

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760590

研究課題名(和文)超音波を利用した革新的金属接合技術の開発原理

研究課題名(英文)Development principle of innovative metal-joining technology utilizing ultrasonic waves

研究代表者

藤井 啓道 (FUJII, HIROMICHI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70560225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：金属材料の超音波接合は、これまで困難であったサブミリサイズの異材接合が容易に実現可能であるため、様々なものづくり産業から脚光を浴びている。本研究では、超音波接合における基礎現象を系統的に理解することを旨とし、アルミニウム合金をベースとして同種および異種材料間の接合試料を用いて実験を行なった。その結果、接合部形成には、接合界面におけるせん断変形と再結晶が重要な役割を果たしていることが明らかになった。また、接合界面における反応層の形成が、接合強度上昇に強く寄与していることが見出された。

研究成果の概要(英文)：Since the ultrasonic joining technique can easily join the sub-milli sized dissimilar metals, there are great expectations to extend the range of applications to many manufacturing industries. The motivation of this study was to reveal the fundamental phenomena during ultrasonic joining process in metallic materials. The experiments were conducted using the specimens prepared by ultrasonic joining of Al alloy to similar and dissimilar metals. Of particular importance were findings that the shear deformation at the joint interface and recrystallization during ultrasonic joining played an important role in achieving a direct bond. In addition, a formation of reaction layer at the joint interface significantly contributed to the increase in joint strength.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：超音波接合 アルミニウム合金 鉄鋼材料 銅 再結晶 せん断変形 塑性流動 金属間化合物

### 1. 研究開始当初の背景

工業製品の高機能化により、製品の小型化・軽量化が不可欠となっている。特に、これまで学術的・技術的に取り上げられてこなかったサブミリオーダーの金属箔材や線材の同種材および異種材接合技術の確立が急務となっている。サブミリオーダーの箔・線材の同種材接合は、TIG やレーザ溶接等の熔融溶接技術の高度制御技術により対応可能ではあるが、熔融・凝固を経るため安定した品質を得ることが難しい。さらに、異種材接合に関しては、既存の溶接・接合技術では対応できない状況にある。これらの背景に対し、我々は超音波接合の新たな応用の開拓を試みる。超音波接合は、超音波振動による摩擦を利用した固相接合法であり、既存の技術では不可能であったサブミリオーダーの同種材および異種材接合を安定的に達成できる接合技術である。この他にも、「不活性ガス雰囲気など特別な作業環境が不要である」、「接合に要するエネルギーが小さく、電気抵抗溶接等に比べコストが 1/5 ~ 1/20 である」等の特徴があり、超音波接合は上述の課題をすべて克服し得る革新的な技術として期待される。そのため、本接合法の学問体系構築と実機適用が次世代工業製品の製造には不可欠であるが、基礎物理データが決定的に不足しており、接合メカニズムと基礎学理の究明が強く求められている。

### 2. 研究の目的

金属材料の超音波接合においては、表面の酸化被膜が超音波振動による摩擦によって破壊除去され、新生面において塑性流動した金属原子同士が結合することにより接合が達成されると考えられてきた。超音波接合時には、その他にも多くの物理現象が複雑に作用して接合が達せられると考えられるが、これらの現象を裏付ける決定的な証拠は報告されておらず、推論の域を脱していない。本研究では、これらの物理現象を系統的に整理・理解し、超音波接合を革新的な接合技術として確立することを目指し、同分野の先駆的な研究を行う。

### 3. 研究の方法

アルミニウム合金をベースとして、超音波接合により同種材接合試料および異種材接合試料を作製した。異種材接合には、工業製品の小型化や軽量化において重要な組み合わせであるアルミニウム合金と IF 鋼、ステンレス鋼および銅の 3 種類の異なる材料を用いた。得られた試料の微細組織を電子顕微鏡法により定量的に解析した。その後、接合メカニズムを解明する上で重要な鍵となる酸化被膜の存在形態を明らかにするため、接合界面における微細組織の観察を行なった。続いて、接合部マイクロ組織形成メカニズムを明らかにするため、プロセス中の金属テープ間に熱電対を埋め込み温度履歴の測定を行った。最

後に、接合した試料の機械的特性を評価し、マイクロ組織解析結果と関連付けながら、特性発現メカニズムを明らかにした。

### 4. 研究成果

アルミニウム合金の同種材による超音波接合、アルミニウム合金 - 鉄鋼材料およびアルミニウム合金 - 銅の組み合わせで超音波異種材接合を実施し、接合部における機械特性と微細組織および接合中の熱履歴を明らかにした。得られた結果に基づき、接合界面現象を系統的に整理し議論することにより、金属材料の超音波接合に関する物理モデルを提案し、今後幅広く工業展開していくための学術基盤を構築した。

