

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760689

研究課題名(和文) 光学的計測法を用いた超音波接合メカニズムの解明

研究課題名(英文) Analysis of Ultrasonic Welding Process using Optical Measurement

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) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：金属材料の固相接合法の一種である超音波接合を対象として、接合界面組織の金属学的評価に加えて、デジタル画像相関法による接合中の材料および接合工具の相対運動解析を行った。さらに、接合界面近傍の塑性変形領域におけるひずみ場の可視化を試みることにより、超音波接合プロセスにおける接合材の動的挙動を定量的に評価した。相対運動挙動の観点から超音波接合過程を考察し、振動を付加する工具と接合する材料の相対運動が接合組織に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Basic study on ultrasonic welding, which is one of solid state bonding technique, has been performed using motion analysis by optical measurement. Relative motion of weld tool, with respect to the working materials, during ultrasonic welding tests are analyzed using the digital correlation method. The dynamic behavior of material during the ultrasonic welding has been evaluate applying the result of motion analysis to the visualization of strain field. It has been clarified that the relative motion between the weld tool and work material strongly affect the microstructure development at the weld interface.

研究分野：材料加工・処理

科研費の分科・細目：接合

キーワード：超音波接合 固相接合 界面接合 異種材料接合

1. 研究開始当初の背景

超音波接合法は金属材料を加圧し、超音波振動を印加することで接合を行う固相接合法である。この手法は、はんだやフラックスを使用せずに、異種金属材料の接合が低温、短時間で可能であることから、半導体基板上の表面電極や小型燃料電池の複合電極などの微細構造を有する部品のマイクロ接合技術として応用されている。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、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。一般に金属間の固相接合は、表面の酸化被膜の破壊、接合界面における拡散、および拡散層の成長などのプロセスから成ることが知られている。しかし、超音波接合においては通常の固相接合現象に加えて、高速振動による接合界面の局所的な摩擦や塑性流動の現象が複雑に絡み合い、接合中のこれらの動的挙動ほとんど明らかにされていない。一方、接合プロセスでは接合材同士、および振動を接合材へ効率的に印加するための超音波ホーンの運動と接合材の相対運動(図1)が重要な因子となるが、上述のような接合界面における微視的変形挙動と超音波ホーンおよび接合材間の相対運動との関連は不明である。

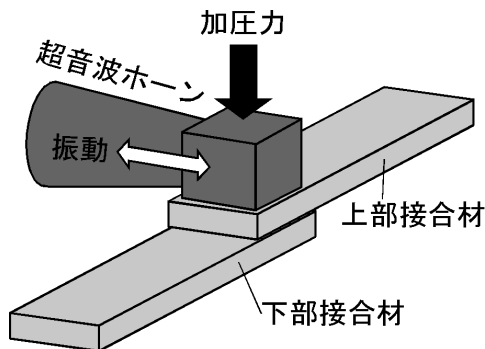


図1 超音波接合の模式図

2. 研究の目的

本研究では、デジタル画像相関法を用いて、動画解析によって得られた変位情報から超音波ホーンおよび接合材間の相対運動解析を行った。さらに、光学計測を接合界面の微視的領域に応用し、接合界面近傍の塑性変形領域におけるひずみ場の可視化を試みることにより、超音波接合プロセスにおける接合材の動的挙動を定量的に評価し、接合界面近傍の微細組織との関係を明確化することで接合メカニズムの解明を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

超音波ホーンと接合材、および接合材同士の相対運動に着目し、デジタル画像相関法を用いた相対運動解析を行った。デジタル画像相関法は、2つの画像間における輝度分布を

もとに変位場を決定する手法であり、超音波接合中の材料を高速ビデオカメラで撮影することで、接合中における相対運動の時間的変化が計測できる。図2に示すように高速ビデオカメラを振動方向に対して垂直に配置し、試料側面からの撮影を行う。撮影画像は毎秒100000フレームでRAMメモリ内に記録され、撮影終了後にPCへ転送される。記録された動画において参照領域を設定し、参照領域におけるピクセル輝度値の正規化相関係数を求める。移動前後における正規化相関係数が最小となる位置を求め、変位を算出する(図3)。参照領域を超音波ホーン、上部試験片および下部試験片に設定し、各動画フレームにおける移動量を求める。振動開始から、終了までの領域の変位の時間的変化を自動的に算出するプログラムを作成した。

