

## 次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第4報）

## — 異種金属接合技術の開発 —

柘植 英明、小川 大介、山田 孝弘

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (IV)  
- Development of joining technology of dissimilar metal materials -

Hideaki Tsuge, Daisuke Ogawa and Takahiro Yamada

本研究では、同種金属材料および異種金属材料の超音波接合における、ホーンおよびアンビルのローレットピッチの違いによる接合強度の差異と、加圧力、加振時間および振幅が接合強度に及ぼす影響について検討を行った。その結果、ローレットピッチが小さくなると、せん断引張強度がやや低下することがわかった。また、加振時間および振幅が増加するに従い接合強度は高くなる傾向が見られたが、加圧力の変化については接合材料の組み合わせによって接合強度への影響が異なっていた。更に、異種接合試料（純銅 C1100/アルミ合金 A5052）の接合断面について、電子顕微鏡によるマイクロ観察を行った結果、加振時間と振幅の大きさによって接合界面の状態が異なっていることが確認された。

## 1. はじめに

輸送機器等の軽量化を行うためには、必要となる性能を有する部材を適材適所に用いるマルチマテリアル化を図る必要がある。マルチマテリアル化のためには、異種材料の接合技術が重要となるが、金属材料の接合においては、リベット等による機械的接合や溶接・圧接等による冶金的接合が一般的に用いられている。中でも溶接は、輸送機器の構造部品等の接合に用いられているが、異種材料接合においては材料の組合せによって脆弱な金属間化合物が形成されるために必要な接合強度が得られないことが課題となっている<sup>1)</sup>。

そこで、摩擦攪拌接合などの熔融を伴わない固相接合法が盛んに研究されており、その中の一つとして超音波接合法がある。超音波接合法は図1に示すように、超音波接合用工具（ホーン）によって接合面に圧力を加え、上側の材料に接合面と平行な向きに振動を印加することで接合界面に摩擦を生じさせる。この摩擦とホーンの加圧による塑性流動によって、金属表面の吸着分子や酸化層が破壊されることで接合材料の金属原子同士が接近し、原子間結合により接合が行われる。この時、下側の材料は受け治具（アンビル）によって強固に保持されていないと、接合材料間に相対摩擦を生じさせることができないために接合ができなくなる<sup>2)</sup>。

超音波接合法は、接合界面に脆弱な金属間化合物が形成されないことや熱影響によるひずみが生じないなどの優れた特長を有しているが、表面にホーンおよびアンビルによる圧痕ができることや、接合材料の表面状態に大きく影響を受けるため、安定した接合強度が得られないなどの課題がある。

昨年度は、アルミニウム合金 A5052、チタン合金 Ti-6Al-4V、冷間圧延軟鋼板 SPCC を用い、同種および異種金属材料における超音波接合において、加振時間と接

合強度および振幅と接合強度の関係について基礎的な検討を行った。その結果、加振時間は接合強度が最大となる最適な時間が存在し、振幅については振幅が大きくなるに従い接合強度が高くなることがわかった。また、A5052/SPCC および A5052/Ti-6Al-4V の異種材料接合では、同種材料接合に比べて接合条件がより限定されることが示された<sup>3)</sup>。

本年度は、ホーン、アンビルのローレットピッチおよびホーン加圧力が接合強度に及ぼす影響について検討した。また、加振時間が接合強度に及ぼす影響については、昨年度に最適時間があることが示されたが、さらに加振時間を長くし、加振時間が接合強度に与える影響について再検討した。また、接合条件を変えて接合した異種接合試料（純銅 C1100/アルミニウム合金 A5052）について、電子顕微鏡により接合界面のマイクロ観察を行った。

## 2. 実験

## 2.1 実験装置および実験方法

接合には超音波金属接合機（日本アビオニクス(株)、SW-3500-20/SH-H3K7）を用い、接合材料には板厚 1mm のアルミニウム合金 A5052、純アルミ A1100、冷間圧延

