の推定(a)実験概要 (b)欠陥推定結果.

に関する研究をスタートさせている。研究の開始に当たり、前期は逆伝搬解析コードの開発に力を入れた。一方、後期は前期に開発したコードを用いて試験的な解析を行った。ただし、逆伝搬解析は、弾性波動の可逆性や相反性を用いて震源を特定する方法であるが、AE 震源のモデル化は工夫を要する。そのため、まず、いくつかのセンサーで受信した欠陥からの散乱波形を AE とみなして、震源からの弾性波を数値シミュレーションにより作成した。図 7 は L 字型 CFRP 中の層間剥離による弾性波動散乱解析により、擬似 AE(すなわち、逆伝搬させる波形)を作成した結果(業績(3)-B)である。ここで用いた CFRP は、一方向 CFRP であり、L 字の両端方向に強い異方性を示し、屈曲部分は異方性の度合いが角度に応じて連続的に変化する。そのため、図 7(a)より、入射波は、異方性の強い両端方向に速く伝搬することがわかる。また図 7(b)より、層間剥離からの散乱波を確認できる。図 8 に図 7 で得られたセンサーでの受信波形を逆伝搬させた場合の結果の一例を示す。図 8(a)で逆伝搬波が試験体に再入射される。再入射された逆伝搬波は図 8(b)で層間剥離の端部に収束していることが見て取れる。これらの結果も査読付き論文に投稿し、掲載されている(業績(1)-A, E)。

(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 (中畑)

数値シミュレーションに実際の計測値をマージしながら、モデルの精度を向上させるための方法としてデータ同化がある。ここでは、データ同化手法の 1 つである粒子フィルタを UT に応用し、1 測点の欠陥エコーから空洞欠陥の位置と大きさを推定する研究を試みた。前期は、(A-2)で開発を続けている有限積分法を用いて得られた模擬波形を

用いて粒子フィルタを用いた欠陥の推定が正しく行われていることを確認した。一方、後期は、図 9(a)のような実際の計測系を用意し、計測実験から得られるアレイ探触子での欠陥からの散乱波を用いた粒子フィルタを実行した。結果の一例を図 9(b)に示す。図 9(b)は 100 個の粒子(解析パターン)をランダムに分布させた後、最終的に得られた欠陥推定結果を示している。図 9(b)中の青丸は配置して最終的に残った粒子であり、赤丸は欠陥の真の位置を示している。図 9(b)より、推定された欠陥の大きさはやや異なるものの、欠陥を推定できていると言える。これらの結果についても論文で発表している(業績(1)-I)。

(C) 波動伝搬解析の並列化及びポスト処理の効率化 (牛島・小山田・一色)

上記 (A-1)-(B-3) に至る数値解析コードの OpenMP, MPI 並列化, およびそれらのハイブリッド並列化, そして計算結果に対するポスト処理等で連携し, 解析自体や可視化技術に関する効率化について検討した。前期は実際に京都大学で打ち合わせを行い, 並列化や可視化技術についての意見交換を行った。また, 拠点大学における事業「プログラム高度化共同研究」の支援の下, (A-1)において開発中の弾性波動問題に対する CQBEM や, 欠陥形状再構成のための逆解析手法の解析コードの高速化・効率化を図った。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の進捗状況は概ね良好であったと考えられる。5 節で述べた (A-1)-(B-2) はいずれも課題申込時点での予定研究内容であり, いずれの項目も中間報告の時点で既にいくつかの成果を報告し, 審査結果も良好であった。それぞれの研究内容に対する進捗の自己評価, 今後の展望は下記の通りである。今後の展望の多くは, 既に継続採択された H31 年度に実行する予定である。

(A-1) 境界要素法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・紅露・古川)

研究計画で掲げた遠方場近似の三次元解析,

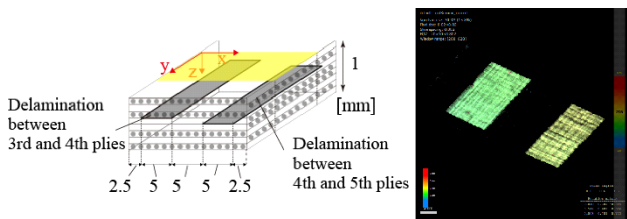


図 10 擬似等方積層 CFRP(a)人工層間剥離を施した擬似等方積層 CFRP 試験体の例(b)その光音響イメージング結果.

Sinc 法ベース BEM 開発を完了したため、予定通り研究を実施できた。今後は、BEM で最も難解な異方性弾性波動問題における高速化に取り組む必要があるだろう。また、粘弾性波動問題等の CQBEM が得意な分野の三次元解析も残されている。

(A-2) 有限要素法・有限積分法・粒子法による大規模弾性波動解析手法の開発 (斎藤・中畑・溝田)

本項目の一番のメインは、H30 年度より本格的に開始した粒子法を用いた弾性波動解析であったが、目標に掲げた非線形超音波シミュレーションを予定通り実施できた。また、擬似等方積層 FRP の弾性波動解析も概ね完了(業績(4)-D)している。現在は、図 10 のような人工層間剥離を設けた擬似等方積層 CFRP を用意し、光音響イメージング(業績(1)-G)により内部の繊維を可視化する取り組みを行っている。今後は、繊維まで考慮した解析との整合性を進める必要がある。

(B-1) 非均質・異方性材料中の欠陥に対する逆散乱解析 (斎藤・古川)

当初の予定通り、き裂に対する逆散乱解析法の開発が終了し、十分な成果を得た。今後は、三次元解析への拡張、CFRP の減衰を考慮した逆散乱解析手法を開発する必要があるだろう。

(B-2) 逆伝搬解析に基づく AE 震源の同定 (斎藤・中畑)

