

令和 5 年 5 月 13 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14863

研究課題名（和文）面状軌跡を用いた超音波接合法の接合機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of joining mechanism of ultrasonic welding using planar vibration

研究代表者

浅見 拓哉（ASAMI, Takuya）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：60706571

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、面状軌跡の振動を用いた超音波接合法の実用化を目的とし、面状軌跡を発生させる振動源の開発、及び接合機構を解明するためのAl板とCu板の接合特性の検討を行った。まず、接合過程の観察を容易とするための面状軌跡を発生させる振動源の開発は、中空部を併用したステップホーンを用い、片側支持とする構造にすることで達成できた。次に、面状軌跡による接合特性は、引張せん断試験及び十字引張試験の方法にて評価を行った。それより、面状軌跡による接合強度は、いずれの試験方法においても線状軌跡を上回ることがわかった。また、面状軌跡による接合強度は、表面粗さによらず高い強度を得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、異種金属の接合方法として用いられる超音波接合法の改良について行った。具体的には用いる振動を複雑な軌跡を描くようにした。その結果、複雑な軌跡を用いた超音波接合法は、従来の超音波接合法よりも高い接合強度を得られることを明らかにした。本研究の成果は、論文、および学会発表を通して広く周知を行った。そのため、複雑な軌跡を用いた超音波接合法の先導的な役目を全うし、また同時に知的財産の共有を行えたと考える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a vibration source that generates planar vibration, and to investigate the joining characteristics of aluminum and copper plates in order to elucidate the joining mechanism. First, the development of a vibration source that generates planar vibration to facilitate the observation of the joining process was achieved by using a step horn with a hollow part and a one-sided support structure. Next, the joining characteristics by the planar vibration were evaluated by the methods of tensile shear test and cross tensile test. I found that the welded strength with the planar vibration exceeded the linear vibration in both test methods. In addition, I also clarified that high strength can be obtained regardless of the surface roughness in the welded strength by the planar vibration.

研究分野：音響・超音波工学

キーワード：超音波接合 異種金属 縦振動 ねじり振動 複合振動 振動軌跡 面状軌跡

### 1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池、IC チップ、ワイヤーハーネス等の製造において、銅とアルミニウム、金とアルミニウムなどの異種金属を接合する必要がある。この接合の要求としては、まず酸化被膜を除去し接合部の電気抵抗を低くすること、そして、接合試料を固相状態で接合し変形を小さくするなどがある。このような要求を満たす接合方法として超音波接合法がある。

現在の超音波接合法は、接合チップを介して接合試料に単純な一方方向の直線軌跡の振動を加えている。しかし、現在の超音波接合法は、振動が一方方向のため、接合試料の寸法、設置方向により接合試料が共振状態となり、接合チップと接合試料の間に振動変位差が生じることで接合できない場合があることが知られている。現状、この問題は、使用する超音波振動の周波数を変化させることで解決している。しかし、複数の周波数の超音波接合機が必要となるため設備投資が高くなり、製造コストの上昇を招いていた。そのため、現状、一方方向の振動を用いた超音波接合法の問題の根本を解決する技術は見出されていない。また、フラックスを用いずに接合できる超音波接合法は、環境への影響も少なく、その技術の高度化は急務である。

### 2. 研究の目的

現在の超音波接合法の問題を解決する方法として、本研究では制御性に優れ、方向性の低い振動である面状軌跡の振動を接合に用いることを提案している。面状軌跡の振動は、周波数の異なる縦振動とねじり振動の線状軌跡を個別に制御することで発生させている。そのため、多少の周波数変化では軌跡の形状が変化せず、制御が容易であるという利点がある。また、2つの周波数を用いているため接合試料が共振状態と成り難いと考えられる。これまで面状軌跡の振動を用いた場合、現在の方法と同様の強度に達す時間は約1/3、加圧は約2/3、振動変位は約2/3に低減することを明らかにしている。すなわち、面状軌跡の振動による接合は、現在の超音波接合法の問題点を解決できる可能性がある。しかし、その接合機構は未だに明らかになっていない。そのため、実用化、またさらなる高度化の妨げとなっている。そこで、本研究は接合試料の振動状態、接合状態に着目し、面状軌跡の振動を用いた超音波接合法の接合機構を明らかにすることが目的である。

