

令和 3 年 6 月 30 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04773

研究課題名(和文)円盤摩擦接合法における異種材料接合界面形成機構の解明

研究課題名(英文)Study on the formation mechanism of dissimilar joint interfaces in the disc friction joining

研究代表者

柴柳 敏哉 (Shibayanagi, Toshiya)

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授

研究者番号：10187411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：円盤摩擦接合法を提案し、装置を開発し、アルミニウム同士、アルミニウムとPET樹脂、アルミニウムとチタン、アルミニウムとマグネシウムのそれぞれについて接合実験を実施し、接合接手を得ることに成功した。世界初である。接合界面はフック状の凹凸構造を呈しており、ファスナに類似していることから本接合が可逆接合への展開が期待できる。界面近傍には動的再結晶粒と思われる微細結晶粒組織が現れることを明らかにした。室温引張試験の結果、アルミニウムと樹脂の継手では樹脂の強度に対して約40%の継手破壊強度を有することが明らかになった。この凹凸界面構造は円盤の外周部において作りこまれる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円盤摩擦接合は、世界初の接合技術で、日本でこの原理が提案され、実証実験を経て、一定の水準の継手強度が得られることが明らかにされたことが本研究最大のポイントである。界面構造は本接合法特有の凹凸構造となっており、ファスナーのような構造であることから可逆接合技術の端緒を開く基礎知見としての学術的・技術的意義は大きい。また、アルミニウムとチタンといった融点が1000 ほど異なる材料の接合にも成功したことは従来の溶接技術の範疇を凌駕する技術への展開が期待できる。本接合技術は原理的には無限長の接合が可能で、またアーク溶接のようなガスを必要とせず、環境負荷を最小にする接合としての社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Disc Friction Joining (DFJ) is a novel joining method which was invented in Toyama, Japan. The present research project has tried both similar joining of aluminum to aluminum and dissimilar joining of aluminum to resin, magnesium, and titanium. These joining tests successfully produced joints that showed a peculiar interface of zig-zag shape. The zig-zag interface may lead us to a new welding technology called "reverse welding" just like a zipper. Fine grain structure was observed in the region closed to the joint interface, which seemed to be produced by the dynamic recrystallization during joining. Tensile tests for Al/PET joint at ambient temperature revealed the joint efficiency was around 40% to the strength of resin. The DFJ interface is concluded to be produced around periphery of the rotating disc where the materials were about to be joined.

研究分野：接合科学

キーワード：円盤摩擦接合 アルミニウム 樹脂 チタン マグネシウム 円盤表面性状 引張強度 界面構造

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 摩擦現象を利用した接合技術

金属の塑性変形を利用した接合法に摩擦接合技術がある。これは被接合材同士の摩擦あるいは接合工具を用いた摩擦による発生熱が素材の一部を軟化させ、塑性変形による新生面の接触と完全な金属結合の成立をもたらすプロセスである。摩擦接合法には、摩擦圧接、超音波接合、冷間圧接、摩擦攪拌接合、Liner Friction Welding などがある。この中で、摩擦攪拌接合だけが長尺部材の接合に適用されており、例えば新幹線の車体製造技術に採用されている。

### (2) マルチマテリアル化と接合技術高度化への期待

異種材料を適材適所に配置してより軽量で高機能・高強度な構造物を造り出す技術潮流の中、このマルチマテリアル化の鍵となる要素技術に異種材料の接合がある。特に、アルミニウムと鉄鋼材料、マグネシウム合金あるいは樹脂といった異種材料の接合は我が国のものづくり産業における喫緊の課題と言える。

上述の摩擦攪拌接合は筆頭候補となる接合技術であるが、塑性変形能が大きく異なる材料の異種材料接合が難しいという問題を抱えている。その根本的な理由は、回転する接合工具周囲の攪拌領域（塑性流動領域）が広いことに帰着する。すなわち、塑性流動範囲を極力少なくしつつ異種材料長尺部材の接合技術のブレークスルーが望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では、円盤接合技術の高度化によるマルチマテリアル構造物の実現を目指して、異種材料接合における接合界面形成機構を材料学的観点（接合時の温度履歴、応力、組織変化、力学特性の観測・観察など）から詳細に検討し、健全かつ高強度接合接手作成のための最適接合条件の策定ならびに装置の高機能化を主題とした基礎研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 供試材

