



摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と樹脂材料の 直接接合特性に及ぼすアルマイト皮膜処理の影響

岡田 俊哉*, 内田 壮平**, 中田 一博***

Effect of Anodizing on Direct joining Property of Aluminum Alloy and Plastic Sheets by Friction Lap Joining

Toshiya Okada*, Shouhei Uchida** and Kazuhiro Nakata***

We have proposed a novel joining process, Friction Lap Joining (FLJ) to join metallic material sheet directly to polymer sheet and have investigated mechanical and metallurgical properties of these dissimilar joints. It was described in this paper that joining mechanism was discussed with the evaluation of TEM microstructure at the joint interface between A2017 aluminum alloy and 2 kinds of polymer, ethylene-acrylic acid copolymer (EAA), and high density polyethylene (PE). EAA sheet was easily joined to an as-received aluminum alloy sheet by FLJ, because EAA had a polar functional group, COOH. On the contrary, PE was not able to be joined to an as-received aluminum alloy, because PE had no polar functional group. However, anodizing of aluminum alloy was effective to join these materials by the assistance of the anchor effect.

Key Words: Friction Lap Joining, Aluminum alloy, Plastics, Dissimilar materials joint

1. 緒 言

現在、軽量構造材料であるアルミニウム合金と鋼材や銅合金等との異種金属材料の接合は各方面で検討されており、一部には実用化もされている。また、近年、自動車、航空機等の輸送機器やエレクトロニクス分野においては更なる軽量化を目的として、軽金属材料と非金属である樹脂・プラスチック（以降、両者を合わせて樹脂材料とする）の異材接合が注目されている。これまでに提案され、また一部実用化されている異材接合方法には「射出成形接合」、「機械的締結」、「接着接合」、「超音波接合」などがあげられる。

しかし、これらの方法にはそれぞれ欠点がある。例えば、射出成形接合法では金型を用いるためにその製品寸法や形状に大きな制約がある。また、機械的締結法はリベットやボルトなどの副資材が必要であり、このためコスト増

や重量増を招くと共に、気密性や水密性に劣るためにその対策が要求されるなど、設計の自由度への制限がある。接着接合の場合、エポキシ系やアクリル系の接着剤に対して有機溶剤が用いられ、その蒸気が作業者の健康を害することから VOC 規制（揮発性有機化合物の排出規制）の対象になっている。また、接着過程で所定の接着強度が得られるのに長時間を有すること、さらに長時間使用で接着特性が劣化することなどがあり、実用上の問題点となっている。超音波接合法も製品寸法や形状に大きな制約がある。このため大寸法の部材を密着性良く、直接接合する方法として、熱可塑性樹脂に対して加熱することにより接合界面において局所的に熔融して接合する熱圧着法が注目されており、その加熱源として、高周波誘導加熱法、抵抗加熱法、レーザー加熱法などが検討され、用いられている。

一方、固相接合の一種である摩擦撹拌接合 (FSW) 法は、異種金属接合法としても注目されている^{1,2)}。著者の一人は、FSW による重ね異材接合継手形成に注目し、これまでに鉄/アルミニウム合金³⁾、鉄/マグネシウム合金⁴⁾、鉄/チタン⁵⁾、鉄/ニッケル合金⁶⁾、アルミニウム合金/マグネシウム合金⁷⁾、およびアルミニウム合金/チタン⁸⁾の各種の異材組合せについて検討を行い、良好な重ね継手が得られることを明らかにした。

これらの結果に基づいて、重ね継手が多用される金属と

* 株式会社 UACJ 技術開発研究所 UACJ Corporation

** 大阪大学接合科学研究所（現、地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所）Joining and Welding Research Institute, Osaka University (Present: Technology Research Institute of Osaka Prefecture)

*** 大阪大学接合科学研究所 Joining and Welding Research Institute, Osaka University
原稿受付：2014年10月22日 原稿受理：2015年4月30日

樹脂の異材接合法に、加熱源として摩擦エネルギーを利用する新しい異材接合法である摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining: FLJ 法) を提案し^{9)~11)}, その接合プロセス機能や接合継手特性などの評価を行ってきた。

本報では、金属材料としてアルミニウム合金、および樹脂材料として汎用性の高いポリエチレンおよび接着性に優れたエチレン・アクリル酸コポリマーを選択し、摩擦重ね接合法による接合継手特性に及ぼす接合条件及びアルミニウム合金の表面処理条件の影響を明らかにするとともに、接合界面組織の評価を行い、その接合機構を検討したものである。

2. 実験方法

2.1 供試材

アルミニウム合金には高強度板材として一般的に用いられている A2017P-T4 を選定した。Table 1 に供試材の化学成分値を示す。試験片寸法は板厚 1.5 mm, 長さおよび幅はそれぞれ 150 mm および 75 mm である。また、接合性に及ぼすアルミニウム合金の表面処理の影響を検討するために、受け入れのままの表面状態 (以降、未処理材) と硫酸アルマイト処理材 (封孔処理無し), およびシュウ酸アルマイト処理材 (封孔処理無し) との比較を行った。これら皮膜の厚みは約 10 μm であり, Fig. 1 にその表面状態の SEM 観察写真を示す。

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A2017P-T4	0.55	0.21	4.13	0.70	0.56	0.03	0.06	0.02	re.

