

テーラードブランク材の加工技術に関する試験研究事業(第 1 報)

行武栄太郎* 磯山 亮* 上田 聖* 早乙女秀丸* 石川裕理* 齋藤和哉* 山下 宏**

1. はじめに

近年、高機能化が求められる家電製品は、使用環境（強度、成形性、耐食性等）に応じ異種材料を用いたマルチマテリアルによる製品設計が行われている。また自動車業界では、異種金属材料を接合後に成形加工する技術開発が盛んで、鉄系材料において実用化されている。しかし、軽金属材料であるアルミニウム合金、マグネシウム合金においては実用化事例がない。今後、軽金属材料を用いた異種金属との組合せによる重量、強度の最適化により製品の更なる軽量化が進められると思われる。

2. 目的

テーラードブランク材は、板厚や材質の異なる板材を接合し 1 枚にしたものである。その接合方法は溶融溶接 (YAG レーザー, TIG 等) が一般的であるが、融点の異なる異種金属の接合は困難である。

本研究事業では、初めに異種金属接合を可能とする摩擦攪拌接合 (FSW) を用いて、軽金属材料 (マグネシウム合金, アルミニウム合金等) のテーラードブランク材を作製する。続いて異材接合に適した摩擦攪拌接合ブロー成形技術を適応することで、表面状態が平滑でない素材での 3 次元成形加工を目指す。

3. 研究内容

3.1 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合は、中心部に突起 (プローブ) のある回転ツールを、高速で回転させながら被加工材へ挿入し、接合部に沿ってツールを移動させ接合する方法で、固相状態での接合が可能である。その結果、凝固割れがなく、熱ひずみも小さい特徴がある。摩擦攪拌接合の原理を図 1 に示す。ツール移動方向とツール回転方向が一致する側を AS、ツール回転方向が一致しない側を RS と呼ぶ。

ツール材質は SKD61 とし、ショルダ径 $\phi 20\text{mm}$ 、ショルダ角 4° 、プローブ径 $\phi 6\text{mm}$ 、長さ 1.8mm を用いた。プローブには M6 のネジ加工を施した。接合条件は回転数 500rpm, 1000rpm, 1500rpm の 3 条件、接合速度 5mm/sec, 10mm/sec, 20mm/sec の 3 条件とした。ツール接触後の予熱時間は 10sec, ツール角度は前進角度約 3° とし摩擦攪拌接合を行った。なお、プローブ挿入量は、バックプレートから 0.1mm の深さまで挿入し接合した。接合方向は圧延方向と平行 (圧延方向同士を向い合せに突き合せたもの) とした。なお、接合部表面は研削せず接合したままの状態とした。摩擦攪拌接合には日東制機株式会社 FF-20IV-FSW を用いた。

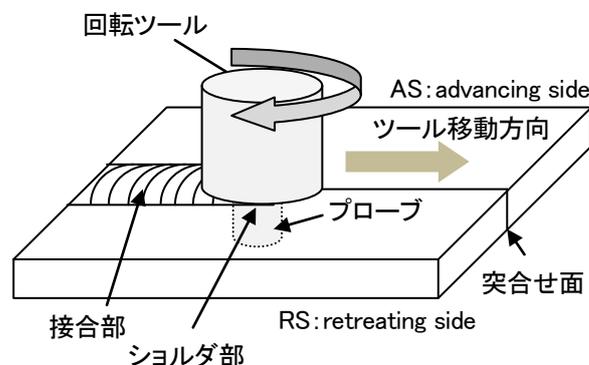


図 1 摩擦攪拌接合の原理

3.2 回転ツール形状の検討

回転ツールは様々な形状が提案されているが、攪拌能力を評価するためには、数多くのツールを試作する必要があり、費用および時間が負担となる。

今回、効率よくツール形状の絞り込みを行う方法として、3D プリント (Stratasys 社 Objet 30 Pro) による試作を試みた。本装置はインクジェット方式で、材料となる液状の紫外線硬化型アクリル系樹脂を XY 平面上に射出し、その直後に紫外線を照射することにより材料を硬化させる。

3.3 供試材

アルミニウム合金には一般市販材料である A5052 - H34 の圧延材 (板厚 2.0mm, 表面研磨済み)、マグネシウム合金には日本金属社製難燃性マグネシウム合金 (板厚 2.0mm, 表面研磨済み) 圧延材を用いた。表 1 に AZX411 の化学組成を示す。

