

研究論文

摩擦攪拌点接合継手の機械的特性におよぼす

ツール先端形状の影響

花井敦浩*¹、清水彰子*¹、津本宏樹*¹、横山博*¹、杉本貴紀*²、吉田陽子*²

Effect of Tool Tip Shape on the Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welds

Atsuhiko HANAI*¹, Akiko SHIMIZU*¹, Hiroki TSUMOTO*¹, Hiroshi YOKOYAMA*¹, Takanori SUGIMOTO*² and Yoko YOSHIDA*²Industrial Research Center*¹ Research Support Department*²

摩擦攪拌点接合は固相接合であり、継手の性能は使用するツール形状に起因すると考えられ、摩擦攪拌点接合により高強度の継手を得るためには、ツール先端形状が継手の機械的特性におよぼす影響を明らかにする必要がある。本研究では、アルミニウム合金を用いて摩擦攪拌点接合継手を作製し、その引張せん断試験および接合部の組織観察を実施した。その結果、ツールの先端形状によって継手の接合強度に大きく差がでること、また、接合強度は接合部分の組織の違いに起因し、接合部分の面積と接合強度には相関関係があり、接合部の面積が大きくなるほど強度が高くなる傾向が見られた。

1. はじめに

摩擦攪拌点接合 (Friction Stir Spot Welding、以下 FSSW) は、非溶融による接合であるため、難溶接材のアルミニウム合金に対しても極めて有効な溶接法であり、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¹⁾。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 FSSW 用のツールに関する報告例が少ないことがあげられる。固相接合である FSSW による継手の性能は、使用するツール形状に起因すると考えられ、FSSW を広く普及させるためには、ツール先端形状が継手の機械的特性におよぼす影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、FSSW において先端形状の異なる 10 種類のツールを用いて、アルミニウム合金の重ね合わせ接合を行った。接合後、継手の引張せん断試験および接合部の組織観察等を行い、継手の性能に大きな影響をおよぼすと考えられる接合部の材料流動と接合強度との関連を明らかにすることを試みた。

FSSW の接合プロセスについて説明する。接合には図 1 に示すような先端がプローブとショルダからなるツールを用いた。図 2 に FSSW の模式図を示す。ツールを回転させプローブを被接合材表面に垂直に押し当て、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。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が発生し塑性流動領域が形成される。攪拌を行った後ツールを引き抜き接合が完了する。

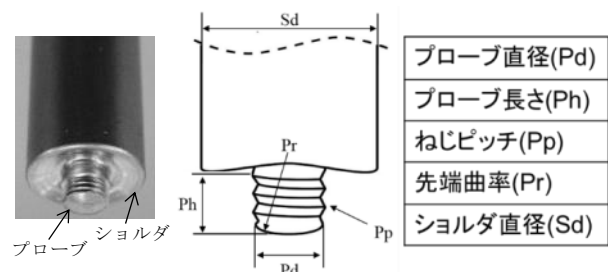


図 1 FSSW ツール

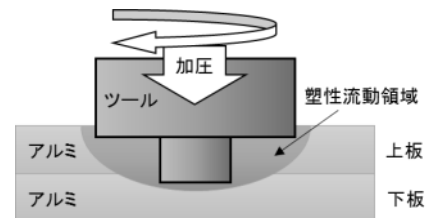


図 2 FSSW 模式図

2. 実験方法

2.1 FSSWによるアルミニウムの接合方法

接合に使用する供試材はアルミニウム合金 (A5052-O、80×30×3mm) を用いた。FSSW はツール回転速度 1,800rpm、挿入深さ 3.4mm、接合時間 3 秒で行った。2 枚の試料を 30×30mm 重ね合わせ、その中央に

*¹ 産業技術センター 金属材料室 *² 共同研究支援部 計測分析室

FSSW を施して引張せん断試験片を作製した。

2.2 ツール形状

FSSW ツールの材質には高速度工具鋼 (SKH56) を使用し、硬さは HRC67~69 に調整した。本研究ではツール形状が FSSW におよぼす影響を検討するため、図 1 で示したツール形状を変化させ実験を行った。表 1 に本研究で使用したツール先端形状の各部分の詳細な形状を示す。形状の異なる 10 種類 (No.1 から No.10) のツールを用意し、2.1 で記載した条件で接合を行った。

