

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420064

研究課題名(和文) 金属の固相接合法による微細部品精密接合技術の開発と応用に関する研究

研究課題名(英文) Development and practical study on precision bonding technology of small metal parts in solid state

研究代表者

神 雅彦 (JIN, Masahiko)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：80265371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来のレーザー溶接やスポット溶接など、高い熱エネルギーにより金属を溶融・凝固させる方法ではなく、金属を個体のまま接合し、熱変形等のない精密、クリーンかつ省エネルギーな接合技術を開発することを目的とした。その方法として、接合面を正確に密着させ、微小塑性変形させて塑性変形部を超音波振動により高速摩擦する方法により、接合界面を溶融させることなく固相のまま化学反応させて接合する金属部材の精密接合方法について検討した。具体的には、精密超音波接合の成立条件に関して解析し、接合のための装置構造について明らかにし、各種の接合実験を実施して、接合状態などを詳細に検証し、その有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Various mechanical components have been miniaturized, and high precision are required to assemble small metal parts. Several metallurgical welding methods, such as laser and electric resistance welding and FSW, have various problems, such as thermal deformation and oxide generation because of the melting of materials. In an effort to solve these problems, an ultrasonic welding method is proposed. This method is a solid-state metallurgical bonding process without the melting of materials. Therefore, thermal deformation and oxide generation are greatly reduced compared with the above-mentioned processes. The author believes that this process is effective in precisely assembling small metal parts. Concretely, welding of thin sheet metals with conditions of butt, T-shape and lap welding is investigated. As a result, it is fundamentally demonstrated that the joining is possible, and the relationship between strength and the shape of the bead on the bonding surface.

研究分野：生産加工・加工学

キーワード：金属 固相接合 超音波 アルミニウム合金 純チタン

1. 研究開始当初の背景

機械部品が、ますます微小化、高機能化あるいは高精度化してきている。個々の機械部品の組立方法には、多種多様な方法が開発されてきたが、微細な金属部品を高精度に高い信頼性で接合する技術は、これからの新しい研究課題である。現状、具体的には、モータコア積層板、電池ケース、マイクロ電子スイッチ類、微細サニタリー管、あるいは内視鏡手術器具などの最先端部品において、高度な接合・組立技術が要求されている。

一方では、金属接合技術に対する環境対応が強く要求されている。溶接技術で言えば、フラックス等による汚染が無くクリーンであること、および省エネルギーであることなどが要求されている。

高度化された金属部品の微細精密接合法には、レーザ溶接やスポット溶接あるいはFSW など、高い熱エネルギーにより金属を溶融・凝固させる方法が研究されている。しかしながら、熱変形、高い装置コストあるいは高エネルギーなどの問題を抱えている。したがって、より高度化された金属部品の接合法が要求されている。

2. 研究の目的

本研究では、従来のレーザ溶接やスポット溶接など、高い熱エネルギーにより金属を溶融・凝固させる方法ではなく、金属を個体のまま接合し、熱変形等のない精密、クリーンかつ省エネルギーな接合技術を開発することを目的とする。

その有力な方法として、接合面を正確に密着させ、微小塑性変形させて塑性変形部を超音波振動により高速摩擦する方法により、接合界面を溶融させることなく固相のまま化学反応させて接合する金属部材の精密接合法について検討する。

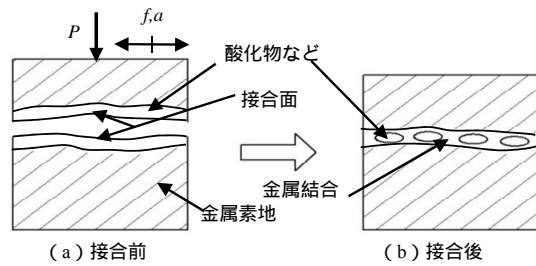
具体的には、金属部材の精密超音波接合の成立条件に関して解析し、接合を実施するための装置構造について明らかにし、各種の接合実験を実施して、接合状態などを詳細に検証し、解析結果の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

