

## 研究論文

# 摩擦攪拌点接合による異種アルミニウム合金継手の 機械的特性に関する研究

徳田宙瑛<sup>\*1</sup>、横山 博<sup>\*1</sup>、清水彰子<sup>\*1</sup>、児玉英也<sup>\*2</sup>、杉本貴紀<sup>\*3</sup>、吉田陽子<sup>\*3</sup>

## Research on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Different Aluminum Alloy

Hiroaki TOKUDA<sup>\*1</sup>, Hiroshi YOKOYAMA<sup>\*1</sup>, Akiko SHIMIZU<sup>\*1</sup>, Hideya KODAMA<sup>\*2</sup>,  
Takanori SUGIMOTO<sup>\*3</sup> and Yoko YOSHIDA<sup>\*3</sup>

Industrial Research Center<sup>\*1\*2</sup> Research Support Department<sup>\*3</sup>

A5052 と A2024 のアルミニウム合金を組合せて摩擦攪拌点接合を実施し、得られた接合継手について、機械的特性の1つであるせん断強度を測定した。その結果、上板に A5052、下板に A2024 を組合せ、ツール挿入深さ 5mm、ツール回転速度 900rpm の条件で接合した継手において、せん断強度 7.79kN で最大となった。また、この継手の接合断面の硬さ試験を実施したところ、摩擦熱の影響により、結晶粒が微細化され A5052 の領域で硬さが上昇する一方で、A2024 の領域で硬さが低下することが明らかとなった。さらに、接合部断面を金属顕微鏡で観察することにより、点接合に用いたアルミニウム合金の塑性流動による外観の変化を観察することができた。

### 1. はじめに

摩擦攪拌接合は、1991年にイギリスの溶接技術研究所(TWD)で発明された固相接合法の1つであり、ツールと呼ばれる棒状の工具を高速で回転させながら材料に挿入させ、材料を熔融させることなく摩擦熱を利用して接合する方法である。熔融接合と比べ変形が少なく、欠陥・割れなどが発生しにくいなど<sup>1)</sup>、今後幅広い分野での利用が期待されている。さらに、近年では輸送機器を中心に軽量化、燃費向上を目的にアルミニウム合金等の軽金属材料の利用が増えており、摩擦攪拌接合はこれらの接合に有効な方法として注目されている<sup>2)</sup>。最近では強度、加工性、耐食性等の特徴を生かして用途に応じた異なる材料の接合に用いられるケースが増えており、アルミニウム合金も例外でない。産業界では A5052 や A2024 が広く使われている。

A5052 は、流通量も多く代表的なアルミニウム合金でマグネシウムの固溶により中程度の強度を持ち、耐食性、成形性、溶解性に優れ、自動車のメータ表示板、各種カバー類などに用いられる。

A2024 は、超ジュラルミンと呼ばれる高強度材で、銅を多く添加し、熱処理を行うことで高強度にした合金であり、切削性、耐摩耗性に優れることから、自動車のステアリングホイールなど構造材料として用いられる<sup>3)</sup>。

しかしながら、耐食性、溶接性等に劣ることから、適用分野は限られている。

耐食性に優れ、高い強度を持ち合わせたアルミニウム合金は少ないものの、高強度の A2024 と展伸性、耐食性に優れた A1230 を熱間圧延させて製造される合わせ材 A2024PC は、航空機用部材として使われるなど、複数のアルミニウム合金を合わせて使用している<sup>4)</sup>が、コストが高い。

一方、摩擦攪拌点接合は省エネルギー、設備投資の低減効果からアルミニウム等の接合で注目されているが、異種アルミニウム合金の点接合によるそれぞれの長所を持ち合わせた合わせ材の報告事例は少ない。そこで、本研究では、異種アルミニウム合金の輸送用部材、建材等の開発を目的に、摩擦攪拌点接合を行い、ツール回転速度、ツール挿入深さをパラメータとし、最大の強度が得られる最適条件を模索した。また、最大強度が得られた継手の断面の硬さ試験及び金属組織観察を行い、接合状態を観察した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 接合条件

