

摩擦攪拌現象とアンカー効果を利用した 新たな異種材料接合技術の開発

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

次長 坂村 勝

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021025-B3)

キーワード：摩擦アンカー接合，亜鉛めっき鋼（GA 鋼），アルミニウム合金，CFRP

1. 研究の目的と背景

近年，地球温暖化防止策として，輸送機器産業では燃費向上を目的とした車体の軽量化が推進されている．その推進のために，従来用いられている鋼をアルミニウム合金や繊維強化型プラスチック（以下，CFRP）等に代替したハイブリッド構造が推奨されており，これに伴い，鋼とアルミニウム合金や CFRP の異種材料接合が必要となっている．

このニーズに応えるべく，筆者らは，鋼とアルミニウム合金等非鉄材料の重ね点接合を行う手法として摩擦アンカー接合を考案し，これまで，A5052 と SPCC の 2 枚重ね継手，A5052/SPCC/SPCC の 3 枚重ね継手の機械的性質について報告を行ってきた^{1,2)}．摩擦アンカー接合は，一般的な摩擦攪拌点接合同様に，重ねて配置された 2 枚以上の供試体に，接合ツールを回転させながら押し当てる接手法である．本手法では先端が球面の接合ツールを用い，この接合ツールを回転させながら下板の鋼側まで押し込む．そして，下板の鋼からなる突起部を上板のアルミニウム合金中に形成し，その突起部のアンカー効果により接合する．本手法で得られた接合材は，特に，はく離強度が高いことを特徴としている．しかし，本手法を A5052 と合金化熔融亜鉛めっき鋼（以下，GA 鋼とする）の重ね継手に適用すると，以下の現象が発生し十分な継手強度が得られないことが判明した³⁾．① A5052/SPCC の場合（図 1）に比し鋼突起は高さが低くなり，ひだ形状を呈する．② 鋼突起の周辺に多量の化合物

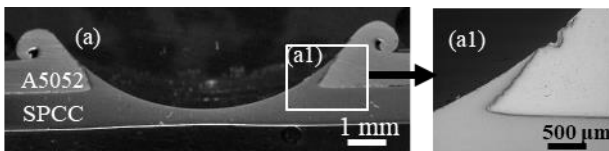


図 1 A5052/SPCC 接合材の断面マクロ及び光学顕微鏡写真（押込量 1.5mm）

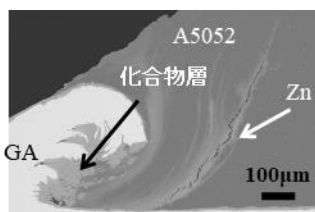


図 2 A5052/GA 接合材の断面 SEM 写真（押込量 1.5mm）

層が存在し，アルミニウム合金中に Zn が流入して割れが発生する（図 2）．これらの原因は，GA めっき膜とアルミニウムの直接接触であると考えている．そこで本研究では，この対策として，Al と Fe の反応抑制が期待できる表面処理を施したアルミニウム合金と GA 鋼に摩擦アンカー接合を適用し，上記①，②の現象を抑制することを試みた．本報では，まず，この結果について報告する．

次に，前述のとおり，CFRP と鋼の異種接合のニーズも高い．このニーズに応えるべく，筆者らは CFRP（下穴あり）/鋼の重ね継手の上に第三の補強用金属板（以下，スティフナとする）を配置し，球面ツールを回転させながら押し込んで接合する手法を考案した⁴⁾．本報では，本手法を CFRP と鋼の接合へ適用して得られた結果についても報告する．

ところで，アルミニウム合金を対象とする摩擦攪拌接合では工具鋼ツールで十分な耐久性が確保できていた．しかし，本接合法を鋼等の高融点材料へ適用する際には接合ツールの耐久性が問題になり，耐久性向上のために，Ir 合金，Co 合金等の合金系接合ツール⁵⁻⁷⁾や，厚膜コーティングを施した超硬合金等の報告⁸⁾がなされている．しかし，いずれの材料もコスト面に問題があり，自動車等の大量生産に適用するのは困難な状況にある．これに対して，筆者らは安価な窒化珪素を先端に有する接合ツールを提案し，これまで，東芝マテリアル㈱と共同で研究開発を行っている．窒化珪素は超硬合金や Co 合金等と異なり，地球上に大量に存在する“窒素”と“珪素”から構成され，量産を行えば行うほど製造コストを低減できるという特徴を有している．これらの背景より，本研究では，摩擦アンカー接合ツール用材料として用いている窒化珪素の耐久性向上について取り組んだので，その結果についても併せて報告する．