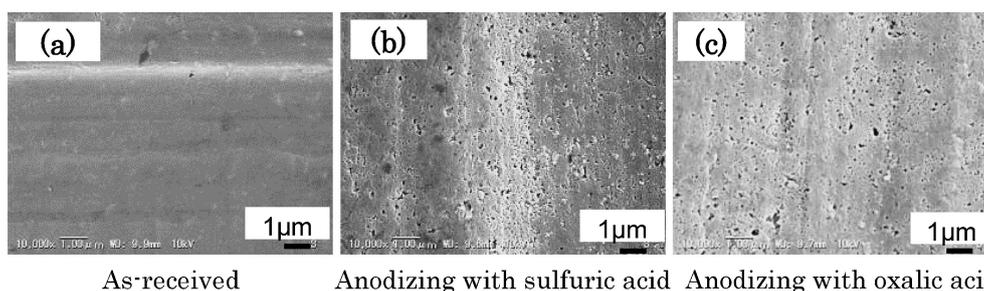


Fig. 1 Surface appearance of A2017P-T4

Table 2 Properties of plastics used

Plastics	Structural formula	Softening point (K)	Melting point (K)	Elastic limit (N/mm)
Ethylene acrylic acid copolymer (EAA)	$-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{n}-$ $-\text{CH}_2\text{CH}-\text{m}-$ COOH	355	371	12
High density polyethylene (PE)	$-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{n}-$	396	405	39

樹脂材料には官能基の無い高密度ポリエチレン (以降, PE) と官能基 (カルボキシル基: COOH) を有し接着性に優れたエチレン・アクリル酸コポリマー (以降, EAA) の 2 種類を用いた。試験片の寸法はいずれも 150 mm × 75 mm × 1.7 mm である。これら樹脂材料の構造式, 軟化点, 融点および引張強度 (実測値) を Table 2 に示す。

2.2 摩擦重ね接合法

接合には位置制御型摩擦攪拌 (FSW) 装置を用いた。Fig. 2 に摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining, 以降 FLJ) の模式図を示す。継手形状は樹脂材料の上にアルミニウム合金を重ねた継手であり, ステンレス鋼製バックリングプレートに固定した。接合ツールは一般的な FSW ツールとは異なり, プローブのないツール端 (ショルダ) が平面形状である。また, ツール径を 5, 10, 15 および 20 mm と変化させて, ツール径の影響も検討した。

接合条件はツール前進角を 3° とし, ツール押し付け深さは試料表面から 0.5 mm, ツール回転数は 1000 rpm, 接合速度は 400 mm/min とそれぞれ一定とした。

2.3 接合部外観および断面組織観察法

接合後の外観状態をツール摩擦面側であるアルミニウム合金 (表側) と樹脂材料側 (裏側) から観察し, 樹脂の熔融状態を評価した。接合部の断面組織を観察するために, 接合した試料の接合方向に垂直な接合部横断面を切り出し, 研磨後に光学顕微鏡にて観察し, 走査型電子顕微鏡 (SEM) 及び付属のエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) による元素分析を行った。また, さらに接合界面の透過型電子顕微鏡 (TEM) による微細構造解析を行った。

2.4 接合継手の引張せん断試験法

接合継手の機械的性質を評価するために引張せん断試験

を行った。試験片の採取箇所、試験片形状および試験片寸法を Fig. 3 に示す。試験片は接合方向に対して垂直に幅約15 mm の短冊状に切り出し、一条件につき3本ずつ作製した。また、試験片を採取後、各試験片の幅を測定した。さらに樹脂材料側から観察して熔融した樹脂がぬれ広がった部位を確認した。

引張試験は試験片のチャック部に厚さ1.5 mm のスペーサーを取り付け、試験片を垂直に引っ張られるように配置した。引張速度は5 mm/min として最大引張せん断荷重を試験片幅で除した値で評価した。

2.5 接合部破断面観察法

引張せん断試験における接合界面破断面、または、試験後に強制的に樹脂を剥離させた試験片のアルミニウム合金側の破断面の観察を SEM により行った。観察に際してはスパッタコーターにより破断面に白金パラジウムをコーティングし、観察位置はツール通過部の中央部とした。

2.6 接合過程における界面温度測定法

継手接合界面の接合中の温度履歴を熱電対を用いて測定した。測定箇所は樹脂板に穴をあけ、そこに K 熱電対 (直径1.0 mm) を通して先端をアルミニウム合金界面に固定した。

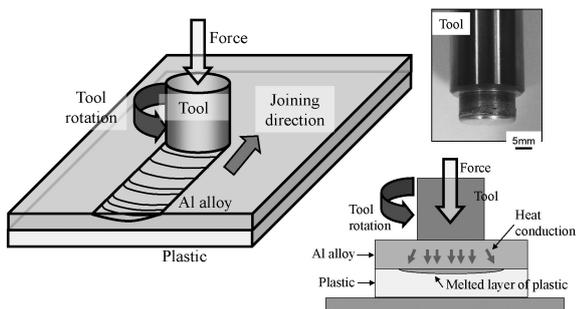


Fig. 2 Schematic Illustration of Joining process, Friction Lap Joining, FLJ

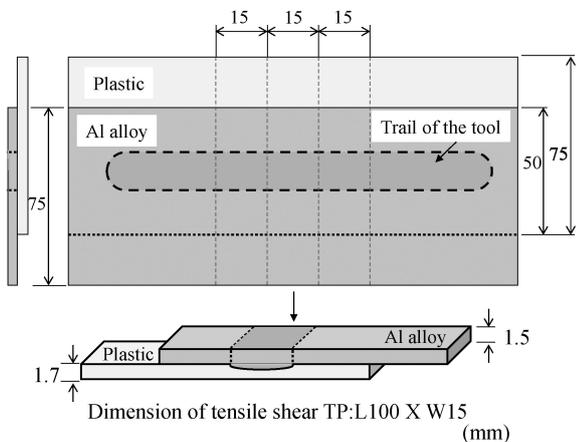


Fig. 3 Sampling position and configuration of tensile shear TP

測定位置はツール通過部の中央部 (a), 前進側の外側へ向かって5 mm (b), 及び10 mm 離れた位置 (c) の3箇所である。(a) および (b) はツール通過部内側, (c) はツール外側となる。また、接合開始側の板端部からの距離は (a) 120 mm, (b) 100 mm および, (c) 80 mm となるように配置した。