摩擦攪拌点接合は 5 軸摩擦攪拌接合装置(東海テクノ社製)を使用した。接合条件は表 1 に示す条件で行い、

ツール挿入速度は 10mm/min、接合時間は 3 秒とした。接合時に装置にかかる加圧力をデータロガーにより記録し解析を行った。

表 1 接合条件

ツール挿入深さ(mm)	4.0, 4.5, 5.0
ツール回転速度(rpm)	900, 1320, 1800

## 2.2 接合ツール

接合に利用したツールを図 1 に示す。ツールの材質は SKH56 相当の高速工具鋼で、硬さが HRC67~69 になるよう熱処理を施したものを使用した。ツール寸法は、ショルダ径 10mm、プローブ部は M5、ねじピッチ 0.5mm の左ねじ加工を施した。プローブ長さは 3mm とした。ショルダの部分はわずかに中心に向かって下がっている逆テーパ型を使用した。

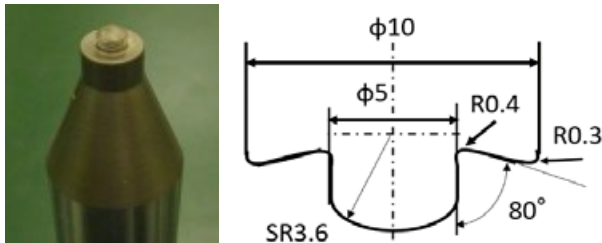


図 1 摩擦攪拌接合に用いたツール

## 2.3 供試材

供試材は、次の 2 種類のアリミニウム合金である<sup>5)</sup>。

①A5052-O (焼きなまししたもの：以下 A5052)

②A2024-T3 (溶体化処理後冷間加工を行い自然時効させたもの：以下 A2024)

試料は、幅 30mm、長さ 80mm、板厚 3mm の短冊状に切断したものを使用した。A5052 及び A2024 を、組合せを変えて 30×30mm の範囲で重ね合わせ、その中央部で点接合を行った。

供試材としたアリミニウム合金の引張強さを JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法)5 号試験片にて測定するとともに、マイクロビッカース硬度計にて硬さ試験を行った。

## 2.4 接合継手の評価

接合継手は、JIS Z 3136 (抵抗スポット及びプロジェクトン溶接継手のせん断試験に対する試験片寸法及び試験方法)に準ずる方法により機械的特性を評価した。せん断試験は万能試験機を用い、試験速度 5mm/min で行った。せん断強度は 1 条件につき 3 本測定を行い、平均値で評価した。接合部の断面組織は、接合部中央を切断して樹脂に埋め込み、バフにより鏡面仕上げをした後、金属顕微鏡により観察した。表面の硬さ測定にはマ

イクロビッカース硬さ計を用いた。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 供試材の引張試験

供試材として用いたアリミニウム合金の引張強さ、ビッカース硬さの測定結果を表 2 に示す。A2024 の引張強さは JIS H 4000 (アリミニウム及びアリミニウム合金の板及び条)の規格範囲内であったが、A5052 は規格より高い値であった。

表 2 使用したアリミニウム合金板の物性

	引張強さ (MPa)	ビッカース硬さ(HV0.1)
A5052-O	248	55
A2024-T3	488	146

### 3.2 せん断強度

摩擦攪拌点接合継手の強度は、ツール回転速度、ツール挿入深さに影響することが知られている<sup>6)</sup>。

接合継手のせん断試験の結果について、ツール回転速度をパラメータとして実験条件の中間値である 1320rpm 一定で、ツール挿入深さを変えたときのせん断強度の違いを図 2 に示す。異種材料の接合を行った場合、ツール挿入深さが深いほど、せん断強度は高くなった。

