

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6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 (VI) - Development of joining technology of dissimilar metal materials -

Hideaki Tsuge, Daisuke Ogawa and Takahiro Yamada

本研究では、超音波金属接合における接合メカニズムを明らかにし、接合強度の向上およびバラつきの少ない安定した接合技術の開発を目指している。今年度は、接合時における界面温度の測定、接合界面の加工面性状が接合強度に与える影響、更にはローレット加工が施されていないホーンによる接合性能について検討を行った。その結果、超音波接合における界面温度は、接合材料の組み合わせによって異なり、界面温度は熱伝導率が高い材料程低くなることが分かった。接合界面の表面性状は接合強度に影響を及ぼし、表面粗さが大きくなるほど接合強度が高くなる傾向があった。また、ローレット加工の無いホーンの接合性能は、振幅が小さい場合や加振時間が短い場合には、ローレット加工が有るホーンよりも接合強度が高い傾向にあるが、振幅が大きく加振時間が長い場合には、ローレット加工の有無による顕著な差異は見られなかった。

1. はじめに

製品の軽量化には、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ことが必要であり、このためには異種材料の接合技術が重要となっている。しかし、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は、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^{1,2)}。

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、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。この摩擦とホーン加圧による界面の塑性流動によって、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難いことや、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³⁾。

昨年度は、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、接合強度がやや低下した。また、加振時間および振幅が増加するに従って接合

強度は高くなる傾向が見られた⁴⁾。

今年度は、超音波接合時における接合界面の温度および接合面の粗さが接合強度に及ぼす影響について検討した。さらに、ローレット加工の無いホーンを用いた超音波接合における接合性能について検討を行った。

2. 実験

2.1 実験装置および実験方法

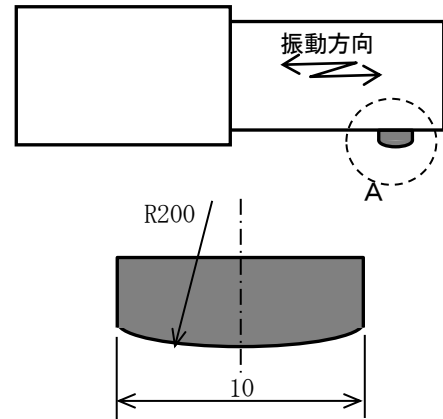
接合には超音波金属接合機（日本アビオニクス(株)、SW-3500-20/SH-H3K7）を用い、接合材料には板厚 1mm のアルミニウム合金 A5052 および A2017、純銅 C1100、冷間圧延鋼板 SPCC を、長さ 100mm、幅 15mm に切断した試料を用いた。接合方法として、2 枚の試料を 15mm 重ね合わせるシングルラップ接合を行った。

界面温度の測定方法は、図 1 に示すように下側試料の接合面の外側から、深さ 0.5mm の半円状の溝をホーン加圧面の端まで加工し、そこに K 熱電対を差し込んで温度計測を行った。なお、K 熱電対は素線径 $\phi 0.1\text{mm}$ のものを用い、サンプリング周波数を 10Hz とし計測を行った。

次に、接合面性状が接合強度に及ぼす影響を検討するために、接合界面を電解研磨した試料を用いて接合実験を行った。さらに、#40 および#80 の電着ダイヤモンドバーを用いて研削加工した試料、幅 1mm、深さ 0.3mm の三角溝を切削加工した試料の 3 種類を作製した。一例として、図 2 に加工した C1100 材の試料表面の状態をマイクロスコープにより観察し、3D 合成した画像を示す。未加工のときの C1100 材の表面粗さは、 $Rz1\mu\text{m}$ 程度であり、#80 研削加工面は $Rz50\mu\text{m}$ 、#40 研削加工面は $Rz100\mu\text{m}$ 程度となっている。なお、加工した試料の接

合においては、ホーン側(上側)は未加工面とし、アンビル側(下側)のみを加工した面にして接合実験を行った。界面温度の計測及び加工面性状に関わる実験に使用するホーンは、約10×10mmの加圧面を有し、試料界面に振動が伝わるように、高さ0.5mm、ピッチ1.0mm、頂点の角度90°の正四角錐形状のローレット加工が施されている。下側の試料を保持するアンビルにおいてもホーンと同様のローレット加工が施されている。

ホーンのローレット形状の検討の一つとして、ローレット加工の無いホーンの接合性能がローレットの有るホーンと同等以上の性能であることが報告されている⁵⁶⁾。ローレット形状の圧痕は見栄えが悪いことや、圧痕を起点とした亀裂が発生することから、本研究においてもローレットの無いホーンの接合性能について評価を行うことにした。図3に示すように、ローレット加工の無いホーンは、R200の曲率半径を有したかまぼこ型で、稜線方向は振動方向に対して90°の方向をなしており、ホーンの加圧面積は10×10mmとなっている。なお、アンビルについては、本実験においても高さ0.5mm、ピ



