

## 研究論文

# 摩擦攪拌接合技術による アルミニウム合金重ね線接合継手の機械的性質

横山 博\*1、津本宏樹\*1、永縄勇人\*1、廣澤考司\*1、児玉英也\*2、松原和平\*3

## Mechanical Property of Aluminum Alloy Lap Joint by Friction Stir Welding

Hiroshi YOKOYAMA\*1, Hiroki TSUMOTO\*1, Hayato NAGANAWA\*1,  
Kouji HIROSAWA\*1, Hideya KODAMA\*2 and Kazuhei MATSUBARA\*3

Industrial Research Center\*1-3

2種類のアルミニウム合金板(A5052、A2024)を同種材・異種材で重ね合わせて摩擦攪拌接合を実施し、その接合強さから、接合の最適条件を検討した。最適条件は材種の組合せにかかわらず、ツール傾斜角 $3^\circ$ 、挿入深さ3.0mm、回転速度1000rpm、接合速度400mm/minであった。最適条件の強さは材種に強く依存し、母材の強さから予想される値まで到達しないものが見られた。また、最適条件を探りつつ、接合強さ発現のメカニズムを、金属組織・接合界面・硬さ・破面観察から解析を試み、更に、静荷重及び繰り返し荷重に対する接合継手の応答にも考察を加えた。

### 1. はじめに

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding, 以下 FSW)は考案されて20有余年の新しい接合方法であるが、すでに鉄道車両、自動車、船舶、航空機等様々な分野で実用化されてきた。特にアルミニウムを代表とする軽合金へは、溶接で発生する変形・接合部の脆化の不具合に対応できる有効な接合方法として、研究がなされてきた<sup>2)</sup>。当センターでも5年にわたり、アルミニウム合金の重ね点接合、突合せ線接合、また、ツール形状の接合に与える影響等の研究を行ってきた<sup>3)-7)</sup>。本報では、重ね合わせ線接合についての検討と考察を行い、物性の異なるアルミニウム合金部材の層状接合に向けた加工法の新規展開を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 接合試料

接合試料には、A5052-O材及びA2024-T3材の2種類のアルミニウム合金を用いた。摩擦攪拌接合装置は、東海テクノ株式会社製5軸摩擦攪拌接合装置を用いた。接合試料は、190mm×45mmの短冊形に切出した供試材を図1に

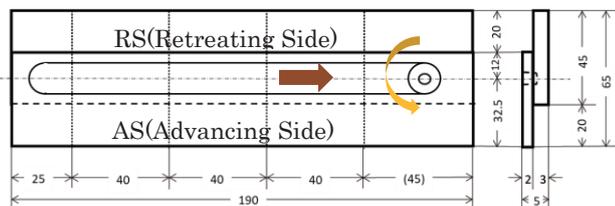


図1 接合試料概略図

示すように重ね合わせ、重ね合わせ部の中心線上で接合し作成した。ツールの回転方向、接合方向は図1に示す方向とし、上板は厚み2mm、下板は厚み3mmとした。

#### 2.2 ツール

ツール材質はSKH56相当材を使用し、熱処理を施し、硬さHRC67~69とした。ツール形状は、図2に示すように、プローブ長3mm、プローブ径5mmにM5×0.5の正ねじを加工、ショルダー径15mmの逆テーパ加工を施した。

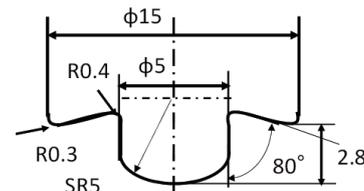


図2 ツール形状

#### 2.3 接合条件

過去の研究<sup>3)-7)</sup>から、ツール侵入速度は10mm/min、ツール傾斜角は $3^\circ$ とした。接合条件を表1に示す。

表1 接合条件

挿入角度	$3^\circ$
回転方向	反時計回り
回転速度	700、1000、1500rpm
接合速度	250、400、600mm/min
挿入深さ	2.4、2.6、2.8、3.0mm

\*1 産業技術センター 金属材料室 \*2 産業技術センター 自動車・機械技術室 \*3 産業技術センター 金属材料室 (現防災部消防保安室)

## 2.4 接合継手の評価

### 2.4.1 評価試料調製

組織試験材、引張試験材(=3)は、それぞれ図 1 に示すように接合開始側端部より 25mm の位置、続いて 40mm 毎の 3 つの位置で、接合線に直角に切出し調製した。

### 2.4.2 引張せん断試験

引張せん断試験は、島津製作所製オートグラフ AG-100kNIS を用い、試験速度 5mm/min で行った。チャック部は、試料接合の都合上、図 1 に示すように上板 AS、下板 RS とした。本実験では、最大引張荷重を引張せん断強さとして評価した。ただし、試験片幅のばらつきの影響を小さくするため、最大引張荷重を試験片幅で除した値を接合単位幅(1mm)の強さ(単位 N)として比較した。