ショルダ形状はショルダ底面が図 1 に示すように凹型のくぼみをつけた形状を逆テーパ、ショルダ底面が図 2 に示すように平坦な形状をフラット、ショルダ底面が凸型に膨らんだ形状をテーパとした。プローブの長さは全て 3.0mm とした。接合には汎用フライス盤を用いた。

2.3 接合部の評価方法

引張せん断試験および硬さ試験により接合部の機械的特性を評価した。引張せん断試験は万能試験機を用い、それぞれの条件で $n=2$ で実施した。引張速度は 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。

接合部の断面組織は、接合部中央を切断して鏡面研磨後エッチング液により腐食し、金属顕微鏡により観察した。また、接合部の断面を電子顕微鏡 (SEM: 日立ハイテクノロジーズ(株)製 SU-70) を用いた結晶解析手法 (EBSD 法) により分析した。

3. 実験結果および考察

3.1 接合強度

ツール形状の違いによる引張せん断試験結果を図 3 に示す。表 1 の No.1 から No.5 および No.8、No.9 のプローブ直径、プローブ先端曲率、プローブねじピッチ、ショルダ直径を変化させたツールを用いた場合、全ての条件で高強度の継手を得ることができたが、ツール条件を変化させると僅かに強度に差がでることがわかった。

プローブねじ加工を変化させた場合、逆ねじ加工を施した No.2 のツールを使用した試験片では高強度の継手を得ることができたが、正ねじ加工を施した No.6 のツールを使用した場合では接合できなかった。また No.7 のねじ加工を施していないツールを使用した場合では接合はできたものの強度は著しく低い値となった。ショルダ形状を変化させた場合、逆テーパおよびフラットとした No.8、No.9 のツールを用いた試験片では高強度の継手を得ることができたが、テーパとした No.10 のツールを用いた場合、強度が著しく低い値を示した。

これらの結果より、ツールの先端形状が継手の接合強度に大きな影響をおよぼすことが判明した。

3.2 組織観察及び硬さ試験結果

組織観察および硬さ試験の代表例として、今回の実験において標準的なツール先端形状として採用した No.2 のツールを用いて接合した試験片の結果を図 4、5 に示す。組織観察から、接合部のプローブ痕近傍で組織が変化していることがわかる。硬さ分布から、接合部周辺は接合時の熱影響により組織が軟化しているが、プローブ痕近傍では硬さが増加している箇所が確認できる。組織観察と硬さ試験の結果から接合部断面を図 4 に示すように母材部、熱影響部、塑性流動部、攪拌部の 4 領域に分類することとする。母材部は組織観察で圧延組織が観察でき硬さが母材と同等な値を示した部分、熱影響部は組織観察で圧延組織が観察できており硬さが低下していた部分、塑性流動部は結晶粒が微細化されている箇所、攪拌部は結晶粒が微細化されている箇所、プローブのねじ加工が施されている部分と分類した。これら 4 領域の SEM-EBSD 像を図 6 に示す。母材部では圧延された組織が観察された。硬さが低下している熱影響部では、接合時の熱影響により圧延組織が再結晶化しているのが組織の状態から確認された。塑性流動部では結晶粒が微細化されており、微細な結晶粒が層状に分布していることが観

