

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420696

研究課題名(和文)超音波接合における相対運動の制御と最適化

研究課題名(英文)Relative motion control and optimization of ultrasonic bonding

研究代表者

佐々木 朋裕 (Sasaki, Tomohiro)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：40432067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、金属材料を加圧し、超音波振動を付加することで接合を行う超音波接合法を対象としている。本接合法では、超音波振動により接合界面を摩擦させることにより、界面密着や酸化被膜の破壊、排出を経て接合が達成される。本研究では、これらを引き起こすための接合材同士、ならびに接合工具と被接合材に生じる相対運動挙動の詳細な理解を図るとともにその制御の可能性を検討した。これにより、接合される材料、および振動を付加する接合工具との間に生じる相対運動と接合界面の組織形成との相関を明らかにした。以上の実験により得られた知見を活用し、高信頼化、高性能化を実現した新しい超音波接合技術の可能性を検討した。

研究成果の概要(英文)：This study deals with one of solid state bonding techniques, "ultrasonic bonding" which utilizes high frequency vibration to bond metals. The bonding phenomena is analyzed by a combination approach of microstructural evaluation of bonding interface and dynamic motion analysis using in-situ observation. The study revealed that the correlation of a relative motion involving the bonding metals and bonding tools to apply the vibration, as well as the microstructural evolution at the bonding interface. A new ultrasonic bonding technique capable of high speed and high reliability bonding has been discussed.

研究分野：材料接合

キーワード：超音波接合 接合 相対運動 その場観察 接合強度

1. 研究開始当初の背景

超音波接合は金属材料を加圧し、超音波ホーン先端に取り付けられた接合工具を介して接合部に振動を付加することで接合を行う固相接合法の一種である(図1)。この手法は、はんだやフラックスを使用せずに、低温、短時間で接合が可能であることから、半導体基板上のワイヤボンディングや、自動車の二次電池の電極接合に利用されている。近年、製品の小型化や接合材質の多様化に伴い接合技術にはさらなる高信頼化が望まれており、接合材の機械的、化学的性質の変化に対応した接合メカニズムの詳細な理解が重要課題となっている。超音波接合では、材料同士の相対運動によって接合界面に生じる摩擦や凝着の発生を起点として接合が開始する。このため、従来の研究では、接合界面近傍で生じる酸化皮膜の破壊、拡散、および反応といった微視的な現象に着目し、加圧、振動条件などの接合プロセス因子と接合界面組織との関連が調べられてきた。一方、研究代表者の以前の研究では、高速ビデオカメラによる接合過程の「その場観察」とデジタル画像相関法を用いた解析手法により、接合材および振動を接合部に付加する接合工具の挙動が明らかにされている。相対運動(摩擦)は接合材に接触する接合工具と接合材との界面にも生じており、この現象が接合部の形成に支配的に作用する可能性が明らかとなった。接合工具と接合材との相対運動は、接合部の温度上昇とともに接合部全体の塑性流動を発生させ、接合力を向上させる要因となると考えられる。すなわち、超音波接合のメカニズムを解明するためには、接合対象となる接合材のみならず、接合工具を含めた三体(図2: 接合工具、上側接合材、下側接合材)の挙動を詳細に把握する必要がある。

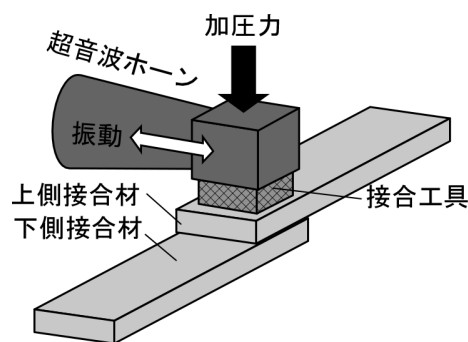


図1 超音波接合の模式図。

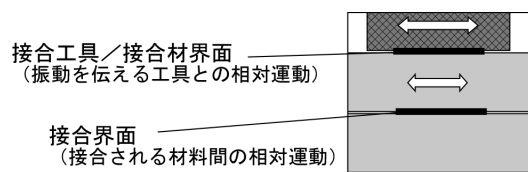


図2 超音波接合における界面運動。

2. 研究の目的

これまでの研究において、上述の接合工具と、工具と接合材の巨視的な相対運動と微視的な接合界面組織の形成とを結びつける統一的な解釈は得られてない。本研究では、超音波接合プロセスにおける工具および接合材の動的挙動を定量的に評価し、界面組織の形成との関係を明確化することで、超音波接合メカニズムの解明を図る。以上より得られた知見を基に、材料科学的観点による組織制御に加えて、界面の相対運動制御による信頼性の高い超音波接合法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

