

円盤摩擦接合法による異種材料接合技術の開拓

— レーザ加工による円盤表面テクスチャの創出 —

富山大学 学術研究部・都市デザイン学系
教授 柴柳 敏哉

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017022)

キーワード：円盤摩擦接合，アルミニウム，PET 樹脂，接合界面，アンカー効果

1. 研究の目的と背景

ものづくりにおいて溶接・接合の役割は極めて重要であり、新しい材料が生み出されるごとにその材料に適した溶接プロセスが開発されてきている。溶接に用いられる熱源には、アーク溶接¹⁾に用いられる電気エネルギー、レーザー溶接²⁾では光エネルギー、拡散接合³⁾では熱エネルギー、摩擦接合^{4,5)}では機械的エネルギーなどがあり、多様である。

溶接される部材については、同種材料と異種材料に大別され、材質に応じた最適溶接技術が適用される。近年、マルチマテリアル化⁶⁾への技術的要請が高まる中、異種材料の溶接は喫緊の課題となっている。最たるものが自動車であり、軽量化を進める強い必要性からアルミニウム合金やマグネシウム合金あるいは樹脂をこれまでの鉄鋼材料の代替材料として採用する動向にある。

アルミニウム合金の溶接は、その特異な物性（高い熱伝導率、熱膨張係数、など）がゆえに熔融溶接が容易ではなく、プロセスが限定的である。しかしながら、1991年英国 TWI での摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding: FSW）技術⁷⁾の開発により、この固相接合技術のおかげで、今では新幹線車体製造に適用されるなど幅広く活用されるようになった。溶かさないうつなぐ方法がアルミニウムで実現されたことが、破壊的イノベーションとなり、アルミニウムの接合技術の展開を可能にして今日に至っている。

アルミニウムと他の材料（鉄、チタン、マグネシウム、樹脂など）との異種材料接合技術はマルチマテリアル技術の重要技術課題の一つであるが、熔融溶接法の適用を目指した技術開発と併行して固相接合技術の開拓への期待も極めて大きい。ここで候補となるのが、摩擦圧接ならびに前出の FSW である。前者は丸棒などの形状に対して有効であり、後者は板に対しての接合に向いている。それぞれ、アルミを主体とした異材接合の切り札となる技術である。

これに加えて、我々は、新しい接合技術である円盤摩擦接合（Disc Friction Joining: DFJ）を先年世の中に提案し^{8,9)}、アルミニウム合金と PET 樹脂の接合に成功するなど、本接合法の現実的な可能性を追求する研究活動を続けている。DFJ は板の線接合（突き合せ接合）に効果的な接合法であり、摩擦圧接と FSW の特徴を含んだ接合法とも言える。現時点においても本接合装置を保有する研究室は世界で我々だけであり、日本初の溶接・接合技術として世界

に貢献すべく開発を続けている。要諦となるのは後述する円盤の表面性状にあり、この最適化指針を、レーザー表面加工技術を視野に入れて、実験データを積み上げながら策定することを本研究の目的とした。

本報告書は、天田財団の支援を得て遂行された研究活動を総括し、DFJ の今後の展望を述べるものである。

2. 円盤摩擦接合の原理

円盤摩擦接合とは、回転する円盤の両側に 2 つの被接合部材をセットし、円盤面に対して垂直に荷重を負荷して押し付け、接触面で発生する摩擦熱を利用して部材の一部が軟化した状態にし、同時に接合面にあった酸化被膜や汚れを除去して、円盤が両材を引き抜かれていく瞬間に 2 つの部材が接触しさらに加圧されることで接合界面を得るという接合技術である。接合プロセスの図解を図 1 に示した。

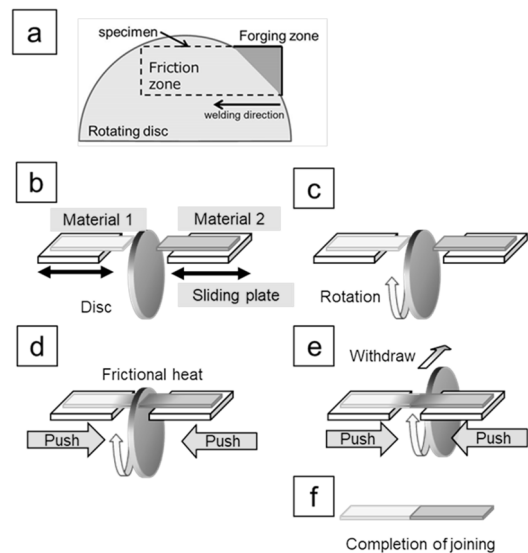


図 1 円盤摩擦接合プロセス

ここで用いる円盤は本技術の要になる技術要素である。円盤の役目は、被接合材との摩擦現象ならびに発熱過程の制御であるが、これに加えて後述する接合界面形状付与機能も有する。摩擦現象の制御については、表面粗度の調整により最適な動摩擦係数を実現しそれにより必要な発熱