2. アルミニウム合金と GA 鋼の接合

2.1 実験方法

2.1.1 供試材料及び接合方法

供試材としては，表面処理を施したアルミニウム合金 A5052（厚さ 1.0mm，以下，表面処理 A5052 とする）と GA 鋼（厚さ 1.2mm，めっき厚さ 8μm）を用いた．供試材の形状は，30mm×80mm とし，図 3 に示すように，上

側に表面処理 A5052, 下側に GA 鋼を, 重ね代を 30mm として配置し, 先端に窒化珪素球を埋め込んだ接合ツールを用いて, エアシリンダ上にセットした供試材を回転する接合ツールに押し込むことで接合した. 使用したエアシリンダは最大 12kN の垂直荷重を発生させることができる. 接合ツールは, 図 4 に示すように, 先端の球径が $\phi 12.7\text{mm}$ で鋼製ホルダーからの突出量は 5mm とした. また接合条件は, ツール回転数 1800rpm, ツール押込量 1.8mm, 接合時間 5 秒とし, シールドガスは用いなかった. なお, 本実験での接合時間はエアシリンダにエアを供給している時間を意味する.

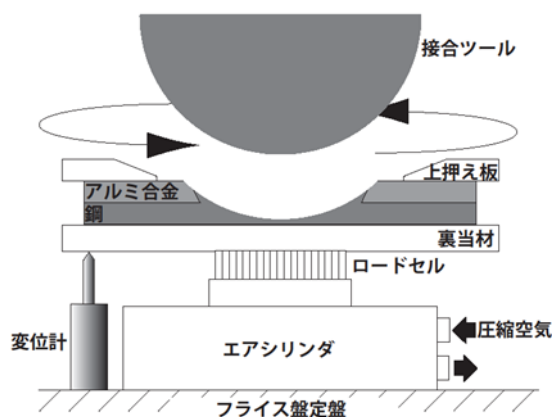


図 3 摩擦アンカー接合用装置概略図

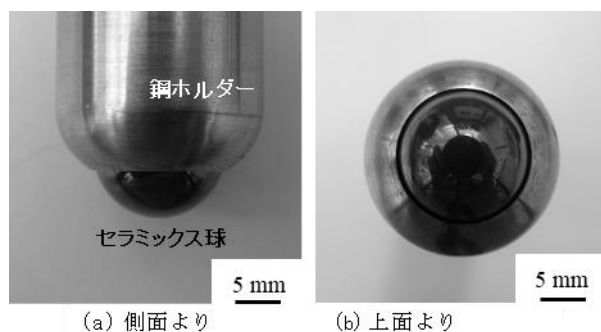


図 4 摩擦アンカー接合用ツール外観

2.1.2 接合材の断面評価

接合材の断面評価については, 切断及び研磨後, 日本電子(株)製静電界放射型走査電子顕微鏡 JSM-7200F (エネルギー分散型 X 線分析(EDS)装置付属)を用いて行った.

2.2 結果及び考察

図 5 に接合材料の突起部近傍の断面 SEM 反射電子像を示す. 図 2 の A5052/GA 接合材の突起部近傍と比較すると, 鋼突起の高さ, ひだ形状は改善されている. また, 接合界面近傍の SEM 写真及び EDS 面分析結果から, 金属間化合物層生成は大幅に抑制され, アルミニウム合金中への Zn の流入は抑制されていることが分かる. これは, 表面処理膜がアルミニウム合金と GA 膜の接触を抑制するとともに, Al と Fe の反応を抑制したためと推察している.

