

摩擦攪拌接合の異種材接合への応用（第1報）

水谷 予志生、足立 隆浩

Application of Friction Stir Welding to Dissimilar material Joining (I)

Yoshiki Mizutani and Takahiro Adachi

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：FSW）による異種材接合として、それぞれ板厚 3mm のアルミニウム展伸材（A6061-T6）と鋼板（SS400）との突き合わせ接合を試みた。ツールの回転数と移動速度を変化させて接合強度への影響を調査したところ、回転数が大きくなると接合面に割れが生じてしまった。移動速度については、速い方が接合強度が高くなる結果であったが、破面や断面形状を見ると設定通りの位置をツールが移動したのかどうか疑問が残る。鋼板側の破面には、アルミ合金のディンプルが観察されている箇所もあることから、理想的にはアルミの母材破断が起こる接合強度が得られると考えられる。

1. はじめに

自動車に代表される輸送機器では、低燃費と排ガスの低減を実現するため軽量化が不可欠である。そこで、鉄鋼材料からアルミニウム合金等軽金属材料への変更が活発に進められており、近年ますます使用される部品点数が増加している。それに伴い、アルミニウム合金同士、あるいはアルミと鉄等の接合の要望が増えており、さまざまな手法が開発・実用化されつつある。

その一つである摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：以降 FSW）技術^{1,2)}は、従来溶接が困難であったアルミニウム合金同士の接合を容易にし、かつ優れた機械的特性を有した接合法であることから、電車車両・自動車等の構造材に急速に実用化が進んできている³⁻⁷⁾。また、被接合材であるアルミニウム合金板を付き合わせて線接合するのが本来の FSW であるが、板材同士を上下に重ね合わせて点接合する摩擦点接合（Friction Spot Joining：以降 FSJ）⁸⁾と呼ばれる接合法も開発され、実用化が進んでいる。

しかし、FSW および FSJ による異種材接合については、研究室レベルでの報告例⁹⁻¹²⁾はあるが、実用化例はまだ少なく、接合方法、接合条件と接合強度の関係等不明な点は多い。本研究では、特に要望の高いアルミニウム合金板と鋼板との突き合わせ接合に着目し、接合条件と強度について調査することを目的とした。

2. 実験方法

本実験では、それぞれ 50×250×3mm の板状のアルミニウム展伸材（A6061-T6）と鋼板（SS400）を接合用試料とし、図1のようにツール進行方向の左側（AS側）に鉄、右側（RS側）にアルミを配して FSW を行った。FSW には、位置制御方式である自動摩擦溶接機（株式会社設備エンジニアリング社製、SHH204-718型）を使用した。本装置にはツールの冷却機構が付いておらず、エアブローのみとなっている。FSW ツールにはハイス鋼を用いて

おり、φ12mm のショルダー先端に M5 の逆ネジ状プローブ（長さ 2.5mm）が付いた形状となっている。ツールは前進角として 3°傾け、これを板厚 3mm に対し 2.7mm まで挿入する設定とした。このため、ツールのショルダー部が鋼板表面にごくわずかに侵入することになる。また、ツール挿入位置は、突き合わせ面よりアルミ側とし、プローブ側面にごくわずかに（約 0.2mm）だけ鋼板の側面に当たるように調整している。ツールの回転速度と移動速度を変化させ、接合強度への影響を調査した。

接合後の試料は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置（東芝 IT コントロールシステム（株）製、TOSCANER-32300μFD）により透過像を観察し、アルミへの鉄片の分散状況や欠陥の有無を観察した。その後、図2のように接合箇所が平行部に入るようにワイヤカッターを用いて引張試験片を作製し、万能試験機（Instron Corporation 製、5985 型）にてクロスヘッドスピード 5mm/min で引張強度を測定した。この時、図2のように FSW 時のバリはそのままにしている。比較として、A6061-T6 同士を FSW した試料についても同様に引張強度を測定した。引張試験後の破面観察および成分分析を実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分光法（SEM-EDS）にて行い、接合断面のマイクロ組織観察も行った。

