

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04931

研究課題名（和文）超高強度空中超音波フェイズドアレイ波源走査法による高速広範囲計測への挑戦

研究課題名（英文）High-speed wide-range measurement by very high-intensity aerial ultrasonic phased array wave source scanning method

研究代表者

大隅 歩 (OSUMI, Ayumu)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：40579413

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、金属製薄板材料を対象とした非接触高速非破壊検査を行うための方法として、空中超音波フェイズドアレイ波源走査法を提案し、その実現を目的とする。具体的には、まず非破壊検査用の空中超音波フェイズドアレイの設計・開発および駆動アルゴリズムの開発を行った。続いて、映像化アルゴリズムを開発し、計測システムに実装した。最後に、開発した空中超音波フェイズドアレイと映像化アルゴリズムを実装した計測システムを用いて、金属製薄板に設けた減肉部に対して実証試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工場プラントなどの大型構造物から航空機部品や電車車両・自動車に至るまで、金属製材料の非破壊検査は社会の安全性から品質の評価までを行う非常に重要な検査である。一方で、運行業務への影響や納品期限による検査時間の制限があるため、広範囲を高速検査できる方法が望まれている。本研究では、上記を実現できる方法として空中超音波フェイズドアレイ波源走査法を創出し、非接触高速非破壊検査について実証した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose and realize the airborne ultrasound phased array wave source scanning method as a method for performing non-contact high speed non-destructive inspection for thin metal plate materials. Specifically, we first designed and developed an aerial ultrasonic phased array for non-destructive inspection and developed a drive algorithm. Next, we developed a visualization algorithm and implemented it in the measurement system. Finally, using the developed airborne ultrasound phased array and a measurement system equipped with a visualization algorithm, a verification test was conducted on the thinning area provided on the thin metal plate.

研究分野：非破壊検査工学

キーワード：空中超音波 非接触計測 高速計測 空中超音波フェイズドアレイ 非破壊検査

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工場プラントなどの大型構造物から航空機部品や電車車両・自動車に至るまで、金属製材料の非破壊検査は社会の安全性から品質の評価までを行う非常に重要な検査であるが、運行業務への影響や納品期限による検査時間の制限があるため、広範囲を高速検査できる方法が望まれている。このような背景の下、研究代表者は、空中超音波を利用した高速かつ広範囲に適用可能な非接触非破壊検査方法の開発を目指しており、空中超音波フェーズドアレイ(Airborne Ultrasound Phased Array 以下、AUPA)を利用した高速化の実現を目指した。一方で、空中超音波を利用した高速かつ広範囲な非接触非破壊検査を実現するためには、高強度の空中超音波を放射可能な AUPA を開発し、固体内に非接触で空中超音波を侵入させる必要があることに加え、高速計測に対応した映像化アルゴリズムを搭載した計測システムを実現する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、AUPA を用いた高速広範囲非破壊検査の実現である。この目的を実現するために、非常に高強度な空中超音波を放射可能な AUPA の周辺制御回路を含めた開発、高速非破壊検査に適した計測システムの構築および実際の実験試料を用いた実験的検証を行った。

3. 研究の方法

本研究では、以下の方法で研究を実施した。

(1) AUPA の実機製作、駆動アルゴリズムの開発および実証試験

AUPA は、空中超音波センサを平面かつ正方形上に配列した構造とし、周辺の制御回路を含めて開発を行った。AUPA の信号制御には、FPGA(Field Programmable Gate Array)を利用して、任意の位置に音波の集束が可能な信号制御用の駆動アルゴリズムを実装した。製作した AUPA に対し、開発した駆動アルゴリズムを開発後、AUPA の放射特性を検証した。

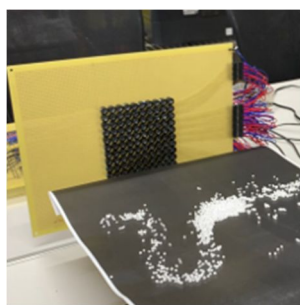
(2) 映像化アルゴリズムの開発および実証試験

本研究では、相反定理を利用した波源走査法を用いて高速非破壊検査を実現する。そこで、映像化のために、以下のような計測システムを提案した。まず、AUPA からの音波照射によって励起された各波源からのガイド波を受信器で計測しデータ受信部に送る。続いて、データ受信部からのデータをデータ格納部にて照射位置に対応した二次元座標に同期させた受信データを格納する。計測領域の計測終了後、ディスプレイにはガイド波振幅分布が表示され、欠陥が映像化される。以上を一連の流れとして、映像化アルゴリズムの開発を行った。続いて、作成した実験試料で実証試験を行った。