### 3. 研究の方法

本研究は、振動源の開発、及び接合機構の解明のための Al 板と Cu 板を用いた接合実験の2つを用いて実施する。

振動源の開発は、接合過程の観察を容易とするため長さ 30 mm 以上の接合チップをもつ振動源を開発する。そのような振動源を FEM にて設計を行い、製作する。振動源は、接合チップに対して加圧した場合に面状軌跡の振動変位が 10 μm 以上得られるように設計を行う。なお、振動源は図 1 に示す様な構造を想定している。図に示した振動源は、中空部を用いたステップホーン (A2017 製) の片端に、縦振動を発生させる 27 kHz 用ボルト締めランジュバン型縦振動子 (D4427PC, 日本特殊陶業製)、及びねじり振動を発生させるための 19 kHz 用ボルト締めランジュバン型ねじり振動子 (DAN4419, 日本特殊陶業製) を接続した構造となっている。この振動源は、周波数の異なる縦振動とねじり振動の振動方向を直交させることで、ステップホーン先端部にて面状軌跡の振動を発生させることができる構造とした。

また、接合機構の解明のための Al 板と Cu 板を用いた接合実験は、接合強度の測定方法、及び表面粗さを変化させた場合について検討する。接合実験は、現有の面状軌跡の振動を発生させるための振動源と静圧を印可できる装置を用いて行った。なお、接合中の接合チップの振動はレーザードップラ振動計を用いて測定した。また静圧の値はロードセルを用い、各種接合強度は引張試験機を用いて測定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 振動源の開発

図 1 に示す様な振動源において接合チップの寸法の検討を行った。検討は汎用有限要素法解析ソフト COMSOL による振動解析を主に用いて設計を行い、その後、試作と評価を行った。接合チップの設計における解析結果の一例を図 2 に示す。解析モデルは、接合チップとして矩形断面の細長い棒（全長 100 mm、材質 SUS303）を用いた。解析は、矩形断面の寸法を変化させた場合について、図 1 における y 方向に片端を加振した場合の自由端の振動変位比を求める方法で行った。図 2 は横軸と縦軸に矩形断面の寸法を示しており、コンター図で振動変位比を示している。同図より、y 方向に加振した場合は、接合チップ先端の変位は  $l_y$  の寸法に依存し、 $l_z$  の寸法に関係ないことがわかった。また、接合チップ

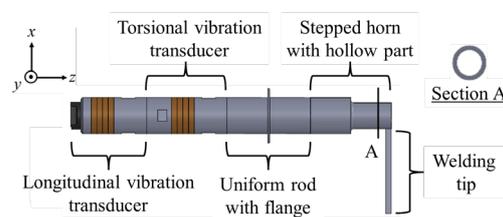


図 1 開発している振動源

両端の振動変位比が 1.414 倍となる寸法は  $l_y = 3.1, 4.5, 5.2 \text{ mm}$  であることがわかった。このような解析を複数回行い、接合チップの寸法は  $l_y = 4.5 \text{ mm}$ ,  $l_z = 6.0 \text{ mm}$  と決定した。

そして、決定した寸法の接合チップの試作を行い、その振動分布の評価を行った。振動分布の評価は、接合チップの長さ方向の各位置における振動をレーザードップラ振動計で測定することで行った。その結果を図 3 に示す。図 3 は、横軸に接合チップの長さ方向の位置、縦軸にたわみ振動の振動変位の片振幅を示している。図より、 $y$  軸方向のたわみ振動は 1 波長が約  $51 \text{ mm}$  であり、接合チップ全体で約 2 波長の振動となっており、 $z$  軸方向のたわみ振動は 1 波長が約  $37 \text{ mm}$  であり、接合チップ全体で約 2.5 波長の振動となっていることがわかった。これより、先端部にて大きさ振動が得られる見込みを得た。

## (2) 引張せん断強度と十字引張強度

アルミニウム板(A1050, 1 辺  $27 \text{ mm}$ , 厚さ  $0.5 \text{ mm}$ )と銅板(C1100, 長さ  $40 \text{ mm}$ , 幅  $15 \text{ mm}$ , 厚さ  $2 \text{ mm}$ )を接合試料として、引張せん断強度と十字引張強度の検討を行った。図 4 は接合された試料の一例である。この場合の接合条件は静圧力  $500 \text{ N}$ , 接合時間  $0.6 \text{ s}$ , 面状軌跡の振動を用いた。図よりアルミニウム板と銅板が中心で重ねられ、アルミニウム板の中心に接合チップによる接合点がついている様子が分かる。