(A拡大図)

図3 ローレット無しホーンの形状

ッチ1.0mm、頂点角度90°の正四角錐形状のローレット形状のアンビルを用いた。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を組み合わせた条件で接合実験を行った。ホーンの加圧力については、1500Nとした。

接合状態の評価として、せん断引張試験を行った。せん断引張試験については、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。最大引張せん断強度を接合試料の接合強度として採用し評価を行った。

3. 結果及び考察

3.1 超音波接合時の界面温度測定

同種材料接合(以後、接合の材料組合せをA5052/A5052と表記)および異種材料接合(C1100/A5052、A5052/C1100、SPCC/A5052)における、接合時の界面温度変化を図4に示す。接合条件は、振幅70%、時間1s、加圧力1500Nである。図4において、実線は全てホーン側(上側)がA5052材となっており、界面の最高温度はアンビル側(下側)がSPCC材の場合に最も高く、次にA5052材となりC1100材のときに最高温度が最も低くなった。各材料の熱伝導率を表1に示す。表1から、界面温度は熱伝導率が高い材料程低くなっていることが分かる。これは、材料の熱伝導率が高い材料ほど、接合時に発生する熱が界面以外に直ちに伝わることで温度上昇が抑えられるためだと考えられる。しかし、A5052材とC1100材の異種接合においてA5052材とC1100材の上下を入れ変えた場合、A5052材が上側のときよりもC1100材が上側のときの方が界面の温度が高くなっている。下側は治具と接触するために熱が急速に逃げるのが要因と考えられる。また、同一接合条件でもC1100材が上側のときは接合できるが、下側のときは接合できないことから、超音波による金属接合では、接合時の界面温度も重要な要素であることが考えられる。

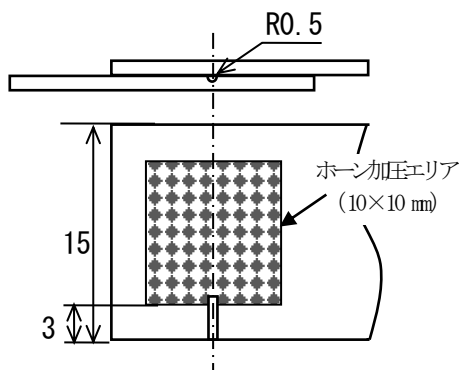


図1 熱電対による温度計測

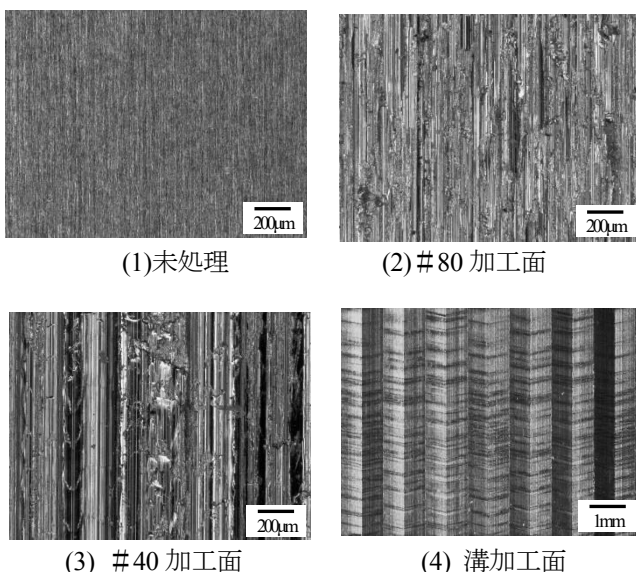


図2 製作した接合面の性状 (C1100)