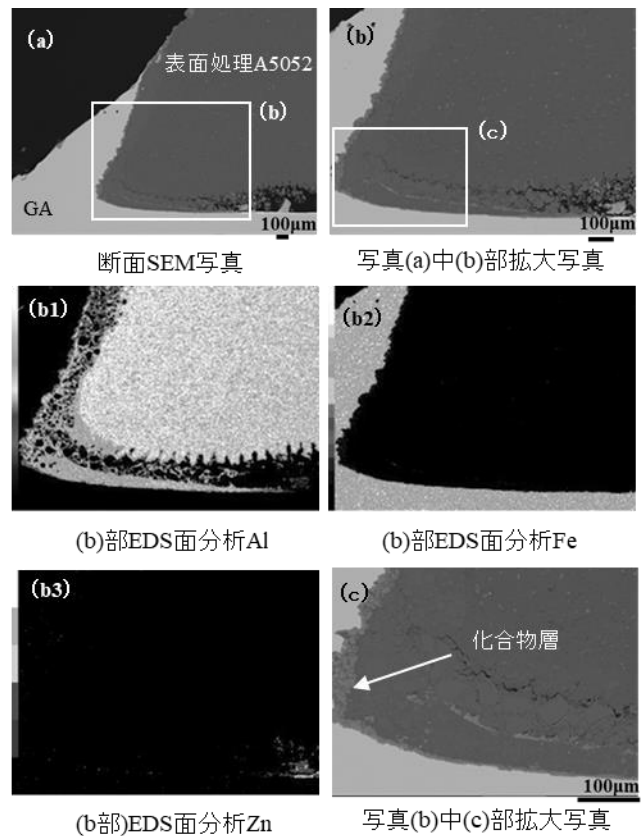


図 5 表面処理A5052/GA接合材の断面SEM写真及びEDS面分析結果

3. CFRP と鋼の接合

3.1 実験方法

3.1.1 接合方法の概要

考案した樹脂-金属異材接合方法の概略図を図 6 に示す. 本接合法の特徴は, 図に示すように被着体である樹脂板及び金属板に加えて, スティフナを使用し, 金属製の被着体とスティフナとの間に樹脂被着体を挟みこんで接合する点であり, 接合ツールが被着体に押し込まれると, 被着体及びスティフナが接合されて一体となり, 継手が形成される. 接合ツールや治具及びツールの押込み方法などについては, 第 2 節に示した摩擦アンカー接合法と同様に行った.

CFRP 被着体には板厚 1mm の CF/PA66 綾織積層板 (Bond-Laminates 製 TEPEX dynalite 201-C200) を, 金属被着体及びスティフナには市販の冷間圧延鋼板 SPCC (板厚 1mm) をそれぞれ使用した. また, 接合ツールは, 径 $\phi 9.5\text{mm}$ の窒化珪素製球体を S45C 製円柱端部に焼嵌め固定したものを用いた. 今回の接合条件は, ツール回転数 970rpm, ツール押込量 2.6mm で行った. また, 中間層となる CFRP 板の接合部には, 接合前に $\phi 10$ の貫通穴加工を行っている.

3.1.2 接合強度測定

製作した接合継手に対して, JIS 規格に準拠し, 引張せん断強度 (JIS Z 3136) 及びはく離強度 (十字引張試

験：JIS Z 3137) を測定した。被着体の切り出し寸法は、引張せん断試験片が幅 30mm×長さ 85mm、はく離強度試験片が幅 50mm×長さ 150mm である。また、本接合法の有効性を相対的に評価するため、構造用エポキシ接着剤（スリーボンド製 2242）を使用した接着継手も製作し、引張せん断強度及びはく離強度を同様に求めた。接着部の面積は、引張せん断継手が幅 30mm×ラップ長さ 25mm、はく離強度試験片が幅 50mm×ラップ長さ 50mm とした。