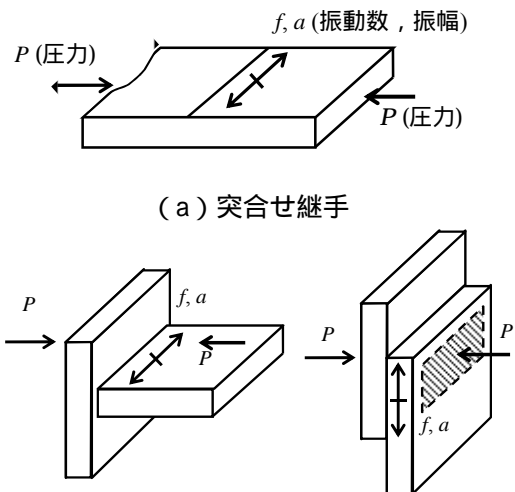
超音波接合法の原理を図1に示す。接触面には、あらかじめ微小凹凸を形成しておき、その凸部のみを計画的に塑性変形させる。次に、接合予定面の表面に存在する吸着分子や酸化層などの不活性層を超音波により摩擦除去し、金属新生面同士を直接接触させる。この作用により、化学的活性度の高い金属原子間で共有結合する。すなわち、金属を溶融させることなく、固相のまま直接接合することが可能となるものと考えられている。なお、接合は微小凹凸の凸部のみで行われ、摩擦により塑性流動した材料は、同凹部に収まるものと考えられる。

薄板の各種の継手形態および超音波接合の実施方法について検討した結果を図2に

示す。(a)突合せ継手の場合では、超音波振動の振動方向は板幅方向とすることで効率的な接合を実施することができた。したがって、(b)T継手の場合も同様に超音波振動の振動方向は板幅方向とする。(c)重ね合わせ接合の場合では、板面の接合領域のみに微小凹凸を形成し、その個所に荷重Pを付加して接合する。超音波振動の振動方向は部材形状に合わせて任意に決定されるものと考えられる。以上の接合形態に関する基礎実験、および装置構造に関する検討を行うこととした。



(振動数:  $f$  振幅:  $a$  接合荷重:  $P$ )  
図1 精密超音波接合の原理



(b) T継手 (c) 重ね合わせ継手  
図2 板の接合形態

超音波接合装置の外観を図3に示す。超音波接合装置は、振動数  $f=20.09\text{kHz}$ 、および最大振幅  $a=16.8\mu\text{m}$  (0-p) で振動する。接合荷重  $P$  は、エアシリンダと空気減圧弁により任意に与える。最大荷重  $P$  は  $P=5.5\text{kN}$  である。この装置の突合せ継手における接合部の構造を図4に示す。超音波振動ホーンの先端には、薄板を二つのボルトによって固定する。突合せ継手の場合は、固定台の上に薄板を設置し、固定クランプによって固定する。試験片同士を一定の荷重  $P$  で押しつけ、超音波振動を接合面と平行方向に一定時間だけ付与する。超音波接合実験は、振幅  $a$ 、接合時間  $t$  および接合荷重  $P$  を変化させることにより行なった。

薄板接合試験片は、材質が A6022-T4 で板厚  $t=1\text{mm}$  の薄板とした。また、突合せ継手お

よびT継手の接合強度の評価は、引張試験により行い、接合強度  $S(=F/(tw))$  を用いて評価した。突合せ継手の試験方法を図5に示す。

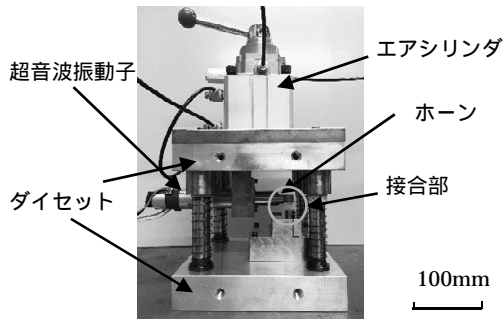


図3 超音波接合装置の外観

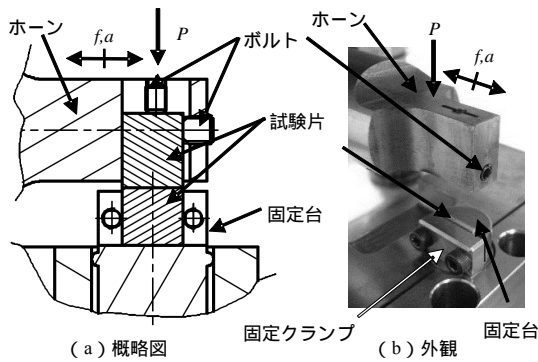


図4 突合せ継手の接合部の構造

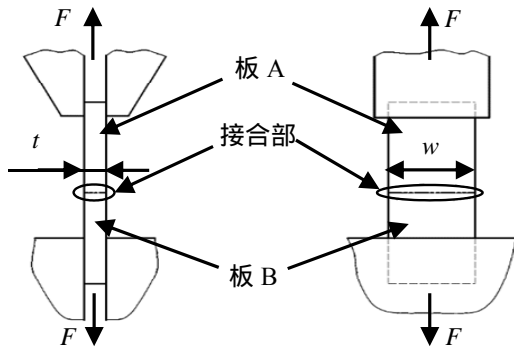


図5 突合せ継手の試験方法  
(試験荷重： $F$ ，板厚： $t$ ，幅： $w$ )