図 5 は接合チップ先端の振動方向と引張せん断試験または十字引張試験の引張方向の関係を表した概略図である。図は超音波複合振動源のホーンに対して黒線方向を縦振動方向、赤線方向をねじり振動としたとき、接合試料との位置関係を表しており、青色矢印は引張方向である。同図(a)と(b)は、いずれも超音波複合振動源のホーンの長さ方向に対して銅板の長さ方向を平行に設置した場合である。一方、同図(a)は引張せん断試験の場合、同図(b)は十字引張試験の引張方向を示している。

図 6 は位置関係(a)における接合時間を変化させた場合の平均引張せん断強度の実験結果である。図は横軸に接合時間、縦軸に引張せん断強度を取り、パラメータはグラフの上の表の通りである。なお、エラーバーは偏差( $\pm 1\sigma$ )を示している。図より位置関係(a)における引張せん断強度は、面状軌跡振動が最も高く、次いでねじり振動、縦振動の順となった。また、面状軌跡の振動の強度は  $0.6 \text{ s}$  で約  $700 \text{ N}$  得られており、偏差も小さく安定していた。図 7 は位置関係(b)における接合時間を変えた場合の平均十字引張強度の実験結果である。図は横軸に接合時間、縦軸に十字引張強度を取り、パラメータはグラフの上の表の通りである。なお、エラーバーは偏差( $\pm 1\sigma$ )を示している。図より位置関係(b)における十字引張強度は面状軌跡の振動が最も高くなった。縦振動は  $0.2 \text{ s}$  では引張せん断強度を測定する前に剥がれてしまったため、 $0 \text{ N}$  とし、 $0.6 \text{ s}$  以降は飽和した。ねじり振動は接合時間に比例して高くなった。また、面状軌跡の振動は  $1 \text{ s}$  で約  $300 \text{ N}$  得られており、偏差も小さく安定していた。これらの結果より、面状軌跡の振動を用いた場合は、引張せん断強度と十字引張強度の両者が安定して得られることがわかった。一方、線状軌

