

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04231

研究課題名（和文）レーザー超音波可視化試験に対するデジタルツイン非破壊評価の構築

研究課題名（英文）Construction of digital twin nondestructive evaluation for laser ultrasonic visualization testing

研究代表者

齋藤 隆泰（Saitoh, Takahiro）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：00535114

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、構造物の維持管理手法の一つであるレーザー超音波非破壊評価法に、デジタルツインの概念を導入することで、その高度化を図った研究である。デジタルツインで作成した仮想空間上で超音波シミュレーションや、実際の計測波形で得られた受信超音波を時間反転させて仮想空間上で再入射する時間反転法、AIを作成する基礎となる深層学習や画像生成技術の一種であるStyle変換を援用した逆解析手法等を開発し、構造・材料内部の欠陥位置や大きさ、形状等を推定する方法を開発した。実際のレーザー超音波非破壊評価法で得られた受信超音波波形等のデータを用いて、開発した手法を実行し、提案手法の有効性及び妥当性等を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、構造物内部の欠陥の有無等を検査する手法である非破壊検査に注目が集まっている。特に、土木構造物は、検査範囲が広範囲であり、橋梁裏側やトンネル上部等、検査しづらい箇所が検査対象となる場合も多い。そのため、検査を制御し非接触で実施できれば、検査効率を大幅に向上できる。また、検査の際には、検査対象内部の欠陥の有無、大きさ、位置等を検査員が推定することとなるが、その推定精度は、検査員の熟練度に依存するため、定量的に評価できる方法も検討できれば有意義であろう。そこで本研究では、非接触で広範囲な検査に対応可能なレーザー超音波可視化試験にデジタルツインやAIを導入し、検査を容易に実行する方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to enhance the advanced laser ultrasonic non-destructive evaluation method, which is one of the maintenance techniques for structures, by introducing the concept of digital twins. In this study, various inverse analysis techniques were developed, including advanced ultrasonic simulation techniques in a virtual space created by digital twins, time-reversal methods that retransmits received ultrasonic waves in the virtual space by time-reversing actual measured waveforms, and deep learning techniques such as style transfer, which serves as the basis for creating AI, to estimate the position, size, and shape of defects inside structures and materials. These developed methods were implemented using data such as received ultrasonic waveforms obtained from actual laser ultrasonic non-destructive evaluation, demonstrating the effectiveness and validity of the proposed approach.

研究分野：応用力学，計算力学，非破壊評価

キーワード：超音波非破壊評価 時間反転法 深層学習 機械学習 レーザー超音波可視化試験 数値シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年、工学の幾つかの分野において、SDGs をキーワードとした取組みに注目が集まっている。持続可能な社会の創生には、橋梁やトンネル等の社会インフラ構造物の維持管理が必須である。そのような維持管理のためには、構造物の健全性評価手法である非破壊評価(NDE)が極めて重要な役割を果たすことは自明である。他方、Society5.0 により IoT やロボット、人工知能(AI)等を取り入れた、我が国が目指すべき未来社会が提唱されている。事実、土木学会でも BIM/CIM の活用が注目を集め、AI・データサイエンスシンポジウムなる講演会も開催されるようになり、今後、AI の活用は間違いなく進むと考えられる。

一般的に、NDE では打音検査等、様々な種類の方法が提案されているが、代表格は超音波非破壊検査(UT)である。UT は利便性に優れ、放射線検査と異なり人体への影響もない。一般的な UT は、探触子と呼ばれる超音波送受信機器を、検査対象に接触させて超音波を送信し、得られた受信波形のエコー高さ等から欠陥の有無を判定する方法である。しかし、CFRP 等の複雑材料の利用が進む今、現場の技術者が受信波形のみから欠陥位置や大きさまでを判定することは難しい。しかも業界では将来の熟練技術者不足も懸念される。

このような現状に即し、NDE の世界では、NDE4.0 なる取組が提唱された。NDE4.0 では、IoT や AI、シミュレーション等を積極的に導入する NDE の新しい概念が提唱されている。確かに、この 10 年で複数の超音波素子から成るアレイ探触子等の利用が一般的になり、現場で数多くのデータを取得できるようになった。しかし高精度な AI の構築には、ビッグデータが必要である。材料・構造物に対する UT では、材料の多様性、欠陥種別等、考慮すべき要素も数多い。実際に計測実験で UT を行ったとしても、多数の試験体準備と多様な人工欠陥を作成する手間及びコストも必要で現実的でない。よって、NDE4.0 を見据えた新しい UT の開発には、如何に効率良くビッグデータを構築し、AI に学習させるかが成功の鍵を握る。以上より、本研究では、デジタルツイン、数値シミュレーション、AI をキーワードに、NDE4.0 の概念を取入れた新しい UT の基礎を構築できないかと考えた。