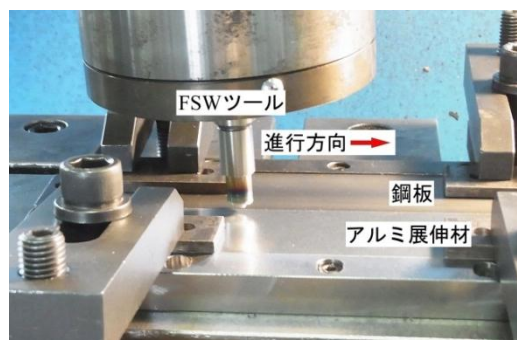


図1 FSW 実験装置図

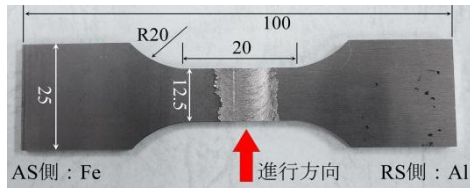


図2 引張試験片形状

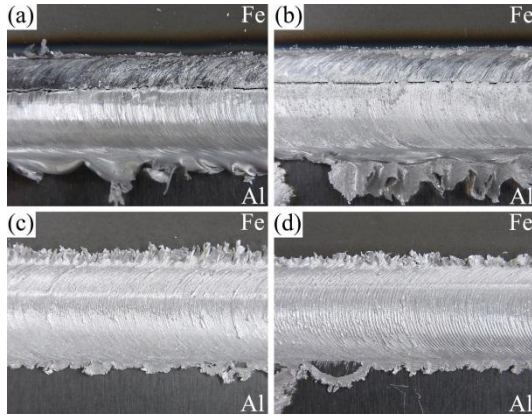


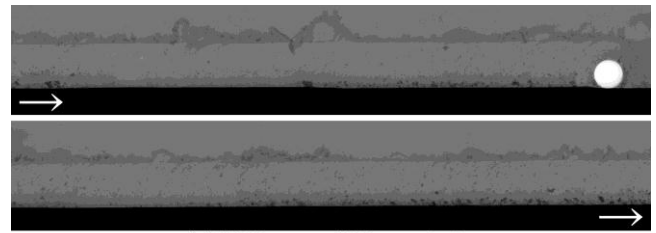
図3 FSW後の試料表面拡大写真

- (a) 2000rpm, 100mm/min、 (b) 1000rpm, 100mm/min、
 (c) 500rpm, 100mm/min、 (d) 500rpm, 200mm/min

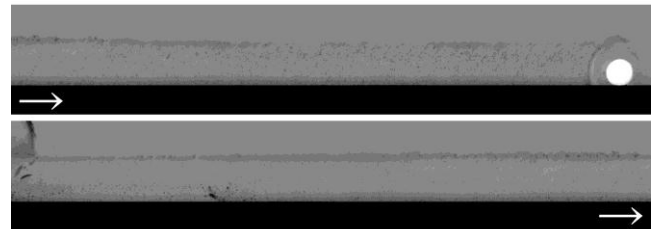
3. 結果及び考察

図3に、回転数500~2000rpmでFSWした場合の試料表面の拡大写真を示す。回転数2000rpmで加工した図3(a)では、接合時にアルミと鉄の境目に溝が生じてしまっており、良好な接合が得られなかった。また、回転数1000rpmの場合には、接合直後においては欠陥は見られなかったが、その後時間が経過すると図3(b)のように割れが生じてしまう場合もあった。回転数を500rpmに落とした場合には、図3(c)のように表面上には欠陥は見られなかった。本実験条件では、1000rpm以上の回転数では入熱量が過多であると考えられる。回転数500rpmのまま移動速度を200mm/minに上げた場合でも、図3(d)のように欠陥は見られなかった。

良好な接合外観が得られた回転数500rpmの試料について、内部欠陥の有無等を調べるためX線透過観察を行った結果を図4に示す。試料長250mmに対し、230mmに渡ってFSWした試料のほぼ全域を示している。ツールは下図左側から上図右にかけて移動しており、最終位置が右上に確認できる。いずれの試料も白く映る空洞のような内部欠陥は観察されなかった。一方、ツールのショルダー底面やプローブ側面が鋼板に当たっていることから、鉄がごくわずかに削られるようになっており、黒く映る鉄の小片がアルミの中に分散しているのが観察された。本実験では、図4(a)の移動速度100mm/minの方が大きい鉄片が分散していた。また、いずれの試料でもツールの移動に伴い、アルミ側への鉄片の分散が粗な部分と密な部分が存在していた。ツールの鋼板への侵入量が0.2mmとごくわずかな設定であるため、試料やツールの