### 2.4.3 硬さ試験

硬さ試験は、アカシ製 MVK-G3 を用い、荷重 0.2kg でビッカース硬さを測定した。試料は、組織観察用に調製したものを、組織状態を確認しながら、接合界面の上下 0.2～5mm の位置で硬さ分布を確認した。

### 2.4.4 疲労試験

疲労試験は、島津製作所製サーボパルサー EHF-ED10T-20L を用い、20Hz の片振引張荷重で行った。荷重は 1.5～3.5kN(0.5kN 刻み)で行い、 $10^7$  サイクルを疲労上限とした。

### 2.4.5 組織観察

組織試験は、接合に対し横方向断面で、上板を上側とし、右側に AS 部が来るように配置した調製試料を用いた。0.05  $\mu$  粒径のアルミナ懸濁液で鏡面とした断面を、1%HF-1.5%HCl-2.5%HNO<sub>3</sub> 水溶液で腐食し、金属顕微鏡で組織観察を行った。また、一部試料については、水平断面、縦断面の検討も行った。

### 2.4.6 接合界面観察

島津製作所製 inspeXio SMX-225CT を用い、接合界面に予め板厚 0.03mm の銅箔を配置したものについて、接合後の界面移動状態を 3次元 CT 像で確認した。観察条件は、管電圧 200kV、管電流 40  $\mu$  A、ビュー数 1200、アベレージ数 12 とした。

### 2.4.7 破面観察

破面観察は、日本電子製 JSM6510A を用い、引張せん断試験及び疲労試験後の破断面を観察した。加速電圧は 20kV とし、2次電子像観察を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 A5052(上板)とA5052(下板)の接合強さ

A5052/A5052 継手の引張せん断試験の結果を図 3 に示す。ツール回転速度 1000rpm、接合速度 400mm/min で

接合した場合、ツール挿入深さ 2.4mm では接合部の充填が十分でなく接合欠陥が観察された。欠陥により引張せん断強さも 41N と低い。挿入深さが深くなるにつれ、欠陥が解消され、3.0mm まで挿入すると、母材部で破断し、せん断強さは 377N となった。これは、A5052 の母材強さ 394N に相当し、接合として十分な強さが得られた。

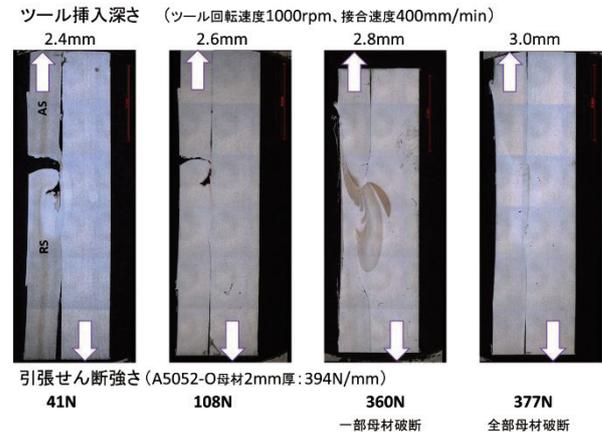


図 3 A5052/A5052 継手の引張せん断試験

### 3.2 A5052(上板)とA2024(下板)の接合強さ

A5052/A2024 継手の引張せん断試験の結果を表 2 に示す。ツール回転速度 1000rpm、接合速度 400mm/min で接合した場合、ツール挿入深さ 2.8mm、3.0mm のいずれも、母材部で破断し 379N となった。これは、A5052 の母材強さ 394N に相当し、接合として十分な強さが得られた。

表 2 A5052/A2024 継手の引張せん断試験

引張せん断強さ (N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
ツール回転速度 (rpm)	1500			
	1000		379	
	700			

引張せん断強さ (N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
ツール回転速度 (rpm)	1500		361	
	1000	376	379	377
	700		212	

: 全試験片母材部破断  
 : 一部試験片母材部破断  
 : データなし

### 3.3 A2024(上板)とA2024(下板)の接合強さ

A2024/A2024 継手の引張せん断試験の結果を表 3 に示す。いずれの破断も接合部で起こっており、母材である T3 処理材の強さ 879N と比較して低くなった。ツール回転速度 1000rpm、接合速度 400mm/min、挿入深さ 3mm の条件で接合した強さは 631N となり本実験条件では最大値と

なった。前項までの他の継手と比較しても、高い接合強さを示した。A2024材の500℃処理O材の引張強さは643Nであり、本接合強さと同程度であるので、接合の際、接合部には約500℃の熱が発生して、接合部が熱処理された可能性が示唆される。