接合実験に用いた材料は、展伸材用アルミニウムの A1070P-H14(以下 A1070)、熱可塑性樹脂のポリエチレンテレフタレート(以下 PET)、AZ31 マグネシウム合金ならびに TP340 チタン合金である。A1070 は冷間圧延材、PET は押し出し材である。接合用試験片の寸法は、厚さ 2mm、幅 10mm、長さ 50mm の短冊状である。

### (2) 接合装置

開発した接合装置の機構と機能について説明する。図 1 ならびに図 2 に、装置外観ならびに内部構造の写真を示した。接合試験片は摩擦係数を下げるための特殊コーティングを施した試料ホルダにセットされ、それぞれのホルダが独立にステッピングモーター駆動により一方向に移動する構造になっている。

各試験片の端部はロードセルに接触しており、接合中の荷重が測定記録されるようになっている。本

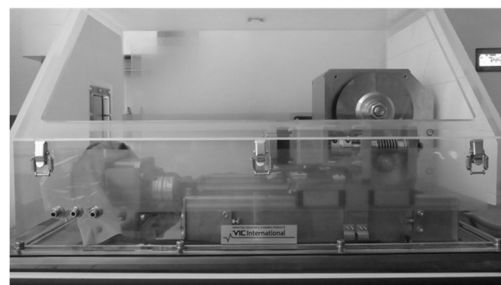


図 1 装置外観

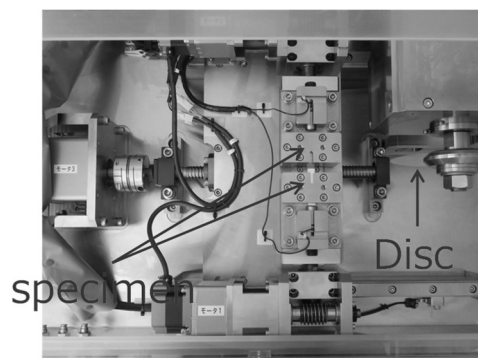


図 2 装置内部構造

装置は位置制御型であり、接合時間とホルダの押し付け移動量は事前にプログラ置に素線径 0.1mm の K 型熱電対をスポット溶接し、接合中の温度履歴も測定できる。接合中の試験片のライブ映像はマイクログラカメラにより撮影され、映像データはパソコンに記録される仕組みとなっている。雰囲気制御が必要な材料の場合は、外部に設置したボンベより還元性ガスをシールドガスとして供給する機構となっている。このように、温度、応力、変位を動的に測定できる接合装置である。

回転する円盤の材質、形状ならびに表面性状(粗度すなわち物理的な意味としては動摩擦係数)は接合材に応じて設計されている。本報告で説明するデータについては、表面粗さが  $0.2\ \mu\text{m}$  程度のものを採用した。円盤の回転数は上述の制御系により事前に設定され、最高回転数は 6000RPM である。

### (3) 接合条件

円盤回転速度 : 1000~4000(R/rpm)、被接合材接近速度 :  $0.35\ (v_1=v_2/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ 、接合速度 :  $15\ (v'/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ 、寄り代 :  $2.7\ (L_1=L_2/\text{mm})$ 、摩擦時間 :  $6.84\ (\text{t/s})$ 、とし、接合開始位置は円盤回転軸直下とした。

使用した円盤の材質は SKH51 で、0.5mm 厚の平板である。界面形状の制御を目的とした実験では、円盤外周部に小孔を複数個所設けた円盤も使用した。なお、円盤は接合後 12mol/L の水酸化ナトリウム水溶液に最低 6 時間浸漬することで、表面の凝着物を除去し、水洗、乾燥後アセトンで脱脂した。

### (4) 接合評価

接合接手は、外観観察、継手断面組織観察、ならびに継手の室温引張試験と破面観察により評価した。外観は、接合時に発生するバリが付いた状態と機械研磨にてバリを除去した状態のそれぞれについて、キーエンス製のデジタルマイクロスコープ : VHX700FSP1344 を用いて実施した。

断面組織観察は、継手の縦ならびに横の 2 方向からの断面について実施した。接合接手に機械研磨を施して鏡面に仕上げた後、化学腐食処理を施して光学顕微鏡観察に供した。高倍率観察時には走査電子顕微鏡を使用した。腐食処理には、テトラフルオロホウ酸 4ml、水 200ml の分量で混合した溶液を用い、電圧 20V、電流 2A 温度 276K、極板間距離 50mm、60s の条件で行った。陰極材にはステンレス板を用いた。