以下に本研究で得られた主な成果について概要を示す。

#### (1) アルミニウム合金の超音波接合における接合機構の解明

3003 アルミニウム合金および 6061 アルミニウム合金を用いて、同種材の超音波接合を実施した。後方散乱電子線回折パターン解析システム (EBSD/OIM) を搭載した電界放射型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) により、接合界面近傍において結晶方位解析を行った結果、アルミニウム結晶粒のすべり面である {111} 面が接合面に対して平行となり、すべり方向である  $\langle 011 \rangle$  方向が超音波振動方向に対して平行になっていることが分かった (図 1)。また、接合時間が短い試料においては、ひずみの多く残る加工組織が形成されていたのに対し、接合時間が長くなると、温度上昇により微細な等軸粒で構成される再結晶組織が形成されることが明らかになった。これらの結果は、接合界面近傍におけるせん断変形と温度上昇による再結晶が接合達成に重要な役割を果たしていることを示唆している。さらに、接合欠陥部周辺においては、プロセス中に塑性流動が生じている形跡も確認された。

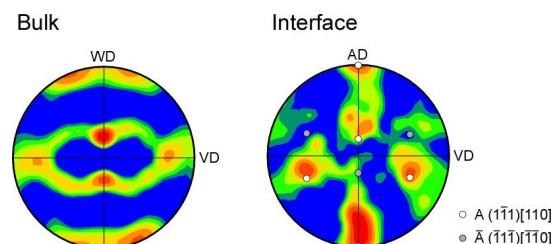


図 1 6061 アルミニウム合金の超音波接合界面より離れた領域 (バルク領域) および界面近傍の結晶組織より得られた {111} 極点図。

続いて、接合中の表面酸化皮膜の挙動を明らかにするため、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて、接合界面近傍の微細組織観察を行った。図 2 は、TEM による 6061 アルミニウム合金の超音波接合界面近傍における明視野像とエネルギー分散型 X 線分析法 (EDS) による元素マップ (Al および O) を示してい

る．接合界面においては，酸化皮膜が除去され，Al-Al の冶金的接合が達成されている領域と，酸化皮膜がクラスターとなり残存している領域が確認された．つまり，超音波接合においては，接合中のせん断変形や塑性流動により酸化皮膜が分断され，アルミニウムの新生面同士が直接接触することにより接合が達成されていることが明らかになった．これは，これまで指摘されていた推論を世界に先駆けて証明した重要な成果である．

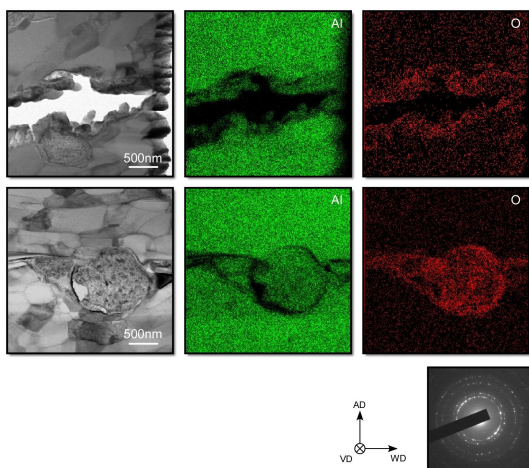


図2 6061 アルミニウム合金の超音波接合界面における TEM 明視野像，元素マップ (Al, O) およびクラスターより得られた制限視野回折パターン．

(2) アルミニウム合金と鉄鋼材料の超音波接合部における機械特性と微細組織形成過程

アルミニウム合金の超音波接合により得られた知見に基づき，異種材料の接合における界面現象を明らかにするため，アルミニウム合金と鉄鋼材料の超音波接合を実施した．接合は，アルミニウム合金を接合工具と接触させるように配置し，接合面と平行に超音波振動するように行なった．アルミニウム合金と鉄鋼材料の接合技術の開発は，小型化や軽量化の求められる輸送機器産業から強く求められている．接合は，厚さ 1.0 mm の 6061 アルミニウム合金と IF 鋼および 304 ステンレス鋼の組み合わせで行なった．接合は，異なる垂直荷重および接合エネルギーの条件の下で実施し，引張せん断試験により接合部の機械特性を評価した．図 3 は，6061 アルミニウム合金と 304 ステンレス鋼の引張せん断強度と接合エネルギーの関係を示している．接合強度は，接合エネルギーの増加と共に大きくなり，その後一定の強度で飽和した．これは，接合エネルギーの増加と共に接合面積が増加した結果であると考えられる．また，接合強度が飽和した後，ある程度接合エネルギーが大きくなると，引張せん断試験における破断形態が界面破断からアルミニウム合金の母材破断へと変化することが明らかになった．