表3 A2024/A2024 継手の引張せん断試験

3.0mm挿入

引張せん断強さ(N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
(rpm) 工具回転速度	1500	562	474	422
	1000	404	631	578
	700	522	499	563

2.8mm挿入

引張せん断強さ(N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
(rpm) 工具回転速度	1500	/	424	598
	1000	198	253	514
	700	/	395	/

■: 最大値  
 ■: 次点値  
 /: データなし

3.4 A2024(上板)とA5052(下板)の接合強さ

A2024/A5052 継手の引張せん断試験の結果を表4に示す。接合条件の各因子による一定の傾向は見られなかった。いずれも接合部破断であった。最大値は、ツール回転速度1500rpm、接合速度400mm/min、ツール挿入深さ2.8mmで448Nが得られた。図4に示す破断の横方向断面組織を

表4 A2024/A5052 継手の引張せん断試験

3.0mm挿入

引張せん断強さ(N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
(rpm) 工具回転速度	1500	404	319	280
	1000	271	447	435
	700	373	347	385

2.9mm挿入

引張せん断強さ(N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
(rpm) 工具回転速度	1500	/	378	274
	1000	/	348	428
	700	/	/	/

2.8mm挿入

引張せん断強さ(N)		接合速度 (mm/min)		
		600	400	250
(rpm) 工具回転速度	1500	/	448	373
	1000	230	266	372
	700	/	222	/

■: 最大値  
 ■: 次点値  
 /: データなし

見ると、上板A2024材AS部で破断しており、期待されるA2024-O材の引張強さ643Nには至らなかった。

過去の研究からも、異種接合材の配置により予想される接合強さが得られないことがあり、今回、その原因を詳しく検討した。



図4 引張せん断試験破断部断面

3.4.1 硬さ試験

接合断面の硬さは、測定部位によりA2024材同種組織では100~120HV、A5052材同種組織では55~65HVと離散的な分布となった。

3.4.2 疲労試験

ツール回転速度1000rpm、接合速度400mm/min、ツール挿入深さ3.0mmの接合条件における各継手の疲労強さを検討した。A2024/A5052継手では、2.0kNまで10<sup>7</sup>回の繰返し荷重に耐えた。

一方、A5052/A5052継手では2.5kNとなり、高強度材(A2024材)を上板とした接合の場合と比較し、強くなった。

3.4.3 組織観察

ツール回転速度1000rpm、接合速度400mm/min、ツール挿入深さ3.0mmにおけるA2024/A5052継手の接合部の金属組織を図5に示す。接合面断面を見ると、プローブ先端通過部に渦巻き状の攪拌模様が観察される。これを縦方向断面、横方向断面で観察すると、ツール進行後背部が凸となる半円形状をしており、併せて考えると、半球状の積層構造をしていると言える。また、引張せん断試験・疲労試験で破断したAS接合近傍部に、特に大きな欠陥は見られなかった。

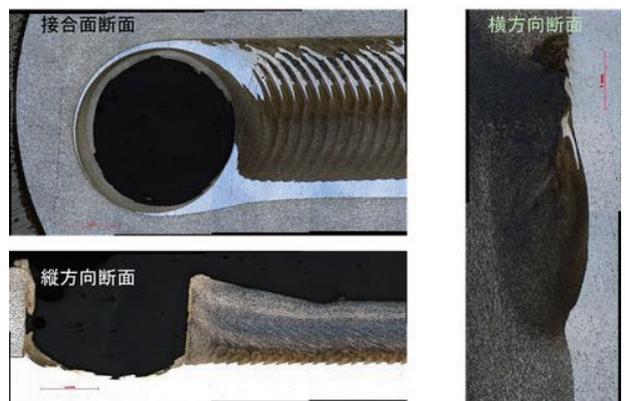


図5 接合断面組織観察

### 3.4.4 接合界面観察

A2024/A5052 継手の接合界面に厚み 0.03mm の銅箔を挟み、接合による材料の移動状態を観察した結果を図 6 に示す。プローブ通過部の AS では、銅箔が直線的に切断された。一方、RS では接合界面から攪拌部底にかけてツール進行方向の後方に半円状に箔が堆積した。この観察結果から、接合界面付近の材料は全体的に攪拌されず、RS から攪拌底部にかけて堆積することが分かった。破断部 AS には初期界面の残留は見られず、その接合強さへの影響は見られないと考えられる。