3. 実験結果および考察

3.1 ツール径の影響

3.1.1 接合継手外観状態

A2017未処理材と EAA の組合せにおいて、ツール径を5~20 mm と4水準に変化させたツールを用いた接合継手の外観状態を Fig. 4 に示す。全てのツール径で接合継手を得ることができた。また、継手裏面ではツール径に対応した EAA 熔融部と、さらにアルミニウム合金と樹脂板の重ね継手の隙間に破線で示すように樹脂がぬれ広がった部分とが認められた。また、ツール径に対応したツール通過部ではツールの押し込みによりアルミニウム合金がわずかに変形して EAA 側に押し付けられており、継手裏面で見られた樹脂熔融部は、このツール通過部にほぼ相当することが確認された。すなわち、ツール径の増加とともに樹脂熔融部の幅は増加した。

3.1.2 継手引張せん断強度

ツール径5, 10, 15および20 mm にて得られた継手の引張せん断試験結果を Fig. 5 に示す。試験片幅で除した最大引張せん断荷重はツール径によらずほぼ一定の値を呈した。ツール径5 mm の継手では全ての試験片が接合界面破

Tool diameter	Surface view (Al alloy side)	Bottom view (Plastic side)
5 (mm)		
10 (mm)		
15 (mm)		
20 (mm)		

Fig. 4 Joint appearance of EAA and as-received A2017 Al alloy for different tool diameters

断となり、一方、ツール径10 mm以上の継手ではEAA母材で破断する試験片もみられたが、いずれの界面破断した試験片においても約80%以上の伸びを示し、最大引張せん断荷重もEAAの引張強さより算出した単位長さ当たりの荷重(引張強さ: $12 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \times \text{試験片幅: } 15 \text{ mm} = 20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$)と同等となり、十分に高い継手接合強度が得られた。

なお、これらの結果に基づき、本報では、以降は破断形態や最大引張りせん断荷重のばらつきを考慮し、ツール径15 mmにて評価を行った。

3.2 A2017表面処理材とEAAとの接合

3.2.1 継手外観状態および断面形状

EAAとアルミニウム合金未処理材および表面処理材との接合継手の外観および断面マクロ写真をFig. 6に示す。EAA側からみると、いずれの継手でもツール通過部に対応したEAA溶融部とさらにその周囲に破線で示すように

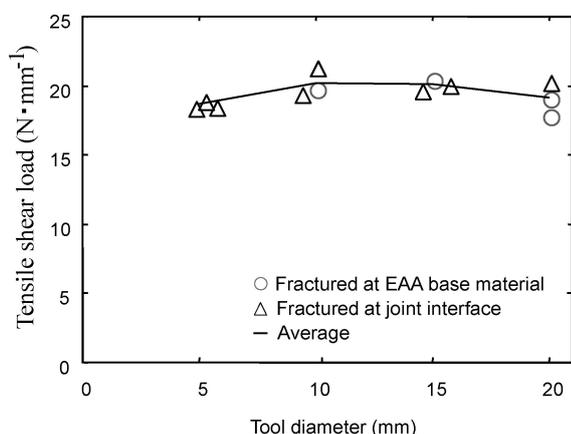


Fig. 5 Effect of tool diameter on the tensile shear load of the lap joint of as-received Al alloy and EAA plastic

ねれ広がった広い接合部を得ることができた。また、いずれもツール通過部の外観および断面には空孔などの欠陥はみられなかった。

3.2.2 継手引張せん断強度

Fig. 7に引張せん断試験結果を示す。いずれも最大引張せん断荷重は約 $20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ となり、良好な値を示した。破断は接合界面破断とEAA樹脂母材破断との両方の形態が認められたが、表面処理材の方が未処理材に比してEAA樹脂母材破断を示す割合が大きい傾向にあった。

Fig. 8A)はA2017未処理材/EAA継手の引張せん断試験中の荷重-伸び線図を、Fig. 8B)は試験中の開始時(a)および終了時(g)の試験片の外観変化の一連の写真を示す。写真(a)から(g)はそれぞれ図中の(a)から(g)の時点の試験片外観に対応し、いずれも樹脂側から撮影したものであり、上端は樹脂部であり、下端はA2017アル

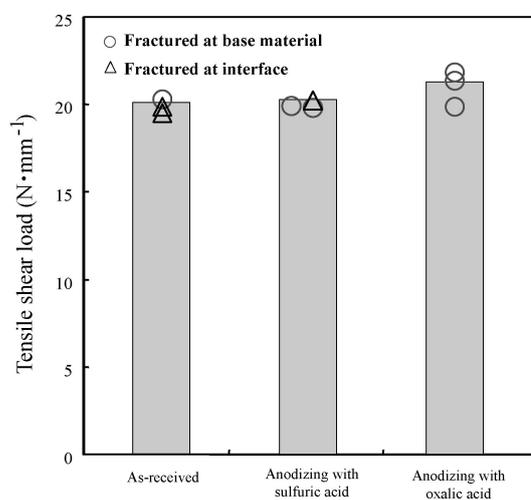


Fig. 7 Effect of surface treatment for A2017 on tensile shear load of the A2017/EAA joint