表 1 化学組成 (mass%)

	Al	Zn	Mn	Si	Ca	Mg
AZX411	3.85	0.99	0.2	0.02	1.1	Bal

各供試材は幅 70mm, 長さ 300 mm の寸法とし、接合後は幅 140 mm, 長さ 300mm の接合部材として評価した。圧延方向はすべての接合条件で長さ方向 (接合方向) として摩擦攪拌接合を評価した。

3.3 組織観察, 硬さ試験, 引張試験

接合部の評価は、組織観察, 硬さ試験, 引張試験を行った。引張試験片は接合方向と垂直方向から 5 本採取した (図 2)。接合方向と垂直方向に引張試験片平行部が向くように切り抜き加工を行い、切り抜き面をエメリー紙 #1500 で研磨した。平行部長さは接合部を含み 60mm とし、平行部幅は 12.5mm とした。

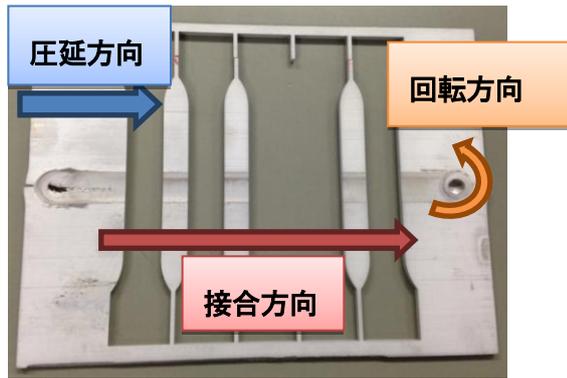


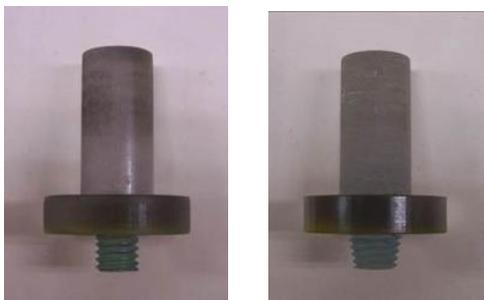
図2 引張試験片採取方法

4. 研究結果と考察

4.1 試作ツールの評価

図3に試作したツールの例を示す。ツールのチャック部は金属ツールと同様の $\phi 20$ とし、ツール先端のプローブ部およびシオルダ部は各般の様子を確認しやすくするため、通常用いている金属ツールの2倍の大きさとした。図3の例では、シオルダ角 4° 、プローブ長さ10mmに固定とし、プローブ形状はM12のネジ形状にテーパ角を 0° と 10° としている。

評価試験は試作ツールを摩擦攪拌接合装置に取付け、被接合材は厚み15mmの2色の粘土を用いて摩擦攪拌接合を擬似的に表現し、攪拌の様子を観察した(図5)。試験時の接合条件は、ツール回転数100rpm、ツールの移動速度1mm/sec、前進角度約 3° とした。



(a) テーパなし (b) テーパ 10°

図3 試作ツール

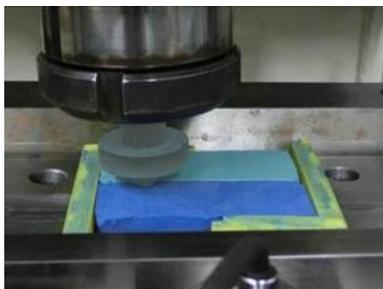
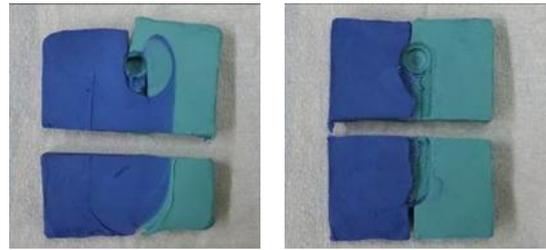


図4 模擬試験の様子

図5に試験後の粘土の様子を示す。図5(a)のテーパなしのツールでの実験では、ツール部およびシオルダ部も良好に攪拌されている様子が確認できる。図5(b)のテーパ 10° のツールでの実験では、攪拌領域が狭く、突き合せ面(接合部)の攪拌領域が狭いと同時に、入熱不足で発生する溝状の欠陥が観