(a)500rpm, 100mm/min



(b)500rpm, 200mm/min

図4 FSW後の試料のX線透視画像

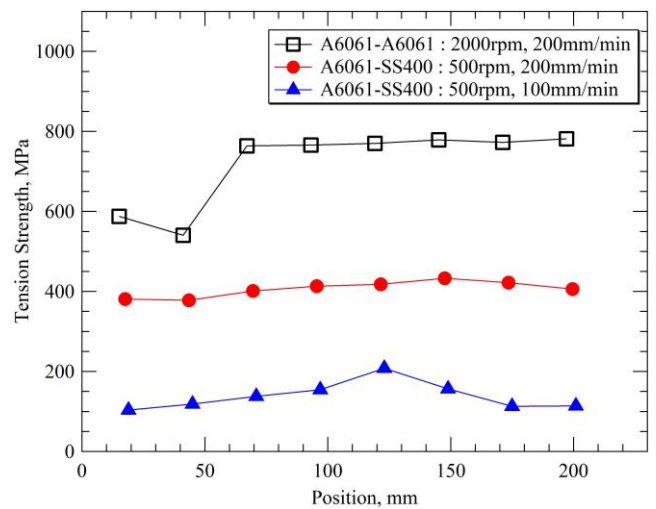


図5 FSW後の引張試験片採取位置と引張強度の関係

熱膨張やソリ、試料の固定位置のズレ、装置の剛性等によって、実際の侵入量に変化している可能性があり、これを反映しているのではないかと考えられる。

FSWを行った長さ230mmの接合試料から、図2の形状の引張試験片を8本作製し、万能試験機にて引張試験を行った。図5は、FSWの開始点を原点とした引張試験片の採取位置を横軸に、各位置での引張強度を縦軸にプロットしている。鉄とアルミの異種材接合については、回転数500rpm、移動速度はそれぞれ100と200mm/minでFSWした2つの試料について示す。比較としてA6061-T6同士を回転数1000rpm、移動速度200mm/minでFSWした試料についても同様に示した。破断位置は、アルミ同士では接合部の外側であったが、鉄とアルミの異種材FSWの場合はいずれも接合部の突き合わせ面であった。いずれの試料でも、FSWの初期では強度が低い傾向であり、特にアルミ同士の試料では初期段階とそれ以降で強度の差が大きかった。70mm以上FSWした後で

は強度が安定していたが、鉄とアルミを FSW したものはアルミ同士より大幅に低く、移動速度 200mm/min の試料では約半分、100mm/min の試料では約 1/4 以下の値であった。これらの強度が低かった原因を調べるため、引張試験後の破面を実体顕微鏡および SEM にて観察した。それぞれの試料で強度が最大であった試験片の鋼板側の破面について、実体顕微鏡によるマクロ写真を図 6 に示す。それぞれ、上側に FSW による加工痕が観察され、そこから (a) では約 1/4、(b) では約半分程度の領域でアルミと思われる銀色の物質が付着していた。それより下側では、鋼板素地の色および赤茶の鉄錆のような色が観察され、ほとんど接合されていないと考えられる。これと同じ試料を SEM で観察した結果を図 7 に示す。図 6 で最も銀色に見えた箇所には、(a) では約 150 μ m、(b) では約 750 μ m 程度の幅の帯状に、延性破壊を示すディンプルが観察される領域が存在していた。また、この領域のすぐ上側にはややフラットな面が存在し、最上部にはディンプル状の破面をもつ波状の領域が存在した。前者は鉄か Fe と Al の化合物であり、後者は FSW の塑性流動で SS400 の表面に付着したアルミではないかと思われる。これらの構成元素を確認するため、EDS による元素マッピングを行った結果を、それぞれ図 8、9 に示す。いずれもディンプルが観察された内部の帯状の箇所では Al が検出されていることから、鉄とアルミが強く結合され、アルミの母材側で破断した領域であると考えられる。また、図 8 の 100mm/min の試料では、このアルミの領域中に粒状の Fe が多数検出されている。これは、図 4 の X 線透過像で、(a) の 100mm/min の試料の方が黒い鉄の粒が多く観察されたことに合致する結果である。この鉄