## 2. 研究の目的

通常の UT では、探触子と検査対象間に接触媒質を塗布する必要があるが、この点がロボット検査の最大の足枷になっている。この点を解決するには、非接触な UT が望ましい。また、現行の NDE では技術者資格制度が導入されており、USA と相互認証もされている。そのため、仮に AI を活用したとしても全てを AI に任せることは難しく、AI でも検査員でも理解しやすい UT の開発が重要だろう。そこで本研究では、送信側のみ非接触で高速スキャン可能な、レーザー超音波可視化試験(LUVT: Leaser Ultrasonic Visualization Testing)に着目した次の A)-D)のテーマを掲げ、それらを達成することで、最終的に NDE4.0 に相応しいデジタルツイン UT の基礎を構築する。

- A) デジタルツインのための弾性波動伝搬シミュレーターの開発
- B) 弾性波動伝搬シミュレーターによるビッグデータ生成
- C) レーザー超音波可視化試験(LUVT)と AI の融合
- D) AI を活かした逆解析手法の開発

ただし、本研究はデジタルツインの概念をベースに新しい非破壊評価法を検討することを主眼としているため、開発したソフトウェアの販売等は含まれない。

## 3. 研究の方法

本研究は、数値シミュレーションと計測実験の両者を用いて行われる。数値シミュレーションには、差分法、有限要素法、境界要素法を適材適所で用いる。計測実験には、研究代表者所有の LUVT 機器一式を用いる。数値シミュレーションは、主に LUVT で生じるレーザー超音波や欠陥形状再構成のための手段に用いられる。また、AI の作成には深層学習等を利用する。計測実験に必要な試験体には、事前に人工的に欠陥を設けてある。

## 4. 研究成果

本研究で得られた成果を 2 節で述べた A)-D)の項目毎に簡単に説明する。詳細は、適宜、研究代表者らによる文献を参照されたい。

### A) デジタルツインのための弾性波動伝搬シミュレーターの開発

デジタルツインでは、現実空間と仮想空間を行き来しながら、現実空間における必要な物理量等を求める必要がある。本研究では、差分法や有限要素法、境界要素法等をベースに、仮想空間における弾性波動(超音波は固体中で弾性波の性質を示す)をシミュレートする方法を開発した。また、仮想空間における CAD データを直接数値解析に用いるアイソジオメトリック解析に対する適用性についても検討した。

### B) 弾性波動伝搬シミュレーターによるビッグデータ生成

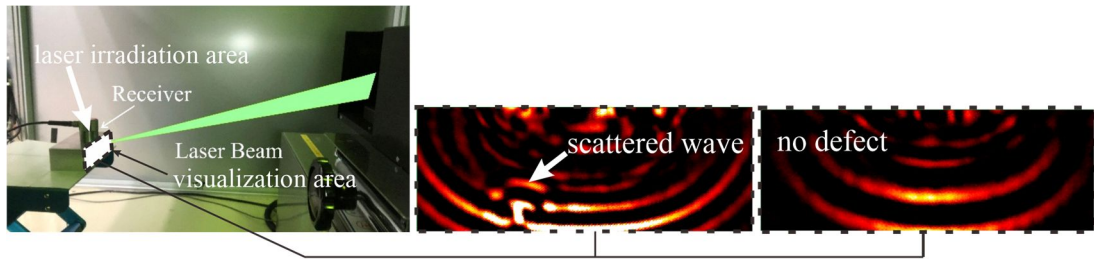


図 1 : LUVT と超音波伝搬可視化結果の一例．中央は欠陥有り，右側は欠陥無しの場合．

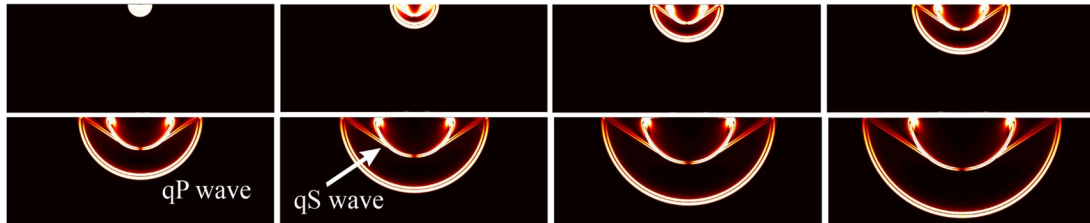


図 2 : 超音波シミュレーターを用いたアルミニウム試験体中の超音波伝搬の一例．  
 (この場合 qP, qS wave は縦波，横波を表す)