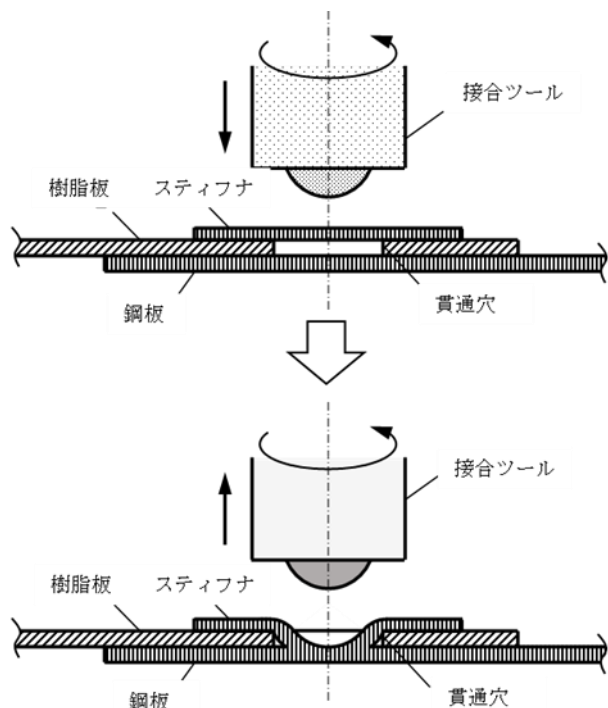


図 6 スティフナを用いた樹脂/鋼の摩擦アンカー接合模式図

3.2 結果及び考察

3.2.1 接合部の断面観察

得られた継手接合部の観察例を図 7 に示す。これより、同一材種である最下層の SPCC 板（被着体）と最上層のスティフナが一体化し、中間の CFRP 板を挟むように三枚の板が顕著なすき間なく接合されていることが確認できる。

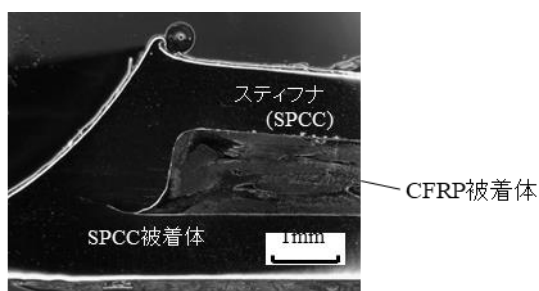


図 7 接合部近傍の断面観察

3.2.2 引張せん断強度及びはく離強度

製作した継手の引張せん断強度(TSS)、はく離強度(CTS)、及び引張せん断強度に対するはく離強度の比

CTS/TSS を表 1 に示す。ここで、接着継手においては、接着面積が引張せん断試験とはく離試験とで大きく異なるため、試験時の最大荷重を接着面積で除して得られる平均応力を引張せん断強度及びはく離強度として表中に示した。これより、本接合法で得られた継手の場合、引張せん断強度 TSS が 3.0kN、はく離強度 CTS は 1.7kN であり、引張せん断強度の 50%を超えるはく離強度を有している。さらに、本接合継手のはく離/引張せん断強度比 (CTS/TSS)を接着継手のそれと比較すると、接着継手の CTS/TSS 値は摩擦アンカー継手のそれよりも著しく低く、はく離に弱い構造用エポキシ接着剤の特性が顕著に表れている。これより、CFRP 部材の主要な接合手段として用いられる構造用接着剤に対して、スティフナを用いる摩擦アンカー接合ははく離に強い接合法であり、大きな面外荷重を受ける場合や十分な接着面積が確保できないなど接着の適用が難しい場面において、効果的な異材接合方法になり得ると期待される。

表 1 引張せん断およびはく離強度試験の結果

摩擦アンカー接合継手			接着継手		
引張せん断強度 (最大荷重) TSS (kN)	はく離強度 (最大荷重) CTS (kN)	CTS/TSS (%)	引張せん断強度 (平均応力) TSS (MPa)	はく離強度 (平均応力) CTS (MPa)	CTS/TSS (%)
3.0	1.7	56	8.2	0.3	4

4 高耐久性窒化珪素の耐久性評価

4.1 実験方法

4.1.1 窒化珪素製ツールの作製

一般的な窒化珪素焼結体の微細組織の模式図を図 8 に示す。窒化珪素焼結体は一部が柱状に成長した窒化珪素粒子とその間を埋める粒界相からなる。この繊維強化材的な組織の特徴が優れた機械特性を発現する所以となっている。今回の実験では、標準的なベアリング用窒化珪素である Sample A に加え、高温機械的特性の向上を目的として組成を調整し、窒化珪素粒子のサイズ及び粒界相の分布を制御した Sample B を作製した。また、Sample B については、焼結時の条件改善として低温かつ長時間での焼結を行うことで、異常な窒化珪素粒子や粒界第二相の成長の抑制と、破壊の起点となる微細な欠陥や空隙の消失を図った。