さらに、汎用金属を用いた同種および異種金属間の超音波接合を対象に、接合界面の微細組織を光学計測により得られた相対運動および接合界面の変形挙動と対応させながら評価し、接合メカニズムを検討した。特に、異種金属間の接合においては、接合界面における固溶体相や金属間化合物相の生成が継手の接合強度を決める重要な因子となることが多い。これらの生成挙動とともに、超音波接合における微細組織の変化を調べた。

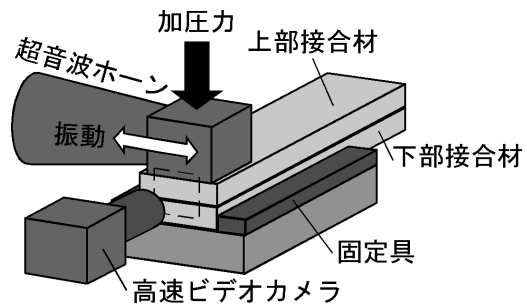


図2 接合過程の撮影方法

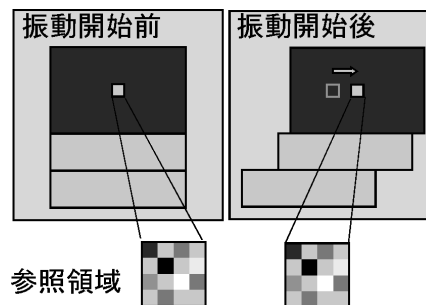


図3 デジタル画像相関法による変位解析

4. 研究成果

1) アルミニウム板の超音波接合における相対運動の解析

図4に加圧力588Nの下で、純アルミニウム板を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。接合強さは接合時間経過に伴い増加している。接合強さは接合時間50ms以下において約130Nまで上昇した後、

接合時間 50ms から 600ms まで接合時間とともにほぼ直線的に増加している。また、接合時間の増加に伴いエラーバーで示される接合強さのばらつきが大きくなる傾向が見られた。破断形態は、接合界面での破断から、接合部が下部試験片側に残るボタン破断へと変化した。この原因は上部試験片が接合チップによって超音波振動と加圧力が長時間付加されたことで、大きな塑性変形を受けて薄化し、損傷の大きい部分で破断したことによる。

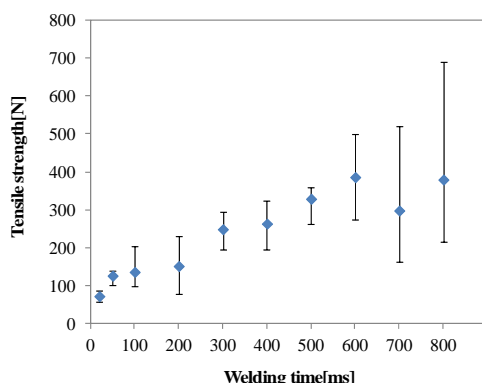


図4 継手強度と接合時間の関係
(純アルミニウム板の接合)

図5は上述の接合実験を行った時の撮影画像から画像相関法により解析した超音波ホーンおよび試験片の振動方向(x方向)の変位 u と接合時間 t_w の関係を示している。また、図6(a)~(c)はそれぞれ、図5の接合時間10ms、300msおよび550ms付近をそれぞれ拡大したグラフである。図5における接合時間50ms以下の解析結果より、上部試験片の変位が約200 μm まで急激に増加していることが分かる。この変位量はエッジの振幅のそれよりも大きく、エッジと上部試験片の間ですべりが生じていることを示している。本実験に用いた超音波接合機は、加圧部が超音波ホーン側にあるラテラルドライブ方式であることに加えて、超音波ホーンが振動方向に対して非対称な形状であるために振動に伴う試験片のすべりが生じ易いと考えられる。また、図6(a)では、接合時間10ms付近において、上部試験片がエッジと同じような周期で振動しながら移動していることがわかる。上部試験片の振幅はおよそ35 μm (peak to peak)で、エッジの振幅の3/4程度となっていた。一方、図5の接合時間が約50msから約480msまでの範囲においても、上部試験片の変位はおよそ700 μm まで上昇し続けている。しかし、接合時間300ms付近(図6(b))における上部試験片の振幅は10 μm 程度に減少しており、エッジの振幅との差が大きくなっている。このことから、エッジから上部試験片へと振動が十分に伝わっていないことがわかる。