察された。これらの試作したツールでの模擬試験の結果よりツール形状を選定し、研究を進めた。



(a) 良好



(b) 不良

図5 摩擦攪拌接合の模擬試験結果

4.2 摩擦攪拌接合

一般的に摩擦攪拌接合技術を用いた異種材料接合では、塑性流動性が高い材料をAS側に配置するが、本研究では、マグネシウム合金と比べ塑性流動特性の高いアルミニウム合金をAS側へ配置するとほとんどの条件で接合ができないことが確認された。接合可能な配置は、マグネシウム合金をAS側、アルミニウム合金をRS側に配置した場合のみである。この原因として、温間での塑性流動特性が室温と大きく異なることが考えられる。マグネシウム合金の場合、室温での塑性変形特性はアルミニウム合金と比べ低い、 200°C 以上では大きく向上し、 300°C 近傍ではアルミニウム合金と同等以上となる。本研究では、接合時の摩擦攪拌部温度が 300°C 以上を示しており、これが起因しマグネシウム合金をAS側に配置することで接合が成功したと考えられる。

4.3 接合部観察

図6に回転数1500rpmで、接合速度10mm/sec、20mm/secでの接合後の外観観察写真を示す。接合部表面は一般的な摩擦攪拌接合部であり、円弧状の連続した摩擦攪拌接合痕が観察されるが、接合速度を大きくすると直線状の大きな欠陥が観察された。

この直線状の溝欠陥は一般的に入熱不足(回転数が小さい、速度が速い)で観察され、本研究でも同様に、接合速度を速くして入熱量を小さくすると溝状の欠陥が観察された。異種材料の接合においても同様な欠陥の発生が確認された。よって、入熱量を大きくするために、回転数3000rpm、接合速度20mm/secで接合試験を行ったが、外観からも判断できる大きな溝状欠陥が観察され、接合が困難であった。また、これら直線的な溝欠陥は各条件下において、RS側に観察された。これは、粘土を用いて評価した場合と同様な形状の欠陥が観察された。よって、材料の攪拌不足が一因と考えられる。

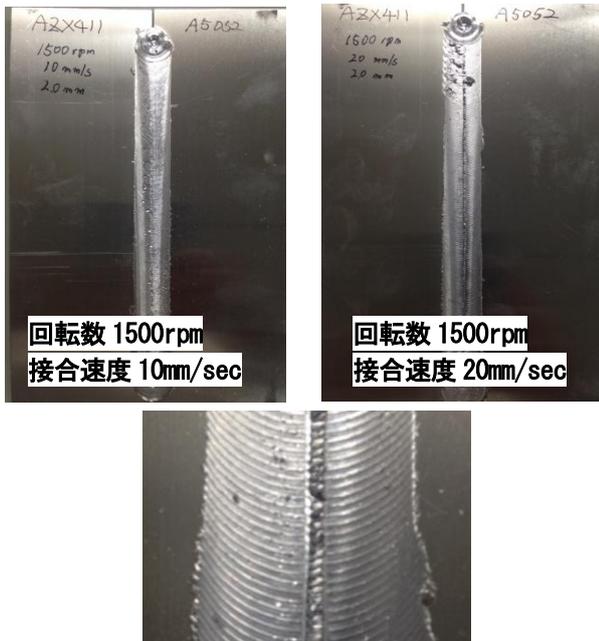


図6 接合部観察結果

図7に走査型電子顕微鏡で観察した接合部断面写真を示す(接合条件:回転数1000rpm,接合速度10mm/sec)。接合部中心では、マグネシウム合金とアルミニウム合金が混ざり合っている様子が観察された。しかし、接合開始部では、RS側に内部欠陥が観察された。接合端部では内部欠陥は観察されない。