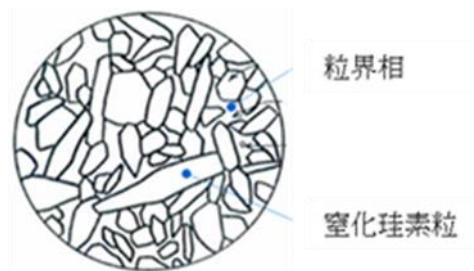


図 8 窒化珪素焼結体のミクロ組織模式図

4.1.2 窒化珪素製ツールの耐久性評価

Sample A 及び Sample B の窒化珪素焼結体をショルダ径 15mm, プローブ径 6mm, プローブ長 1.9mm の FSW ツール形状に加工した. 被接合材をオーステナイト系ステンレス鋼板 SUS304 (厚さ 2.5mm) とし, 垂直荷重 3500Kg, 接合ツール前進角を 3° として, スターインプレートを行うことで耐久性を評価した. なお, 接合中の供試材及び接合ツールの酸化を抑制するためにアルゴンガスを常時吹き付けた.

4.1.3 窒化珪素焼結体の特性評価

窒化珪素焼結体の特性評価として, JIS R1604 に基づく 4 点曲げ強度の温度依存性評価を実施した. 外部支点間距離は 40 mm, 内部支点間距離は 20 mm とし, クロスヘッド移動速度は 0.5 mm/min とした. 加えて, JIS R1623 に基づくビッカース硬度の温度依存性を評価した. この時の荷重は 196 N, 荷重保持時間は 30 s とした. 4 点曲げ強度及びビッカース硬度の測定は, 20 $^{\circ}\text{C}$ から 1200 $^{\circ}\text{C}$ までの範囲で実施した.

4.2 結果及び考察

4.2.1 耐久性評価結果

ツール寿命評価試験の FSW 条件は, 無欠陥継手が得られると共に接合温度が低いツール回転数 600 rpm, 接合速度 1000 mm/min とした. 得られたツール寿命を図 9 に示す. Sample A では接合距離が 1.64 m でショルダ部に一部破損が発生した. これに対して, Sample B は 9 m 以上の接合距離でも破損が発生せず, 最終的に 9.45 m にてショルダ部に一部破損が発生して評価を終了した. 得

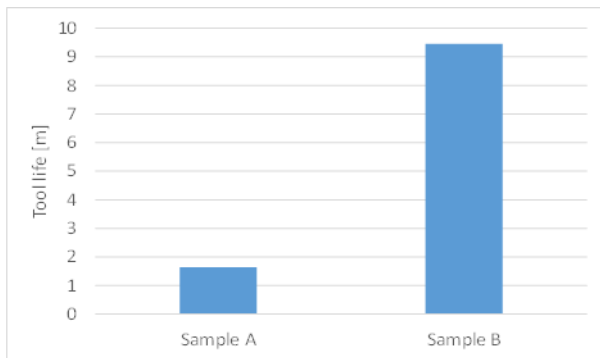


図 9 FSW ツール寿命の比較 (Sample A, Sample B)

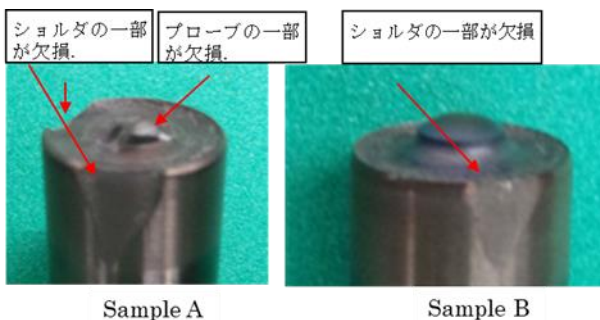


図10 耐久性試験後の接合ツール外観

られた結果を比較すると, Sample B は標準的なベアリング用窒化珪素材料である Sample A に対し, 5.8 倍程度の寿命を持つことが示された. 破損後のツール形状を図 10 に示す. Sample A はショルダ, プローブが共に欠けており, 接合不良を発生させたのに対し, Sample B はショルダの一部が欠けたのみであり, プローブ部分には異常が見られなかった.