量を得ることに直結する。界面形状付与については、接合界面の凹凸形状のことであり、いわゆる「機械的接合効果：アンカー効果」を現出することを意味する。

本稿では、工業用純アルミニウムと熱可塑性樹脂の一種であるポリエチレンテレフタレート（PET）樹脂との接合研究成果を報告する。

3. 実験方法

3.1 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)と、熱可塑性樹脂のポリエチレンテレフタレート(以下PET)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。

3.2 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2ならびに図3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プモータ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。本装置は位置制

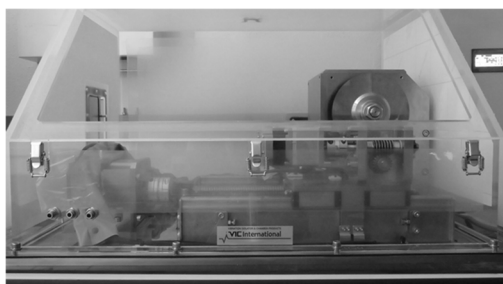


図2 装置外観

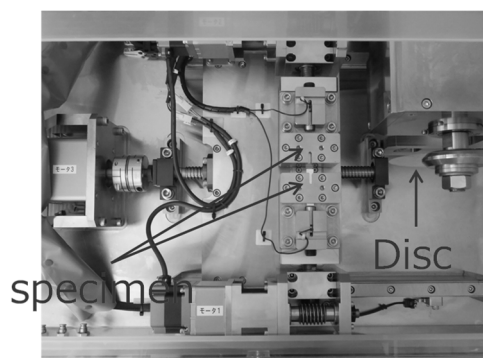


図3 装置内部構造

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 $0.2\mu\text{m}$ 程度のもので採用した。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。

3.3 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。

3.4 接手評価

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。

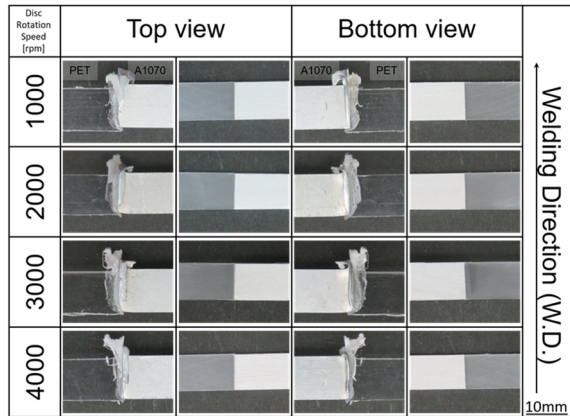


図4 継手外観写真

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. 実験結果と考察

4.1 無加工円盤による接合

4.1.1 継手の外観

図4は無加工円盤による回転速度1000rpm~4000rpm、摩擦時間6.84s、被接合材接近速度0.35mm/s、試料移動速度15mm/s、寄り代2.7mmの条件におけるA1070/PET継手の接合直後及びバリ排除後の表裏の外観である。接合方向は、外観の下から上である。全ての条件において外観上はクラックや接合部に溝があるなどの欠陥は認められなかった。

4.1.2 継手断面マイクロ組織

図5にA1070/PET DFJ継手の代表的なマイクロ組織を示す。a)はFig. 3-3のb)と同じ1000rpmの継手のマクロ組織である。本観察面において、周期的に凹凸が形成されていた。b)は継手の中央部である。この領域には、接合界面から母材側に向かう順に凹凸、微細結晶粒帯、熱影響部が観察できる。