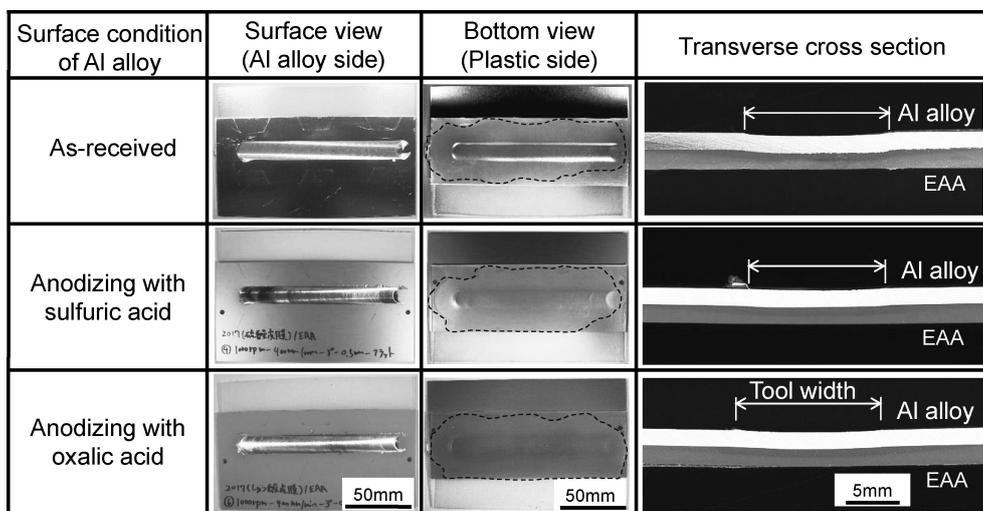
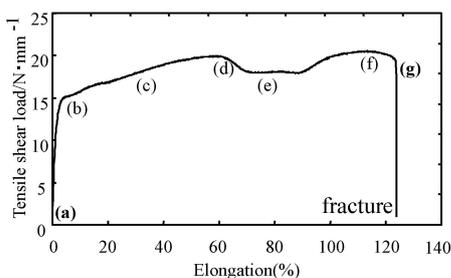
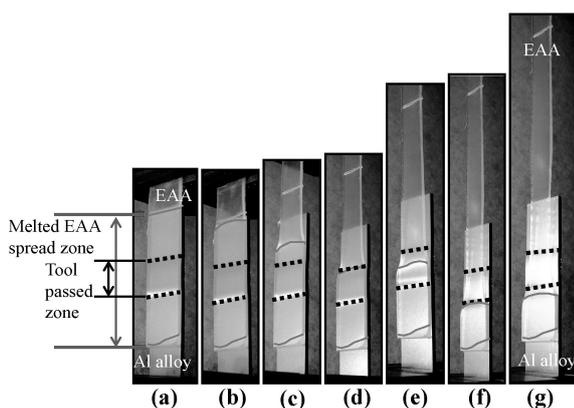


Fig. 6 Surface appearance and cross section of A2017/EAA joints for different surface conditions (Toll diameter 15 mm)



A) Tensile shear load curve of as-received A2017/EAA joint



B) Appearance of the joint, (a) before and (g) after tensile shear test for as-received A2017 and EAA joint

Fig. 8 Result of tensile shear test of as-received Al alloy and EAA plastic

ミニウム合金である。中央部にツール通過部があり、その両側に熔融した樹脂が重ね継手の隙間にぬれ広がった領域（母材部との境界を実線で表示している）が認められた。引張開始後、(b)で樹脂全体の変形が開始すると、(c)のようにぬれ広がった領域の樹脂が順次、アルミニウム合金表面から剥離する。その剥離した部分の樹脂はEAA母材部と共に伸びていく様子が分かる。せん断荷重は(d)で示すように剥離位置がツール通過部の端部に達した時に一旦、極大値を示すが、剥離位置がツール通過部の内部に及ぶと、(e)のようにせん断荷重は若干低下した。さらに、ツール通過部のもう一方の端に達すると再び上昇して最大値を示し、その後、細長く伸びた母材部で破断した。この結果から、継手引張せん断試験における最大荷重はツール通過部の端部で得られており、ツール通過部の内部は端部よりも接合強度が若干低いことが分かった。

3.2.3 破断面観察

引張試験時に界面破断となった継手、および強制的に界面で破断させた継手のアルミニウム合金側破断面表面の外観、SEM微細組織およびEDXによるアルミニウム（Al $k\alpha$ ；青色表示）および炭素（C $k\alpha$ ；赤色表示）の面分析結果をFig. 9に示す。SEM観察はツール通過部の中央(a)にて行った。

Fig. 9 (b)はA2017未処理材とEAAの組合せであるが、(b-1)のSEM像に示すようにアルミニウム合金表面

には数 μm から10 μm 程度の表面キズによる微小な凹部が存在しており、(b-2)の面分析に示すように凹部の中では炭素（赤色表示）が明瞭に検出された。これは接合時に熔融したEAA樹脂が凹部の中に入り込み、引張せん断試験時に引きちぎられてアルミニウム合金側表面に取り残されたものと思われる。(b-3)は(b-1)の平滑部分のSEM高倍率像であり、表面には樹脂と思われる付着物が破面全体に点在して分布しており、これらは面分析において比較的強い赤色部分が点在して分布していることに対応していると思われる。しかし炭素が特に顕著に認められた部分（強い赤色部分）はまばらであり、その数も少ない傾向にあった。

一方、硫酸およびシュウ酸アルマイト処理を行った場合の観察結果をそれぞれFig. 9 (c)および(d)に示す。既にFig. 1で述べたようにいずれの皮膜でもその表面には数十から数百nm程度のアルマイト皮膜孔が開いており、面分析の結果から、いずれの皮膜においても分析視野全面にわたって炭素が強く検出された部分（強い赤色部分）が分布していた。また(c-3)および(d-3)は平滑部分のSEM高倍率像であり、平滑部分においてもその表面全面には付着した樹脂が白く点状に分布しており、未処理材の結果と比較して、樹脂の付着は顕著であった。