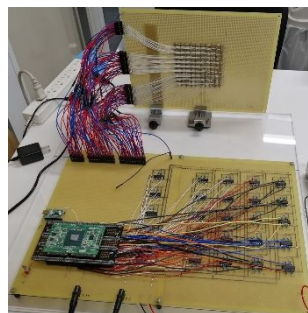
4. 研究成果

(1) AUPA の実機製作、駆動アルゴリズムの開発および実証試験

図 1 に製作した AUPA を示す。図(a)は AUPA の正面の写真、図(b)は裏側からの写真である。製作した AUPA は 100 個の空中超音波センサを正方形上に配列した構造であり、FPGA と増幅回路で構成された周辺制御回路で構成している。AUPA から放射される音波は音源開口面直上の領域において、任意の位置に集束可能であり、その走査速度は 3000 Hz である。



(a) 正面の写真



(b) 裏側の写真

図 1 AUPA の実機写真

図 2 に、製作した AUPA の音波放射特性を計測するための評価装置を示す。図(a)は、評価装置の概要である。評価装置では、AUPA の正面に 1/8 インチコンデンサマイクロホンを設置し、マイクロホンを精密ステージで二次元走査することによって、AUPA の音波放射特性を計測する。図(b)は、計測領域を示しており、図中の点 A ~ D の座標は AUPA を電子制御し、音波を集束させた位置を示している。

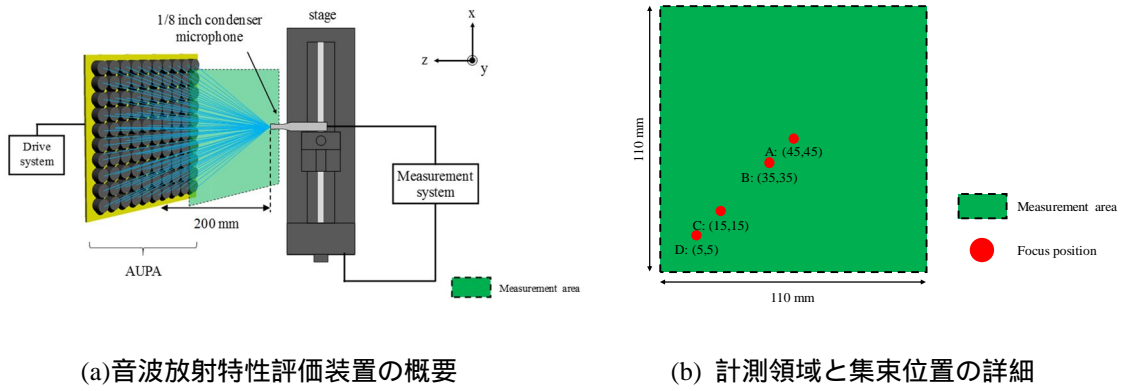


図 2 実験装置と計測領域

図 3 に評価結果を示す．図(a)は各位置に音波を集束させたときの音圧分布であり，左から順に点 A から D の位置に音波を集束させた結果を示している．結果より，任意の位置に音波を集束できていることが確認できる．なお，点 A においては約 166 dB の非常に強力な空中超音波が放射されていることは別途確認している．

