

研究論文

摩擦攪拌点接合継手の機械的特性に及ぼす

接合材の表面状態の影響

花井敦浩*1、清水彰子*2、津本宏樹*2、横山 博*2、古澤秀雄*2、
杉本貴紀*3、吉田陽子*3

Effect of Surface State of Welding Material on the Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welds

Atsuhiko HANAI*1, Akiko SHIMIZU*2, Hiroki TSUMOTO*2, Hiroshi YOKOYAMA*2,
Hideo FURUZAWA*2, Takanori SUGIMOTO*3 and Yoko YOSHIDA*3

Industrial Research Center*1*2 Research Support Department*3

摩擦攪拌点接合は固相接合であり、アルミニウム合金表面の強固な酸化皮膜の影響などが接合強度へ大きく影響を与えることが考えられ、摩擦攪拌点接合により高強度の継手を得るためには、接合材料の表面状態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、表面状態を変化させた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、接合材料の表面状態によって継手の接合強度に大きく差がでること、また、接合材料の酸化皮膜の厚みと接合強度には相関関係があり、酸化皮膜が薄い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、非熔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 継手の機械的特性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、接合する材料の表面状態に起因すると考えられ、FSSW を広く普及させるためには、接合材料の表面状態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、アルミニウム合金に表面処理を実施し、表面状態の異なる接合材料を作製し、FSSW により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。

2. 実験方法

2.1 接合

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

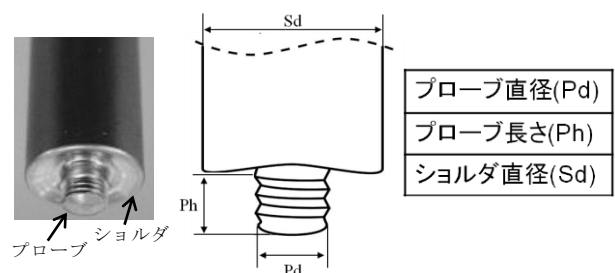


図 1 FSSW ツール

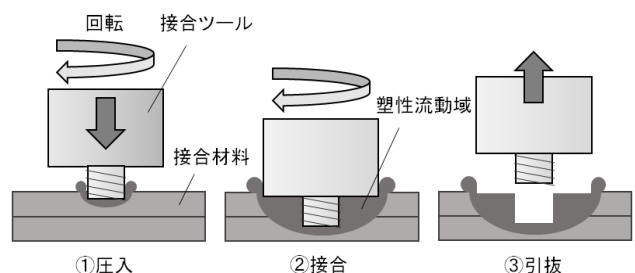


図 2 FSSW 模式図

*1 産業技術センター 金属材料室 (現産業労働部 産業振興課) *2 産業技術センター 金属材料室
*3 共同研究支援部 計測分析室

る。攪拌を行った後ツールを引き抜き接合が完了する。接合条件はツール回転速度 1,800rpm、挿入深さ 3.4mm、接合時間 3 秒で行った。接合にはフライス盤を用いた。

2.2 接合ツール及び供試材

接合に用いたツールは、プローブ直径 (Pd) 5mm、プローブ長さ (Ph) 3mm、プローブ部に左ねじ加工を施し、シオルダ直径 (Sd) 10mm のものを使用した。材質は高速度工具鋼 (SKH56) を使用し、硬さは HRC67~69 に調整した。接合に使用する表面処理を実施した供試材は、アルミニウム合金 (A5052-O、80×30×3mm) を用いた。2 枚の試料を 30×30mm 重ね合わせ、その中央に FSSW を施して試験片を作製した。

2.3 接合材料の表面処理

接合材料であるアルミニウム合金への表面処理としてショットブラスト、バフ研磨、陽極酸化処理を実施した。ショットブラストはショット材としてアルミナ (Al_2O_3) の#24 (粒径約 $750\mu m$) と#240 (粒径約 $70\mu m$) を使用した。バフ研磨は鏡面状態まで処理した。陽極酸化処理は硫酸法による処理により約 $60\mu m$ の酸化皮膜を付与した。表面処理は重ね合わせ接合の 2 枚の試料の合わせ面の両方に行った。

2.4 接合継手の評価

引張せん断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 (島津製作所社製 AG-100kNIS) を用いて、引張速度 5mm/min で行った。