室温引張試験はインストロン・ジャパン(株)製の精密万能試験機 : 5567 型 30KN を用い、初期ひずみ速度  $\epsilon_0 = 5.6 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$  の下で大気中にて実施した。デジタル情報として記録された荷重変位データより、応力ひずみ線図(公称応力と公称ひずみの関係)を得た。継手効率は同種材接合の場合は母材の引張強度に対する割合として算出するが、本研究のように異種接合材の場合においては相対的に低い強度を有する側、すなわち PET 樹脂の引張破断強度に対する継手の引張強さの割合をもって継手効率とした。

引張試験後の破断面の観察は日立ハイテクノロジーズ製の低真空電子顕微鏡 : Miniscope TM3030 を使用し、必要に応じて EDS(加速電圧は 15kV)による元素分析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) アルミニウムと樹脂の円盤摩擦接合

図 3 に A1070/PET DFJ 継手の代表的なマクロ組織と界面マイクロ組織の観察例を示す。図に示すように、フック状の突起がアルミ側から樹脂内に刺さるように伸びているのがわかる。このフックの高さは円盤回転数とともに増加しており、界面形状の複雑さを円盤回転数により制御できる可能性を示唆している。

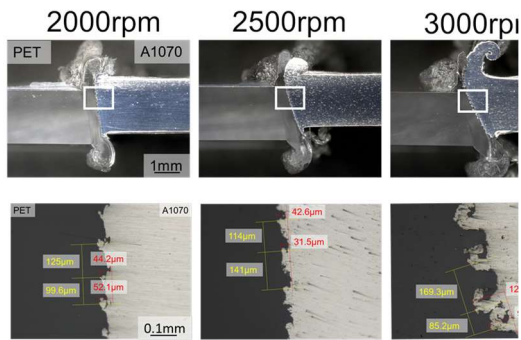


図3 界面組織における凹凸と円盤回転数との関係

図4に引張試験における応力ひずみ線図の一例を示した。円盤回転数は3000RPMである。図よりほぼ直線的に応力値が増加し、24MPaにて破断したことがわかる。この破断強度はPET樹脂の強度(51.4MPa)に対して、46.7%である。

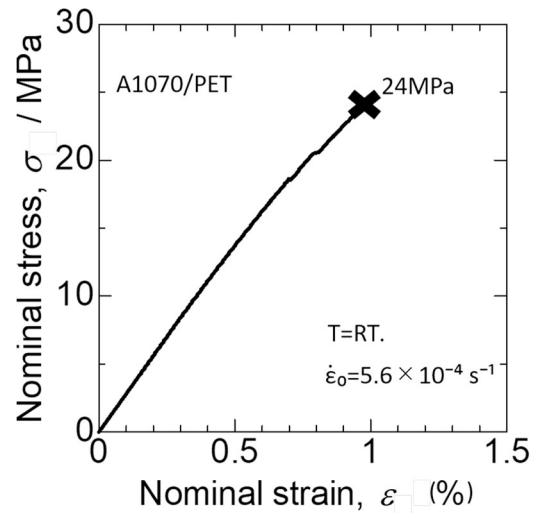


図4 Al/PET DFJ継手の室温引張試験における応力ひずみ線図

### (2) アルミニウムとチタンの円盤摩擦接合

図5はアルミニウムとチタンの円盤接合界面の一例である。界面にわずかであるが微細な凹凸が存在していることがわかる。さらに、チタン側の界面近傍領域の結晶粒が微細化されていることも見て取れる。この事実より、円盤摩擦接合は金属の高温変形を基調としており、動的再結晶を伴いながら軟化した金属が凹凸構造を作りながら接合界面を形成することが示唆される。

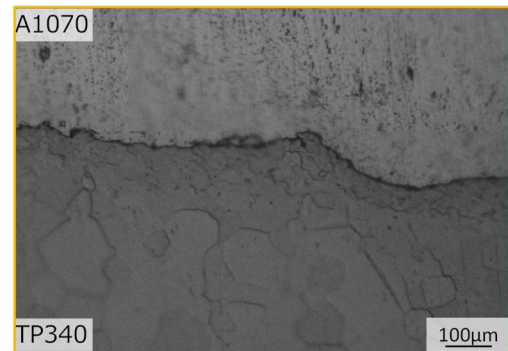


図5 Al/Ti 接合界面近傍の組織

図6は接合接手の室温引張試験における応力ひずみ線図の一例である。弾性領域で破壊しているものの、40MPaほどの破断応力を示しており、この値はアルミニウムの引張強さの30%ほどである。界面結合力を増大させる方法としては、凹凸をより複雑にすること、ならびに界面相反応を生じさせて化学的な結合力を増すこと、の2つの方法が考えられる。これについてはさらなる研究を推進する予定である。