以上の結果に示すように，非常に強力な空中超音波を任意の位置に集束可能な AUPA を実現した．

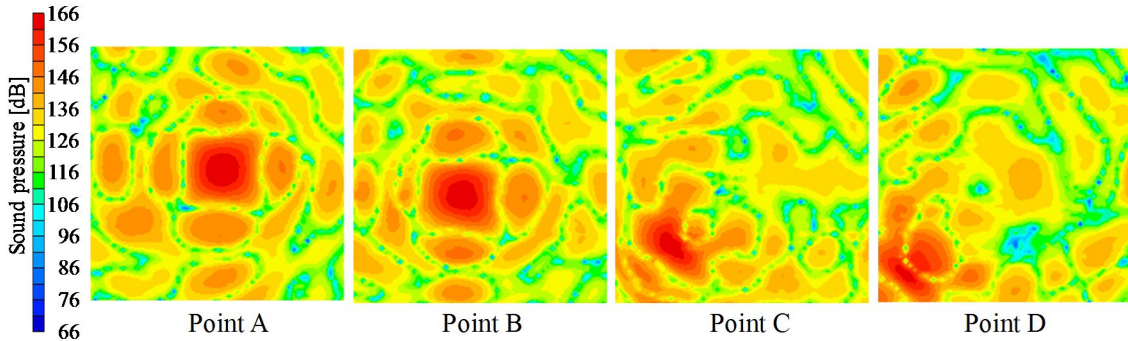


図 3 各位置における音波集束の様子

(2) 映像化アルゴリズムの開発および実証試験

図 4 に，提案する映像化アルゴリズムを搭載した計測システムの概要を示す．システムは，AUPA の制御系と計測および映像化システムから構成される．本システムは，以下のように動作する．まず，製作した AUPA からの計測領域全面に渡って，集束音波を二次元走査しながら照射する．次に，音波の照射された位置を波源としてガイド波を受信器で受信し，音波照射位置の座標に対応させて，受信データを格納する．その後，計測したガイド波から，振幅ピークが抽出され，映像部において欠陥が可視化される．

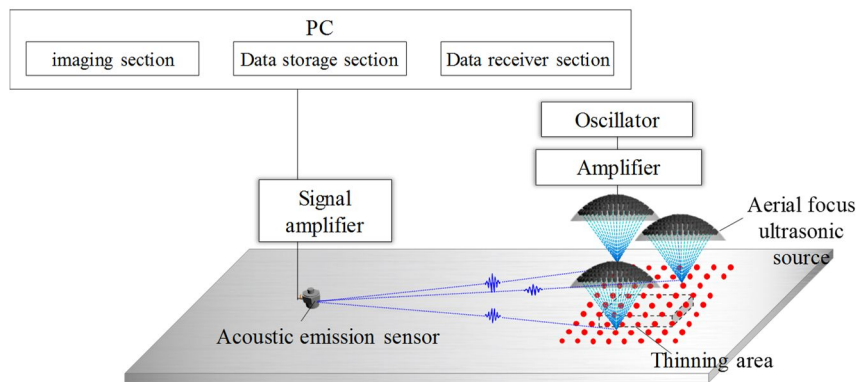


図 4 映像化アルゴリズムを搭載した計測システム

図 5 に計測結果の一例を示す．図 4 に示す実験の試料は，厚さ 3 mm のジュラルミン板であり，厚み 0.5 mm の減肉部が計測領域に設けてある．計測領域は，100 × 100 mm の領域であり，この領域において，AUPA からの音波を測定間隔 2 mm で走査照射した．なお，10 点の受信位置

における受信波形のピーク振幅の平均値で映像化を行った。

結果より、減肉部に該当する領域において、振幅が大きくなっており、映像化されていることが確認できる。すなわち、AUPA を用いた高速広範囲非破壊検査によって、非破壊検査が可能であることが示された。

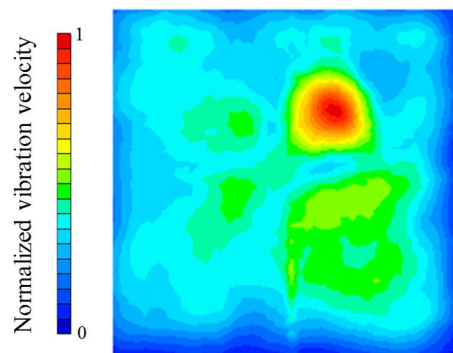


図5 減肉部のイメージング結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Ayumu Osumi, Kenta Yamada, Youichi Ito | 4. 巻 41 |
| 2. 論文標題 Imaging slit in metal plate using aerial ultrasound source scanning and nonlinear harmonic method | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 885-890 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.41.885 | 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 Kiyosuke Shimizu, Ayumu Osumi and Youichi Ito | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 High-speed imaging of defects in thin plate by scanning elastic wave source technique using an airborne ultrasound phased array | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab1a31 | 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 Ayumu Osumi, Kenta Yamada, Yusuke Asada, Youichi Ito | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Harmonic imaging of a defect in a flat plate using a guided wave generated by a high-intensity aerial ultrasonic wave | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SGGB14(1-8) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab1a31 | 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 - |