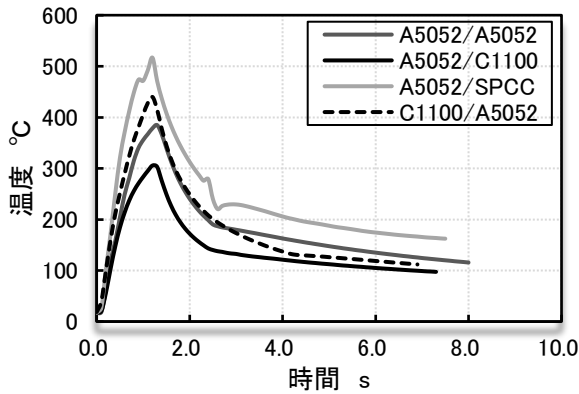


図4 接合時の界面温度変化

表1 材料の熱伝導率

	熱伝導率 (W/mK)
銅	403.0
アルミニウム	236.0
鉄	83.5

3.2 接合面性状と接合強度

図5に、A2017/A2017の接合において電解研磨処理の有無における振幅と接合強度の関係を示す。接合条件は、加振時間0.9s、加圧力1500Nとし、振幅を50%、70%、90%と変えて実験を行った。振幅が大きくなるに従って接合強度は高くなる傾向にあるが、電解研磨処理の有無によって接合強度に差異が見られなかった。また、A2017/SUS304の接合においても、電解研磨処理有りとは処理無しの場合における接合実験を行ったが、A2017/A2017の接合強度と同様に差異は見られなかった。この結果から、超音波金属接合においては、接合界面の自然酸化膜層や小さな表面粗さは接合強度に大きな影響を及ぼさないと推察できる。そこで、接合界面に研削および切削加工を施した場合の接合強度について検討を行った。なお、接合条件は、振幅70%、加振時間0.9s、加圧力1500Nの同一条件とした。図6に、表面性状と

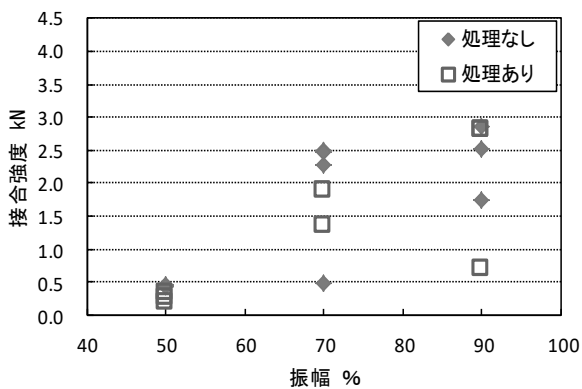
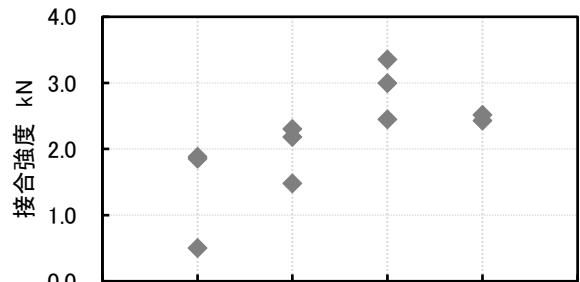
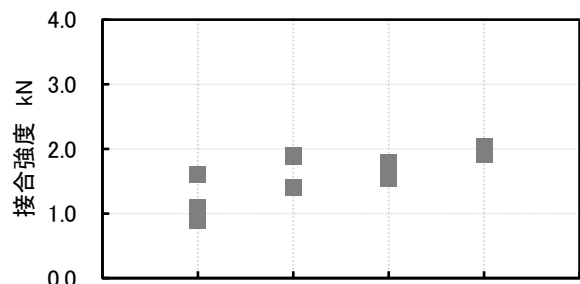


図5 電解研磨処理における振幅と接合強度 (加振時間 0.9s、加圧力 1500N)

接合強度の関係を示す。図6(1)は同種接合(A2017/A2017)、図6(2)は異種接合(A2017/C1100)の場合の結果である。破壊形態としては、溝加工以外の試料では界面剥離となったが、溝加工試料については溝部でき裂が生じてしまうために、接合部端部の試料破断となっている。図6において、横軸の加工面性状における表面粗さは、A2017材、C1100材ともに左から順に Rz1 μ m、Rz50 μ m、Rz100 μ m、Rz330 μ m程度となっており、表面粗さが大きいほど接合強度が高くなる傾向にあることが分かる。表面粗さが小さい場合は、接合強度に影響を与えないが、表面粗さが大きくなると接合強度を向上させることから、表面粗さが大きくなるとアンカー効果が生じるために接合強度が向上したためだと考えられる。しかし、どの程度の表面粗さが適しているかについては、材質の組み合わせと接合条件に影響されると考えられるため、今後更に検討が必要である。



(1) A2017/A2017



(2) A2017/C1100

図6 表面性状と接合強度の関係 (振幅70%、加振時間0.9s、加圧力1500N)

3.3 ローレット加工無しホーンの接合性能

図3に示すローレット加工の無いホーンを用いて、加圧力1500Nとし、振幅を50%、70%、90%、加振時間を0.3s、0.5s、0.7sと変化させて接合実験を行った。図7に振幅と接合強度、図8に加振時間と接合強度の関係を示す。振幅が小さい場合や加振時間が短い場合には、ローレット加工の無いホーンの方が接合強度が高い傾向があった。しかし、振幅が大きく加振時間が長い場合は、