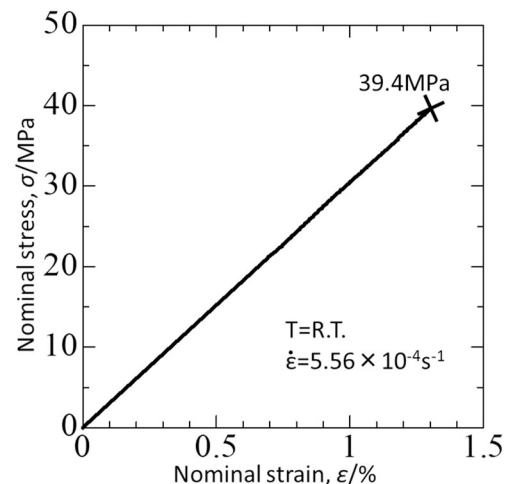


図6 Al/Ti 継手の室温引張試験における応力ひずみ線図

### (3) アルミニウムとマグネシウムの円盤摩擦接合

図7はアルミニウムとマグネシウム合金(AZ31)の円盤接合界面の一例である。界面には微細な凹凸が存在しており、界面近傍領域の結晶粒が微細化されていることも先のAl/Ti接合接手の場合と同じ結果である。室温引張試験の結果は図8に示したごとく、期待したほど強い継手が得られなかったことを示している。これは、マグネシウムとアルミニウムの変形応力の温度依存性が異なることが主因であると考えている。マグネシウムはある温度まではアルミニウムよりも変形応力が高いがそれが逆転すると異常なまでに軟化して接合前の円盤との摩擦段階に

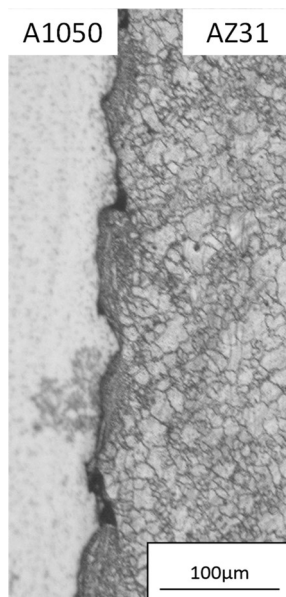


図 7 Al/AZ31 継手界面組織  
の一例

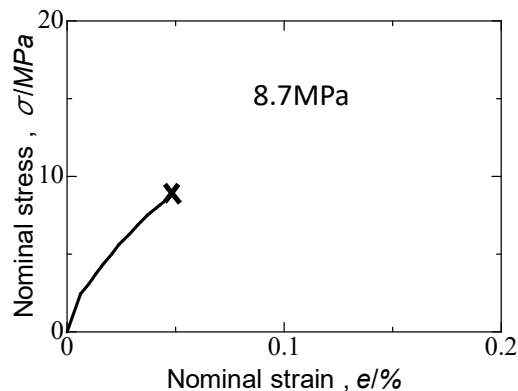


図 8 Al/Mg 継手の室温引張試験における応力ひずみ線図

て変形が進行して所謂バリが多く発生するようになり凹凸の要素となる微小変形部が消失する。そのことが強固なアンカー効果の形成を阻害し、低い継手強度に至ったものと考えている。この問題については、円盤の摩擦係数や回転速度の制御と最適化により解決できると考える。