アルミニウム、および銅などの汎用金属の同種を対象とした接合実験のその場観察を行った。接合部に付与する加圧力、および接合時間を接合因子として、被接合材の塑性流動、接合界面の組織、および継手の接合強度を中心に検討した。さらに、接合中に生じる凝着核の形成、および接合中の温度上昇に伴う再結晶粒の生成や金属間化合物相の生成を画像解析により得られた相対運動および接合温度計測のデータと対応させながら比較し、接合メカニズムを検討した。

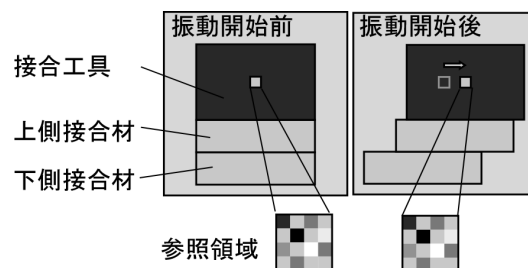


図3 画像相関法による相対運動の解析。

(1) 接合工具の表面形状が接合組織に与える影響

接合材と接触する工具の表面形状は塑性流動の発生にかかわる重要な因子であると考えられる。本研究では、異なる表面形状をもつ接合工具を新規に作製し、接合部の形成に効果的な接合工具の設計を図った。

2枚の純アルミニウムA1050-H24板材(上側試験片: 11mm×100mm×0.5mm, 下側試験片: 30mm×60mm×0.8mm)を用いた接合実験を行った。下側試験片/アンビル間のすべりを抑制するために、下側試験片を治具で固定して接合を行った。本研究で使用した2種類の工具表面形状を図4に示す。図4(a)に示す工具には、ピッチ0.8mm、高さ0.3mm、および試験片と接触する先端部の幅(接触幅)が0.2mmの溝が加工されている(三角型工具)。また、図4(b)の接合工具には、ピッチ、高さ、および接触幅が同一で鋸歯状の溝が加工されている(鋸歯型工具)。工具先端と試験片を含む領域を高速ビデオカメラで撮影し、画像相

関法を用いて加振中の接合工具と接合材の変位を求めた。

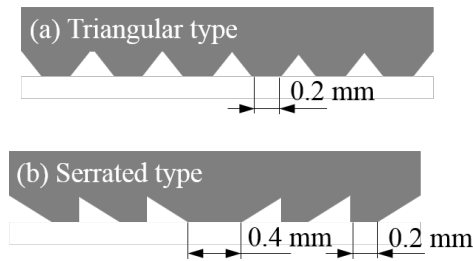


図4 接合工具表面形状の影響の調査。

(2) 接合工具表面の突起形状が接合に及ぼす影響

(1) の実験より、接合する材料を把持するために接合工具の表面形状が接合性状に重大な影響を及ぼすことが明らかとなった。特に、接合材の把持は表面に加工された突起による食い込みにより達成される。本実験では、その影響の詳細に調べるため、図5に示される突起の傾斜角度を変えた単一の突起を工具表面に加工した。突起角度は、それぞれ 135° 、 170° 、および 175° とした。

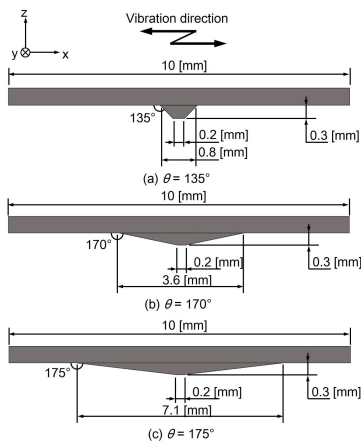


図5 工具表面の突起形状。

(3) 接合界面の酸化被膜が接合性に及ぼす影響。

多くの研究者らによって報告されているように、接合界面に介在する酸化被膜の破壊や排出といった微視的現象は固相接合における重要なプロセスである。また、このような酸化皮膜は工具/接合材界面にも存在し、巨視的な接合過程に影響を与えていると考えられる。さらに、これまでの研究で、接合工具と接合材の相対運動は接合材の塑性流動を引き起こし、攪拌効果によって接合部が形成されることがわかった。接合材と接触する工具の表面形状は塑性流動の発生にかかわる重要な因子であると考えられる。以上の観点から、2つの界面挙動に密接に関わる接合

