

研究論文

摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金とチタンの 異種材料接合継手の非破壊検査

花井敦浩*¹、清水彰子*¹、津本宏樹*¹、横山博*¹

Non-destructive Inspection of Dissimilar Metal Joint of Aluminum Alloy to Titanium by Friction Stir Spot Welding

Atsuhiko HANAI*¹, Akiko SHIMIZU*¹,
Hiroki TSUMOTO*¹ and Hiroshi YOKOYAMA*¹

Industrial Research Center*¹

近年、軽金属部材の新しい接合技術として摩擦攪拌点接合技術が注目されているが、接合継手の品質評価に関する規格や方法などの整備が遅れているという課題を抱え、本技術の普及には至っていない。本研究では、摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金とチタンの異種材料接合継手において、非破壊試験による内部観察と破壊試験による強度試験を実施した。その結果、非破壊試験により接合部径を計測することが可能であること、また、異種金属材料界面の攪拌部の状態により接合強度に影響を及ぼすことが明らかとなった。

1. はじめに

摩擦攪拌点接合（FSSW、Friction Stir Spot Welding）は従来の抵抗スポット溶接に代わる接合法として注目されている。摩擦攪拌点接合は、非溶融による接合であるため、難溶接のアルミニウム合金に対しても極めて有効な接合法として注目を集めている。しかし、本技術の普及には、いくつか課題がある。その一つに接合継手の品質評価に関する規格や方法が無いことがあげられる。摩擦攪拌点接合技術を広く普及させるためには、接合継手の品質評価法の確立が必要である。

一方、自動車、航空機、鉄道車両、船舶等の輸送機器産業では、軽量化、高機能化、製造コスト削減等への要望から、異種金属材料接合に対するニーズが増加している。例えば、チタンの耐食性や比強度を生かし、アルミニウムや鋼などの異種金属材料継手の接合技術が検討されている。チタンとアルミニウム合金の接合が可能になれば、単一材料で部材を作製するよりも、強度や耐食性を備えた軽量部材をより低コストで作製できる利点がある。しかし、アルミニウムとチタンは融点、熱伝導率、熱膨張率などに大きな違いがあり、結晶構造も異なる。また、TiAl や TiAl₃ などの脆性な金属間化合物が生成しやすく溶融溶接が困難な材料である。金属間化合物は硬く脆いため、接合界面に生成すると溶接部の継手強度が低下する^{1) 2)}。そのため、アルミニウムとチタンの異

種材料接合については、両材料を溶融させず、接合界面の金属間化合物の生成を抑えることが可能な固相接合である摩擦攪拌点接合が有望である。

本研究では、摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金とチタンの異種材料接合継手の作製を試み、接合状態を超音波フェイズドアレイ探傷と X 線 CT 観察によって非破壊で可視化することで、定量的な評価を可能とする接合継手評価法について検討した。

2. 実験方法

2.1 摩擦攪拌点接合（FSSW）

摩擦攪拌点接合の接合プロセスについて説明する。接合には図 1 に示す形状のツールを用いた。先端には突起部（プローブ）があり、逆ネジ加工が施されている。このツールを回転させプローブを被接合材表面に垂直に

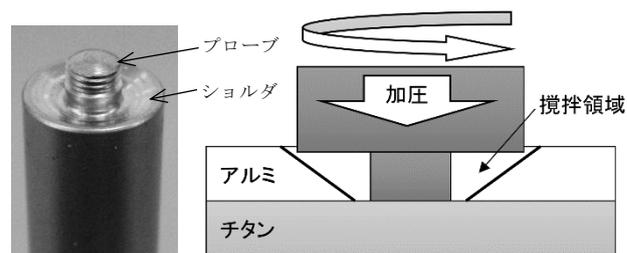


図 1 FSSW ツールと FSSW 原理図

押し当てた。その時に発生する摩擦熱により、材料が軟化し、プローブが材料の中に圧入される。ツールのショルダにより、盛り上がってくる材料を抑えながらツールを圧入することで、プローブ周囲では塑性流動域（攪拌領域）が形成される。充分攪拌を行った後ツールを引き抜き接合が完了する。