接合部における機械特性や破断形態の変化の起源を理解するため，FE-SEM/EBSD 法と TEM 観察により接合部微細組織の解析を行なった．その結果，アルミニウム合金の超音波接合同様に，接合部における加工組織の形成と温度上昇により再結晶が接合に重要な役割を果たしていることが確認された．また，加工組織における高い転位密度の領域において，Al 中への Fe 原子の拡散が促進され，接合界面における厚さ数十 nm の拡散層が形成されることが破断形態の変化の主因となっている可能性が示唆された．

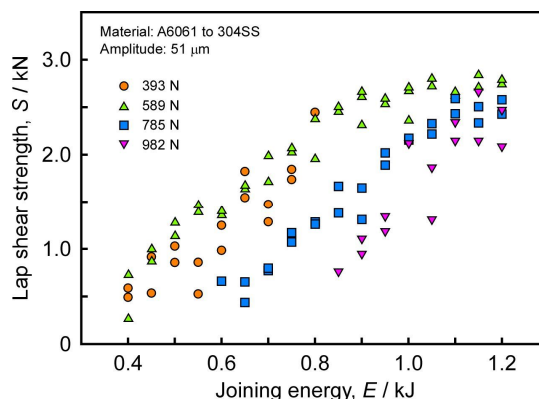


図3 6061 アルミニウム合金と 304 ステンレス鋼の超音波接合部における引張せん断強度と接合エネルギーの関係

(3) アルミニウム合金と銅の超音波接合における接合界面反応

電子産業等において需要の高いアルミニウム合金と銅の冶金的接合を実現するため，厚さ 1.0 mm の 1050 アルミニウム合金と純度 99.9 % の純銅の超音波接合を実施した．接合は，アルミニウム合金を接合工具に接触するように配置して行なった．試料の引張せん断試験を行なうと，アルミニウム合金と鉄鋼材料の超音波接合同様に，接合強度は接合エネルギーの増加と共に大きくなり，一定の値で飽和し，破断形態が変化するという結果であった．

引張せん断試験の結果から，アルミニウム合金と銅の超音波接合においても，接合界面において反応層が形成されていると考えられるため，TEM を用いて接合界面近傍における微細組織観察を行なった．図 4 は，1050 アルミニウム合金と銅の超音波接合界面における明視野像と制限視野回折パターンを示している．この試料は，引張せん断試験において，母材破断した条件で接合を実施した．接合界面においては，厚さ 50 nm 程度の反応層が形成されていることが確認された．この反応層は，EDS 分析と制限視野回折パターンによる構造解析から， $Al_2Cu$  金属間化合物層であることが明らかになった．また，反応層形成は，超音波接合中のアルミニウム合金のせん断変形と温度上昇により反応が促進されたことに起因しており，接合強度の増加に



対して強く寄与していることが明らかになった。

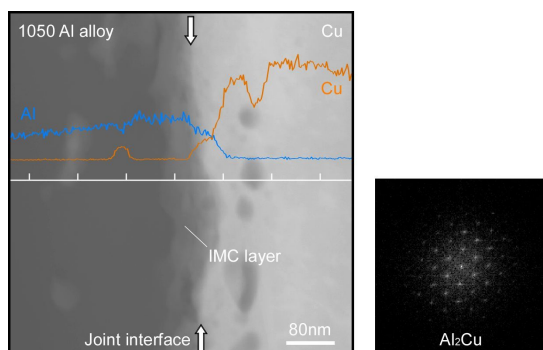


図4 1050 アルミニウム合金と銅の超音波接合部における金属間化合物層の TEM 明視野像と制限視野回折パターン。

#### (4) まとめ

以上の得られた知見より、金属材料の超音波接合においては次の現象を経て接合部形成が実現されることが明らかになった。

接合界面における材料のせん断変形および塑性流動

材料の表面皮膜の分断・除去

材料の新生面同士の接触

変形熱および摩擦熱による材料の温度上昇

界面反応層の形成

これらの現象は、超音波接合を学術的に議論する際に仮説として提案されていたが、研究代表者らの体系的な実験により、世界に先駆けて各基礎現象の証拠が示された。その結果、研究代表者は国際会議において招待講演や特別講演を依頼されており、本研究成果の学術的価値は非常に高いと世界的に評価されている。さらに、本研究成果は、今後超音波接合を工業展開していく上で極めて重要な基礎データとなり、技術開発原理になり得ると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計4件)

S. Shimizu, H.T. Fujii, Y.S. Sato, H. Kokawa, M.R. Sriraman and S.S. Babu, “Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al alloy 6061”, *Acta Materialia*, 74, pp. 234-243, (2014). 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.043>