接合部の断面組織は、接合部中央を切断して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。

2.5 接合材料の表面状態の評価

接合材料の表面状態の評価として、粗さ測定機 (テラーホブソン社製フォームタリサーフ S5) による粗さの計測と、オージェ電子分光装置 (日本電子社製 JAMP-9500F) による酸化皮膜状態の分析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 接合強度

引張せん断試験の結果を図 3 に示す。表面処理無しに比べてショットブラストを施したものは、粒径の大きいアルミナ#24 の場合は強度が 1.3 倍程度増加し、粒径の小さいアルミナ#240 の場合も若干強度が増加した。バフ研磨した場合も若干強度が上昇した。しかし、陽極酸化処理をした場合は表面処理無しに比べて著しく強度が低下した。これらの結果から、接合材料の表面状態が接合強度に影響を及ぼすことが確認できた。

3.2 組織観察

表面処理の異なる材料を用いて接合した試験片の接合

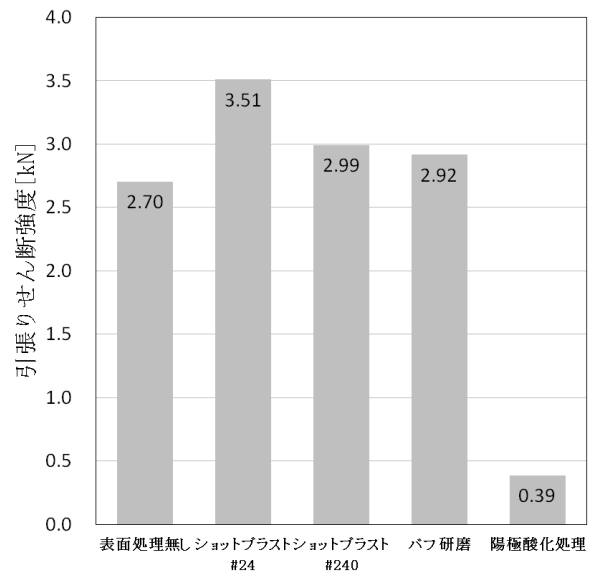


図 3 引張せん断試験結果

断面の組織観察の結果を図 4 に示す。FSSW の接合部では組織観察において、プローブ痕近傍で組織が微細化され変化している攪拌部という箇所がみられる²⁾。FSSW の接合原理より、逆ねじ加工を施したプローブにより、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¹⁾。表面処理無しやショットブラスト、バフ研磨を実施したものは接合部のツール痕近傍に組織が変化している攪拌部が確認でき、プローブの逆ねじ加工の効果により材料が攪拌され上板と下板が塑性流動により接合されていることがわかる。しかし、強度が著しく低下していた陽極酸化処理の場合、プローブの逆ねじ加工による塑性流動が下板まで達しておらず、上板部分のみが攪拌され良好な接合部が形成されていないことが確認できた。

また、図 4 の右側に示した各接合部の拡大写真により表面処理無しとショットブラスト、バフ研磨の接合部を比較すると、ツール痕近傍の攪拌部付近の上板と下板の界面の状態が、表面処理無しの条件では界面が上昇していないのに対し、ショットブラストとバフ研磨をしたものは界面が上昇している。ショットブラストやバフ研磨をすることにより接合材料の表面状態が変化し、攪拌部の塑性流動が促進され、プローブの逆ねじ加工の効果による攪拌部の対流状の塑性流動も促進されることで、上板と下板の界面を押し上げたと考えられる。つまり、接合材料の表面状態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。