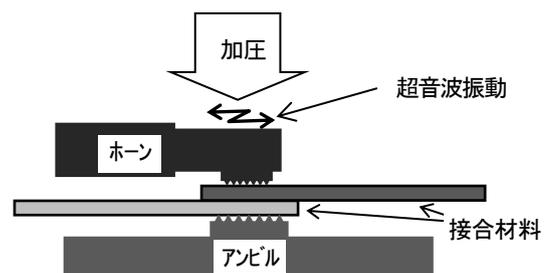


図1 超音波接合法の原理

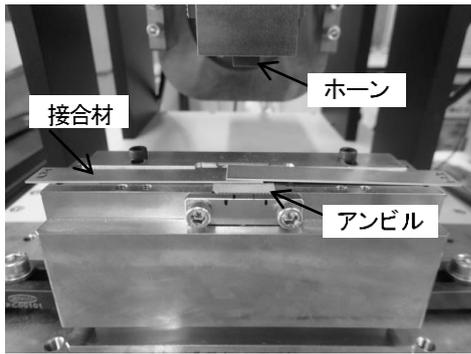


図2 接合実験の様子

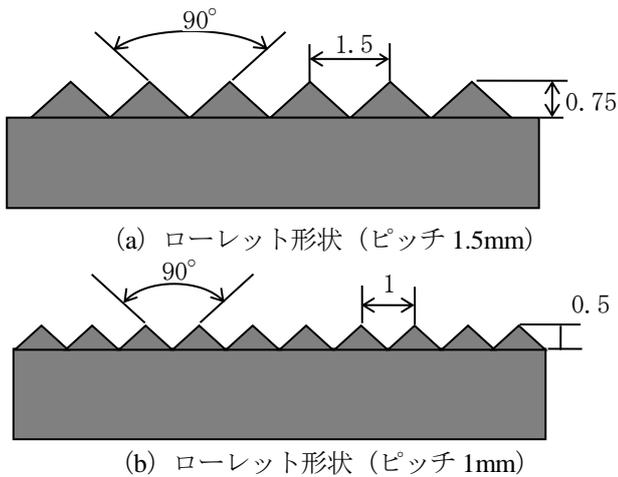


図3 ホーンおよびアンビルのローレット形状

軟鋼板 SPCC および純銅 C1100 を、長さ 100mm、幅 15mm に切断した試料を用いた。また、図 2 に示すように、接合試料はアンビルの上に 2 枚の試料を 15mm 重ね合わせるシングルラップ接合とした。

接合ホーンは、約 10×10mm の加圧面を有しており、接合材料が動かないように図 3 に示すようなローレット形状となっている。昨年度は、図 3(a) に示す高さ 0.75mm、ピッチ 1.5mm、頂点の角度 90° の正四角錐形状、今年度は、図 3(b) に示す高さ 0.5mm、ピッチ 1.0mm、頂点の角度 90° の正四角錐形状のホーンおよびアンビルを使用した。本実験における接合条件は、ホーンの全振幅 64μm (100%) に対し、50%、70%、90% の振幅、加振時間 0.3sec、0.5sec、0.7sec、0.9sec を組み合わせた条件で接合実験を行った。ホーンに加圧力については、1300N、1500N、1700N、1900N とした。

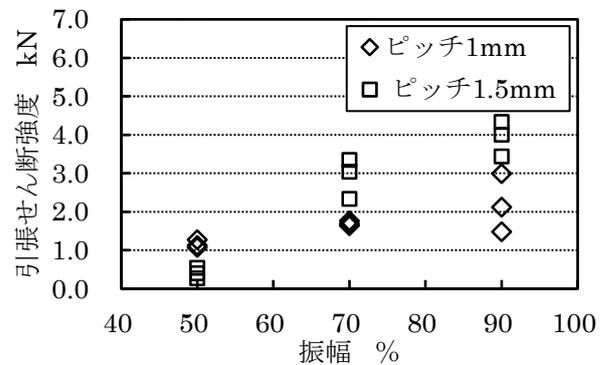
接合状態の評価として、せん断引張試験および接合界面の断面観察を行った。せん断引張試験については、各接合条件に対して 3 セットずつ接合試料を準備し、万能材料試験機 (インストロン 5985 型) を用いて試験速度 2mm/min にて引張せん断試験を行った。断面のマイクロ観察には、フィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザ (FE-EPMA、日本電子 (株)、JXA-8530F) を用い、加振時間と振幅を変えた条件で接合し