一般的に，LUVT では図 1 のようにレーザー照射面における超音波伝搬を可視化できる．検査員は，超音波伝搬や欠陥による散乱現象を目視で確認できるため，検査に熟練してなくとも欠陥有無を判定しやすい利点がある．しかしながら，そのような検査員による目視での判定を，AI が代替することができれば，検査の効率化に寄与できる．一般的に，AI を作成するには，図 1 中央，右側のような AI に判定させたい LUVT 可視化結果を大量に準備する必要がある．そのため，もちろんそのような LUVT 可視化画像をある程度準備するのは当然のことであるが，欠陥の大きさや個数，位置等の異なる様々な試験体を用意することは，経済面も含めて効率的ではない．そのため，本研究では，A)で対象とした非破壊評価モデルのデジタルツインを作成し，そのモデルに対して開発した超音波シミュレーター等を用いて，図 1 の LUVT 可視化結果に相当する結果を人工的に導くことを行った．

結果の一例を，図 2 に示す．図 2 は，図 1 と同程度のサイズのアルミニウム試験体の表面を伝搬する超音波を，開発した超音波シミュレーターで模擬した結果の一例を示している．図 2 より，試験体表面を伝搬する縦波，横波超音波をはっきりと確認することができる．このように図 2 の結果は，確かに物理的に正しいものの，図 1 で示した実際の LUVT で得られた結果とは様相が異なることがわかる．実際の LUVT の結果は，多くのノイズを含むため，波面の乱れや振幅の大小も一部まばらである．そのため，図 1 のような実際の LUVT 結果と，図 2 のような超音波シミュレーターで得られた結果の両者をそのまま AI を作るための学習データに利用すると，AI の欠陥検出精度に影響を与える．そこで，本研究では次の C)のような方策を採ることを考える．