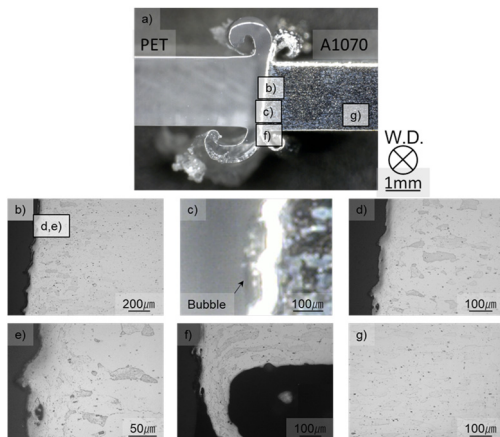


図5 A1070/PETのDFJ継手組織

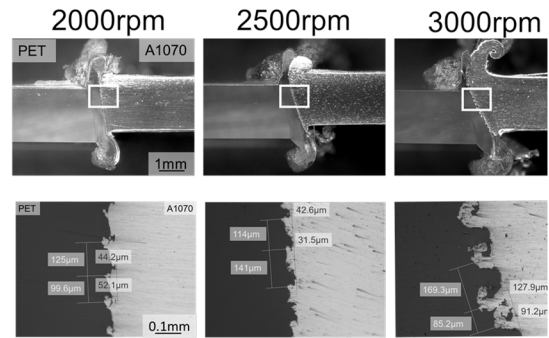


図6 界面組織における凹凸と円盤回転数との関係

部が観察できる。c)は本観察面より接合方向奥側に観察された気泡である。面積の計測はできていないが、大きさは本写真を基に300μm程度と推測している。d)はb)の熱影響部の拡大である。e)はb)の微細結晶粒帯の拡大である。f)は塑性流動方向に伸張した組織が観察できた領域である。流動はバリの排出方向に沿って生じており、円盤との摩擦の際に形成した組織であると考えている。また、同様にa)の上部A1070バリ近傍においては、上部に向かって塑性流動が観察できた。g)は母材部の組織である。

次に界面組織における凹凸と円盤回転数との関係をまとめて図6に示す。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。

4.1.3 温度履歴

図7にA1070/PET DFJ実験中の代表的な温度履歴を示す。図には円盤回転数が1000、2000、ならびに3000RPMの場合を載せている。横軸が時間で縦軸が温度である。図中にはPET樹脂のガラス転移温度ならびに融点を破線で示した。

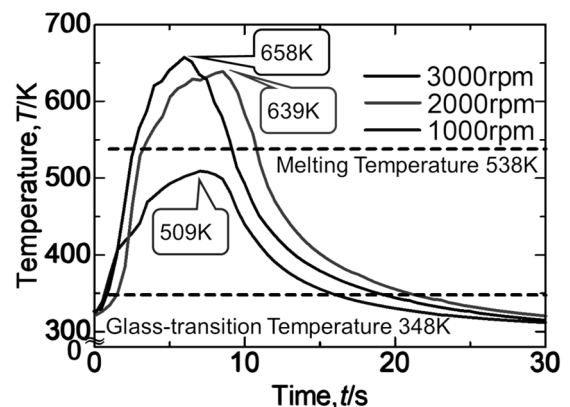


図7 接合中の温度履歴

円盤回転速度の増加に応じて最高到達温度が 509、639 そして 658K と上昇したことがわかる。1000RPM の場合は樹脂の融点以下であるが、ガラス転移点よりも高温である。これらの温度は、アルミ側で円盤接触部より 2mm 離れた位置での測定結果であることを考えると、円盤接触部の温度はさらに高温であることが推定できる。すなわち、樹脂の軟化温度域に達したアルミニウムが円盤からすり抜けた途端に樹脂と接触し、急速に樹脂を加熱することになる。このことにより樹脂が軟化したことになる。樹脂側も円盤との摩擦発熱により加熱されており、この余熱効果もアルミとの接触時の樹脂軟化を促進している。

後述するが、アルミニウム側にできた凹凸部へ軟化した樹脂が押し付けられ、微細かつ複雑形状になじむように充填されて接合が完了し、いわゆるアンカー効果が発現すると考えている。

4.1.4 室温引張試験

図 8 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。

引張前後の試験片の状態を図 9 に示した。図中左側が引張前である。引張後を見るとアルミ側に一部樹脂部が残っていることが見て取れるが、これはこの部分については樹脂内破断すなわち接合界面強度が樹脂強度を上回っていることを意味する。

図 10 は破面観察結果の一例である。図中の矢印は接合方向である。これはアルミ側の破面であるが、図の A および B 領域はそれぞれ界面破断部および樹脂内破断部を示している。界面破断部の拡大図を下に示しているが、溝状の凹凸部に残存する樹脂が一部確認できる。このように、この異材継手界面はフック状の突起を特徴とする形状の界面を有しており、そのフック部がアンカー効果を発揮して接合強度発現に寄与したとと考えている。

本実験では、他の領域は界面破断型であったが、この樹脂内破断領域での接合過程と外部因子のより詳細な解析を進めることで長尺物の接合において母材破断する強度をもたらす界面構造を作り出す最適接合条件が策定できる。