ローレット加工の有無による顕著な差異は見られなかった。図9に、接合後の試料におけるホーン加圧位置の外観写真を示す。ローレット加工の無いホーンでは振動による僅かな摩擦痕が見られるが、ローレット加工の有る

ホーンの様な深い圧痕は見られない。これらの結果から、ホーンの圧痕が外観上問題となる場合は、ローレット加工の無いホーンが有効であると言える。また、ローレット加工の有るホーンでは、振幅が大きく加振時間が長い条件になると、ホーン圧痕部の端から亀裂が生じることがあるが、ローレット加工の無いホーンでは亀裂が生じ難いなどのメリットがある。但し、アルミ材等ではホーンとの溶着が問題となることから、ホーンへの溶着が生じない接合手法については今後検討が必要である。

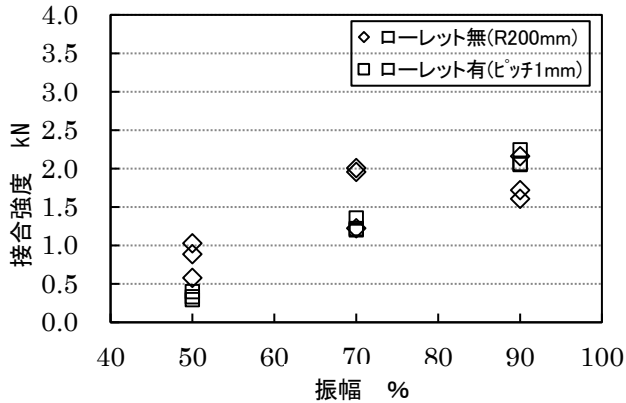


図7 振幅と接合強度の関係 (加振時間 0.5s)

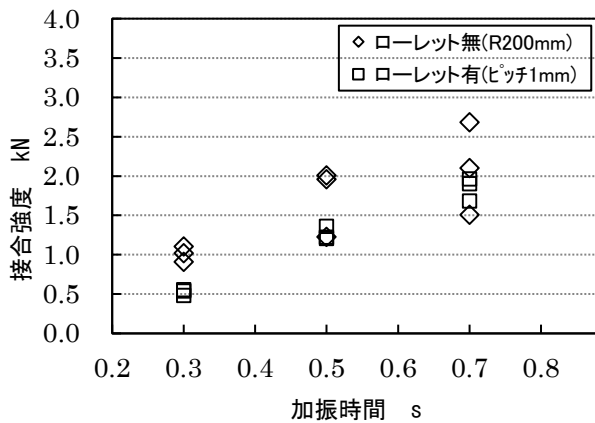
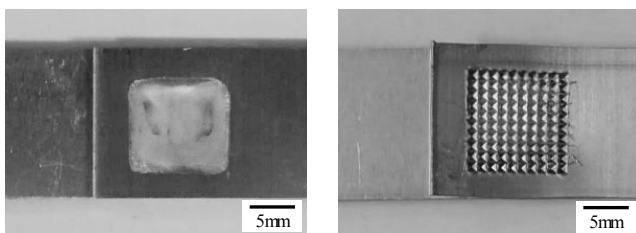


図8 加振時間と接合強度の関係 (振幅 70%)



(1) ローレット加工無し (2) ローレット加工有り
図9 ホーン加圧位置の外観および形状測定
(振幅 9%、加振時間 0.5s、加圧力 1500N)

4. まとめ

超音波金属接合における、接合時の界面温度測定、界面性状が接合強度に及ぼす影響を検討した。さらに、ローレット加工の無いホーンの接合性能を評価した結果、以下の結果を得た。

- 1) 超音波接合における界面温度は、接合材料の組み合わせによって異なり、上側が同じ材料の場合は下側試料の熱伝導率が高いほど界面温度は低くなる。
- 2) 異種接合 (A5052/C1100) の場合、ホーン側とアンビル側を入れ替えると接合時の界面温度は異なり、C1100 材がホーン側のときの方が界面温度が高くなり、接合が可能となる。
- 3) 接合界面の表面性状によって接合強度は異なり、表面粗さが大きくなるほど接合強度は高くなる傾向がある。
- 4) ローレット加工の無いホーンの方が、振幅が小さい場合や加振時間が短い場合には、ローレット加工があるホーンよりも接合強度が高い傾向にあるが、振幅が大きく、加振時間が長い場合は、ローレット加工の有無による顕著な差異は見られない。

【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
- 4) 柘植ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp49-52, 2018
- 5) 渡辺ら, 溶接学会論文集 Vol.27, No1, pp7-12, 2009
- 6) 佐々木ら, 軽金属溶接, Vol.53, No11, pp448-454, 2015