2.2 供試材および接合条件

供試材としてアルミニウム合金は A5052-O 板材（長さ 100mm、幅 30mm、板厚 3mm）を、チタンは TP270-C 板材（長さ 100mm、幅 30mm、板厚 3mm）を用いた。上板をアルミニウム合金、下板をチタンとして重ね接合継手の作製を試みた。摩擦攪拌点接合の接合条件として、ツール回転速度、ツール挿入深さ、及び接合時間の 3 つの条件を検討した。ツール回転速度の影響を調べるため、挿入深さ 3mm、接合時間 10 秒とし、ツール回転速度を 950、1,320、1,800rpm と変化させた。挿入深さの影響を調べるため、ツール回転速度 1,800rpm、接合時間 6 秒とし、挿入深さを 2.8、3.0、3.2、3.4、4.0mm と変化させた。接合時間の影響を調べるため、ツール回転速度 1,800rpm、挿入深さ 3mm とし、接合時間を 3、6、10 秒と変化させた。図 2 に作製した 2 種類の接合試験片を示す。短冊状の 2 枚の試験片をそれぞれ図 2 のように 30mm×30mm 重ね合わせ、その中央に摩擦攪拌点接合を施した。

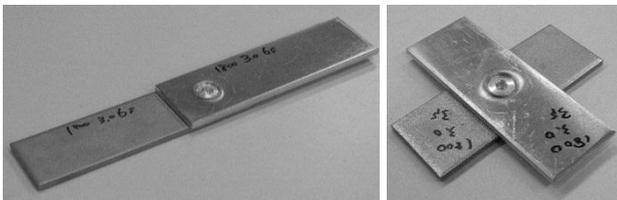


図 2 引張せん断試験片(左)と十字引張試験片(右)

2.3 摩擦攪拌点接合ツール

摩擦攪拌点接合ツールの材質には工具鋼 (SKD61) を使用し、硬さは HRC46~48 に調整した。ショルダの直径は 10mm、プローブの直径は 4mm、プローブの長さは 3mm とし、プローブには逆ネジ加工を施した。接合には汎用フライス盤を用いた。

2.4 接合部の評価

摩擦攪拌点接合の接合強度に及ぼす接合条件の影響を評価するために、破壊試験と非破壊試験を実施した。

2.4.1 破壊試験

引張せん断試験、十字引張試験、及び硬さ試験により接合部の強度を評価した。引張せん断試験及び十字引張試験は万能試験機を用い、引張速度 5mm/min で行った。硬さ試験はマイクロビッカース硬さ試験機を用いて

測定した。

接合部の断面組織観察を実施した。接合部中央を切断し、鏡面研磨後、エッチング液により腐食して、光学顕微鏡により観察した。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) による接合部断面の元素分析も実施した。

2.4.2 非破壊試験

接合継手の接合部の非破壊試験は、超音波探傷装置及び X 線 CT 装置を用いて行った。超音波探傷には、超音波フェイズドアレイ探傷装置を用い、測定周波数 17MHz、振動子が 64 個の探触子を用いた。超音波フェイズドアレイ探傷装置は、従来の超音波探傷装置と異なり、超音波を送受信する振動子を複数同時に制御することで、広範囲を迅速、正確に測定することができる装置である。

図 3 に超音波探傷による接合部の平面画像 (C スコープ) と X 線 CT による断面画像を示す。C スコープでは、ドーナツ状の接合部の最外径を計測し、摩擦攪拌点接合の接合部の大きさとした (図 3 左)。X 線 CT による観察は、電圧 130 kV、電流 40 μ A の条件で撮影を行い、その断面観察像から接合部の直径を計測した (図 3 右)。