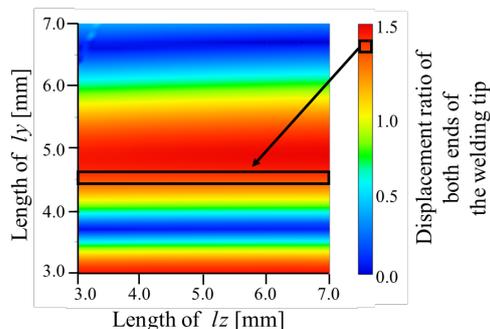


図 2 接合チップの解析結果の一例

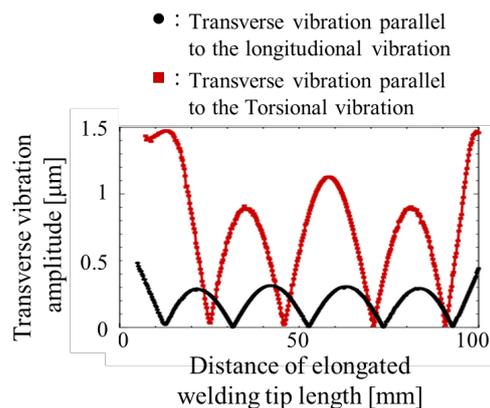


図 3 接合チップの振動分布

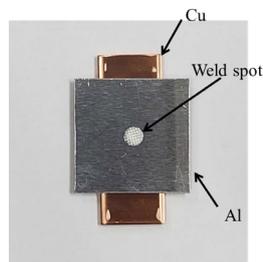


図 4 接合された試料の一例

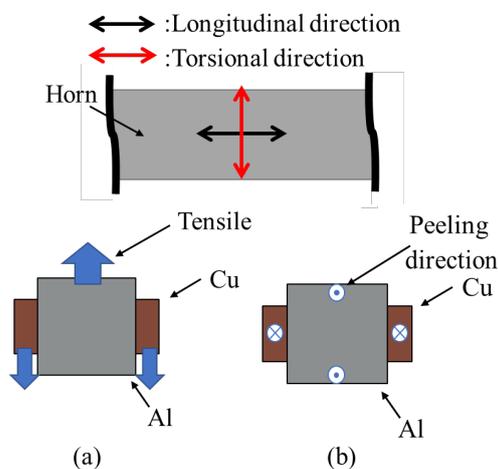


図 5 振動方向と引張方向の関係

跡の振動においては、600 N 程度の引張りせん断強度が得られたとしても、十字引張強度は 100 N 程度となった。

### (3) 表面粗さを変化させた場合の引張せん断強度

表面を粗くした銅板 (C1100, 長さ 40 mm, 幅 15 mm, 厚さ 2.0 mm) と表面を粗くしたアルミニウム板 (A1050, 長さ 27 mm, 幅 27 mm, 厚さ 0.5 mm) を用いて引張せん断強度の検討を行った。表面を粗くするには、試料の圧延方向と同じ方向にエメリー紙の #220, #400, #800, 及び #2000 を往復移動させて行った。

図 8 はその結果である。図は、縦軸に引張せん断強度、横軸にエメリー紙の番手を表している。また、図の横軸の 0 は購入時のままの試料を用いた場合を表している。図の凡例は黒四角が縦振動、赤三角はねじり振動、青丸は面状振動を表し、エラーバーは偏差 ( $\pm 1 \sigma$ ) を表している。図において、接合強度の測定ができなかった場合は接合強度を 0 N で示した。図より、接合強度は面状振動、縦振動及びねじり振動いずれの振動においても購入時のままの試料を用いた接合が高くなった。これは、試料であるアルミニウム板及び銅板ともに表面を粗くしたことで 2 つの試料の表面粗さの差が大きくなったことで振動を阻害するような働きが生まれ、接合強度が低くなったことが考えられる。しかしながら、表面粗さと接合強度の定量的な関係性を見出すことは困難であった。これは研磨時の研磨剤が試料表面に残留していた影響かと考えられる。

#### <引用文献>

- ① 原田章二, アルミニウムの各種接合法と最近の進歩, (社)軽金属溶接構造協会, 1991, pp. 79-86.
- ② Yosuke Tamada, Takuya Asami and Hikaru Miura, Welding characteristics of Cu and Al plates using planar vibration by a dumbbell-shaped ultrasonic complex vibration source, Jpn. J. Appl. Phys., 2018, 57, 07LE12.
- ③ 水野 隼佑, 浅見 拓哉, 三浦 光, 超音波接合に用いる細長い接合チップを取り付けた複合振動源の特性, 日本音響学会 2023 年春季講演論文集, 2023, 2-7-5.
- ④ Haruki Sakuma, Takuya Asami, Hikaru Miura, Tensile shear strength and cross tensile strength in welding using an ultrasonic complex vibration source, Acoustical Science and Technology, 2022, Vol. 43, No. 1, pp. 1-9.
- ⑤ 山崎 梨菜, 浅見 拓哉, 三浦 光, 超音波複合振動源を用いた試料の表面粗さによる接合強度, 日本音響学会 2023 年春季講演論文集, 2023, 2-7-6.