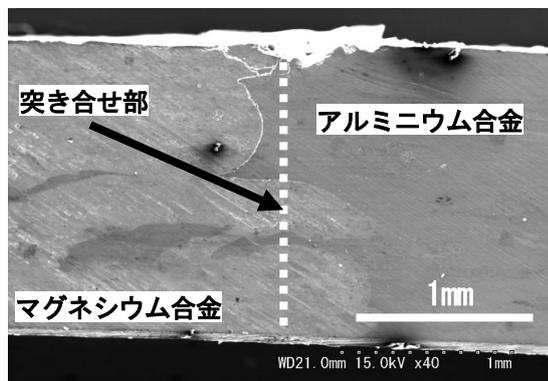


図7 接合部断面写真

また、接合ツールとの接触面からアルミニウム合金とマグネシウム合金との接合界面にクラックが観察された。このクラックは接合中に発生したものとは異なり、接合後(接合終了数秒後)に発生が確認された。これは、アルミニウム合金とマグネシウム合金との熱膨張率の差が起因していると考えられる。図8に図7で示した接合部におけるMg元素の成分分析結果を示す。接合ツールによりMg元素がアルミニウム合金側へ攪拌され混ざり合っている様子が観察された。また、Al元素についても同様にマグネシウム合金側へ攪拌されていることが確認されたことから、2つの合金は摩擦攪拌接合により大きな塑性流動を伴い接合されたと考えられる。しかし、接合界面(Mg元素, Al元素界面)での各元素の拡散現

象については詳細検討が必要である。

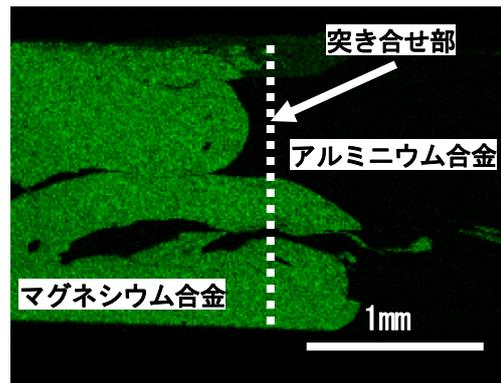


図8 Mg元素の成分分析結果

図9に摩擦攪拌接合部のマグネシウム合金側における組織観察結果を示す。観察には光学顕微鏡を用いた。摩擦攪拌中心部ではプローブによる大きな塑性変形と摩擦発熱(300°C以上)による動的な再結晶10μm以下の等軸再結晶粒が観察された。さらに内部を観察したところ約10nmの球状のMnが粒内に分散していることが観察された。アルミニウム合金側でも同様に微細な結晶粒が観察された。今後、摩擦攪拌部における化合物、粒内析出物、結晶方位等の詳細検討を進める予定である。

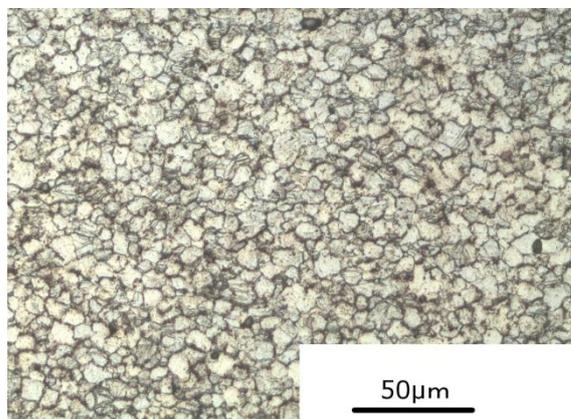


図9 接合部のマグネシウム合金側の組織観察結果

4.4 硬さ試験

図10に摩擦攪拌接合部の接合方向に対して垂直断面の硬さ試験結果(接合条件:回転数1000rpm,接合速度10mm/sec)を示す。硬さ試験は接合中心部(付き合せ面)から0.5mm間隔で測定した。また、板厚方向には板厚中央で測定した。

摩擦攪拌接合中心部では、ショルダ接触部では母材に比べ硬さが低下している。これは、摩擦熱により再結晶し軟化したことが考えられるが、アルミニウム合金とマグネシウム合金で低下の幅が異なるのは、マグネシウム合金の結晶粒微細化による効果が考えられる。さらに、図9で観察された微細なMn粒子が起因していると考えられ、詳細な検討が必要

である。また、アルミニウム合金側の摩擦攪拌中央部で硬さが大きく向上している箇所がある。これは、Al と Mg との金属間化合物が生成されたと考えられる。そこで、X線回折 (株式会社 SmartLab) により解析を行ったが、攪拌部中央より顕著な金属間化合物の回折は確認はできなかった。今後は測定範囲を接合界面近傍 (アルミニウム合金とマグネシウム合金の境界部) とし、詳細な検討を進めたい。