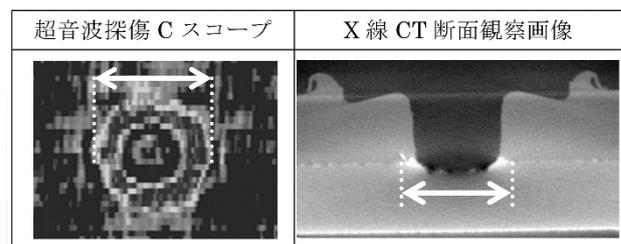


図 3 非破壊試験結果

3. 実験結果および考察

3.1 接合強度

接合時間を変化させた時の強度試験結果を図 4 に示す。接合時間を長くすると十字引張試験では最大荷重が増加する傾向が見られた。

次に、挿入深さを変化させた場合における接合実験を実施した。挿入深さが 2.8mm の条件では挿入深さが浅く接合できなかった。また、挿入深さが 4.0mm の条件ではツール先端が摩耗し接合できなかった。これはツールがチタン側に 1mm 挿入され、高融点材料であるチタンとの摩擦熱が他の条件に比べ高温となり軟化したためと考えられる。継手を作製できた挿入深さ (3.0、3.2、3.4mm) と継手の強度の関係を図 5 に示す。挿入深さが深くなるに従い最大荷重は上昇した。これらの結果から接合可能な条件において、接合時間が長いほど、また挿入深さが深いほど、接合部がより攪拌され接合強度が高くなると考えられる。

ツール回転速度を変化させた時の強度試験結果を図6に示す。回転速度が大きくなるに従い最大荷重が低下する傾向が見られた。アルミニウム合金同種材での接合では回転速度が高くなると最大荷重が増加する傾向を示したのに対し、アルミニウムとチタンの接合では異なる傾向を示した³⁾。

いずれの条件においても、同様の条件で実施した摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金同種材の接合継手ほどの強度は得られなかった³⁾。

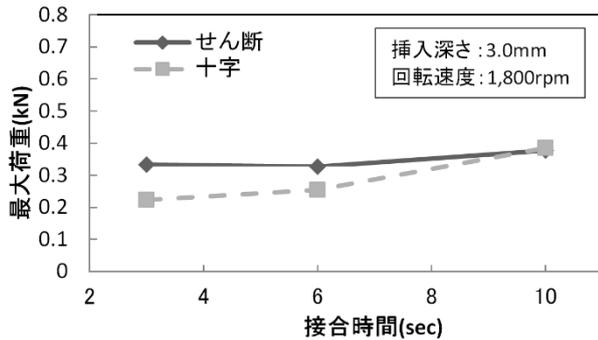


図4 接合時間と接合強度の関係

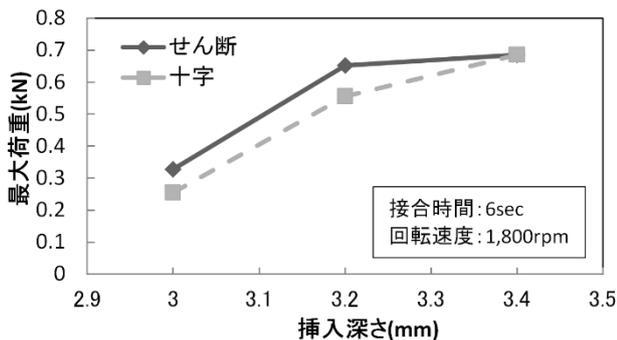


図5 挿入深さと接合強度の関係

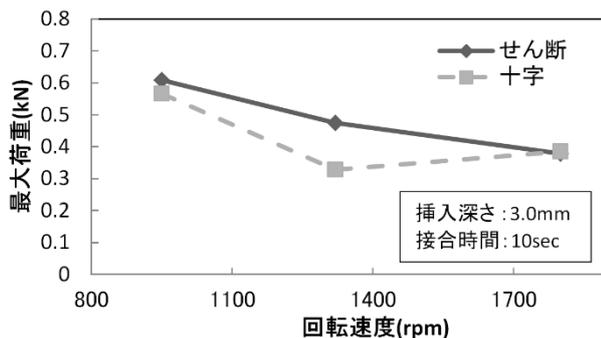


図6 回転速度と接合強度の関係

3.2 組織試験

挿入深さ 3.4mm、接合時間 10 秒としてツールの回転速度を 950rpm と 1,800rpm の 2 つの条件で接合した接合部断面の金属顕微鏡写真と、攪拌部のアルミニウム合金とチタンの境界付近を拡大した写真を図7に示す。プローブ痕跡の周囲は攪拌領域が形成され、流動の軌跡も明瞭に認められた。拡大写真を見ると、回転速度が 950rpm では下板のチタンが攪拌されてフックのような