た純銅 C1100 とアルミニウム合金 A5052 の異種接合試料(C1100/A5052)について断面観察を行った。

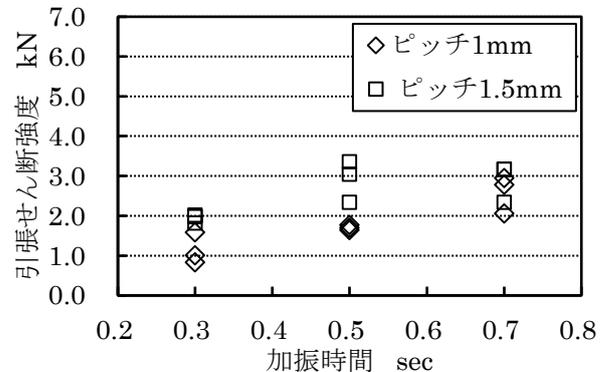
### 3. 結果及び考察

#### 3.1 ホーン、アンビルのローレットピッチの影響

同種材料接合 (A5052/A5052) における、振幅と引張せん断強度の関係を図 4(a) に示す。ローレットピッチが 1mm と 1.5mm の引張せん断強度を比較すると、振幅 50% ではピッチ 1mm の方が高いが、振幅 70% 以上ではローレットピッチ 1.5mm の方が高い引張せん断強度となっている。図 4(b) の加振時間を変えた場合においても、ローレットピッチ 1.5mm の方が引張せん断強度が高い傾向にある。これは、ローレットピッチ 1.5mm の方が頂点の数が少ないために接合材料に大きな塑性変形を生じさせ、表面の酸化層等がより破壊されることで、大きな面積で金属原子同士の接合ができたためだと考えられる。しかし、接合時に大きな塑性変形を生じさせることは、接合材料の表面に大きな圧痕を形成させることになり、実際に適用できる製品が制限される。しかし、圧痕の大きさはローレットピッチだけでなくローレット形状にも左右されるため、ローレット形状が接合強度に及ぼす影響については、今後さらに検討を行っていきたいと考えている。



(a) 振幅と引張せん断強度の関係



(b) 加振時間と引張せん断強度の関係

図4 同種材料接合 (A5052/A5052) におけるローレットピッチの影響

### 3. 2 ホーン加圧力の影響

ホーン加圧力と接合強度の関係を検討するために、同種材料 (A5052/A5052 および A1100/A1100)、異種材料 (C1100/A5052) を用い、加圧力を 1300N、1500N、1700N、1900N と変化させて接合実験を行った。振幅 70%、加振時間 0.5sec においてホーン加圧力を変化させたときの引張せん断強度を図 5 に示す。A1100/A1100 の

接合においては、加圧力に関係なく 2kN 程の引張せん断強度となっているが、A5052/A5052 および C1100/A5052 においては、加圧力の影響を見いだすことができなかった。同種材料接合では、A5052/A5052 よりも A1100/A1100 の方が引張せん断強度が高いのは、塑性流動が生じ易いためと考えられ、これは材料の硬さに起因していると思われる。加圧力と接合強度の関係は、材料の硬さや接合する金属の組み合わせ等によって異なってくると考えられるため、今後は超音波接合の実用化が想定される異種金属材料の組み合わせに対して個別に検討を行っていく必要がある。

### 3. 3 加振時間及び振幅の影響

加振時間を 0.3~0.9sec まで変化させたときの、同種材料 A1100/A1100、A5052/A5052 の加振時間と引張せん断強度の関係を図 6(a)、異種材料 C1100/A5052 および A5052/SPCC の結果を図 6(b) に示す。同種・異種ともに、加振時間が長くなるに従い引張せん断強度が高くなっていくが、0.7sec 以降はせん断引張強度が横ばいとなっている。これは加振時間が 0.7sec 以降になると、引張せん断強度が材料の引張強度とほぼ同等の強度となり母材破断となるためである。