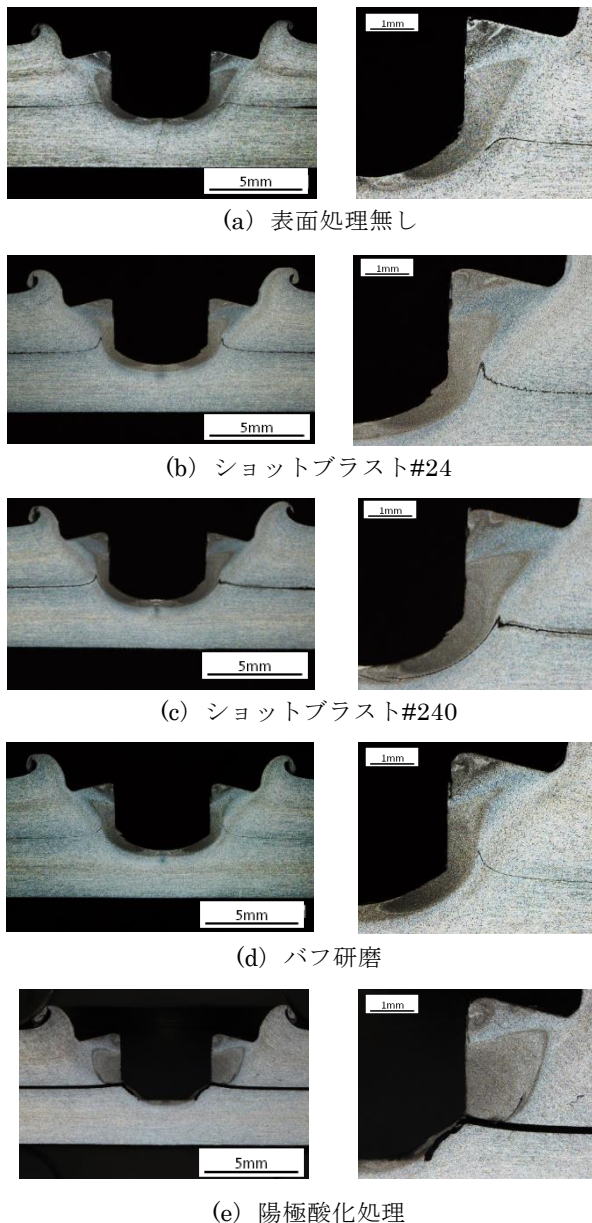


図4 組織観察結果（右：接合部拡大）

引張せん断試験後の破断面を図5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、攪拌により接合界面が消失している部分を攪拌接合領域として図6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接合部面積として算出した。算出した各接合継手の攪拌接合部面積と引張せん断強度の関係を調べた結果を図7に示す。攪拌接合部面積と引張せん断強度には相関性があり、攪拌接合部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。また、組織試験の結果より、ショットブラストやバフ研磨をした場合、ツール痕近傍

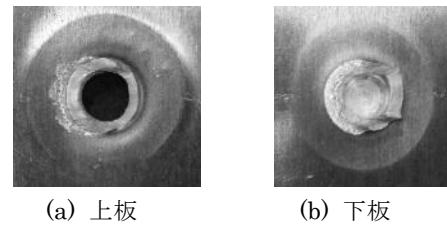


図5 引張せん断試験後の破断面

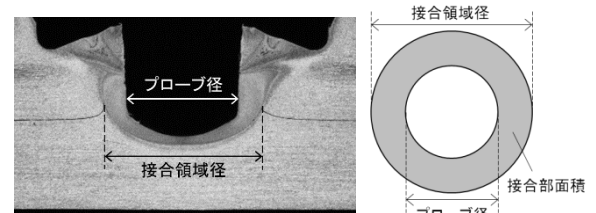


図6 計測箇所（左）と接合部面積算出方法（右）

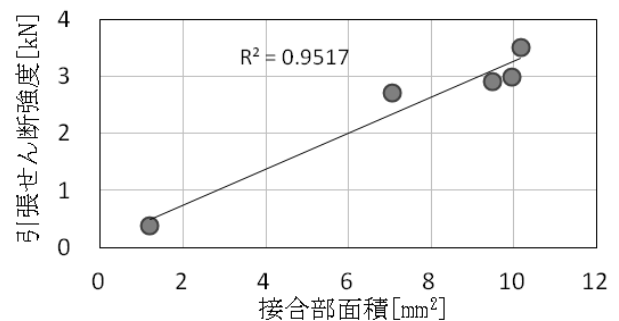


図7 引張せん断強度と攪拌接合部面積の関係

の攪拌部付近の上板と下板の界面が上昇しているため、接合部面積が増大し、強度が増加したと考えられる。

3.3 接合材料表面解析

接合材料の表面状態がどのような条件の場合に接合部の塑性流動に影響を与え、接合強度が変化するか解析するため、接合材料表面の酸化皮膜の状態の分析と粗さ測定を行った。

接合材料への各表面処理による表面酸化皮膜の状態をオージェ電子分光装置により分析した結果を表1に示す。得られた表面酸化皮膜の厚みと引張せん断強度の関係を調べた結果を図8に示す。酸化皮膜が薄いほど、接合強度が増加する傾向が示され、表面酸化皮膜の厚みと接合強度は相関関係があることが示唆された。