3.3 A2017表面処理材とPEとの接合

3.3.1 継手表面外観状態および断面形状

A2017表面処理材/PEの継手外観および断面形状をFig. 10に示す。EAAと異なり、PEでは未処理材の場合、接合直後に界面剥離が発生して、十分な強度を有する継手は得られなかった。

一方、アルマイト処理を施した場合、いずれもツール通過部の外観および断面には欠陥はみられず、熔融したPE樹脂がぬれ広がった接合部を得ることができた。しかし、アルマイト処理の違いによる接合部の外観状態および断面形状の差は認められなかった。

3.3.2 継手引張せん断強度

継手引張せん断試験結果をFig. 11示す。A2017未処理材は接合ができなかったため、継手強度は測定していない。一方、アルマイト処理を施した場合はいずれも界面破断することなく、PE母材が降伏し、良好な接合継手が得られた。一例としてFig. 11B)にシュウ酸アルマイト処理材の引張試験前後の試験片外観を示すが、試験後もツール通過部周辺のツール荷重を直接受けていない樹脂がぬれ広がった部分でも、剥離することなく強く接合されていることが確認された。また、アルマイト処理の違いによる継手強度の差は認められなかった。

3.3.3 破断面観察

引張せん断試験では、全てPE樹脂母材破断を呈したため、接合界面状態を検討するために強制的にPE樹脂を接合部から引き剥がして、そのアルミニウム合金側破断面にて外観、微細組織、およびEDXによるアルミニウム（Al

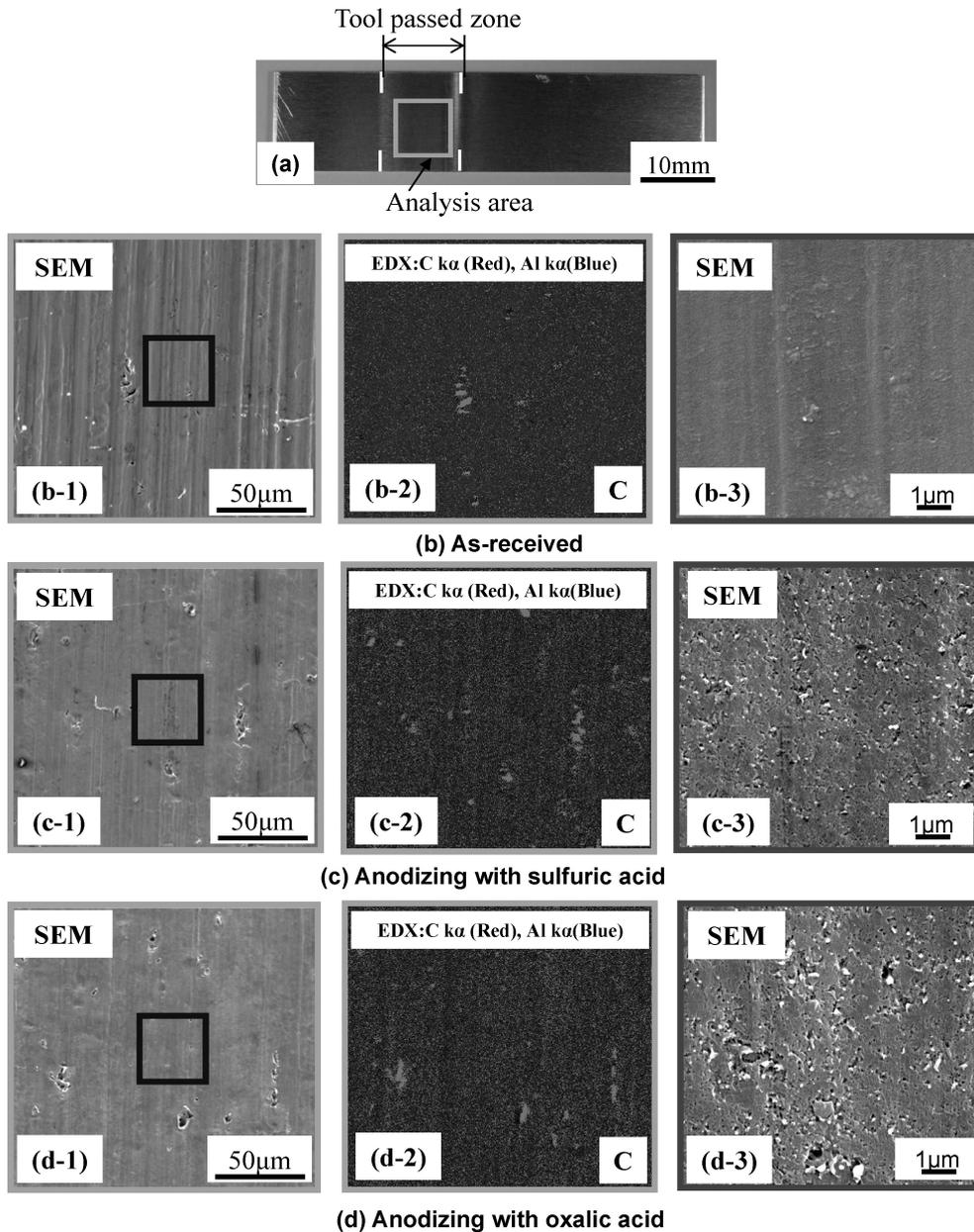


Fig. 9 Appearance of fractured surface of A2017 Al alloy (a), and SEM Image and C mapping with EDX for different surface treatment of A2017/EAA; (b) as-received (c), anodizing with sulfuric acid and (d) anodizing with oxalic acid