散乱体を AE 震源とした場合の Time-Reversal 法(業績(3)-A)を開発し、欠陥位置を推定する方法(業績(4)-B)を開発した。最大の難関であった、トポロジー感度を導入した場合の震源推定方法を開発した。ただし、AE 震源のモデル化については今後検討すべき課題である。また、トポロジー感度だけでなく、最適化を行って AE 源の形状自体を再

構成する方法(業績(4)-C)も検討すべきだろう。

(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 (中畑)

当初の予定通り二次元波動場を対象に、粒子フィルタを用いた欠陥推定を行った。数値シミュレーション、実験で得られた波形に対して本手法の適用性を検討した。今後は、三次元解析への応用や高精度化について検討すべきだろう。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- A. 前原佑・斎藤隆泰：時間反転法を用いた L 字型 CFRP 中の欠陥形状再構成，計算数理工学論文集, vol. 18, pp. 47-52, (2018)
- B. 野口豪気・斎藤隆泰：ペナルティ法を適用した MPS 法による高調波励起シミュレーション，計算数理工学論文集, vol. 18, pp. 41-46, (2018)
- C. 小野寺貴・斎藤隆泰・古川陽・廣瀬壮一：CFRP 中の層間剥離に対する逆散乱解析，計算数理工学論文集, vol. 18, pp. 17-22, (2018)
- D. 射場峻輔・古川陽・斎藤隆泰・廣瀬壮一：DE-Sinc 境界要素法の開発と 2 次元面外波動問題への適用，土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 74, No. 2, pp. I_243-I_252, (2018)
- E. 森川光・斎藤隆泰・木本和志：トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた時間反転法の超音波フェーズドアレイ探傷への応用，土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 74, No. 2, pp. I_85-I_93, (2018)
- F. 斎藤隆泰・小野寺貴・古川陽・廣瀬壮一：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，土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 74, No. 2, I_65-I_74, (2018)
- G. K. Nakahata, K. Ogi, K. Mizukami, K. Ohira, M. Maruyama, S. Wada, T. Namita, T. Shiina: Three-dimensional imaging of subsurface delamination in carbon fiber reinforced plastic using photoacoustic wave method, Electronics and

Communications in Japan, pp.1-8, (2019)

- H. 永井政貴・林山・中畑和之・静铸造ステンレス鋼の凝固組織モデルを用いた三次元超音波伝搬解析の検討, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 867, 18-00192-18-00192, (2018)
- I. 中畑和之・辻田篤史・藤澤和謙・村上 章・粒子フィルタによる欠陥の位置と大きさの推定のための弾性散乱振幅の導入, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 74, No. 2, pp. I_75-I_84, (2018)

(2) 国際会議プロシーディングス

- A. T. Onodera, T. Saitoh and S. Hirose: 2-D inverse scattering analysis for a defect in FRP, The Sixth Japan-US NDT Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World, USB 収録, Hawaii Convention Center Oahu, USA, (2018)

(3) 国際会議発表

- A. H. Morikawa and T. Saitoh: Time-reversal method using topological sensitivity for the shape reconstruction of defects in elastic solid, The 5th Asian symposium on materials and processing (ASMP2018), Swissotel Le Concord, Bangkok, Thailand (2018)
- B. T. Saitoh and Y. Maehara: Analysis of elastic wave scattering by defect in L-shaped CFRP and defect identification using time-reversal method, The 5th Asian symposium on materials and processing (ASMP2018), Swissotel Le Concord, Bangkok, Thailand (2018)
- C. A. Furukawa, R. Iba, T. Saitoh and S. Hirose: A frequency-domain boundary element method using Sinc approximation for SH wave scattering, ICCM2018, ID: 3347, 2018, Rome, Italy, (2018)
- D. T. Saitoh, T. Onodera, A. Furukawa and S. Hirose: 2-D inverse scattering analysis using pure SH wave for delamination in

carbon fiber reinforced plastic, ICCM2018, Rome, Italy, (2018)

- E. T. Saitoh, T. Onodera, A. Furukawa and S. Hirose: Analysis of anisotropic elastic wave field using boundary element method with far-field approximation, WCCM 2018, NewYork, (2018)
- F. T. Saitoh, K. Ooashi and K. Nakahata: Development of new dynamic elastic constant estimation method for FRP and its validation using FDTD method, 12th European Conference on Non-Destructive Testing (12th ECNDT), Sweden, 2018

(4) 国内会議発表

- A. 斎藤隆泰・稲垣祐生・古川陽・廣瀬壮一: 境界要素法を用いた 3 次元異方性弾性波動解析のための基本解の遠方場近似, 第 23 回計算工学講演会論文集, (PDF 収録, F-02-05), 2018 年 6 月 6 日発表, ういんく愛知
- B. 森川光・斎藤隆泰: リニアアレイ探触子の利用を想定したトポロジー感度法による散乱体決定の 2 次元解析, 第 23 回計算工学講演会論文集, (PDF 収録, G-08-02), 2018 年 6 月 6 日発表, ういんく愛知
- C. 森川光・斎藤隆泰: トポロジー最適化による 2 次元等方性材料中の欠陥形状再構成, 第 26 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 東京都立産業技術センター晴海本部, 2019 年 1 月 31 日発表
- D. 大芦健太・斎藤隆泰: 横等方性材料の弾性定数推定法の開発と有限要素法による検証, 土木学会関東支部 第 46 回技術研究発表会, 前橋工科大学, 2019

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- A. 斎藤隆泰: 音響異方性材料中の超音波伝搬シミュレーション, 非破壊検査, vol. 68, No. 2, pp. 78-83, (2018)
- B. 中畑和之, 発明の名称: 内部構造評価のためのプログラム, 方法および装置, 特願2019-053640