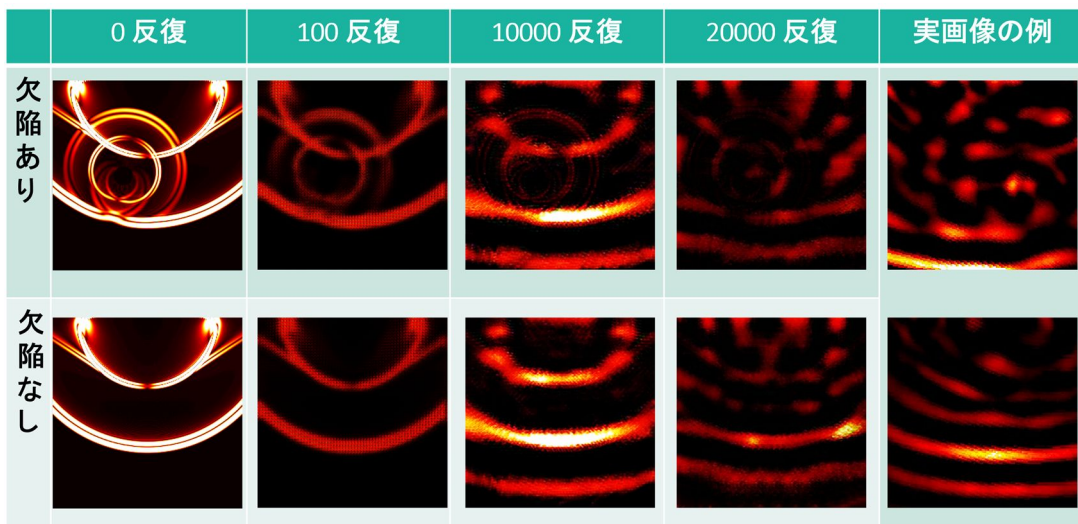


図 3 : 超音波シミュレーターで作成された LUVT 画像を Style 変換により実際の LUVT 画像に近づけた例．



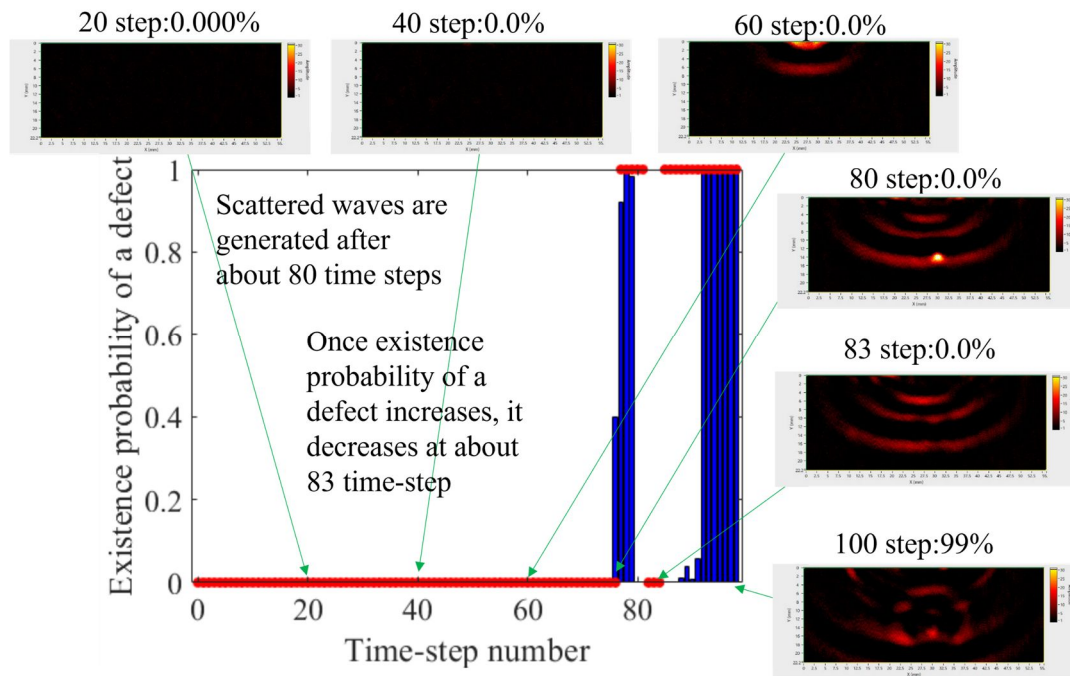


図4：深層学習を用いたアルミニウム試験体中の欠陥有無の自動判定結果。

#### C) レーザー超音波可視化試験(LUVT)とAIの融合

AIの基礎となる深層学習は、画像中の特徴量を機械が自動的に抽出することができる。この点が一般の機械学習と異なる。そのため、B)で述べたように、超音波シミュレーターと実際のLUVTで得られた画像の差異は、AIの学習に大きな影響を及ぼす。そこで、本研究ではGANの一種であるStyle変換を用いて、超音波シミュレーターで得られた画像の様相(Style)を変換させた後に、深層学習の学習データに用いることを考えた。

図3にStyle変換を用いて超音波シミュレーターにより作成された人工画像を、実際のLUVT画像に近づけた例を示す。上段は欠陥有りの場合、下段は欠陥無しの場合を示している。また、最左列の結果は、超音波シミュレーターによる結果を示してある。図3より、超音波シミュレーターで得られた人工画像は、複数のステップを経て、実画像の様相に近づいていることがわかる。ノイズのばらつき等も、概ね再現されている。このようにStyle変換を施すことで作成された人工画像を、実際のLUVT画像と合わせて、深層学習のための学習データとして利用することができる。

深層学習を用いてアルミニウム試験体中の欠陥の有無を判定した結果の一例を図4に示す。このアルミニウム角柱試験体には、中央やや下付近に貫通空洞を設けてある。この試験体に対する代表的なLUVT可視化結果のスナップショットも、時間ステップと共に示してある。中央の棒グラフは横軸が時間ステップ、縦軸が深層学習で作成したAIが示した欠陥存在確率を示している。

ただし、青の棒グラフはAIが示した欠陥存在確率を、赤丸印は熟練でない検査員がLUVT結果から目視により欠陥有無を判定した結果を示していることに注意されたい。また、代表的なLUVT結果に対し、それぞれAIが示した欠陥存在確率も示してある。入射波が送信され、およそ80時間ステップ程で、その波面が欠陥付近に到達する。そのような中、AIが示した欠陥存在確率も、およそ80時間ステップ程で急上昇していることがわかる。もちろん、同様に検査員による欠陥存在確率も上昇する。その後、両者共に、低い欠陥存在確率を示している。この理由は、例えば80時間ステップ目では、明瞭に散乱波の発生を確認することができるが、LUVTの特性上、一時的に散乱波がその後消失しているように見えるためである。以後、再び欠陥存在確率は急上昇し、概ね欠陥有りと診断を下していることがわかる。

このように、本研究では、LUVTで得られた画像中の欠陥有無の判定を、深層学習で行ったが、その深層学習の前段階でもデータサイエンスの知識を駆使したStyle変換と超音波シミュレーターを組み合わせることでピックアップデータを作り出すことも行っている。その他、本報告書では詳細は省略するが、時系列情報を取入れたRecurrent Neural Network(RNN)や、有名なVGG16やImageNetデータベース等を利用した欠陥有無の判定等も行っている。