$k\alpha$: 青色表示) および炭素 (C $k\alpha$: 赤色表示) の面分析を行った。その結果を **Fig. 12** に示す。

Fig. 12 (b) および (c) ならびに **Fig. 12** (e) および (f) にみられるように、面分析により、分析視野全面にわたって炭素が強く検出され、大きな板表面キズに相当する凹部では特に顕著であった。

Fig. 12 (b) および **Fig. 12** (e) 中の四角形で示す表面キズの無い平滑領域を拡大すると、**Fig. 12** (d) および **Fig. 12** (g) にそれぞれ示すように、数十から数百 nm のアルミイト皮膜孔の部分に破断時に引きちぎられて取り残された PE 樹脂が確認された。これらは **Fig. 9** で示した EAA 樹脂と同様の結果であった。

3.4 接合界面温度測定

Fig. 13 に未処理材と EAA の接合時の接合界面の温度履歴測定結果を示す。ツール通過部内の 2 箇所では約 540 K まで温度が上昇し、また、その外側の熔融樹脂のぬれ広がり部でも 460 K 程度まで温度が上昇していた。EAA 樹脂および PE 樹脂の融点はそれぞれ 371 K と 405 K であり、いずれの部位においても樹脂材料の融点を越えた温度まで上昇していた。このことから、摩擦重ね接合法ではアルミニウム合金板表面に押付けられたツールの回転による摩擦熱が熱伝導により樹脂材料へ伝わり、その加熱および熔融に有効であることが明らかになった。しかし、未処理材と PE の組合せの場合では、接合継手は形成されず、樹

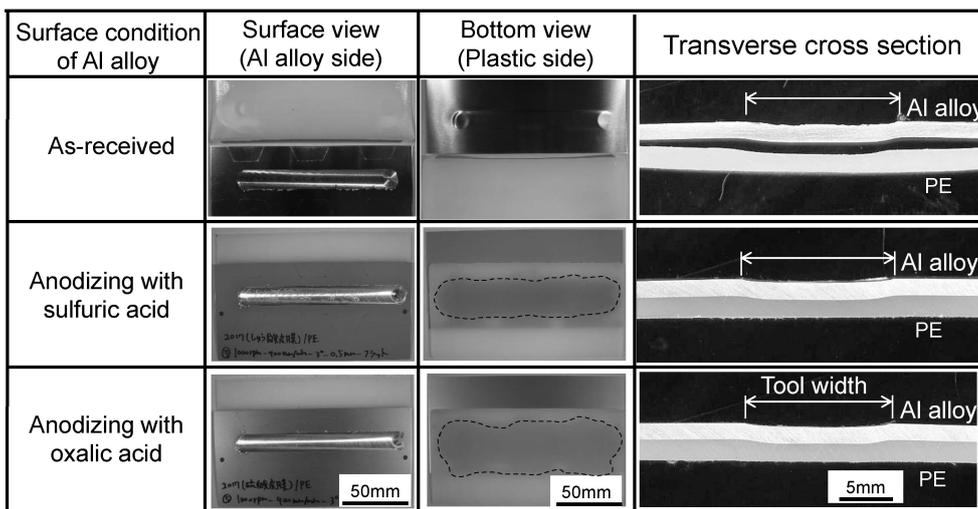


Fig. 10 Surface appearance and cross section view of welded joints for each surface and PE (Toll diameter 15 mm)

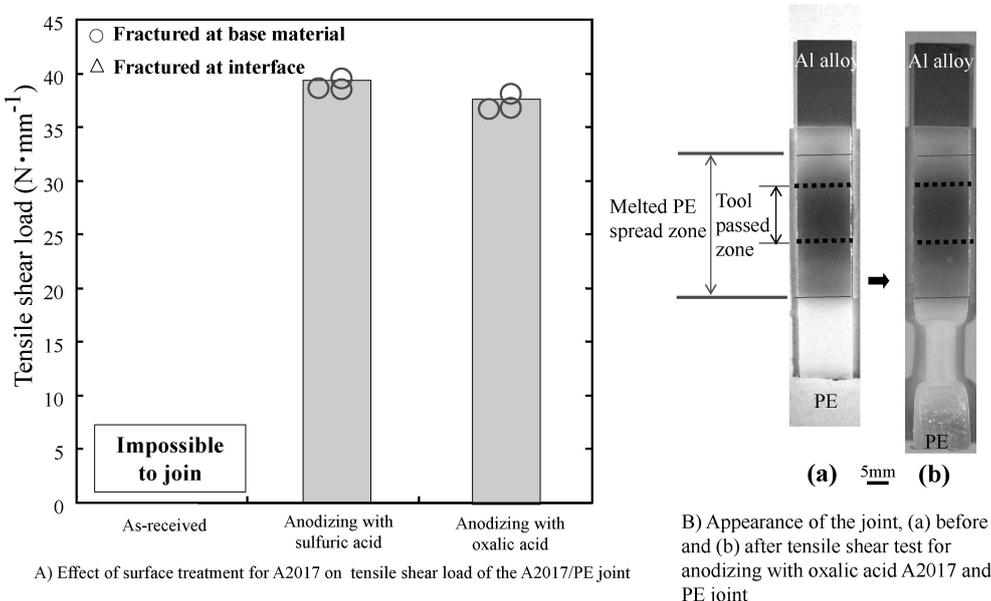


Fig. 11 Result of tensile shear test of A2017/PE joints for different surface treatments