接合時間480ms以上では、上部試験片の振幅が再び急増傾向にあることが図5および図

6(c)からわかる。また、治具で固定した下部試験片は接合時間0~480msにおいて振動は抑えられていたが、接合時間480ms以上では上部試験片と同程度の振幅の振動が生じている(図6(c))。前述したように、接合時間500ms以上における高速ビデオカメラの撮影画像において、接合部の塑性変形によって観察面が撮影レンズの焦点からずれ始める様子が認められた。

以上の観察結果によって確認できた試験片の挙動の違いから、本実験条件における超音波接合過程は次のようになる。まず、接合過程(接合時間0~50ms)では上部試験片は大きく振動しながらすべり運動する。次に、接合過程(接合時間40~480ms)では上部試験片の振幅が減少する。最後に、接合過程(480ms~)接合部全体が塑性変形し、上部試験片と下部試験片の振幅が共に増加する。

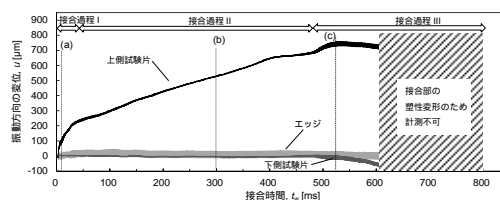


図5 試験片と接合チップの変位と接合時間の関係(純アルミニウム板の接合)

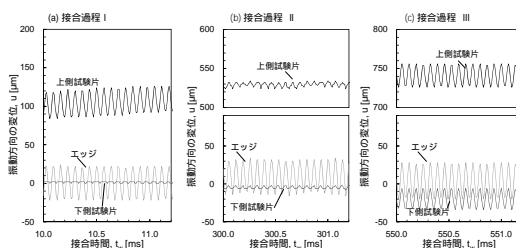


図6 各接合過程における接合チップと試験片の挙動。(a)、(b)、および(c)はそれぞれ図3中に示す接合時間をそれぞれ拡大したグラフである。

図7は各接合過程における接合部の断面組織写真である。また、図8は破線枠1および2の部分拡大した写真である。接合過程Iの後半に相当する断面組織(図7(a))は接合前と同様の圧延組織を呈しており、ほとんど変化が認められない。接合過程IIは、接合界面の摩擦によって部分的な接合領域が形成される過程である。また、この接合領域の形成により上下の試験片間の相対運動が抑制され、接合過程IIは接合チップと試験片との界面で相対運動が生じる接合過程IIへと移行すると考えられる。接合過程IIの断面組織では、図8(b)に示すように、接合界面において部分的な接合領域が振動方向に成長する様子が認められる。一方、試験片上部には垂直荷重によるエッジの食い込みと振動によって著しい塑性変形が生じている(図8(a))、

接合過程 になると、この塑性変形領域は、接合界面へ向かって拡大を始める(図 7(c))。さらに、引張試験において最大の継手強度が得られた接合時間(図 8(d))では、接合界面の組織全体が攪拌されていることがわかる。図 5 の運動挙動からわかるように、接合過程 II および III においては、接合チップとそれに接触する上側試験片の相対運動が支配的となる。また、接合部の温度は接合過程 III において、約 300 以上まで上昇することが確認された。すなわち、図 7(d)のような攪拌組織の形成は温度上昇と接合チップの機械的振動の相乗効果によるものと推測される。本実験の超音波接合では、接合過程 III で生じる組織の攪拌による接合面積の拡大が継手強度の上昇に大きく寄与するものと考えられる。