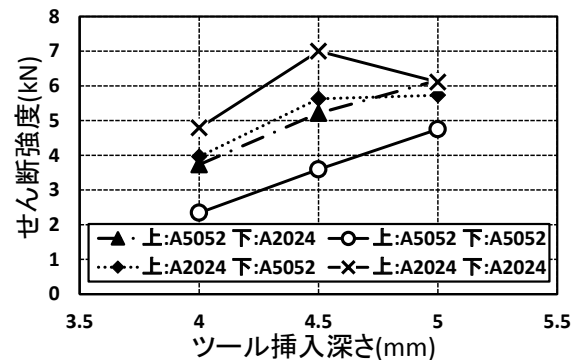


図 2 せん断試験結果(ツール回転速度 1320rpm)

図 2 よりツール回転速度 1320rpm 一定でツール挿入深さが 4.5mm の場合、4.0mm のときに比べてせん断強度が高くなった。これはツールの挿入深さが大きくなることで、より広い領域で塑性流動が生じたためと考えられる。

一方、ツール挿入深さ 4.5mm と 5.0mm を比較すると A2024 同士では 5.0mm でせん断強度が低下した。一般に、ツール挿入深さが大きくなれば、摩擦熱が増加し塑性流動が生じやすくなる。しかし、一定量以上の摩擦熱では塑性流動の発生が頭打ちとなり、また、A2024 は熱処理型合金であることから、過剰な入熱による強度低下が生じたと考えられる。

異種材料との接合で最大せん断強度が得られたツール挿入深さ 5mm 一定でツール回転速度とせん断強度の関係を図 3 に示す。

上板に A5052、下板に A2024 の組合せで、ツール回転速度 900rpm の条件で、本実験範囲で最大となる 7.79kN のせん断強度を示した。

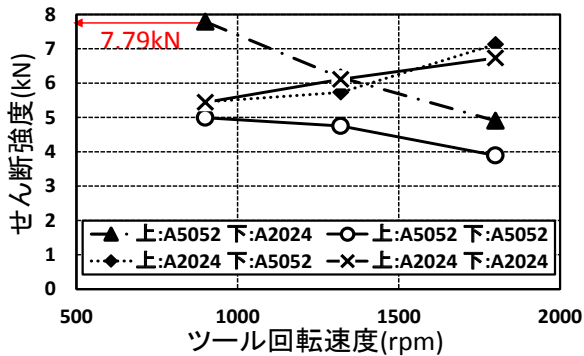


図 3 せん断試験結果(ツール挿入深さ 5mm)

上板を A5052 としたときは、ツール回転速度が速くなるほど、せん断強度は低くなった。上板を A2024 としたときは、ツール回転速度が速くなるほど、せん断強度は高くなった。

図 4 にツール挿入深さ 5mm におけるツール回転速度とツール挿入時にかかる圧力(最大加圧力)の関係を示す。A2024 を上板としたときは、ツール回転速度が大きくなるほど、最大加圧力が小さくなる傾向になる。ツール回転速度が大きくなることで塑性流動が促され、材料の軟化により最大加圧力が低くなると考えられる。一方、A5052 を上板としたときは、ツール回転速度に関わらず、最大加圧力はほぼ一定となった。いずれの場合も、上板の合金の種類が同じであればその傾向はほぼ同等であった。

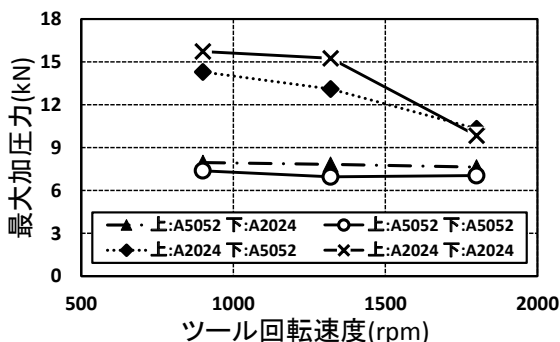


図 4 ツール回転速度と加圧力との関係  
(ツール挿入深さ : 5mm)

加圧力と時間の経時変化を図 5 に示す。ツール挿入速度は 10mm/min、停留時間は 3 秒である。ツールの先端がアルミニウムに接触した時間を 0 とした。加圧力は 25~30 秒で最大値となっていることから、ツールの先端が 4~5mm 挿入したとき、すなわち下板に 1~