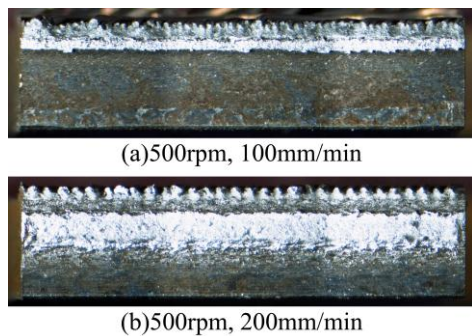


図 6 引張試験後の SS400 側の破面マクロ写真

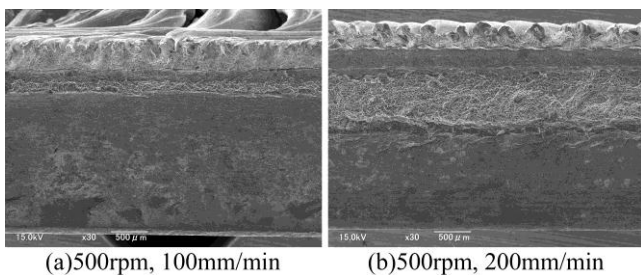


図 7 図 6 の破面の SEM 写真

片の周りでは Al も重なって検出されている領域があることから、反応して化合物ができていている可能性がある。この領域のすぐ上側のフラットな面には、主に Fe と O が検出され、一部 Al も検出されている。大部分が Fe で O も検出されていることから、破断位置は鉄とアルミの界面であり、この領域では Fe-Al の結合が弱いと考えられる。これらの結果から、ショルダー直下には Fe-Al の結合が弱い領域があり、その下側に強い結合の領域ができることが分かった。このさらに下側ではほぼ Fe と O が検出されただけであり、図 6 のマクロ写真からも鉄の素地および鉄錆であると思われる。この領域ではほとんど接合されておらず、接合強度に寄与していないと考えられる。そこで、鉄とアルミの接合が十分なされていたと思われる領域の面積を図 6 のマクロ写真から算出し、全ての領域でこのような接合がなされていたと仮定して図 5 の引張強度を補正すると、100mm/min の試料では約 570MPa、200mm/min の試料では約 630MPa となった。これは、アルミ同士の平均値である 720MPa の 8 割程度と