工具の表面形状、および接合材表面の介在物が接合過程に及ぼす影響を調べた。同時に、接合界面の酸化皮膜の存在、および界面での接合部形成が相対運動挙動に及ぼす影響を明確化するため、陽極酸化処理皮膜や潤滑剤を界面に介在させた模擬接合実験を行った。

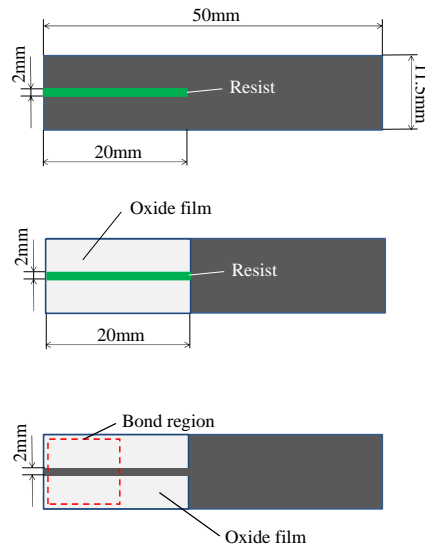


図6 接合界面への陽極酸化処理。

4. 研究成果

(1) 鋸歯型工具表面形状を用いた接合実験。

図7は、それぞれの接合工具を用いて超音波接合した継手の接合強さと接合時間の関係を示す。三角型工具を用いた場合の接合強さは、接合時間 2000ms まで緩やかに上昇している。一方、鋸歯型工具を用いた場合では、接合時間 1500ms 以降から急激に接合強さが上昇しており、接合時間 2000ms で約 560N に達している。

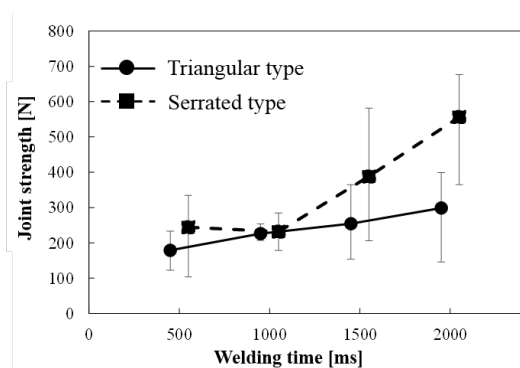


図7 鋸歯型工具 (Serrated) を用いた超音波接合継手の接合強度。

加振時間 2000ms における試料の断面組織写真を図8に示す。三角型工具を用いた図8(a)の組織では、加振前と同様の圧延組織が見られた。一方、鋸歯型工具を用いた図8(b)の組織では、試験片上部に塑性流動した様子が確認された。加振中の工具近傍の温度を熱電対で測定した結果を図9に示す。鋸歯型工

具を用いた場合の方が、加振時間 2000ms において三角型工具よりも高い約 240 °C まで達しており、この違いは、工具/接合材間の相対振幅の違いに起因すると考えられる。温度上昇による試験片の軟化が促進されることによって接合工具からの組織の攪拌領域が形成されたと結論できる。

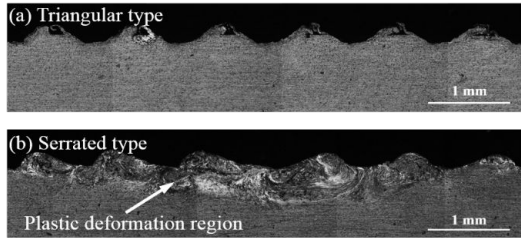


図 8 通常の接合工具 (Triangular) と鋸歯型工具 (Serrated) を用いた場合の接合組織の比較。

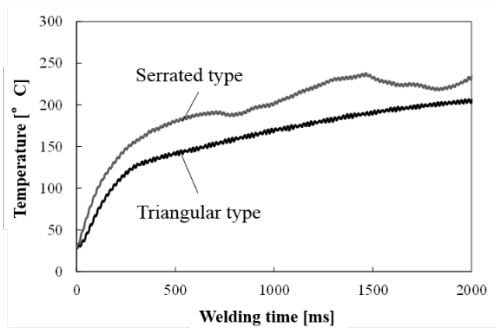


図 9 接合温度。

以上より、超音波接合においては、特に、接合時間が長くなると、接合に伴う温度上昇により被接合材の巨視的な塑性流動が発生し、接合界面における接合部の成長を促進させること確認された。また、この現象には、接合材と接触する接合工具による摩擦と押し込みが大きく関わっていることがわかった。また、工具による被接合材の摩擦攪拌を誘発させるため、表面を鋸歯状に加工した工具を用いることで、継手強度が改善されることを明らかとした。