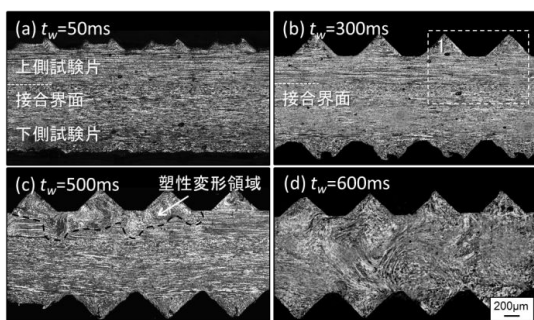


図 7 接合部の断面組織 (純アルミニウム板の接合)

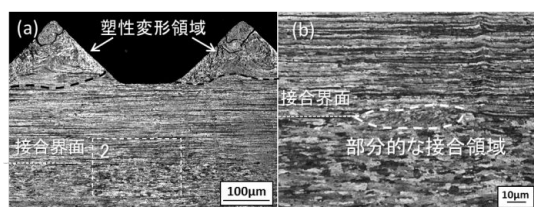


図 8 断面組織の拡大写真。(a)、(b)はそれぞれ図 7 の破線枠 1、および図 8(a)の破線枠 2 の部分を拡大した写真である。

2) 鉄鋼と Al 合金の超音波接合過程

図 9 は鉄鋼 (SPCC) と Al 合金 (A5052) 接合時間 2000ms で接合したときの試験片および接合チップの移動量を計測した結果である。純アルミニウム板の同種材接合の場合と同様に、接合時間 0~700ms までに上部試験片は振動しながら+x 軸方向に約 100 μ m 移動していることがわかる。しかし、接合時間 700~2000ms の範囲においては、上部試験片の変異量は+x 軸方向に約 10 μ m 程度である。0~700ms に比べると移動量はおよそ 1/10 程度である。前節で述べたように、純アルミニウム板の超音波接合では、接合チップと試験片との相対運動によって攪拌された組織が接合界面へと拡大することで接合力が増加するが、異種材の接合過程においても、接合強度に影響を与える接合チップ、上部試験片間の

相対運動は 700ms から大きくなると考えられる。

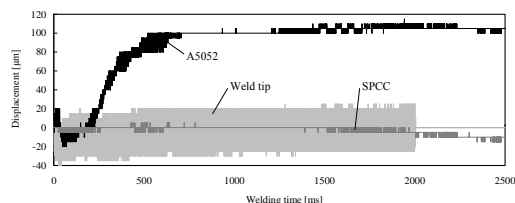


図 9 試験片と接合チップの変位と接合時間の関係 (SPCC と A5052 の接合)

継手の接合強さと接合時間の関係を図 10 に示す。接合時間 1000ms までは接合時間の増加とともに継手の接合力も約 960N まで増加しているが、それ以降は接合力が減少している。また、図 11 は接合時間 1000ms および 2000ms における試験片の振動方向の断面である。接合時間の増加に伴い接合チップ直下の組織が塑性変形し、攪拌されている。これは、接合時間 700ms 以降において観察された接合チップ、上部試験片間の相対運動によるものと考えられる。図 12 は画像相関法により求めた接合中の Al 合金の変形挙動を示している。チップの先端と接触する接合部の中心から接合領域が形成され、徐々に外側へと広がっていくことがわかる。攪拌領域は接合時間とともに接合界面付近まで拡大しているが、本実験条件においては、SPCC 側の組織が攪拌される様子は認められなかった。一方、接合時間 2000ms の継手の接合界面には図 13 に示すような厚さ約 1 μ m の金属間化合物層が確認された。鉄鋼と Al 合金の超音波接合においては、同種材の接合の場合と同様に接合チップによる摩擦が接合材の攪拌および温度上昇を促進させるが、接合が長時間になると接合界面で金属間化合物層が生成され、接合強さを低下させる原因となることがわかる。