#### D) AIを活かした逆解析手法の開発

デジタルツインでは、対象とする領域の仮想空間を作成することとなるが、このデジタルツインを有効に活用できる可能性のある逆解析手法として、時間反転法が挙げられる。時間反転法は、波動の相反性を利用した逆解析手法である。その手順は、まず、欠陥からの散乱波を多点計測受

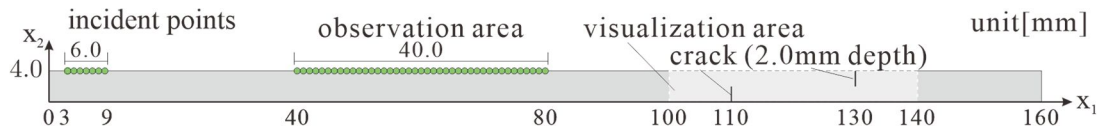


図 5：デジタルツインを活かした時間反転法による表面き裂の検出モデル。

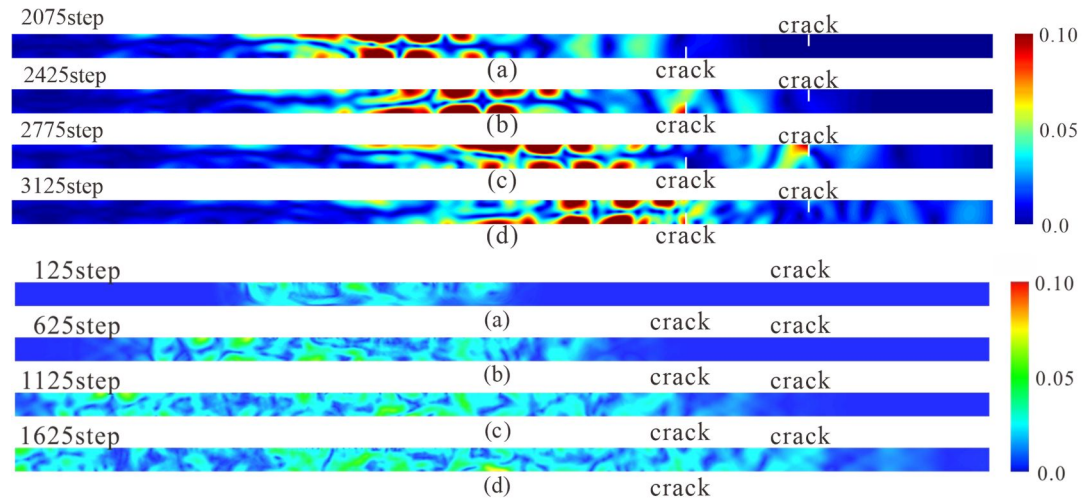


図 6：板内部の超音波伝搬（上段）と受信点で得られた波形の時間反転解析結果の一例。

信する。その後、その多点計測受信波形を時間反転させ、対象の場に再入射させると、波動の相反性により、それら時間反転波は散乱源に集束することとなる。そのため、この集束位置を波動の散乱源（欠陥位置）と考えることができる。この原理は、LUVTをはじめとした UT に当てはめることができる。そこで、本研究では、検査対象のデジタルツインを作成し、検査対象内部の欠陥を検出することを考えた。ここでは最も複雑な例である板内部の欠陥に対する適用例を示す。

図 5 は、平板中の 2 つの表面き裂を、その時間反転法で検出するためのモデルを示している。入射点は板の左側 7 点、観測点は中央やや左の 41 点である。入射点で励起された超音波の一部は、板右側の 2 つの表面き裂により散乱される。図 6 の上段図は、板内部の超音波伝搬の様子を仮想空間上で再現した様子のスナップショットを示している。表面き裂により散乱された超音波の一部は、受信点で計測することができる。図 6 下段図は、そのような受信点での計測波形を時間反転させ、板内部に入射させた結果のスナップショットを示している。図 6 下段図より、時間反転波が、入射点の左右に伝搬している様子を見て取れる。

実体波を扱う通常の問題では、単純に時間反転波の集束位置を読み取れば、欠陥有無を判定することができる。しかしながら、板内部の超音波は、板の上下面で反射を繰り返しながら伝搬するため、時間反転波の集束位置は図 6 のように判然としない。そこで、本研究ではものづくりの分野で広く利用されているトポロジー最適化に用いるトポロジー感度を使って、時間反転波の集束位置を推定することを試みた。