表 1 使用ツール形状一覧

ツールNo.	プローブ直径 [mm]	プローブ先端曲率	プローブねじピッチ [mm]	プローブねじ加工	ショルダ直径 [mm]	ショルダ形状	プローブ長さ [mm]
1	3.0	R 2.9	0.5	逆ねじ	10	逆テーパ	3.0
2	4.0	R 2.9	0.5	逆ねじ	10	逆テーパ	
3	5.0	R 3.6	0.5	逆ねじ	10	逆テーパ	
4	4.0	R 5.0	0.5	逆ねじ	10	逆テーパ	
5	3.0	R 2.9	0.35	逆ねじ	10	逆テーパ	
6	4.0	R 2.9	0.5	正ねじ	10	逆テーパ	
7	5.0	R 3.6	-	無	10	逆テーパ	
8	4.0	R 2.9	0.5	逆ねじ	12	逆テーパ	
9	4.0	R 2.9	0.5	逆ねじ	10	フラット	
10	5.0	R 3.6	0.5	逆ねじ	10	テーパ	

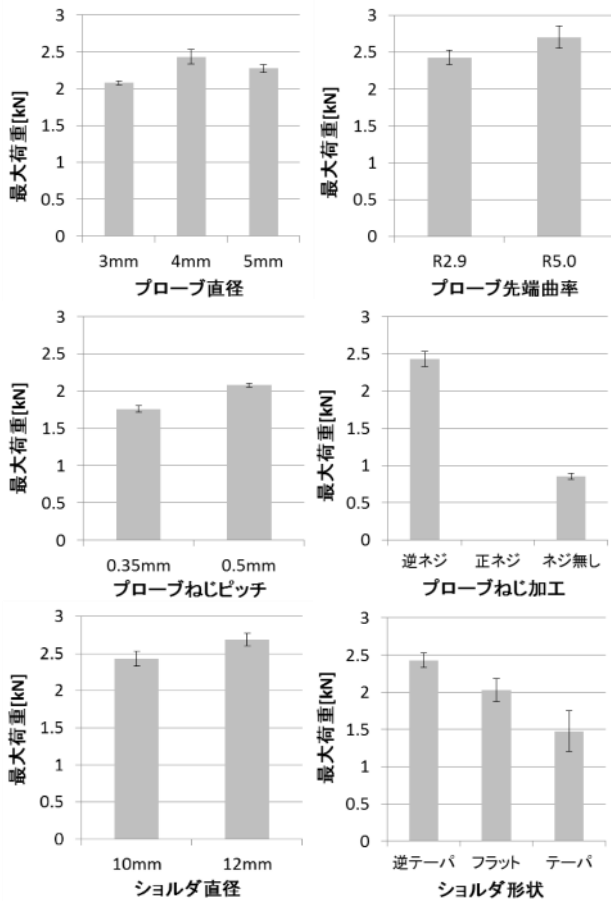


図3 引張せん断強度

察された。攪拌部では結晶粒が微細化されており、微細な結晶粒が均一に分散されていることが観察された。また、塑性流動部と攪拌部では結晶粒の微細化により硬さが増加していることが確認された。これらの結果から、接合界面付近での攪拌部の形成により接合界面が消失し接合できることがわかった。

表1のNo.1からNo.10までの形状の異なるツールを用いて接合した試験片の組織観察の結果を図7に示す。表1のNo.1からNo.5およびNo.8、No.9のツールを用いて接合した試験片では、接合界面付近に攪拌部が形成され接合界面が消失していることが確認できた。

正ねじ加工を施したNo.6のツールを使用した場合、またNo.7のねじ加工を施していないツールを使用した場合には、共に攪拌部は形成されず接合界面が残存していることが確認できた。FSSWの接合原理より、逆ねじ加工を施したプローブの場合、接合時にプローブが材料に挿入されるとツールの回転による円周方向の塑性流動に加え、プローブの周辺で逆ねじ加工の作用により下方向に材料が塑性流動し、板表面と直角方向に対流状の塑性流動が接合界面付近に発生し、これが攪拌部を形成していると考えられる。しかし、正ねじ加工を施したNo.6のツールでは、プローブ周辺で正ねじ加工の作用