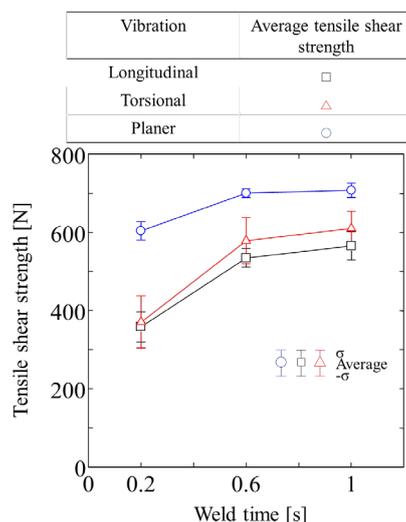


図 6 接合時間に対する引張せん断強度の特性

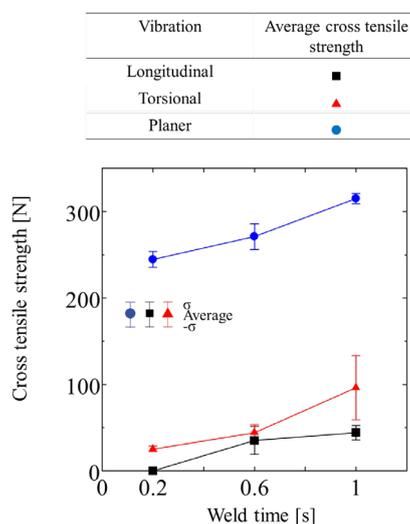


図 7 接合時間に対する十字引張強度の特性

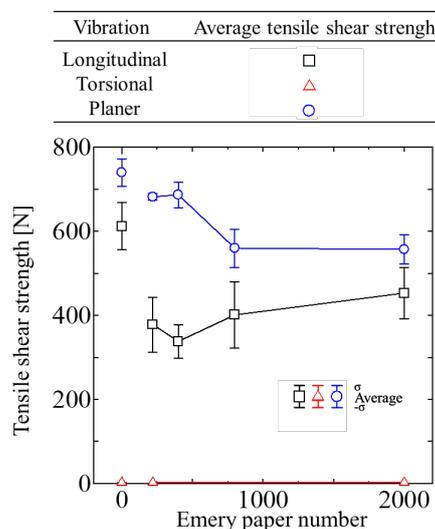


図 8 表面粗さ (エメリー紙の番手) に対する引張せん断強度の特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Saegusa Naoki, Asami Takuya, Miura Hikaru	4. 巻 60
2. 論文標題 Ultrasonic complex vibration source using two longitudinal vibration transducers and a uniform rod with diagonal slits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDD09 ~ SDDD09
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abf2aa	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 Tamada Yosuke, Sakuma Haruki, Asami Takuya, Miura Hikaru	4. 巻 41
2. 論文標題 Vibration characteristics of the welding tip and welding sample in ultrasonic welding using planar vibration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 645 ~ 653
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.41.645	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22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 振幅拡大比が個々に設計可能な縦 - ねじり振動源
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田義大, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 異なる断面積を有するヘリカルスリット付き伝送棒とホーンを用いた超音波振動源の開発
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田義大, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Vibration Characteristics of Ultrasonic Complex Vibration Source Using Transmission Rod with Different Cross-Sectional Area
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Study of longitudinal-torsional vibration source using stepped horn with hollow part
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田義大, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 楕円状振動軌跡を発生させるための振動源の開発
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎梨菜, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 ダンベル型複合振動源による超音波金属接合 電解研磨を施した試料の引張せん断強度試験
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田義大, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 楕円状振動を発生させるヘリカルスリットを用いた超音波複合振動源の開発
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 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 中空部を有するステップホーンを用いた縦 - ねじり振動源 - FEM と実測による比較 -
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 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 振幅拡大比が個々に設計可能な縦 - ねじり振動源の実測による検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎梨菜, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波複合振動源を用いた接合試料の電解研磨の有無による強度
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Dissimilar metals welding using longitudinal-torsional complex vibration source -Welding strength characteristics due to different weld time-
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 ダンベル型振動源による超音波金属接合 - 接合時間の違いによる引張せん断強度と十字引張強度 -
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波面状振動を用いた異種金属接合における引っ張りせん断強度と十字引っ張り強度
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 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波複合振動源を用いた面状振動によるアルミニウム板と銅板の接合
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石慎也, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波振動を用いた被覆より線と銅板の接合特性
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石慎也, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Development of longitudinal-torsional vibration source with a helical slits transmission rod
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石慎也, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Resonance characteristics of a longitudinal-torsional complex vibration source using a transmission rod with helical slits
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石慎也, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波縦振動による被覆より線と銅板の接合特性
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 三枝直樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 2つの縦振動子と斜めスリット付き一様棒を用いた複合振動源の振動特性
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 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 超音波複合振動源を用いた異種金属の接合 ~ 加圧や試料の設置方向が異なる場合の接合強度 ~
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 佐久間晴樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 縦・ねじり複合振動源を用いた異種金属の接合 接合試料の寸法の違いによる接合特性
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三枝直樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 斜めスリット付き一様棒を用いた複合振動源の振動特性
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本大学理工学部電気工学科 三浦・淺見研究室  
<https://www.ele.cst.nihon-u.ac.jp/miuralab/index.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
---------	---------