図 7 は、そのトポロジー感度を用いて表面き裂を推定した結果の一例を示している。プロット値はトポロジー感度であり、可視化領域は 2 つの表面き裂付近に限定してある。図 7 より、トポロジー感度は実際の表面き裂付近で大きな値を示していることがわかる。すなわち、図 5 のように複雑な超音波伝搬を対象とし、時間反転波の集束位置を明確に判断できないような問題においても、正しく欠陥位置を推定することができた。

なお、現在では、この時間反転波の集束位置を、より簡易的に AI を用いて判定することも検討している。

以上より、3 年間の研究計画でスタートした本研究により、LUVT をはじめとした UT に対して、デジタルツインや AI を用いて更なる高度化を図れることが示された。今後もデジタルツインや AI の応用研究は UT 分野で必須と考えられ、更なる検討を続ける予定である。



図 7：時間反転法による表面き裂の推定結果。青実線が実際の表面き裂。実際の表面き裂付近でトポロジー感度は大きな負の値を示している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 斎藤隆泰	4. 巻 73
2. 論文標題 最新の超音波イメージング-深層学習の応用を中心に-	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 73-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh	4. 巻 12
2. 論文標題 2-D elastodynamic time-reversal analysis for surface defects on thin plate using topological sensitivity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Axioms	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/axioms12100920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Nakajima, T. Saitoh and K. Kato	4. 巻 4
2. 論文標題 A study on deep CNN structures for defect detection from laser ultrasonic visualization testing images	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Intelligence, informatics and infrastructure	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceii.4.3_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Nakajima, T. Saitoh and T. Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulation-aided deep learning for laser ultrasonic visualization testing with style transfer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Intelligence, Informatics and Infrastructure	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2305.18614	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・廣瀬壮一	4. 巻 4
2. 論文標題 波動解析や逆問題および非破壊評価におけるAI・データサイエンス活用の動向	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 852-866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.4.3_852	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・木本和志	4. 巻 4
2. 論文標題 畳込みニューラルネットワークを用いた2次元弾性波動場における欠陥の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 265-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.4.3_265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰	4. 巻 35
2. 論文標題 深層学習を用いた異方性弾性体中の欠陥に対する逆解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 38-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中島 未椰・斎藤 隆泰・加藤 毅	4. 巻 35
2. 論文標題 深層CNNによるレーザー超音波可視化試験における欠陥検出と位置推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 8-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh and S. Hirose	4. 巻 -
2. 論文標題 Inverse scattering technique using deeplearning for3-D scalar wave propagation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Computational Methods	6. 最初と最後の頁 80-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh, S. Ohyama, K. Kato and S. Hirose	4. 巻 4
2. 論文標題 Automatic detection of concrete surface defects using deep learning and laser ultrasonic visualization testing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.36001/phmap.2023.v4i1.3673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh, S. Sasaoka and S. Hirose	4. 巻 -
2. 論文標題 Scattering source determination using deep learning for 2-D scalar wave propagation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems	6. 最初と最後の頁 396-407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-7243-2_33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh, Y. Kuwabara and T. Kato	4. 巻 2
2. 論文標題 Determination of the presence or absence of defect for laser ultrasonic visualization testing using transfer learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Computational Mechanics and Applications	6. 最初と最後の頁 80-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-49791-9_6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 中島未耶・斎藤隆泰・加藤毅	4. 巻 3
2. 論文標題 レーザー超音波可視化試験における欠陥検出のための深層CNN構造の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 916-924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_916	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・笹岡真次・廣瀬壮一	4. 巻 3
2. 論文標題 固体中の欠陥位置および大きさ推定のための深層学習ベース2次元逆散乱解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 935-944
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 木本和志・斎藤隆泰	4. 巻 79
2. 論文標題 き裂による散乱波の反響環境下での時間反転集束	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰	4. 巻 27