2mm 到達しているときに最大加圧力となっていると考えられる。またツールが深さ 5mm に到達し、停留した後に加圧力が下がっている。これは摩擦熱により塑性流動が生じアルミニウムが軟化したためと考えられる。

異種アルミニウム同士の接合時の加圧力は、上板に使用したアルミニウムの材質と同種のアルミニウムの接合時の経時変化と似る傾向があり、下板の種類は加圧力にほとんど影響を受けないことが明らかとなった。

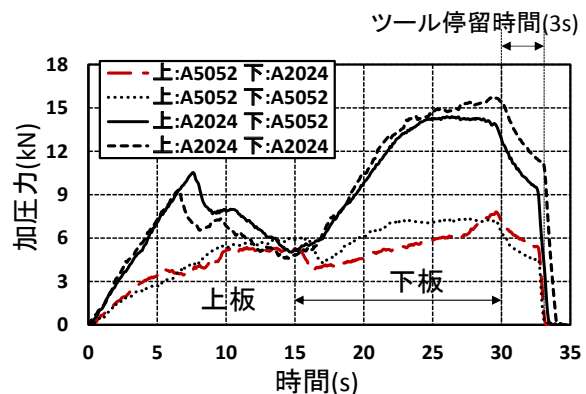


図 5 加圧力の経時変化

(ツール回転速度 900rpm ツール挿入深さ 5mm)

### 3.3 金属顕微鏡観察

最も高いせん断強度が得られた条件(上板 A5052、下板 A2024、ツール挿入深さ 5mm、ツール回転速度 900rpm)における接合継手の断面観察結果を図 6 に示す。

断面はツールの挿入により形成された接合痕が観察される。ツールの挿入により、上板である A5052 は塑性流動が生じたことにより下板の A2024 側に進入している。また A2024 も塑性流動により上板の A5052 の領域に進入して接合できている様子が観察できた。

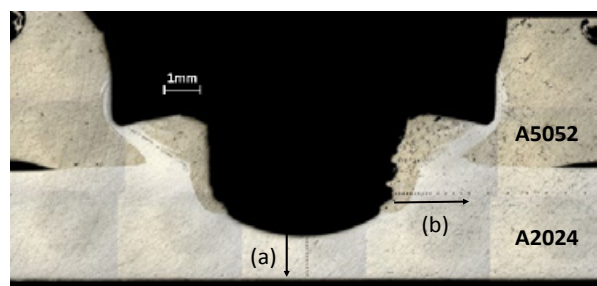


図 6 接合継手の断面写真

### 3.4 硬さ試験

3.3 で用いた試料の断面硬さ試験(HV0.1)を行った結果を図 7 に示す。なお測定位置は図 6 に示す接合痕の底面から深さ方向(矢印(a))、接合痕の側面から直径方向の領域(矢印(b))である。硬さは接合痕の底面から深さ方向、接合痕の側面から直径方向に平行に測定した。接合痕の底面から深さ方向は深さに関係なく硬さはほぼ一定であった。一方、接合痕の側面から直径方向は表面付近