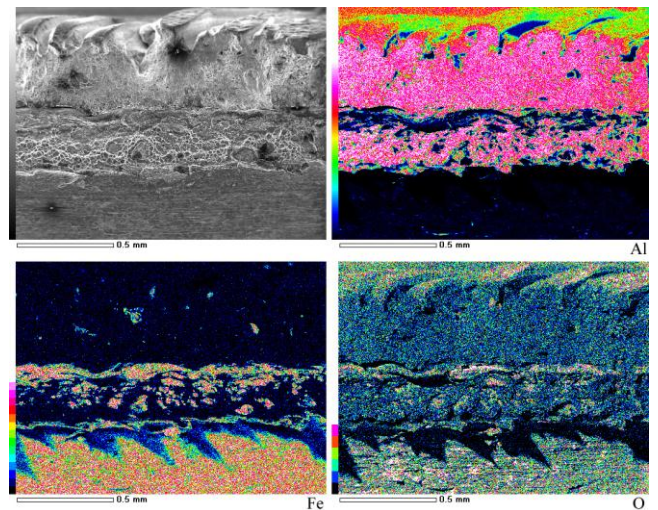


図 8 図 7 (a) の破面の EDS マッピング

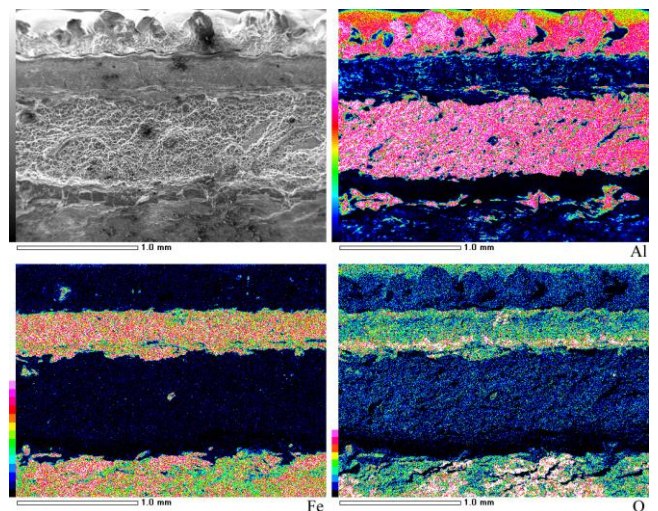


図 9 図 7 (b) の破面の EDS マッピング

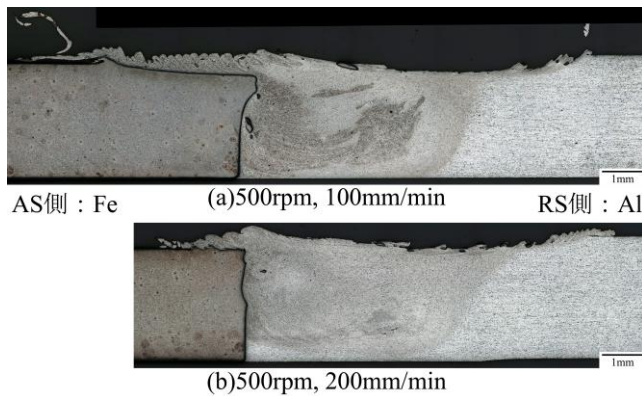


図10 FSW後の試料の断面マクロ組織

なり、理想的な接合が可能となれば、十分な強度が達成できるものと考えられる。今回、設定では板厚方向の9割までプローブが侵入し、鋼板の側面を削るはずが、結果では約1/4から半分程度しか接触していないように見える。そこで、実際にツールが侵入した量を調べるため、この2種類の試料について断面観察を行った。

図10にFSW加工位置が130mm付近の断面のマクロ組織を示す。この図では、紙面手前から奥に向かってツールが移動しており、図中左側がAS側でSS400となり、右側がA6061となっている。図10(a)に示した移動速度が100mm/minの試料では、鋼板の表面にツールショルダーが約270 μ m侵入し、その分塑性変形した鉄がアルミ側に押し出されるような形状になっている。このため、プローブにはアルミ側に押されるような力が働き、張り出した鉄の下側を削ることができなかったのではないかと考えられる。一方、図10(b)の200mm/minの鋼板の表面側は、若干波打っただけでショルダー全体が侵入してはいなかった。また、側面側は最大0.1mmの幅で深さ1.4mm程度が削られたようになっているが、プローブの長さ2.5mmには達していない。加工条件の設定に起因するもの、あるいは試料やツールの熱膨張やソリ、装置の剛性等によって実際の侵入量に変化した可能性が考えられる。この原因を調査し、設定通りの加工が行えるような条件を調査することが課題である。

4. まとめ

FSWによる異種材接合として、板厚3mmのアルミニウム展伸材(A6061-T6)と鋼板(SS400)との突き合わせ接合を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 回転数500~2000rpmでFSWを行ったところ、回転数1000rpm以上ではクラックが発生してしまった。低回転数の500rpmではこのような欠陥は発生しなかったことから、入熱量が多すぎると接合不良になることが分かった。
- 2) 本実験で異種材を回転数500rpmでFSWした試料の引張強度は、アルミ同士をFSWしたものの半分程度しか得られなかった。この破面および断面組織を見ると、ツールのプローブ側面が鋼板の側面に十分に当たっていなかったことが分かった。
- 3) 接合に寄与していたと思われる箇所の面積で強度を補正すると、アルミ同士の8割程度の値となった。理想的な接合が可能となれば十分な強度が達成できるものと考えられ、加工条件の最適化が課題である。

【参考文献】

- 1) 佐藤ら, まてりあ, Vol.42, pp.214-220, 2003
- 2) 藤井, 金属, Vol.83, pp.5-10, 2013
- 3) 福田, 金属, 73, pp.330-335, 2003
- 4) 酒井, 軽金属, 56, pp.584-587, 2006
- 5) 玄道ら, 日本金属学会誌, 70, pp.870-873, 2006
- 6) 江角ら, 金属, Vol.83, pp.25-33, 2013
- 7) 篠田, 軽金属, 64, pp.196-202, 2014
- 8) 藤本, 金属, Vol.83, pp.11-16, 2013
- 9) 福本ら, 溶接学会論文集, 22, pp.309-314, 2004
- 10) 安井ら, 溶接学会論文集, 23, pp.469-475, 2005
- 11) 時末ら, FSWの基礎と応用, 日刊工業新聞社, pp.40-44, 2005
- 12) 宮川ら, 溶接学会論文集, 26, pp.42-47, 2008