形状に盛り上がり、上板のアルミニウム合金に食い込んでいるのが分かる。回転速度が 1,800rpm では下板のチタンが盛り上がっているが、950rpm の場合と比べると食い込み量が少ない。このチタンの攪拌部の形状がアンカー効果となり継手強度に影響を及ぼし、強度試験において、回転速度が低速になるほど継手強度が上昇したと考えられる。1,800rpm の場合は攪拌力が強いいため、食い込み部であるチタンの先端がちぎれているのが図7の拡大写真から観察できる。このため 1,800rpm の場合は盛り上がり部が小さくなり、アンカー効果が減少したと考えられる。

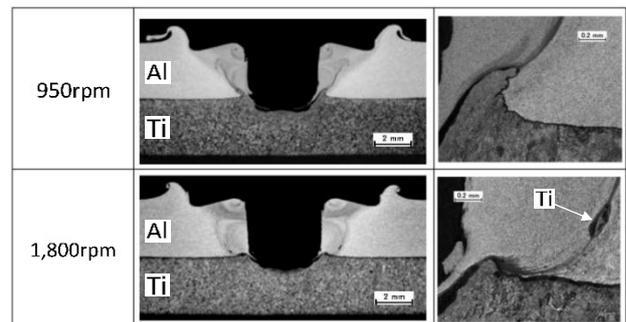


図7 断面組織写真

3.3 元素分析と硬さ試験

ツールの回転速度を 950rpm と 1,800rpm の 2 つの条件で接合した継手断面の元素分析を行った。SEM-EDX による元素マッピングの結果を図8に示す。アルミニウム合金とチタンの境界付近の攪拌部においてチタン側にアルミニウムが入り込み、拡散されている箇所が観察された。この箇所の定量分析を行うと表1のような結果となった。また、接合部断面の硬さ試験を実施した。アルミニウム合金とチタンの境界付近の攪拌部に硬度が 500HV を超える部分が存在した。アルミニウム合金とチタンの母材部の硬度は 100HV 前後であるため、材料境界部付近に硬い物質が析出していることが分かった。これらの結果からアルミニウムとチタンの金属間化合物である $TiAl_3$ が析出したと考えられる。

ツール回転速度が 950rpm と 1,800rpm の 2 つの条件での元素マッピングによる金属間化合物部域を計測した結果を表2に示す。ツール回転速度が 950rpm の方が 1,800rpm に比べて金属間化合物部の面積は小さくなった。この結果から、ツール回転速度が小さいほど、金属間化合物の析出が少なくなる傾向にあると考えられる。これは、脆性な組織である金属間化合物が多いほど接合強度を低下させることを示唆する結果となった。