#### 4. 研究成果

##### (1) T継手の場合

振幅  $a$  を変化させて接合試験を行った試験片について、引張試験を行った。振幅  $a$  と接合強度との関係を図6に示す。その他の接合条件は、接合時間  $t=3.0s$  および接合荷重  $P=0.8kN$  と設定した。その結果、振幅  $a=7.9\mu m(0-p)$  から接合し始め、振幅の増加と共に接合強度が増加する傾向にあることがわかった。また、低荷重の場合、接合開先の変形が少なく、接触面積が小さいために接合できない、もしくは接合強度が低いことが考えられる。

接合荷重と接合強度との関係を図7に示す。接合荷重の増加とともに、接合強度も増加することがわかった。接合荷重を高くする

と、塑性変形部が大きくなり接触面積が大きくなったことで接合強度が高くなると考えられる。

接合部断面を顕微鏡で観察した写真を図8に示す。どの開先角  $\theta$  においても、ほぼ全体的に接合界面に隙間があることがわかる。また、丸で囲んだ部分で接合が行われたと考えられる。

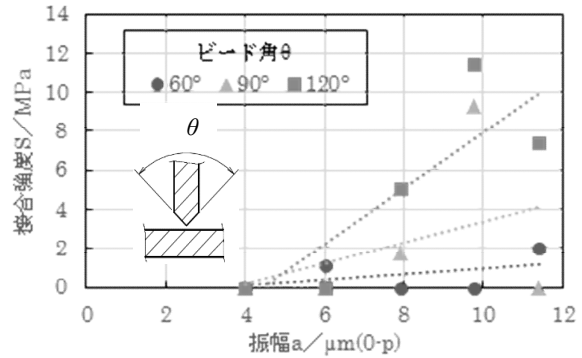


図6 振幅と接合強度との関係  
( $f=20.1kHz$ ,  $t=3.0s$ ,  $P=0.8kN$ )

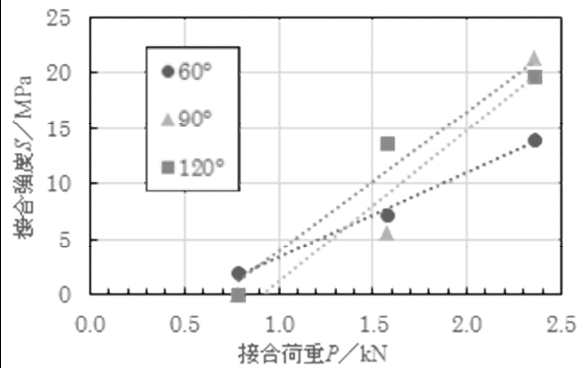


図7 接合荷重と接合強度との関係  
( $f=20.1kHz$ ,  $a=11.4\mu m(0-p)$ ,  $t=3.0s$ )

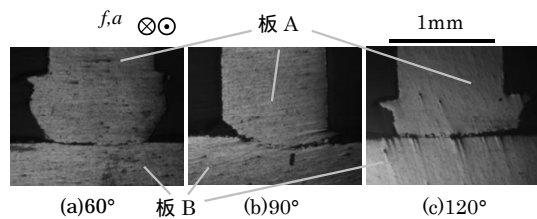


図8 接合部断面

( $f=20.1kHz$ ,  $a=11.4\mu m(0-p)$ ,  $t=3.0s$ ,  $P=2.4kN$ )

##### (2) 突合せ継手の場合

接合時間を変化させて接合試験を行った試験片について引張試験を行った。接合時間と接合強度との関係を図9に示す。その他の接合条件は、振幅  $a=13.9\mu m(0-p)$  および接合荷重  $P=0.8kN$  と設定した。その結果、開先角  $\theta=60^\circ$  を除いては、接合時間  $t=5.0s$  から接合強度が大幅に上昇しており、接合時間が長くなると共に接合強度が増加する傾向にあることがわかった。一方、開先角  $\theta=60^\circ$  では、同

条件での接合をすることができなかった。これは、低圧力の場合、開先部が押し潰されないことで、接触面積が少なく摩擦があまり生じなかったために、接合が出来なかったものと考えられる。