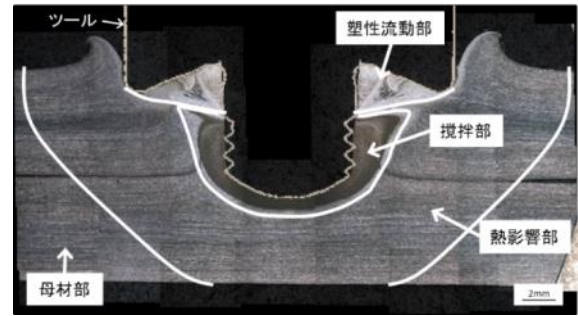


図4 ツール No.2 の接合継手組織

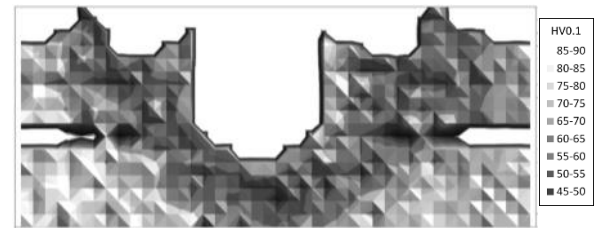


図5 ツール No.2 の接合継手硬さ分布

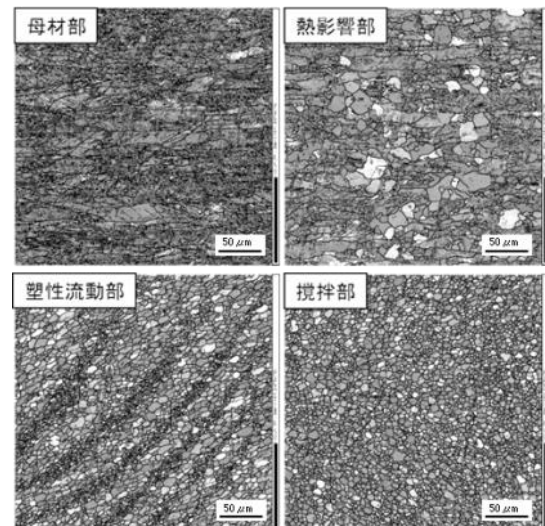


図6 接合部断面 SEM-EBSD 像

により上方向に材料が塑性流動するため、接合界面付近では攪拌部が形成されず、その結果接合ができなかったと考えられる。また、ねじ加工を施していないNo.7のツールにおいては、ツールの回転による円周方向の塑性流動は発生するものの、プローブ周辺ではねじ加工が無いいため板表面と直角方向の塑性流動は発生せず、接合界面付近に十分な攪拌部が形成されず、引張せん断強度が低くなったと考えられる。

ショルダ形状をテーパとしたNo.10のツールを用いた場合、十分な攪拌部が形成されず接合界面が残存していることが確認できた。これは、ショルダ形状をテーパにした場合、接合時にプローブが材料に挿入されると、プローブ周辺の材料が盛り上がってくるが、それをショルダで抑え込むことができないことと、ショルダによる接合材料表面からの摩擦熱を与えることができず、熱に

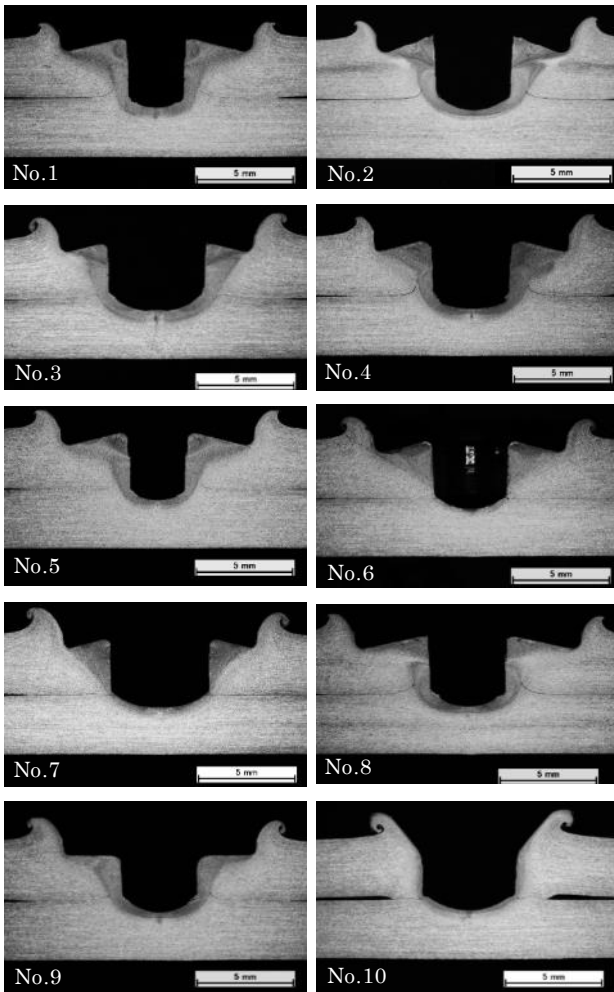
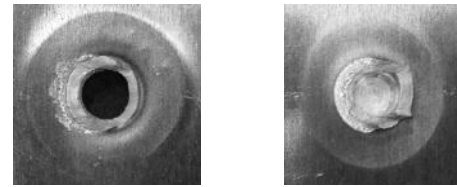