2. 論文標題 コンクリート補強面の欠陥に対する人工知能非破壊検査	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 63-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰	4. 巻 28
2. 論文標題 弾性波動場の深層学習と非破壊評価への応用-Grad-CAMを用いたAIによる弾性波の追跡-	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SAITOH Takahiro, TASHIRO Masahiko, KIMOTO Kazushi	4. 巻 77
2. 論文標題 SHAPE RECONSTRUCTION FOR A DEFECT USING 3-D ELASTODYNAMIC TIME-REVERSAL ANALYSIS WITH TOPOLOGICAL SENSITIVITY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_69 ~ I_79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_69	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤 隆泰、竹田 晴彦、廣瀬 壮一	4. 巻 2
2. 論文標題 深層学習とレーザ超音波可視化試験を用いたCFRP-コンクリート構造の未接着部分の検出	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 241 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.2.J2_241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Saitoh and A. Ishiguro	4. 巻 80
2. 論文標題 Surface crack detection in a thin plate using time reversal analysis of SH guided waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. Structural Engineering and Mechanics	6. 最初と最後の頁 243-251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/sem.2021.80.3.243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齋藤 隆泰、加藤 毅、廣瀬 壮一	4. 巻 70
2. 論文標題 時間領域境界要素法で求めた散乱波動場の深層学習と欠陥種別の判定の試み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 272 ~ 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11396/jjsndi.70.272	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齋藤隆泰・豊田哲志	4. 巻 33
2. 論文標題 トポロジー感度を用いた板内部の欠陥に対する逆散乱解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹田晴彦・齋藤隆泰・廣瀬壮一	4. 巻 21
2. 論文標題 等方弾性体・粘弾性体中の空洞に対する線形化Born逆散乱解析の適用性の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 89-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TAKEDA Haruhiko、SAITOH Takahiro、HIROSE Sohichi	4. 巻 77
2. 論文標題 2-D LINEARIZED INVERSE SCATTERING ANALYSIS FOR DOMAIN AND BOUNDARY TYPE DEFECTS IN VISCOELASTIC MEDIA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_47 ~ I_57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・松原江里・廣瀬壮一	4. 巻 -
2. 論文標題 CFRPを対象としたWavefield dataの深層学習と内部欠陥の検出	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第26回計算工学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・石黒明日海・木本和志・中畑和之	4. 巻 -
2. 論文標題 トポロジー感度とSH板波を用いた薄板表面き裂の逆散乱解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第26回計算工学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹田晴彦・福島輝宙・斎藤隆泰	4. 巻 -
2. 論文標題 レーザ超音波可視化試験を用いたCFRPの減衰の推定と推定値を用いた波動シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会2021年茨城講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤隆泰・笹岡真次・竹田晴彦・廣瀬壮一	4. 巻 -
2. 論文標題 2次元面外波動問題における深層学習ベース逆散乱解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第29回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 103-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加藤毅・小西裕貴・斎藤隆泰	4. 巻 -
2. 論文標題 深層学習を用いたレーザー超音波可視化試験における欠陥検出と位置推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第29回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 斎藤隆泰
2. 発表標題 最新の超音波イメージングに関する2,3の話題-逆散乱解析からAIの応用まで-
3. 学会等名 2023年度 非破壊検査総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Saitoh and S. Hirose
2. 発表標題 Inverse scattering technique using deeplearning for3-D scalar wave propagation
3. 学会等名 International Conference on Computational Methods (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Saitoh, S. Ohyama, K. Kato and S. Hirose
2. 発表標題 Automatic detection of concrete surface defects using deep learning and laser ultrasonic visualization testing
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 T. Saitoh
2. 発表標題 Inverse scattering technique for a defect in anisotropic plates
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Saitoh, S. Sasaoka and S. Hirose
2. 発表標題 Scattering source determination using deep learning for 2-D scalar wave propagation
3. 学会等名 22nd Asia simulation conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Saitoh
2. 発表標題 Convolution quadrature time-domain boundary element method for 2-D pure SH wave propagation in anisotropic and viscoelastic materials
3. 学会等名 7th-Asia Pacific International Conference on Computational Methods in Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Saitoh, Y. Kuwabara and T. Kato
2. 発表標題 Determination of the presence or absence of defect for laser ultrasonic visualization testing using transfer learning
3. 学会等名 Olympiad in Engineering Science2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤隆泰