振幅を変化させて接合試験を行った試験片について引張試験を行った。振幅と接合強度との関係を図10に示す。その他の接合条件は、接合時間  $t=3.0s$  および接合荷重  $P=0.8kN$  と設定した。実験結果より、振幅と接合強度が比例関係にあることがわかった。また、振幅  $a=11.4\mu m(0-p)$  で接合強度が大幅に大きくなっていることがわかる。

図10の振幅  $a=11.4\mu m(0-p)$  における接合部断面の顕微鏡写真を図11に示す。強度の一番高い開先角  $\theta=60^\circ$  には、接合界面確認できないほどに接合ができていることがわかった。また、固定クランプの形状の問題なのか、どの場合も同じようなばりが発生しているため、ばりが発生しないよう検討する必要がある。

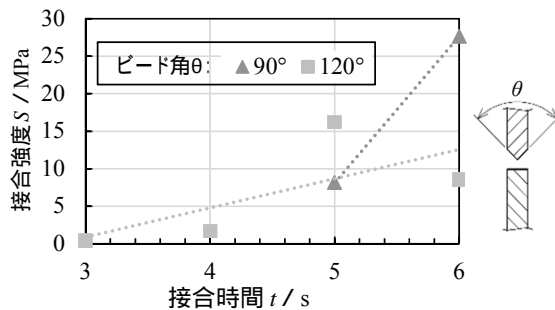


図9 接合時間と接合強度との関係 ( $f=20.1kHz, a=13.9kHz, P=0.8kN$ )

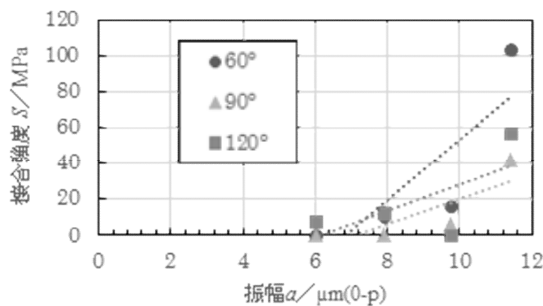


図10 振幅と接合強度との関係 ( $f=20.1kHz, t=3.0s, P=2.4kN$ )

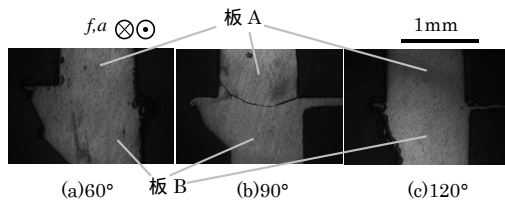


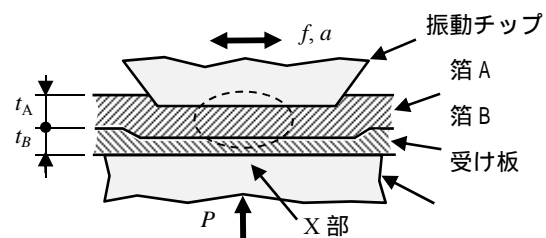
図11 接合部断面

( $f=20.1kHz, a=11.4\mu m(0-p), t=3.0s, P=2.4kN$ )

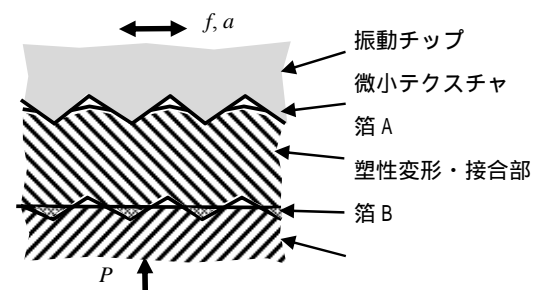
### (3) 金属箔の精密超音波接合

金属箔を超音波接合法により重ね合わせ接合する方法を解析する。検討した接合方法の原理を図12に示す。図(a)に示すように、受け板上に接合する箔Aおよび箔Bを重ね合わせ、それに振動チップを、定圧力  $P$  で押しつけ、接合面と平行方向に振動数  $f$ 、振幅  $a$  で一定時間超音波振動させて接合する。

X部の拡大を図(b)に示す。接合チップの表面には、微小テクスチャ(凹凸)を形成しておき、箔Aに押し付けることにより、箔の曲げ変形を利用して箔Bとの接合面に凹凸を発生させ、その凸部に圧力を集中させ、凸部を選択的に接合する。この方法により、箔全体を大きく圧縮変形させることなく精密接合ができるものとする。