4.2 特殊加工円盤による接合

前節にて、DFJ 継手界面の特徴として、凹凸形状を発見したことを述べ、その凹凸構造がもたらすアンカー効果発現が継手強度に寄与する因子であることを指摘した。

本節では、この界面凹凸を意図的に複雑にすることを目的として、円盤に特殊加工を施してその効果を引張試験により検証した結果を説明する。

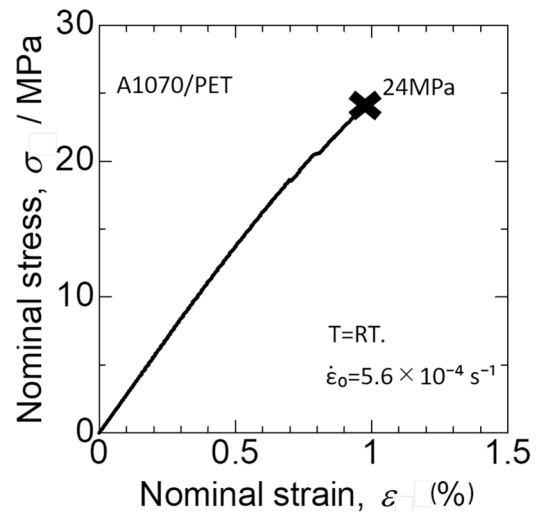


図 8 Al/PET DFJ 継手の室温引張試験における応力ひずみ線図

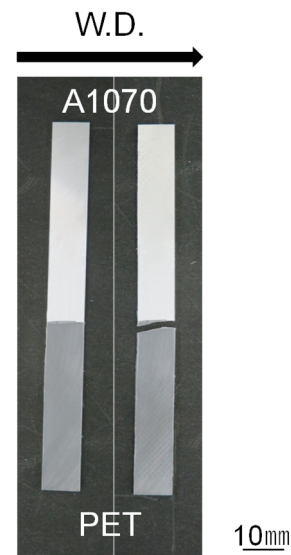


図 9 試験前後の引張試験片

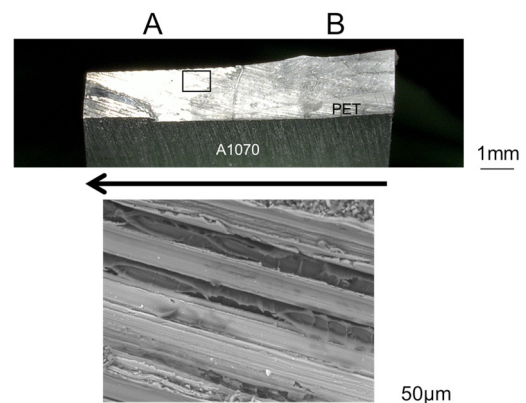


図 10 破面観察結果の一例

図 11 に $\pi/4$ 円盤を用いて 3000rpm の条件で接合した継手の引張試験結果を示す。a) は試験に供した継手の外観である。b) は試験後の外観である。尚、a) b) 共に ND 方向から撮影している。また、写真上部が PET であり、下部が A1070 となっており、接合方向は写真左から右の方向、引張方向は写真の上下方向である。c) は試験で得られた応力-ひずみ線図である。本グラフは縦軸に公称応力、横軸に公称ひずみをとっている。グラフは、応力とひずみが直線的な関係を保ったまま増加した後、35.6MPa を呈して破断したことを示している。この値は継手効率 69.2% (PET 51.4MPa を基に算出) に相当する。

d) は破断後の A1070 側の破面を傾斜させて撮影した写真である。A1070 側に PET が付着した状態で破断が生じたことがわかる。e) は破断後の継手破面を真上方向(d)の写真で R.D. 方向)から観察したものである。上の破面が PET 側、下の破面が A1070 側である。接合方向は左から右の方向である。

このほかに、#180 のエメリー紙により表面粗さを増大させた場合、小孔設置位置を孔同士の間隔を中心角 $\pi/8$ とした場合、も接合実験に供したが、 $\pi/4$ 円盤が最大値を与えた。