次に、振幅を 50~90% と変化させた場合の同種材料

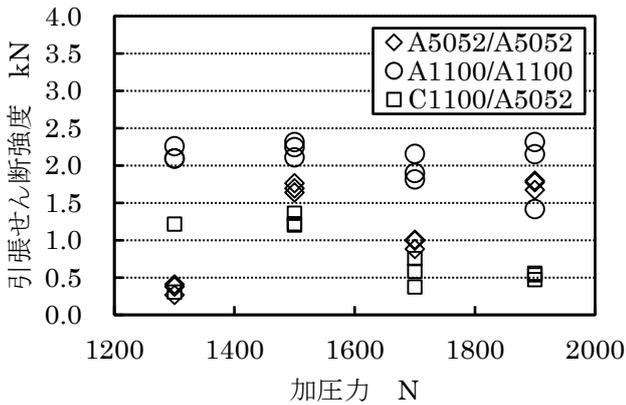
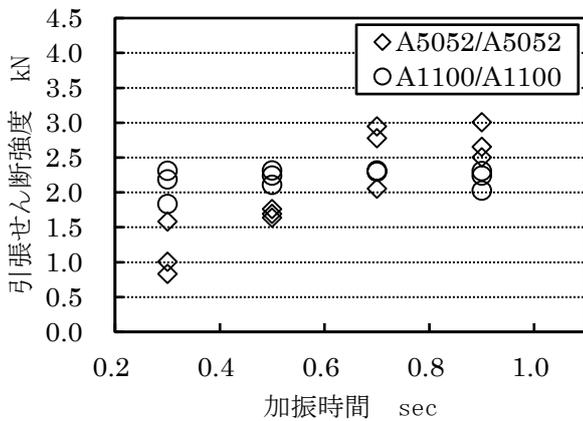
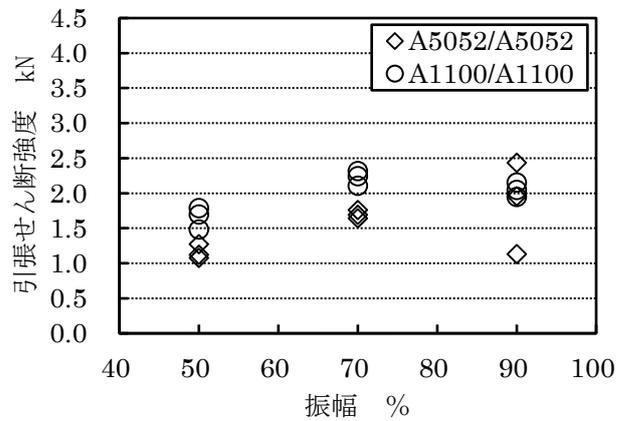


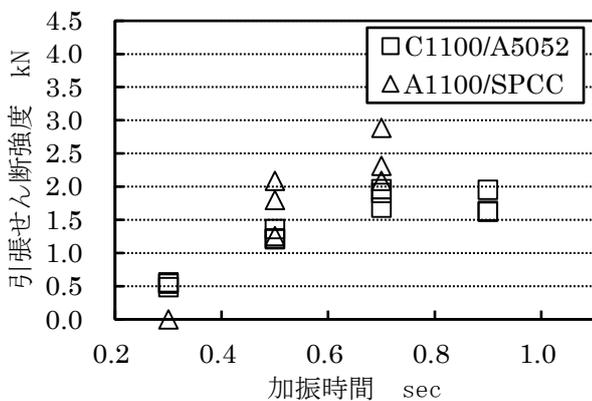
図 5 接合強度に及ぼす加圧力の影響 (振幅 70%、加振時間 0.5sec)



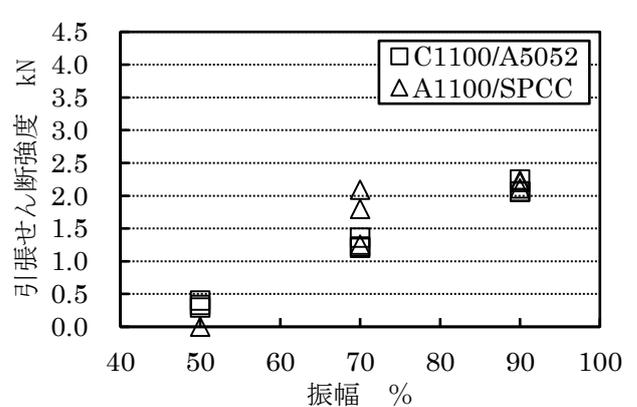
(a) A1100、A5052 同種材料接合



(a) A1100、A5052 同種材料接合



(b) A5052/C1100、A5052/SPCC 異種材料接合



(b) A5052/C1100、A5052/SPCC 異種材料接合

図 6 加振時間と引張せん断強度の関係 (振幅 70%)