脂によっては熔融および加圧のみでは接合は達成できないことが明らかになった。

すなわち、FLJ法によるアルミニウム合金と樹脂の接合には、接合に効果的なアルミニウム合金の表面処理と、接合に適した樹脂の種類があることが示唆された。

3.5 考察

3.5.1 接合界面の微細構造解析

TEM を用いて接合界面の微細構造の解析を行った。

Fig. 14 に EAA 樹脂と A2017 未処理材継手の TEM 像 (a) および EDX 分析結果 (b) を示す。接合界面は観察範囲内ではほぼ平滑であり、幅約 10 nm の濃いコントラストを示す領域が存在しており、EDX 分析結果より、この層の主成分は C, O および Al であり、アルミニウム合金

表面に形成された自然酸化皮膜と推察された。

また、Fig. 15 に PE 樹脂とシュウ酸アルマイト処理材継手の TEM 像を示す。この接合界面には、特に反応層を示唆するようなコントラストを示す領域はみられなかった。しかし、Fig. 15 (c) に示すようにアルマイト皮膜孔内を観察したところ、コントラストが異なる領域が観察された。更なる高倍率の観察 (Fig. 15 (d)) において、この濃淡部領域は PE 樹脂がアルマイト孔内に浸入していたことが示唆された。このような場合には、いわゆるアンカー効果による強固な接合機構¹²⁾が期待される。

3.5.2 樹脂の分子構造および極性官能基と接合特性との関係

本研究において EAA 樹脂は A2017 材の表面処理の有無

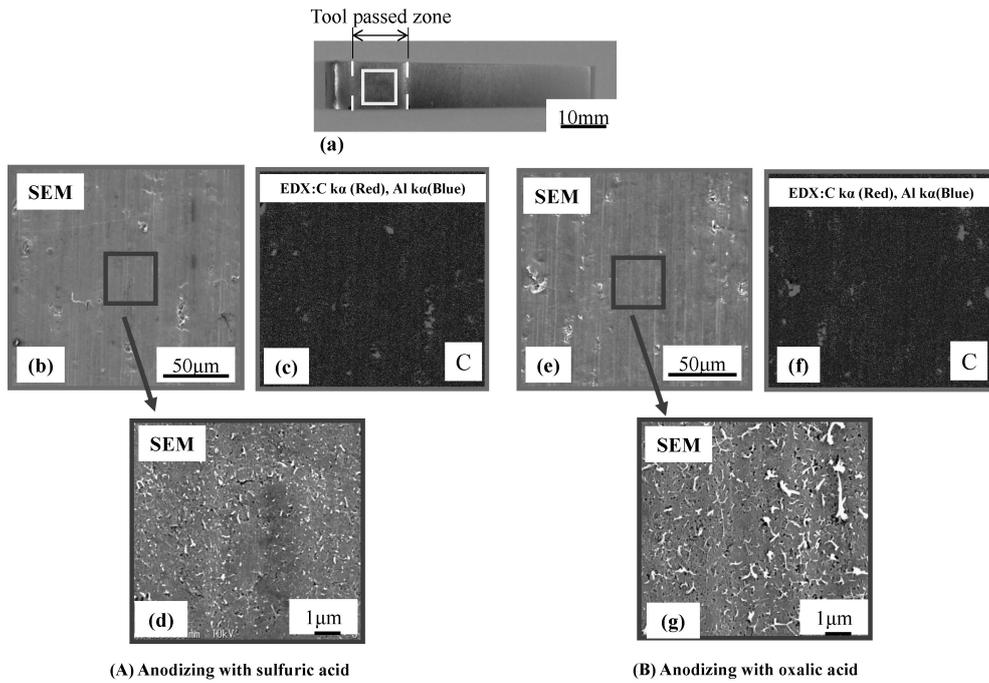


Fig. 12 Appearance of fractured surface (a); SEM image (b) and (e), C mapping with EDX (c) and (f), and higher magnification SEM image (d) and (g) at the square area (a) for the anodizing A2017/PE joints

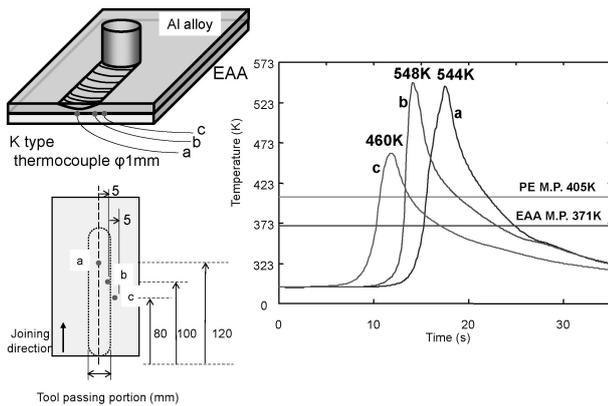


Fig. 13 Temperature measurement results at the joint interface during FLJ with tool diameter of 15 mm

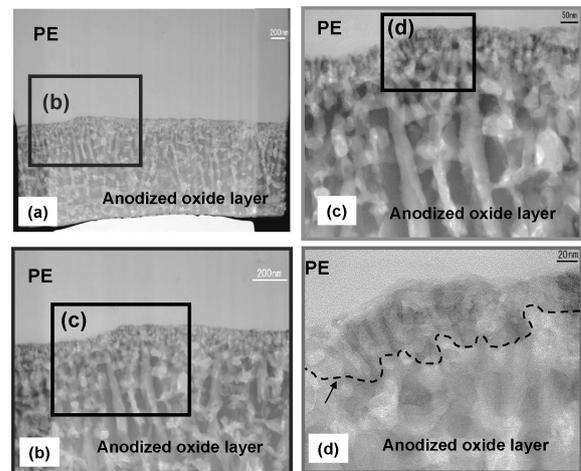


Fig. 15 Higher magnification TEM images at the joint interface of anodized oxide layer and PE