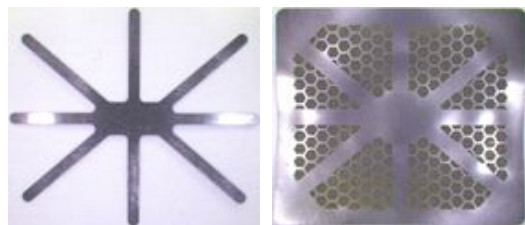
(a) 超音波接合方法(全体)



(b) 接合界面詳細(X部拡大)

$P$ : 押付圧力,  $f$ : 振動数,  $a$ : 振幅,  $t$ : 板厚  
図12 箔の重ね合わせ超音波接合方法

前記メカニズム図のように、純チタン板 ( $t_1=80\mu m$ ) と純チタン箔 ( $t_2=20\mu m$ ) とを重ね合わせ、周波数  $f=20kHz$ 、振幅  $a=15\mu m$  の超音波振動条件で、接合時間  $0.2s$  で重ね合わせ接合したサンプルを図13に示す。このような薄い材料の接合は、レーザ溶接などの熱を加える冶金的手法では形状維持が困難である。したがって、医療部品や電池のタブリードなどの製造に超音波接合技術が期待されている。



(a) 純チタン板  $t_1=80\mu m$  (左)・純チタン箔  $t_2=20\mu m$  (右)



10mm

(b) 両者を超音波接合したサンプル  
図 1.3 チタン箔と薄板の超音波接合例

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 3 件)

神雅彦, 超音波振動を応用した生産加工技術の現状と今後の動向, 機械と工具, 査読無, 6 巻, 2016, 21-25

神雅彦, 強力超音波の材料加工への応用=切削, 研削, 塑性加工および接合技術の現状=, 超音波 TECHNO, 査読無, Vol.27, 2015, 23-26

神雅彦, 超音波を応用した精密加工技術に関する研究(機械工学科の研究活動と教育活動), 日本工業大学研究報告, 査読無, Vol.45, 2015, 90-94

### 〔学会発表〕(計 11 件)

神雅彦, 飯塚卓也, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 5 報)-アルミニウム合金板における接合状態の検討-, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15 日, 東京理科大学野田キャンパス(千葉県・野田市)

神雅彦, 飯塚卓也, 微小機械部品の超音波接合に関する基礎的研究-接合ビード形状に関する検討-, 電子情報通信学会研究会, 2015 年 12 月 21 日, 日本大学理工学部駿河台キャンパス(東京都・千代田区)

神雅彦, 飯塚卓也, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 7 報)-T 継手における接合ビードと接合強度との関係-, 第 66 回塑性加工連合講演会, 2015 年 10 月 30 日, いわき市文化センター(福島県・いわき市)

神雅彦, 飯塚卓也, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 8 報)-突合せ継手における接合ビードと接合強度との関係-, 第 66 回塑性加工連合講演会, 2015 年 10 月 30 日, いわき市文化センター(福島県・いわき市)

M.Jin, T.Iizuka, Fundamental study on ultrasonic welding of small metal parts, LEM21 2015 The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015 年 10 月 21 日, 京都リサーチパーク(京都府・京都市)

神雅彦, 飯塚卓也, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 6 報)-ステンレス線とステンレス薄板との接合-, 平成 27

年度塑性加工春季講演会, 2015 年 5 月 30 日, 慶應義塾大学矢上キャンパス(神奈川県・横浜市)

神雅彦, 超音波振動を応用した金属の接合技術, 第 28 回 JZK 研究会 Colloquium2015「技術科学と生産技術の交流-7」, 2015 年 2 月 5 日, NASIC セミナーホール(東京都・渋谷区)

神雅彦, 吉川研一, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 5 報)-純チタン箔の接合-, 第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 12 日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)

林正弘, 神雅彦, 精密塑性加工における超音波振動の応用, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013 年 9 月 14 日, 関西大学千里山キャンパス(大阪府・吹田市)

神雅彦, 中立亘, 金井秀生, 小玉満, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 4 報)-薄板および箔の接合-, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013 年 9 月 14 日, 関西大学千里山キャンパス(大阪府・吹田市)

神雅彦, 中立亘, 金井秀生, 小玉満, 精密超音波接合に関する基礎的研究(第 4 報)-薄板および箔の接合-, 平成 25 年度塑性加工春季講演会, 2013 年 6 月 9 日, 大同大学(愛知県・名古屋市)

### 〔図書〕(計 1 件)

鬼鞍宏猷, 神雅彦, 養賢堂, やさしい超音波振動応用加工技術, 2015, 203

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神 雅彦 (Masahiko, Jin)  
日本工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 80265371