(2) 工具突起形状が接合に及ぼす影響。

工具の試験片への食い込み量を比較するために、図 10 に工具と上側試験片の z 方向の相対変位を示す。突起角度の値が小さくなるほど、接合初期の段階から押し込み方向 (-z 方向) への相対変位が大きくなっている。一方、図 11 は接合中の工具、試験片の振動方向の変位波形から振幅を求めた結果である。各工具ともに、工具の振幅が試験片のそれよりも常に大きく、工具と試験片の間で相対運動が生じていることがわかる。

=175° では、試験片の振幅が他の 2 つの工具の場合に比べて顕著である。この理由は、接合界面付近の温度上昇に伴い、凝着抵抗が増したためであると推測される。

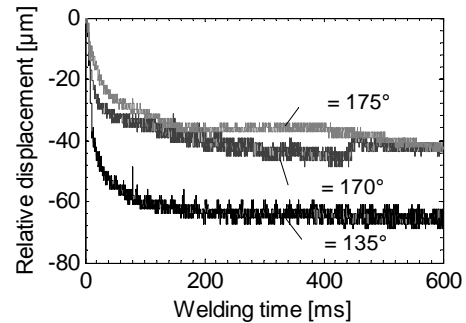


図 10 相対運動解析により算出した接合工具の押し込み挙動。

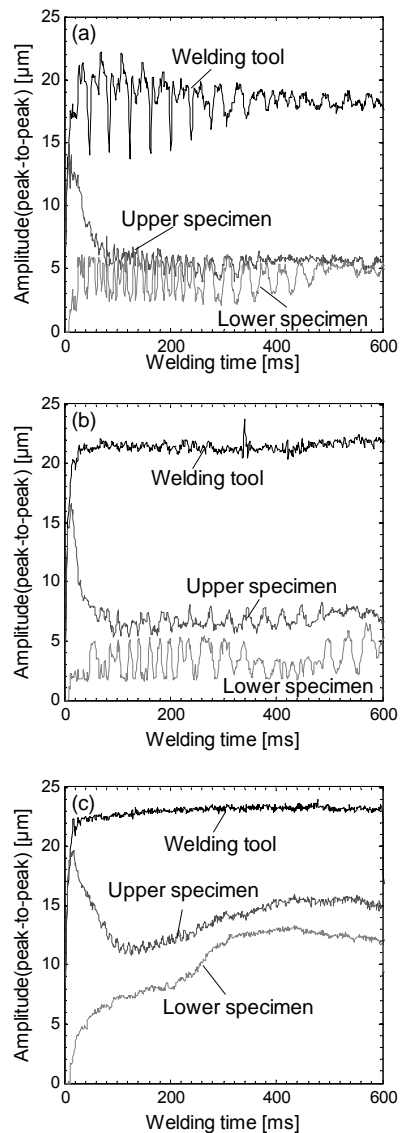


図 11 接合中の振幅の変化。

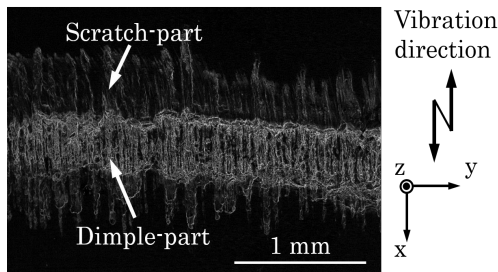


図 12 接合部の形成 .