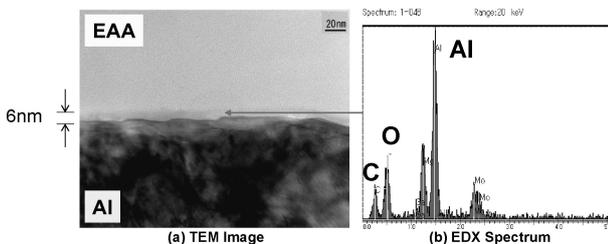


Fig. 14 TEM image and EDX spectrum at the interface of as-received A2017 and EAA joint

にかかわらず接合が可能であったが、PE樹脂の場合、未処理材は接合ができなかった。両者の違いの一つに樹脂の極性官能基の有無が挙げられる。EAA樹脂は極性官能基(カルボキシル基:COOH)を有しているため、摩擦重ね接合による加熱によって溶融したEAA樹脂は、ツールによる押し付け荷重によってアルミニウム合金表面と密着した際、アルミニウム合金の自然酸化膜(Al₂O₃)との間で静電引力が生じて強い接合が可能になったと考えられる。すなわち、酸化膜中の電気的に負に帯電しているOとカルボキシル基中のH^{δ+}との間に生じる水素結合力によ

て接合が生じたと考えられる。更に、アルマイト処理を施すことにより、安定した酸化皮膜が形成されると共に、皮膜表面に生じた微細な孔に溶解した樹脂材料が入り込んだことによるアンカー効果も接合に寄与したと考えられる。

一方、極性官能基を有していないPE樹脂の場合、いわゆるファンデルワールス力による分子間力は発生するが、水素結合による静電引力は生じないため強い結合力が発生せず、未処理材の場合は接合ができなかったと推察される。したがってPE樹脂の接合はFig. 15に示すように界面の微細構造解析結果において示唆されたように、アルマイト処理の微細な凹凸に溶解した樹脂が入り込んだアンカー効果が大きく寄与したと考えられる。

なお、摩擦重ね接合中に樹脂は大気中で溶解温度以上の高温に加熱されるため、PE樹脂が大気との反応により変成されて、極性官能基であるOHやCOOHなどが形成され、アルミニウム合金表面にぬれ広がった可能性も推察されるが、今後の更なる検討課題としたい。

4. 結 言

本研究では摩擦エネルギーを用いる摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining: FLJ法) により大気中で、かつ、その場でアルミニウム合金と樹脂との直接接合が可能であることを明らかにした。得られた主な結果は以下のようになる。

1) 極性官能基を有するエチレン-アクリル酸コポリマー (EAA) はA2017アルミニウム合金に対してアルマイト皮膜処理の有無にかかわらず、樹脂母材破断を示す良好な接合継手が得られた。極性官能基であるカルボキシル基 (COOH) とアルミニウム合金表面の酸化皮膜との間での水素結合により接合が可能になったと推察された。

2) 極性官能基を持たない高密度ポリエチレン (PE) はA2017アルミニウム合金表面未処理材とでは、接合ができなかった。一方、アルマイト皮膜処理を施すことによりPE樹脂母材破断を示す良好な接合継手が得られた。透過電子顕微鏡観察により接合界面では多孔質アルマイト皮膜の孔内へのPE樹脂の嵌入が認められ、いわゆるアンカー効果の寄与が示唆された。

謝辞

本論文は、一般社団法人軽金属溶接協会内の異材接合委員会活動の一環として行った共同研究成果の一部を取りまとめたものであり、委員各位に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中田一博, 牛尾誠夫: 異材溶接・接合のニーズと今後の技術開発の動向, 溶接学会誌, 71-6 (2002), 6-9
- 2) 青沼昌幸, 中田一博: 摩擦攪拌接合法による異種金属接合, 塑性と加工, 53-621 (2012), 3-7
- 3) Y. C. Chen, T. Komazaki, Y. G. Kim, T. Tsumura, K. Nakata: Interface microstructure study of friction stir lap joint of AC4C cast aluminum alloy and zinc-coated steel, Materials Chemistry and Physics, 111 (2008), 375-380
- 4) Y. C. Chen, K. Nakata: Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded magnesium alloy and steel, Materials and Design, 30 (2009), 3913-3919
- 5) J. Liao, N. Yamamoto, H. Liu, K. Nakata: Microstructure at friction stir lap joint interface of pure titanium and steel, Materials Letters, 64 (2010), 2317-2320
- 6) K. H. Song, W. Y. Kim, K. Nakata: Evaluation of microstructures and mechanical properties of friction stir welded lap joints of Inconel 600/SS 400, Materials and Design, 35 (2012), 126-132
- 7) Y. C. Chen and K. Nakata: Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, Scripta Materialia, 58 (2008), 433-436
- 8) Y. C. Chen, K. Nakata: Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys, Materials and Design, 30 (2009), 469-474
- 9) 国内特許出願 長野, 岡田, 中田: 特許公開2012-170975
- 10) 国際特許出願 長野, 岡田, 中田: PCT/JP2012/053839
- 11) T. Okada, S. Uchida, K. Nakata: Direct joining of Aluminum alloy and plastic sheets by friction lap Processing, Materials Science Forum, 794-796 (2014), 395-400
- 12) 長尾敏光: 第4章 樹脂/めっきの結合状態および応力と密着性の要因: 有機/金属・無機界面のメカニズム, サイエンス&テクノロジー株式会社 (2006), 37-46

執筆者の紹介



岡田俊哉



内田壮平



中田一博