が A5052 の領域であるため、硬さは低いが、表面からの距離が 0.6mm 以上では A2024 の領域となり硬さは高くなった。

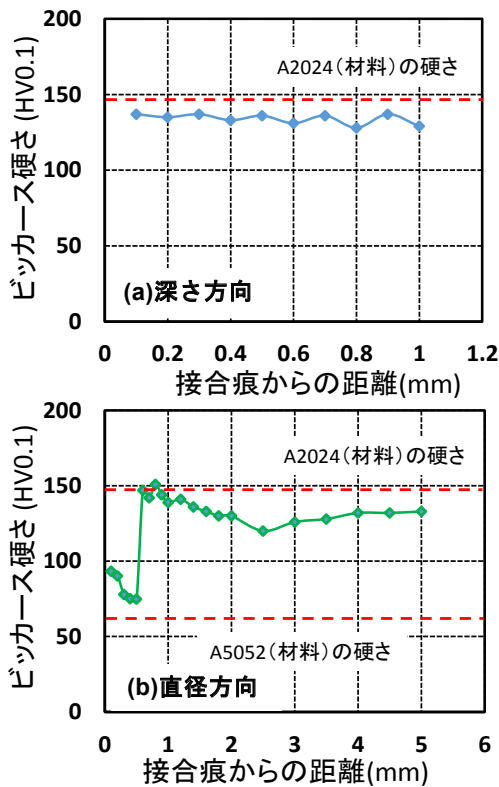


図7 ビッカース硬さ測定結果

一般的に摩擦攪拌接合継手の断面は組織的に 4 つの分類で表わされる<sup>7)8)</sup>(図8)。

①母材：圧延組織を示し、溶接と比べても差のない組織

②熱影響部：摩擦攪拌接合中の熱サイクルを受ける領域

③加工熱影響部：ツールの攪拌による母材の局所的な変形を伴う結晶粒組織が観察される。

④攪拌部：再結晶温度における強塑性変形によって動的再結晶現象が生じ、結晶粒が微細化する。

接合痕の側面から直径方向のビッカース硬さは攪拌部である A5052 の領域においては表面に近いほど硬さは高くなり、A5052 の材料自体の硬さと比較して高い値となっている。この領域においては、摩擦熱が発生し材料が攪拌される塑性流動が起こり、結晶粒が微細化されたものと考えられる。

一方で A2024 は材料自体の硬さより低くなった。これは、A2024 は熱処理型合金であり、表面付近では摩擦熱により高硬度に寄与していた微細な析出物が母材に固溶してしまい、硬さが低下してしまったものと考えられる。しかし、図6中の矢印(b)に示すように接合面か

ら離れた位置の A2024(母材)では熱の影響が小さいため、接合面からの距離が 2.5mm の位置から離れるほど、硬さは 2.5mm の硬さと比較してわずかに高くなっていると考えられる。

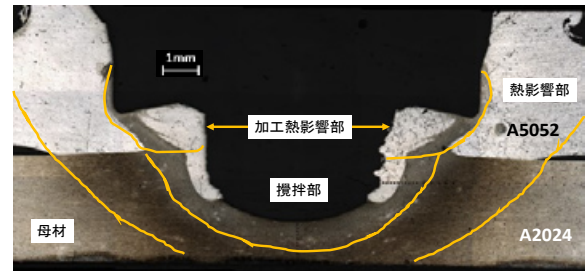


図8 摩擦攪拌接合の断面の領域

#### 4. 結び

本研究で、異なる種類のアルミニウム合金の重ね接合を実施し、せん断強度の測定、金属顕微鏡による接合継手の断面観察、硬さ試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 摩擦攪拌点接合を実施するにあたり、アルミニウム合金の上下板の組合せ、ツール回転速度、ツール挿入深さの条件を適切に選択することで 7kN 以上のせん断強度をもつ接合継手が得られた。
- (2) ツールが板に挿入時にかかる加圧力は、材料によって異なるが、上板に用いる材料の特性に大きく受ける。
- (3) 異種アルミニウム合金接合継手の断面硬さ試験を行うことで、上板、下板の塑性流動の様子を推測することができる。

#### 文献

- 1) 大阪府立産業技術総合研究所テクニカルシート, No9001
- 2) 荒深純一, 古市英樹, 加藤数良: 軽金属溶接, **52**(12), 470(2014)
- 3) 株式会社 UACJ ホームページ, <http://alumi-world.jp/car/01shurui.html>
- 4) 社団法人軽金属協会: アルミニウムの製品と製造技術, P281(2001)
- 5) 社団法人軽金属協会: アルミニウムハンドブック, P6(1990)
- 6) 花井敦浩, 清水彰子, 津本宏樹, 横山博: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **3**, 2(2014)
- 7) 時末光: FSW の基礎と応用, P63(2005), 日刊工業新聞社
- 8) 植松美彦, 戸梶恵郎, 村田瞬亮, 戸崎康成, 栗田達夫: 材料, **56**(6), 537(2007)