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 気流中における空中超音波フェーズドアレイを用いた非破壊検査 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会・2022年総合大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波励起によるガイド波の分散性を考慮したパルス圧縮の基礎検討 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波励起によるガイド波のパルス圧縮の基礎検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイ波源走査法による減衰の大きな材料内を伝搬するガイド波の可視化 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会・第29回 超音波による非破壊評価シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイ波源走査法を用いた金属薄板内非対称欠陥の非破壊検査 |
| 3. 学会等名 日本音響学会・第24回関西支部若手研究者交流研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイによる弾性波源走査法を用いたガイド波伝搬による金属薄板内減肉の検出 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会2021年度秋季講演大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kyosuke Shimizu, Ayumu OSUMI and Youichi Ito |
| 2. 発表標題 Visualization of defects in thin metal plate using scanning airborne ultrasound source technique and dual frequency guided wave propagation |
| 3. 学会等名 The 42st Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 気流中における空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性 |
| 3. 学会等名 2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイ弾性波源走査法を用いたガイド波伝搬による金属薄板内欠陥の可視化 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 チャープ信号を用いた空中超音波フェーズドアレイの音波放射 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大隅歩 |
| 2. 発表標題 非線形空中超音波励起によるガイド波の発生と欠陥イメージングへの応用 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 GANを用いた弾性波源走査法による非破壊検査画像の判別支援システムの構築 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイによる非線形弾性波源走査法を用いたガイド波伝搬の可視化 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 時間反転波による空中超音波フェーズドアレイの音波集束の検討 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田健太, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波を用いた弾性波源走査法励起によるLamb波の伝搬シミュレーション |
| 3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイにおける超音波エミッタ径とグレーティングローブの抑制の検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kenta Yamada, Ayumu Osumi, Youichi Ito |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation of Lamb Wave Propagation in Flat Plate by Scanning Aerial Ultrasonic Source Technique |
| 3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kyosuke Shimizu, Ayumu Osumi, Youichi Ito |
| 2. 発表標題 Focusing Properties of Airborne Ultrasound Phased Array Using Time Reversal Method |
| 3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイと複数受信器による固体内欠陥の検出 |
| 3. 学会等名 2020年度日本非破壊検査協会秋季講演大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイと複数受信器を利用した金属薄板中の欠陥イメージング |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田健太, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波励起による平板内 Lamb 波の伝搬シミュレーション |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田健太, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非線形空中超音波励起による高調波ガイド波の3次元シミュレーション |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 清水鏡介, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非接触フェーズドアレイによる材料の評価 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 大隅歩, 山田健太, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波フェイズドアレイの音波照射特性 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 山田健太, 大隅歩, 伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波励起による高調波ガイド波の伝搬特性 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐久間渉、大隅歩、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中線集束超音波励起によるガイド波を利用した固体材料の非破壊評価 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介、大隅歩、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイを利用した弾性波源走査法の基礎検討 |
| 3. 学会等名 第27回超音波による非破壊評価シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水鏡介、大隅歩、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイを利用した固体材料の非接触評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大隅歩、清水鏡介、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非接触非破壊検査のための強力空中超音波フェイズドアレイの音波放射特性 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Osumi Ayumu, Wataru Sakuma, Youichi Ito |
| 2. 発表標題 Investigation of Guided Wave in Flat Plate Generated by High-intensity Line Focus Aerial Ultrasonic Wave |
| 3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shimizu Kyosuke, Osumi Ayumu, Youichi Ito |
| 2. 発表標題 Generation of High-Intensity Pulsed Ultrasound by Airborne Ultrasound Phased Array |
| 3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大隅歩、山田健太、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非線形空中超音波波源走査による金属平板減肉部のイメージング |
| 3. 学会等名 2019年度日本非破壊検査協会秋季講演大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐久間渉、大隅歩、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非接触非破壊検査のための強力線集束超音波の発生 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田健太、大隅歩、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波波源走査法による高調波ガイド波伝搬を利用した非破壊検査の検討 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大隅歩、山田健太、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 非線形空中超音波励起による弾性表面波の相反定理を利用した計測 |
| 3. 学会等名 2019年度非線形音響研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大隅歩、山田健太、伊藤洋一 |
| 2. 発表標題 強力空中超音波スキャン照射による金属薄板中の高調波ガイド波伝搬 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|---------------------|-----------------|
| 1. 著者名 伊藤洋一, 大隅歩 | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 日本工業出版 | 5. 総ページ数 77 |
| 3. 書名 超音波 techno | |

| | |
|---------------------|-----------------|
| 1. 著者名 伊藤洋一, 大隅歩 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 日本工業出版 | 5. 総ページ数 92 |
| 3. 書名 超音波 techno | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 日本大学研究者情報システム https://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/83/0008225/profile.html |
|--|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|