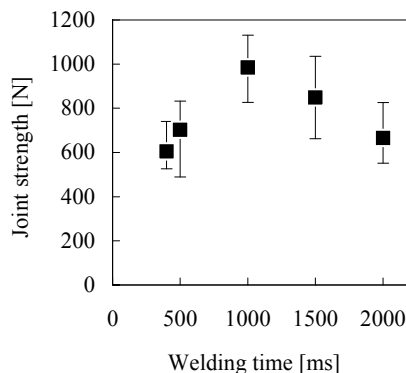


図 10 継手強度と接合時間の関係 (SPCC と A5052 の接合)

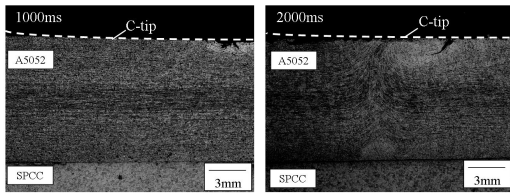


図 11 継手の断面組織
(SPCC と A5052 の接合)

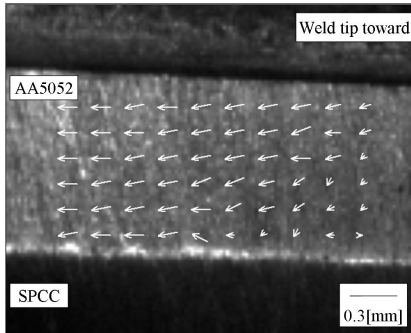


図 12 画像相関法により求めた Al 合金の
変形挙動

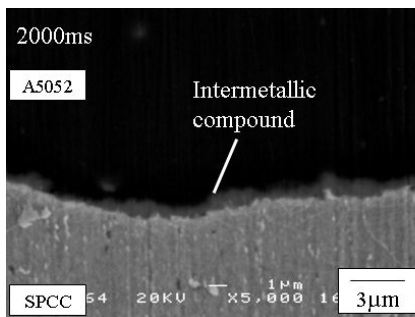


図 13 接合界面の金属間化合物層

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. Tomohiro Sasaki, Yutaro Sakata, Takehiko Watanabe: Effect of tool geometry on microstructure of ultrasonic welded joint, IOP Conf. series Mater. Sci. Eng. (2014) 印刷中. 査読有
2. Tomohiro Sasaki, Takehiko Watanabe, Yusuke Hosokawa, Atsushi Yanagisawa: Analysis for relative motion in ultrasonic welding of aluminum sheet, Sci. Tec. Weld. Join., Vol.18 (2013)19-24. 査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

1. Tomohiro Sasaki, Yusuke Hosokawa: Effect of relative motion between weld tool and work piece on microstructure of ultrasonically welded joint, Thermec'2013, 2013 年 12 月 3 日, Las Vegas(USA).
2. Tomohiro Sasaki, Yutaro Sakata, Yusuke

Watanabe, Effect of tool geometry on microstructure of ultrasonic welded joint, IJST 2013 2013 年 11 月 28 日, 大阪大学

3. Tatsushi Nagai, Tomohiro Sasaki: Analysis of ultrasonic welding process of aluminum alloy and mild steel sheet, IJST 2013 2013 年 11 月 28 日, 大阪大学
4. Tomohiro Sasaki, Takehiko Watanabe, Yusuke Hosokawa, Atsushi Yanagisawa: Analysis for relative motion in ultrasonic welding of aluminum sheet, AMPT2012, 2012 年 9 月 25 日, Wollongong, Australia.
5. Yusuke Hosokawa, Tomohiro Sasaki, Takehiko Watanabe, Atsushi Yanagisawa: Relationship between relative motion in ultrasonic welding and formation of weld microstructure, AMPT2012, 2012 年 9 月 25 日, Wollongong, Australia.
6. 細川祐介, 佐々木朋裕, 渡辺健彦, 後藤拓人, 柳沢敦: 画像相関法による工業用純 Al 板の超音波接合過程の解析, 日本金属学会, 2011 年 11 月 7 日, 沖縄

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: 40432067