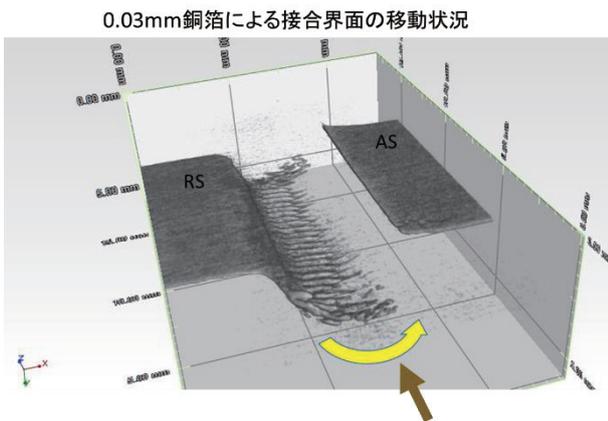


図 6 接合界面

### 3.4.5 破面解析

#### a) 引張せん断試験(静荷重)

A2024/A5052 継手の引張せん断試験における、せん断強さの異なる 2 種類の破断面を観察した結果を図 7 に示す。強さの低いものは大きな塊状の破面を呈しているのに対し、強さの高いものは平坦で均一なディンプルを呈している。この破断面の様相は、攪拌の程度とそれに起因する材料温度の上昇を反映していると考えられる。

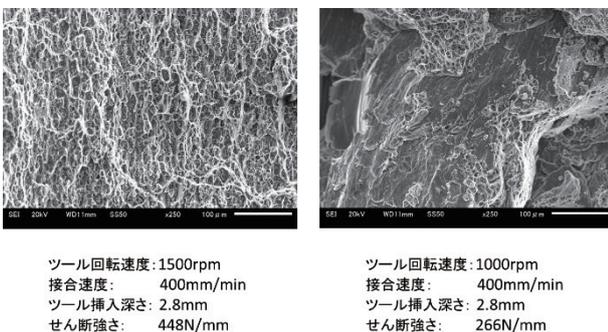
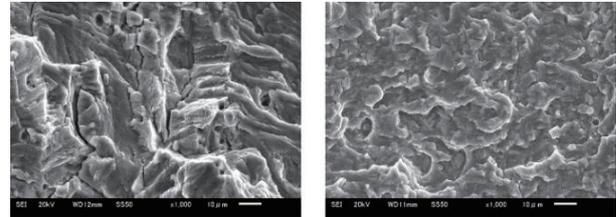


図 7 引張せん断破断面

#### b) 疲労試験

疲労試験における強さの異なる 2 種類の破断面の観察結果を図 8 に示す。いずれも、図左側から右側に一様のストライエーションが観察された。A5052/A2024 継手の場

合、ストライエーションの停留が見られ各所でクラックが発生していることが分かった。一方、上板下板を入れ替えた A2024/A5052 継手の場合では均一な疲労痕が観察された。疲労強さの違いは、この疲労進展形態の違いによるものと考えられ、これは下板の強さの影響により材料攪拌状態が変化したためと推察される。



5052(上板)/2024(下板)  
ツール回転速度:1000rpm  
接合速度: 400mm/min  
ツール挿入深さ: 2.8mm  
3.5kN疲労破断回数: 774万回

2024(上板)/5052(下板)  
ツール回転速度:1000rpm  
接合速度: 400mm/min  
ツール挿入深さ: 2.8mm  
2.5kN疲労破断回数: 27万回

図 8 疲労破壊破断面

## 4. 結び

本研究の結果及び考察をまとめると以下のとおりである。

- (1) ツール回転速度 1000rpm、ツール挿入深さ 3.0mm、接合速度 400mm/min で、最適に近い条件が得られた。
- (2) 同種材の接合では、母材相当(但し、熱処理材の場合は、焼きなまし相当)の接合強さが得られた。
- (3) A2024/A5052 継手の接合では、下板材の影響により A2024 を下板にした時と比べ強さが低下した。
- (4) A2024/A5052 継手の接合断面は、ツール進行後背部に半球が積み重なった状態の攪拌痕を残すことが金属組織観察により分かった。
- (5) A2024/A5052 継手接合部強さは AS における攪拌の程度に影響を受け、攪拌不足による微小な攪拌欠陥が疲労強さ低下の一因となることが破面観察から推察された。

## 文献

- 1) 熊谷正樹: 社団法人日本溶接協会 溶接情報センター WE-COM マガジン, **6**, 1(2012)
- 2) 大阪府立産業技術総合研究所:テクニカルシート, No.09001
- 3) 花井敦浩, 他: あいち産業科学技術総合センター研究報告 **3**, 2(2015)
- 4) 花井敦浩, 他: *ibid.*, **4**, 18(2015)
- 5) 花井敦浩, 他: *ibid.*, **5**, 16(2016)
- 6) 徳田宙瑛, 他: *ibid.*, **6**, 10(2017)
- 7) 徳田宙瑛, 他: *ibid.*, **7**, 14(2018)