これらの結果を踏まえて、円盤摩擦接合研究で明らかになった重要事項ならびに今後の展開について以下にまとめる。

1. 円盤摩擦接合による工業用純アルミニウム A1070 と、PET 樹脂、工業用純チタン TP340 ならびに AZ31 マグネシウム合金の接合が可能であることが実証された。
2. 継手界面付近に形成された微細結晶粒帯は摩擦中の高温強加工によるものであると結論された。
3. 接合面の凹凸は円盤が抜ける際に形成され、この凹凸が継手強度に大きく影響している。また、円盤の回転速度、接合速度により凹凸の制御が可能である。
4. 円盤の表面処理は界面温度の制御に有効であり、継手強度の向上に期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Toshiya Shibayanagi, Norihiro Tajiri, Shyuhei Hirose, Satoru Ishihara, Masaru Sato                                | 4. 巻<br>37              |
| 2. 論文標題<br>Development of Disc Friction Joining and its Application to Dissimilar Butt Joining of Aluminum and Resin Plates | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Welding Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>1WL - 3WL |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>杉森 康志郎, 田尻 典大, 柴柳 敏哉            |
| 2. 発表標題<br>SUS304ステンレス鋼とPMMA樹脂の円筒円盤摩擦接合    |
| 3. 学会等名<br>日本鉄鋼協会・日本金属学会 北陸信越支部 令和元年度連合講演会 |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>開道弘紀、杉森康志郎、田尻典大、柴柳敏哉                      |
| 2. 発表標題<br>アルミニウム合金と熱可塑性樹脂の円盤摩擦接合継手の力学的特性に及ぼす接合条件の影響 |
| 3. 学会等名<br>日本鉄鋼協会・日本金属学会 北陸信越支部 令和元年度連合講演会           |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>杉森 康志郎, 田尻 典大, 柴柳 敏             |
| 2. 発表標題<br>SUS304ステンレス鋼とPMMA樹脂の円筒円盤摩擦接合    |
| 3. 学会等名<br>日本鉄鋼協会・日本金属学会 北陸信越支部 令和元年度連合講演会 |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Norihiro Tajiri, Koshiro Sugimori, Toshiya Shibayanagi, Satoru Ishihara   |
| 2 . 発表標題<br>Characteristics of Dissimilar Interface of Aluminum/Resin Joints Produced by Disc Friction Joining  |
| 3 . 学会等名<br>14th International Conference on the Physical Properties and Application of Advanced Materials, (ICPMAT 2019), September 1-4, Daegu, Korea ( 国際学会 ) |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Toshiya Shibayanagi, Norihiro Tajiri, Koshiro Sugimori, Satoru Ishihara                      |
| 2 . 発表標題<br>Interfacial Characteristics of Aluminum / Resin Dissimilar Joints by Disc Friction Joining   |
| 3 . 学会等名<br>14th International Aluminium Conference (INALCO 2019), November 13-15, Tokyo, Japan ( 国際学会 ) |
| 4 . 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Toshiya Shibayanagi   |
| 2 . 発表標題<br>Development of Disc Friction Joining and its Application to Similar and Dissimilar Joining      |
| 3 . 学会等名<br>13 th International Conference on the Physical Properties and Application of Advanced Materials |
| 4 . 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Toshiya Shibayanagi   |
| 2 . 発表標題<br>Disc Friction Joining of Aluminum to Mild Steel   |
| 3 . 学会等名<br>International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2018 Kitakyushu International Conference Center Kitakyushu, Japan |
| 4 . 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田尻典大                                 |
| 2. 発表標題<br>A1070工業用純アルミニウムとPET樹脂の円盤摩擦接合継手の組織と強度 |
| 3. 学会等名<br>一般社団法人軽金属学会第135回秋期大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田尻典大                                       |
| 2. 発表標題<br>A1070工業用純アルミニウムとPET樹脂の突き合わせ接合に対する円板摩擦接合の適用 |
| 3. 学会等名<br>一般社団法人摩擦接合技術協会平成30年度第二回研究会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                                       |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田尻典大                      |
| 2. 発表標題<br>A1070アルミニウムと PET樹脂の円盤摩擦接合 |
| 3. 学会等名<br>一般社団法人溶接学会2018年度春季全国大会    |
| 4. 発表年<br>2018年                      |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究期間内の出願ではないが、円盤摩擦接合に関する基本特許が2021年4月特許登録されたことをここに付記する。  
 特許の名称：接合装置並びにそれを用いた接合方法及び接合体の製造方法  
 出願人：柴柳 敏哉、石原 知、廣瀬 周平、佐藤 智  
 特許第6868885号



6. 研究組織

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                            | 備考 |
|-------------------|---|--|----|
| 研究<br>分<br>担<br>者 | 山根 岳志<br><br>(Yamane Takeshi)<br><br>(60272895) | 富山大学・学術研究部都市デザイン学系・助教<br><br><br><br><br>(13201) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|         |         |