H.T. Fujii, Y. Goto, Y.S. Sato and H. Kokawa, “Microstructural evolution in dissimilar joint of Al alloy and Cu during ultrasonic welding”, *Materials Science*

*Forum*, 783-786, pp. 2747-2752, (2013). 査読有

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2747

H.T. Fujii, Y. Goto, Y.S. Sato and H. Kokawa, “Interface microstructure and mechanical properties of dissimilar joint between 6061 Al alloy and 304 stainless steel by ultrasonic welding”, *IIW document*, IX-2445-13, pp. 1-8, (2013). 査読無

H. T. Fujii, S. Shimizu, Y. S. Sato, H. Kokawa, M. R. Sriraman and S. S. Babu, “Recrystallization at bond interface in Al alloy build fabricated by very high power ultrasonic additive manufacturing”, *IIW document*, IX-2406-12, pp. 1-9, (2012). 査読無

##### [学会発表](計12件)

Hiromichi T. Fujii, Saki Shimizu, Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa, Sriraman M. Ramanujam and Sudarsanam S. Babu, “Bond formation between Al tapes during very high power ultrasonic additive manufacturing”, International Institute of Welding (IIW2014), Seoul, Republic of Korea, (July 13th – 18th, 2014).

藤井 啓道, 清水 早紀, 佐藤 裕, 粉川 博之, ラマヌジャム スリラマン, バブ スタルサナム, 「超音波積層造形法における接合界面現象」, 『第215回溶接冶金研究委員会』, 大阪, (2014年5月23日).

藤井 啓道, 吉田 浩紀, 佐藤 裕, 粉川 博之, 「陽極酸化処理したアルミニウム合金の超音波接合界面における微細組織解析」, 『平成25年度溶接学会秋季全国大会』, 東京, (2014年4月23日).

Hiromichi T. Fujii, “Microstructure and mechanical properties in dissimilar joint between Al alloy and Cu by ultrasonic welding”, TMS 2014 143<sup>rd</sup> Annual Meeting, San Diego, USA, (February 19th, 2014).

##### [Special lecture]

藤井 啓道, 後藤 優太, 佐藤 裕, 粉川 博之, 「異種金属材料の超音波接合部における微細組織形成機構」, 『第1回グリーンエネルギー材料のマルチスケール創製研究会』, 天草, (2014年1月8日).

Hiromichi T. Fujii, Y. Goto, Y.S. Sato and H. Kokawa, “Microstructural evolution in dissimilar joint of Al alloy and Cu during ultrasonic welding”, International Conference on Proceeding & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC’ 2013), Las Vegas, USA, (December 4th, 2013).

##### [Invited talk]

H.T. Fujii, Y. Goto, Y.S. Sato and H. Kokawa, “Interface microstructure and mechanical properties of dissimilar joint between 6061 Al alloy and 304 stainless

steel by ultrasonic welding”, International Institute of Welding (IIW2013), Essen, Germany, (September 12th, 2013).

藤井 啓道, 後藤 優太, 佐藤 裕, 粉川 博之, 「6061 Al 合金と 304 ステンレス鋼の異材超音波接合部における微細組織形成機構」, 『平成 25 年度溶接学会秋季全国大会』, 岡山, (2013 年 9 月 3 日).

清水 早紀, 藤井 啓道, 佐藤 裕, 粉川 博之, ラマヌジャム スリラマン, スダルサナム バブ, 「超音波接合を利用した積層造形法における 6061Al 合金の接合メカニズムの解明」, 『平成 25 年度溶接学会秋季全国大会』, 岡山, (2013 年 9 月 3 日).

藤井 啓道, 後藤 優太, 佐藤 裕, 粉川 博之, 「Al 合金/Cu の異材超音波接合部における微細組織と機械特性」, 『平成 25 年度溶接学会春季全国大会』, 東京, (2013 年 4 月 18 日).

H. T. Fujii, S. Shimizu, Y. S. Sato, H. Kokawa, M. R. Sriraman and S. S. Babu, “The effect of thermal cycle on microstructural evolution during very high power ultrasonic additive manufacturing”, The 2nd East Asia Symposium of Welding and Joining (EAST-WJ), Nara, Japan, (September 27th, 2012).

清水 早紀, 藤井 啓道, 佐藤 裕, 粉川 博之, ラマヌジャム スリラマン, スダルサナム バブ, 「超音波接合を利用した積層造形法における 3003 および 6061Al 合金の接合部組織形成過程」, 『平成 24 年度溶接学会秋季全国大会』, 奈良, (2012 年 9 月 27 日).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~setsugo/english/fujiiprofileE.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 啓道 (FUJII, HIROMICHI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70560225