図 7 振幅と引張せん断強度の関係 (加振時間 0.5sec)

A1100/A1100、A5052/A505 及び異種材料 C1100/A5052、A5052/SPCC における振幅と引張せん断強度の関係を図 7 (a) (b)に示す。同種・異種に関係なく、振幅が大きくなるほど引張せん断強度が大きくなり、振幅 90%で材料の引張強度と同程度の強度となっている。

C1100/A5052 の加振時間を 0.3~0.9sec まで変化させたときの接合断面の FE-EPMA による組成像を図 8 に示す(上側 : C1100、下側 : A5052)。図 8(a) (b) (c)におい

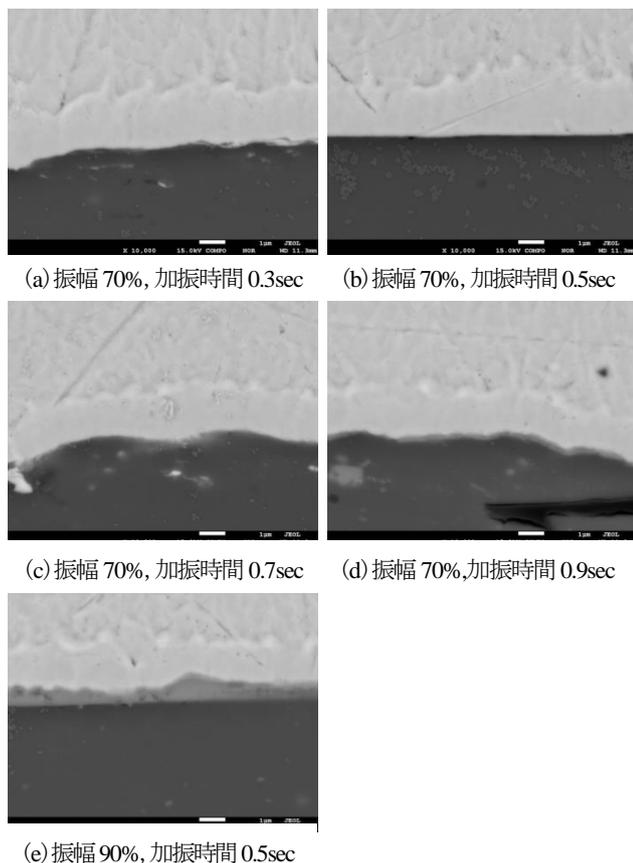


図 8 FE-EPMA による接合断面の組成像 (C1100/A5052)

ては、断面に C1100 と A5052 が混在する明確な層は確認できなかったが、図 8(d)では 0.2 $\mu$ m 程の C1100 と A5052 が混在する層が確認された。振幅が 90%の図 8(e)では、1 $\mu$ m 程度の C1100 と A5052 が混在した層が観察された。この混合層は塑性流動や拡散により形成されたものと考えられ、加振時間が長くなるに従い混合層が徐々に形成され、振幅が大きいほど混合層が厚くなると推測される。

なお、今回のマイクロ観察では、接合材料が混在した層がどのような結晶構造になっているかは分からなかったため、今後更に詳細な検討を行う必要がある。

#### 4. まとめ

ホーンおよびアンビルのローレットピッチの違いによる接合強度の差異と、加圧力、加振時間および振幅が接合強度に及ぼす影響について検討を行った。また、異種接合試料 (C1100/A5052) の接合断面についてマイクロ観察を行い、以下の結果を得た。

- 1) ローレットピッチが小さくなると、せん断引張強度がやや低下する。
- 2) 加振時間および振幅が増加するに従い接合強度が増加する傾向にあるが、加圧力については接合材料の組み合わせによって傾向が異なる。
- 3) 異種材料 C1100/A5052 における超音波接合では、加振時間が長くなると接合界面に混合層が生成される。この混合層は、同じ加振時間では振幅が 70% よりも 90%の方が厚くなる。

#### 【参考文献】

- 1) 高田ら,電子情報通信学会技術研究報告, 107 (167), pp47-51, 2007
- 2) 渡辺ら, 溶接学会論文集 Vol.17, No.2, pp223-233, 1999
- 3) 加賀ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp48-51, 2017