アルミニウムの表面酸化皮膜である酸化アルミニウム (Al_2O_3) は、硬くて高融点であり還元が難しい酸化物である。また、FSSW はツールと接合材料の摩擦熱により材料を軟化させ、塑性流動性を高めた状態で材料を攪拌し接合する固相接合である。このため、FSSW において接合界面に存在する酸化皮膜は接合時の摩擦熱での温度域では軟化することができず、接合部の塑性流動を妨げてしまう。このため、接合材料の酸化皮膜が薄

いほど、接合部の塑性流動が促進され攪拌部の接合面積が増加し、接合強度が増加したと考えられる。

表 1 表面酸化皮膜分析結果

表面処理	表面処理無し	ショットブラスト #24	ショットブラスト #240	バフ研磨	陽極酸化処理
酸化皮膜厚さ [μm]	0.072	0.013	0.009	0.015	68

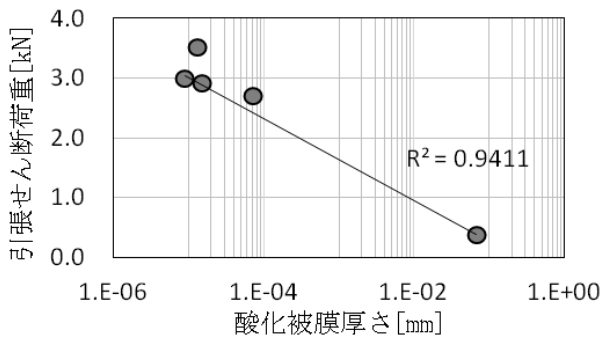


図 8 引張せん断強度と表面酸化皮膜厚さの関係

表 2 表面粗さ

表面処理	表面処理無し	ショットブラスト #24	ショットブラスト #240	バフ研磨
粗さRa[μm]	0.28	7.87	4.39	0.06

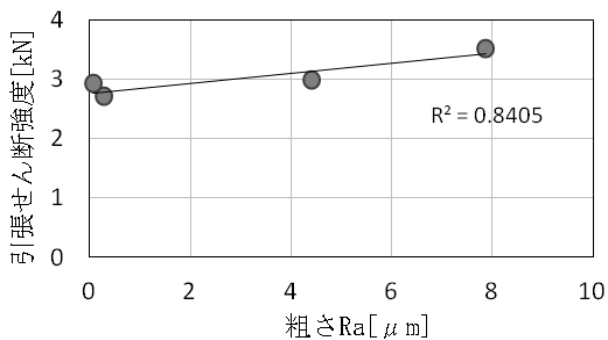


図 9 引張せん断強度と表面粗さの関係

表面処理による表面粗さの変化を狙ったショットブラストとバフ研磨を施した接合材料の表面粗さを測定した結果を表 2 に示す。粗さの指標として算術平均粗さ (Ra) を用いた。表面処理無しに比べてショットブラストした材料は表面の凹凸が激しく、粒径の大きいアルミナ#24 の場合の方が粒径の小さいアルミナ#240 の場合よりも粗さの数値が高かった。バフ研磨した材料は表面処理無しに比べて数値が下がっており表面が平滑になっていることがわかる。表面粗さと引張せん断強度の関係を調べた結果を図 9 に示す。粗さの数値が高いほど強度が高くなる可能性が示唆された。

4. 結び

本研究では、FSSW において接合材料の表面状態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) 表面状態で接合強度に大きく影響をおよぼすのは酸化皮膜の厚みであることがわかった。酸化皮膜が薄いほど、材料の塑性流動は促進され攪拌部の接合面積が増大し、強度が増加することがわかった。これは、アルミニウムの表面酸化皮膜である酸化アルミニウム (Al_2O_3) は硬くて高融点であり還元が難しく、FSSW におけるツールと接合材料の摩擦熱では酸化皮膜を軟化させることができず、接合部の塑性流動を妨げる作用をしているためと考えられる。
- (2) 接合材料の表面粗さの状態による接合強度への影響は、粗さの数値が高いほど強度が高くなる可能性が示唆された。

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
- 2) 花井、清水、津本、横山：あいち産業科学技術総合センター研究報告、4、18(2015)