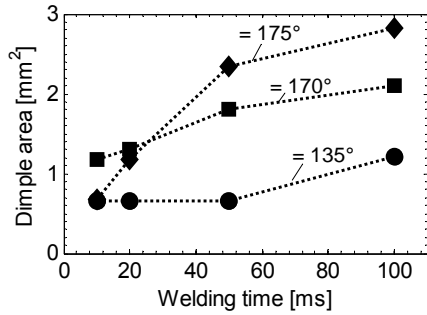


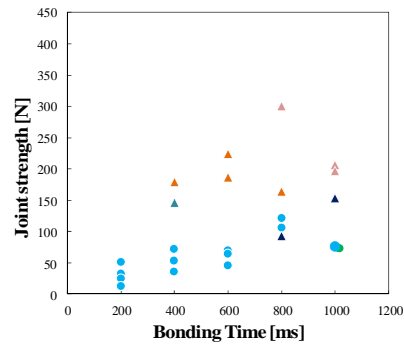
図 13 工具の突起角度による接合部の拡大過程の違い .

図 12 は、接合した継手の破断面を観察した SEM 写真である。破断面では、画像中の白く見える領域には、ディンプルパターンが認められたことから、この部分が接合部であると考えられる。そこで、ディンプル部を接合領域と仮定して、白い領域の面積を二値化処理して算出した結果を図 13 に示す。が大きくなるほど、接合時間の経過に伴うディンプル部の拡大が大きいことがわかる。が大きい工具では、突起の試験片への食い込みに伴う接触端部の広がり大きいことが、接合領域の拡大に寄与したと考えられる。

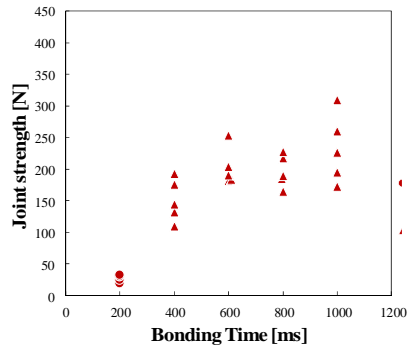
この原因は、工具と被接合材の相対運動の促進効果によるものであることが示唆される。

(3) 接合界面の酸化被膜が接合組織の形成に及ぼす影響。

図 14(a) に一般の接合工具を使用して 6061 合金を接合した時の継手強度を示す。接合時間の増加に伴って継手強度は増加する傾向にあるが、継手強度のばらつきが大きいことが分かる。この理由は、試験片の破断形態のばらつきに起因する。また、いずれの接合条件においても接合時間が比較的長い 1000ms においても、継手強度が低い継手が存在することが分かる。一方、図 14(b) は部分的に陽極酸化を施した試験片を接合した時の結果である。陽極酸化処理を部分的に施した試験片では、接合時間 400ms 以降で全ての試験片で、母材破断を呈する高い接合強度を示した。



(a) 陽極酸化処理なし

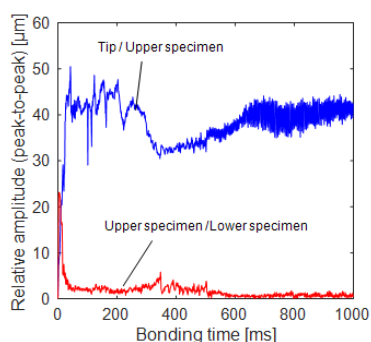


(b) 陽極酸化処理あり

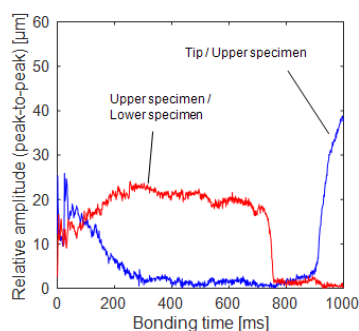
図 15 部分的な陽極酸化処理による接合強度ばらつきの低減 .

図 16 に部分的に陽極酸化処理の有無による相対運動の違いの例を示す。それぞれ、相対振幅と接合時間に対してプロットしてある。陽極酸化処理のない場合 (図 16(a)) では、上下の接合材同士の相対振幅が接合開始と同時に急激に減少していることがわかる。接合界面では上下の接合材が擦りあわされる (相対運動することにより、接合部が形成される。しかし、一方で、接合部の形成により接合界面の摩擦抵抗が上昇し相対運動は阻害される。このため、接合が進行すると上下の相対振幅が小さくなる。これに対して、図 16(b) の陽極酸化処理を施した場合では、上側試験片 / 下側試験片の相対振幅が約 20 μm で接合時間約 800ms まで継続して確認できる。この結果は次のように考察できる。部分的に施した陽極酸化被膜により、酸化被膜が介在する部分では初期接合部の形成が妨げられる (図 17 (a))。初期接合部の形成が抑制されることで、接合部全体で巨視的な摩擦抵抗が減少し、上側試験片 / 下側試験片の相対運動が支配的となる。また、接合部は陽極酸化処理を施していない箇所にも局部的に形成される (図 17 (b))。しかし、陽極酸化被膜が介在する領域では、接合部が形成され難いため、上側試験片 / 下側試験片の相対運動が継続的に起きる。接合時間の増加と共に被接合材の温度が上昇し、上側試験片 / 下側試験片の相対運動が継続的に生じたことで、局部的に形成された接合部が酸化被膜を破壊し