このように、円盤の表面性状を変化させることは継手強度改善に効果的であることを示唆するデータを得ることに成功した。

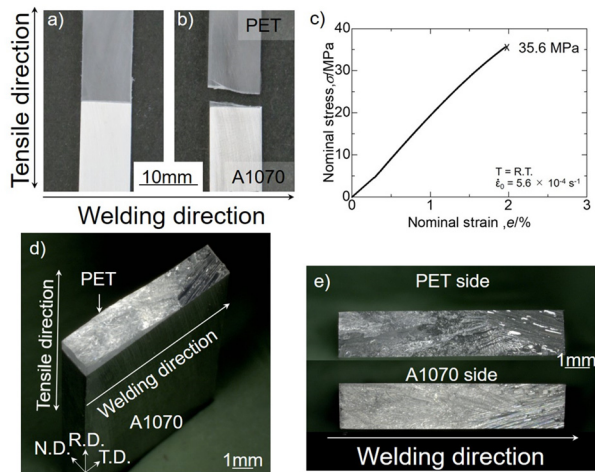


図 11 $\pi/4$ 円盤を用いて 3000rpm の条件で接合した継手の引張試験結果

5. 考察：円盤表面性状の設計指針

円盤摩擦接合は回転円盤が被接合材端部との間で摩擦状態にあり、そのことが熱エネルギーの創出をもたらし、接合界面の複雑形状付与機構を支配する。円盤との摩擦発熱の状態を経て、円盤が被接合材を抜け出るときに、本実験では 0.5mm の円盤厚みのギャップを挟んで対峙する二つの表面が接して接合界面を形成することになるが、この円盤の端部において露出する表面が削り取られるように

して独特の突起部を形成すると考えている。あるいは、円盤の表面にできる構成刃先により接合材端部が独特の形状に削られていくとも考えられるが、先に示した周期的な凹凸を作り出すことに対して明確な説明がなされにくいことを考えると円盤端部における凹凸形成が現時点では界面構造形成の場である可能性が高い。

このことを踏まえて円盤性状の最適化指針を考えると、円盤端部の微細加工が極めて重要な要素技術になる。この接合界面の形成機構は、円盤の外縁部の形状に最重要ポイントがある。すなわち、ミクロンレベルで円盤形状に凹凸等の表面起伏を作りこむ技術が必要で、レーザ加工しかこれを達成できる手法はない。この研究期間では、レーザ表面調質の効果を実証できてはいないが、当該研究はこれからも継続されていき、円盤へのレーザ加工が新規研究課題になっており、加工メーカーもあり、試作品もある。今後は、本助成研究で明らかになった「接合原理と円盤が具備すべき機能」をもとに、DFJ が社会実装されるべく徹底的な技術開発研究に邁進する。

6. 結論

装置開発に紆余曲折があり、数々の失敗や不具合を解決しながら 2 年以上の時間を費やして信頼できる実験ができるようになった。その装置は世界でここだけの接合装置であり、アルミニウムと樹脂の突き合せ接合に成功し、DFJ が新たな接合技術としての発展の端緒を開いたものと考えている。

この技術の一番大事なポイントは円盤にある。DFJ 独特の界面凹凸の形成機構は今後のさらなる詳細な研究を必要とするが、本報告書内で示したように、円盤の端部に微小な孔を開けるだけの加工を施すだけで接合強度が向上したことが端的に示すように、こういった微細加工パターンの追求が DFJ の先鋭化に不可欠であることは明白である。

これまでに、円盤の材質として、普通鋼や耐熱鋼などを試してきたが、将来において DFJ に最適化された材質(強度と剛性などを最適化する)を設計した後に、表面微細形状の付与が必要になり、その際にレーザ加工技術が成否を決する。DFJ 技術の展開の鍵を握るのがレーザ加工であることは疑いようのないことである。

謝 辞

円盤摩擦接合装置の開発に対して研究費を与えくださった天田財団には心から感謝を申し上げます。この研究費なくして装置開発は成しえなかったことに加えて、円盤表面性状の設計指針を見出しその有効性を検証することはできなかったことを強調し、今後の技術開発の進展とそれによる高信頼性継手の創出によりご支援いただいたことに対する謝意の具体化としてまいります。

また、本研究に共同してくれた石原 知氏、柴柳研究室の学生諸君(廣瀬周平、田尻典大、杉森康司郎、開道弘紀、

横井仁哉)に感謝します。最後に、円盤摩擦接合装置を共同開発していただいたVIC International(竹内幸雄社長)に謹んでお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中 学：溶接学会誌、73(2004), 113-118.
- 2) 片山聖二：軽金属、62(2012), 75-83.
- 3) 大橋 修：まてりあ、57(2018), 443-447.
- 4) 藤井英俊、青木祥宏：日本機械学会誌、112(2019), 8-11.
- 5) 山本尚嗣、高橋 誠、有年雅敏、池内建二：溶接学会論文集、23(2005), 496-503.
- 6) 杉本幸弘：溶接学会誌、87(2017), 66-70.
- 7) 佐藤 裕：軽金属、68(2018), 310-315.
- 8) T.Shibayanagi, N.Tajiri, S.Hirose, S.Ishihara, M.Sato : *Welding Letters*, 37(2019), 1WL-3WL.
- 9) 柴柳敏哉、石原 知、廣瀬周平、佐藤 智：特許第6868885号