図7 組織観察結果

よる塑性流動の促進ができないため十分な攪拌部が形成されず、引張せん断強度が低くなったと考えられる。

組織観察の結果、ツール先端形状の違いにより攪拌部の形成状況が変化し、接合強度に差が出たと考えられる。引張せん断試験後の破断面を図8に示す。接合部がリング状に形成されていることが確認できる。リング状に形成されている接合部の状態を定量化するため、各接合継手の組織観察結果において、攪拌部により接合界面が消失している部分を攪拌部接合領域として図9に示すように接合領域径を計測し、計測値から求めた円の面積からプローブ直径の円の面積を差し引いたリング状の面積を攪拌部接合面積として算出した。算出した各接合継手の攪拌部接合面積と引張せん断強度の関係調べた結果を図10に示す。攪拌部接合面積と引張せん断強度には相関性があり、攪拌部接合面積が大きくなるほど強度が高くなる傾向が確認できた。



(a) 上板 (b) 下板
図8 引張せん断試験後の破断面

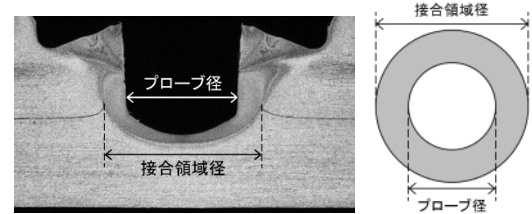


図9 計測箇所(左)と接合面積算出方法(右)

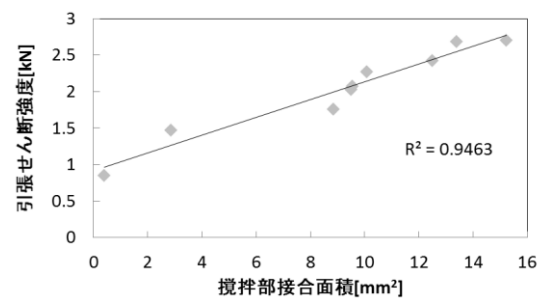


図10 引張せん断強度と攪拌部接合面積の関係

4. 結び

本研究では、FSSW においてツール先端形状が継手の機械的特性におよぼす影響について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) ツール先端形状によって接合強度に大きく差が出ることがわかった。
- (2) FSSW での接合強度の要因は接合部の攪拌部であることがわかり、攪拌部の接合面積と継手の接合強度には相関性があり、攪拌部接合面積が大きくなるほど強度が高くなる傾向が見られた。
- (3) 高強度な接合継手を実現するには、攪拌部を形成するために必要な板表面と直角方向の対流状の塑性流動を接合界面付近に発生させる必要がある。そのため、プローブへの逆ねじ加工と、塑性流動する材料を押しえこむ逆テーパ形状のショルダが必要だということがわかった。

文献

- 1) 社団法人溶接学会：摩擦攪拌接合 FSW のすべて、P222(2006)、産報出版