3.4 非破壊試験

摩擦攪拌点接合継手の強度を推定するために、超音波探傷結果及び X 線 CT 観察結果と破壊試験による継

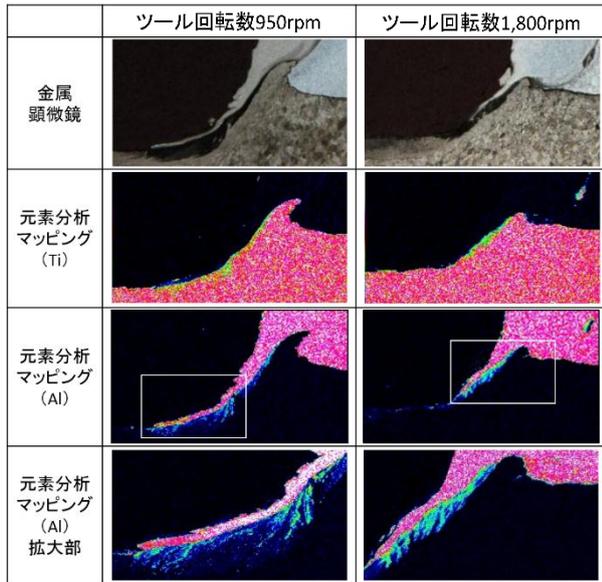


図8 元素分析マッピング

表1 攪拌領域硬化部の元素分析結果

元素	Al	Ti	合計
原子数%	74.4	25.6	100.0

表2 断面観察による攪拌領域硬化部計測結果

ツール回転速度	950rpm	1,800rpm
金属間化合物部面積	$4 \times 10^{-4} \text{mm}^2$	$7 \times 10^{-4} \text{mm}^2$

手強度との相関性について調べた。非破壊試験により測定した接合部径は、強度試験後の破断面から実際の接合部径を計測した実測値と傾向がほぼ対応しており、非破壊試験による接合部径の測定は有効な手法であることが分かった。超音波探傷によるCスコープとX線CTによる断面画像及び破断面から求めた接合部径と強度試験の最大荷重との関係を図9に示す。その結果、非破壊試験により測定した接合部径は、いずれも引張せん断荷重及び十字引張荷重との相関性を示唆しているが、同様の条件で実施した摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金同種材の接合継手ほどの相関性は得られなかった³⁾。

4. 結び

本研究では、摩擦攪拌点接合継手の接合強度を定量的に非破壊で評価できる接合継手評価法について検討し

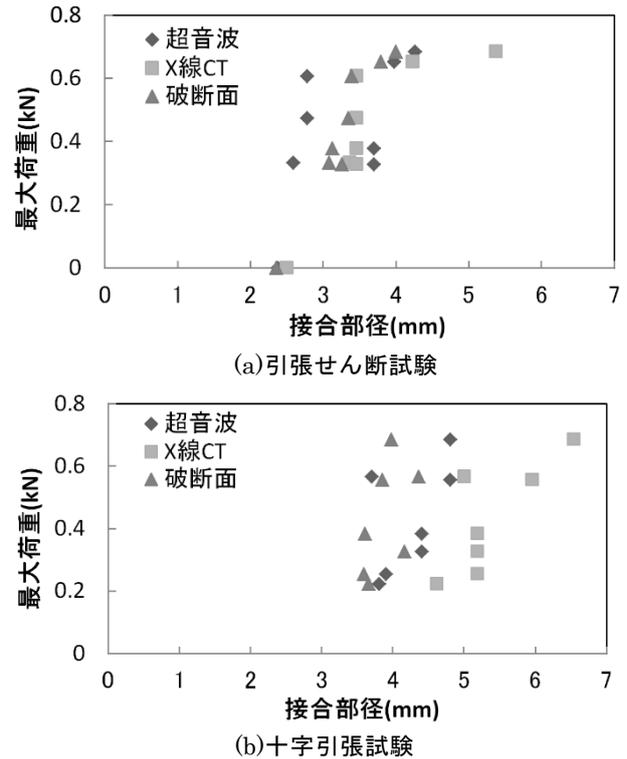


図9 非破壊試験の接合部径と接合強度の関係

た。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金とチタンの異種材料接合継手の接合強度は、同様の条件で実施したアルミニウム合金同種材の接合強度ほどは得られなかった。
- (2) アルミニウム合金とチタンの摩擦攪拌点接合による異種金属接合の場合、アルミニウム合金同種材の接合とは異なり、ツールの回転速度が低速になるに従い、接合強度が上がる傾向となった。
- (3) 非破壊試験により接合部径の大きさを測定できることが分かった。しかし、接合強度は接合部径の計測だけでは、推定することが難しいことが判明した。

文献

- 1) 圓城敏男, 池内建二, 金井雅仁, 丸山敏治: 溶接学会誌, **46**(2), 32(1977)
- 2) 尾崎仁志, 林慎吾, 杓名宗春: 溶接学会論文集, **26**(1), 24(2008)
- 3) 花井, 古澤: あいち産業科学技術総合センター研究報告書, **2**, 4(2013)