2. 発表標題 非破壊評価とシミュレーション・データサイエンス
3. 学会等名 2022年接着・接合技術コンソーシアム第3回非破壊検査WG（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤隆泰
2. 発表標題 波動解析が拓くNDE4.0の実現-社会インフラ構造物への応用を見据えて-
3. 学会等名 数値解析が拓く次世代情報社会～エッジから富岳まで～（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤隆泰
2. 発表標題 データサイエンスの応用力学への応用 -順解析から逆解析まで-
3. 学会等名 令和4年度西部地区応用力学フォーラム「スパコンとデータサイエンスを援用したあたらしい物理エンジン」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中畑和之・中村悠人・丸山泰蔵・齋藤隆泰
2. 発表標題 ポロジ－導関数を用いた超音波イメージングの実験的検証
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹岡真次・斎藤隆泰・廣瀬壮一
2. 発表標題 2次元波動問題を対象とした深層学習ベース逆散乱解析手法の開発
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田哲志・斎藤隆泰・加藤毅・廣瀬壮一
2. 発表標題 LUVTと深層学習を用いた等方性材料中の表面欠陥の自動検出
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島未椰・小西裕貴・斎藤隆泰・加藤毅
2. 発表標題 深層CNNによるレーザ超音波可視化試験における欠陥検出と位置推定
3. 学会等名 第21回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤隆泰・豊田哲志・中畑和之
2. 発表標題 レーザー超音波を用いた一方向CFRPの弾性定数の推定
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田哲志・斎藤隆泰・中畑和之
2. 発表標題 レーザー超音波可視化試験と機械学習を用いた新しい弾性定数推定法の開発
3. 学会等名 2022年度非破壊検査秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤隆泰・笹岡真次・廣瀬壮一
2. 発表標題 2次元異方性純面外波動問題における深層学習ベース逆散乱解析
3. 学会等名 2022年度非破壊検査秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤隆泰
2. 発表標題 深層学習を用いた異方性弾性体中の欠陥形状再構成
3. 学会等名 最適化シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島未椰・塚越勇真・斎藤隆泰・加藤毅
2. 発表標題 レーザー超音波可視化検査におけるスタイル変換を用いたデータ拡張手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島未椰・斎藤隆泰・加藤毅
2. 発表標題 LUVT非破壊探傷のためのデータ拡張
3. 学会等名 第15回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 斎藤隆泰・笹岡真次・川上真穂・廣瀬壮一
2. 発表標題 3次元波動問題における深層学習ベース逆散乱解析
3. 学会等名 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 豊田哲志・斎藤隆泰・中畑和之
2. 発表標題 機械学習を用いた一方向CFRPに対する新しい弾性定数推定法の開発
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小西裕貴・田島賢哉・加藤毅・斎藤隆泰
2. 発表標題 深層畳み込みニューラルネットワークを用いたレーザ超音波可視化試験における欠陥検出と位置推定
3. 学会等名 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 豊田哲志・斎藤隆泰・木本和志
2. 発表標題 トポロジー感度を用いた薄板中の表面き裂に対する2次元動弾性時間反転解析
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sasaoka, T. Saitoh and S. Hirose
2. 発表標題 Deep-learning based inverse scattering for a defect in 2-D isotropic solids
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Saitoh, A. Furukawa and S. Hirose
2. 発表標題 Convolution quadrature time-domain boundary element method for 2-D pure inplane anisotropic viscoelastodynamics
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤隆泰
2. 発表標題 計算力学やAIを活かしたデジタルツイン非破壊評価に対する展望
3. 学会等名 2022年日本音響学会春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro SAITOH
2. 発表標題 Inverse scattering for a cavity in 2-D anisotropic and viscoelastic solids
3. 学会等名 Practical inverse problems and their prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro SAITOH
2. 発表標題 Forward and inverse scattering analyses for defects in anisotropic and viscoelastic solids
3. 学会等名 Theory and practice in inverse problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤隆泰
2. 発表標題 波動解析と人工知能 -非破壊検査への応用を中心に
3. 学会等名 京都大学学術情報メディアセンターセミナー「超並列計算の地震・工学設計への応用例とAIを利用する計算力学の展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Saitoh
2. 発表標題 Convolution quadrature based time-domain boundary element method for wave propagation
3. 学会等名 IUTAM symposium, Computational methods for large-scale and complex wave problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島輝宙・斎藤隆泰
2. 発表標題 Recurrent Neural Networkを用いたCFRP中の欠陥の自動検出方法の検討
3. 学会等名 土木学会関東支部 第49回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田哲史・斎藤隆泰
2. 発表標題 レーザー超音波可視化試験と機械学習を用いたCFRP板の異方性弾性定数の推定
3. 学会等名 土木学会関東支部 第49回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹岡真次・竹田晴彦・斎藤隆泰
2. 発表標題 固体中の欠陥検出のための深層学習ベース逆散乱解析
3. 学会等名 土木学会関東支部 第49回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Saitoh, K. Kato and S. Hirose
2. 発表標題 Deep-learning for wave propagation images in CFRP and its application to laser ultrasonic non-destructive testing
3. 学会等名 Mechanistic Machine Learning and Digital Twins for Computational Science, Engineering & Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 斎藤隆泰ら（分担執筆）	4. 発行年 2024年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 356
3. 書名 超音波による非破壊検査・材料評価技術の進展	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者のHP <a href="https://civil.ees.st.gunma-u.ac.jp/~applmech/index.html">https://civil.ees.st.gunma-u.ac.jp/~applmech/index.html</a>
---

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------