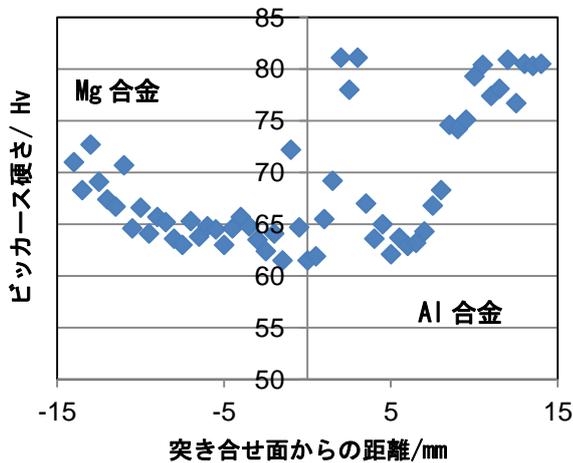


図 10 接合部の垂直断面の硬さ試験結果

4.5 接合部内部欠陥観察

X線CT装置 (ヤマト科学株式会社 TDM3000H-FP) により接合部内部を観察した。さらに、異種材料接合のため X線透過率が材料毎に異なり、そのコントラストを利用して突き合せ部の摩擦攪拌状態を観察した。図 11 に欠陥部を観察した結果を示す。外部からも観察された直線状の溝状の欠陥が観察された。これは、外部から欠陥が観察されなかったが、内部観察を行うことで、管状のワームホールが観察された。管状欠陥は溝状欠陥と同様に AS 側での発生が確認された。この欠陥はツール回転数 1000rpm, 接合速度 30mm/sec で発生しており、入熱不足が原因と考えられる。

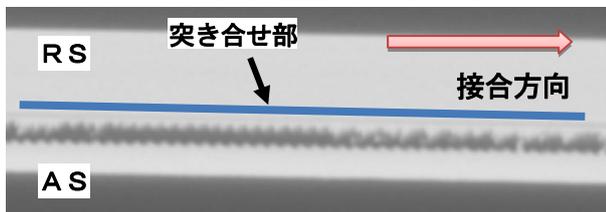


図 11 接合部内部の X線 CT 観察結果

図 12 に各種材料のコントラストを利用して突き合せ面の攪拌状態を観察した結果を示す。接合攪拌部では材料が複雑に混じり合っていることが観察された。今後は接合部の攪拌状態が接合強度に及ぼす影響及び接合条件 (回転数, 接合速度) による攪拌状態への影響を検討したい。

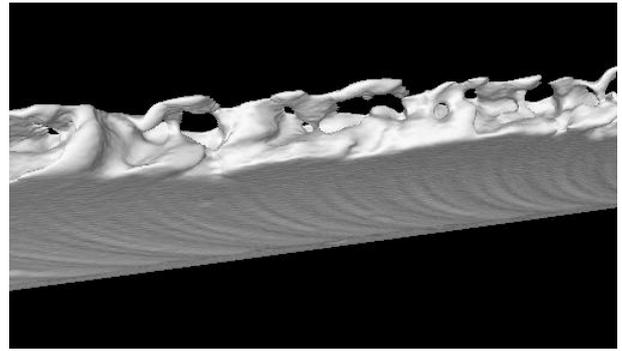


図 12 攪拌状態を観察した結果

4.6 接合部引張試験

各種条件で接合した接合部材の引張強度試験では、ほとんどの場合で、継手効率 50%以下であり、図 7 に示すように、接合後のクラックが原因と考えられる。そこで、外観が健全で、内部欠陥の無い接合条件を調査した結果、回転数 500rpm, 接合速度 5mm/sec で継手効率 70%以上を示した。しかし、接合部表面形状は粗く、ささくれのような外観を示した。図 13 に回転数 500rpm, 接合速度 5 mm/sec での接合部表面を示す。



図 13 接合部表面

5. まとめ

- ・ 3D プリンターにより試作した接合ツールで摩擦攪拌接合状態を粘土により模擬できた。
- ・ 難燃性マグネシウム合金 (AZX411) とアルミニウム合金 (A5052-H34) との接合に成功した。
- ・ ツール回転数 500rpm, 接合速度 5 mm/sec で継手効率 70%以上の摩擦攪拌接合を実現した。
- ・ 攪拌部では異種材料が複雑に混ざり合い接合されていることが確認できた。

6. 今後の予定

マグネシウム合金, アルミニウム合金等の軽金属異種材料において継手効率 80%以上を有するテーラードブランク材を作製し、接合部材による 3次元成形 (プレス加工) の可能性を検討する。