ながら成長する(図 17 (c))。また、高温下で上側試験片/下側試験片の相対運動が生じたことで、接合時間 800ms 以降では陽極酸化被膜が介在する接合界面全体でも塑性変形が生じる。



(a) 陽極酸化処理なし



(b) 陽極酸化処理あり

図 16 部分的な陽極酸化処理による接合強度ばらつき低減.

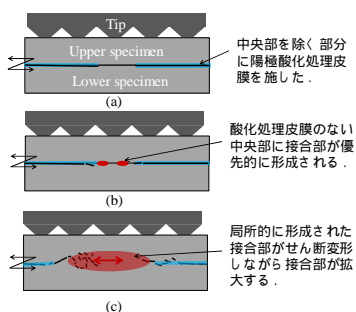


図 16 部分的な陽極酸化処理の効果の模式図.

以上より、局所的に形成された接合部への応力集中により、接合界面の塑性流動が促進されることが明らかとなった。接合界面に酸化被膜や潤滑剤を介在させて初期接合部を局在化させることで、被接合材同士の相対運動、および塑性流動による接合部の成長を促進させる効果が得られることを明らかにした。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 1 件)

Kazuki Komiyama, Tomohiro Sasaki, Yusuke Watanabe: Effect of tool edge

geometry in ultrasonic welding, J. Matter. Proc. Technol. Vol.229, 2016, 714-721. 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.031>

〔学会発表〕(計 7 件)

Takuya Chiyozawa, Takmumi Kamimura, Tomohiro Sasaki, Jonas A. Pramudita: Relative motion and growth of bonded area in ultrasonic bonding of 6061 aluminum alloy, 10th International Conference on Trends in Welding, Research & 9th International Welding Symposium of Japan, Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS), 2016 年 10 月 11 日 ~ 10 月 14 日, 一橋講堂(東京都千代田区).

千代澤 卓也, 佐々木 朋裕: アルミニウム合金の超音波接合における接合部の拡大機構, 溶接学会 平成 28 年秋季全国大会, 2016 年 9 月 14 日 ~ 9 月 16 日, HOTEL 天坊(群馬県渋川市).

中村 飛鳥, 佐々木 朋裕: 5000 系アルミニウム合金と銅の超音波接合, 日本機械学会 北陸信越支部 第 53 期総会・講演会, 2016 年 3 月 5 日 信州大学工学部(長野県長野市).

Kazuki Komiyama, Tomohiro Sasaki: Friction behavior between tool edge and welding material in ultrasonic welding, Advances in Materials & Processing Technologies Conference, 2015 年 12 月 14 日 ~ 12 月 17 日, Madrid, (Spain).

小宮山 和希, 佐々木 朋裕, 鷹野 萌: 超音波接合における工具と接合材の摩擦挙動, 平成 27 年溶接学会 秋季全国大会, 2015 年 9 月 2 日 ~ 9 月 4 日, 北海道北海道科学技術大学(北海道札幌市).

千代澤 卓也, 佐々木 朋裕, 室 伸太郎: 6061 アルミニウム合金の超音波接合過程, 平成 27 年溶接学会 秋季全国大会, 2015 年 9 月 2 日 ~ 9 月 4 日, 北海道北海道科学技術大学(北海道札幌市).

小宮山 和希, 佐々木 朋裕: 超音波接合における工具表面形状の効果, 溶接学会 平成 26 年 秋季全国大会, 2014 年 9 月 10 日 宇奈月国際会館(富山県黒部市)

〔その他〕

ホームページ:
<http://joining.eng.niigata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 朋裕 (SASAKI, Tomohiro)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 26420696