4.2.2 焼結体の機械的性質

窒化珪素材料の違いによる FSW 時のツール破損形態の変化を考察するため, Sample A, Sample B の高温機械特性を評価した. ビッカース硬度及び 4 点曲げ強度の温度依存性を図 11 及び図 12 にそれぞれ示す. 高温特性向上を目的とした Sample B は硬度, 強度共に高い値を示している. 図 11 に示されているように, 特に 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上の温度域において Sample B の硬度の低下が抑制され, Sample A よりも有意に硬度が高くなっている. 鉄鋼材料や Ti 合金などの融点の高い材料の FSW では, ツール表面温度が 1000 $^{\circ}\text{C}$ 程度になるため, この特性は極めて重要である. また, 図 12 が示すように, 4 点曲げ強度においても 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温域での劣化は Sample B が低い. 総じて, Sample B は良好な高温機械特性を示し, 1000 $^{\circ}\text{C}$ に

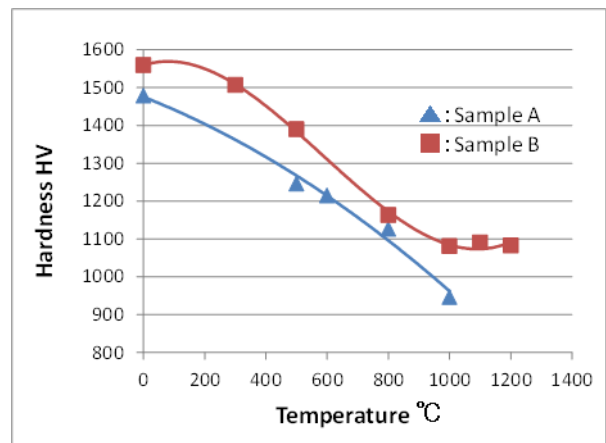


図11 温度とビッカース硬さの関係

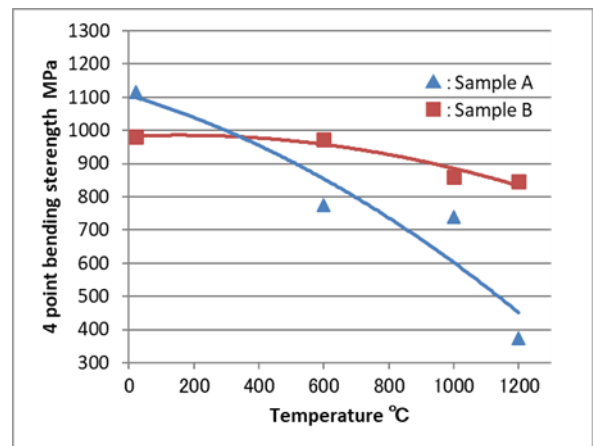


図12 温度と4点曲げ強度の関係

において Sample A 比にて約 20%の機械的特性向上が達成されている。今回の実験結果は、この機械的性質の差異に起因するものと推察している。

5. 結言

本研究では、表面処理を実施したアルミニウム合金 A5052 と合金化溶融亜鉛めっき鋼 (GA 鋼) の接合を行った。次に、鋼と CFRP の接合を行った。そして、新たに開発した窒化珪素焼結体を用いた接合ツールの耐久性評価を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) Al と Fe の反応抑制が期待できる表面処理を施した A5052 と GA 鋼の接合を行った。その結果、鋼突起のひだ形状が改善され、接合界面近傍の金属間化合物層生成が大幅に抑制され、アルミニウム合金中への Zn の流入は抑制されることが分かった。
- (2) CFRP 被着体を、鋼被着体及び鋼補強板 (スティフナ) で挟み、球形ツールを押し込むことで上下の両鋼板が接合されるとともに、CFRP 板が両鋼板に挟まれるように一体化した継手を作製できる。この接合継手のはく離強度は引張せん断強度の 50%以上であり、構造用エポキシ接着剤に対して、はく離に対する優位性を確認できた。
- (3) ツール回転数 600rpm, 接合速度 1000 mm/min の条件において、高温強度を向上させた窒化珪素焼結体で作製した接合ツールでは、一般的な窒化珪素焼結体から作製した接合ツールの 5.8 倍の耐久性を有する。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成及び大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行われたものであり、ここに深く感謝の意を表します。

また、研究の推進に当たって適切なご指導を下さいました大阪大学接合科学研究所所長・藤井英俊教授及び産業技術総合研究所製造基盤技術研究部門・村上敬上級主任研究員にこの場を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) 大石郁, 坂村勝, 大田耕平, 藤井英俊: 溶接学会論文集, 32-1 (2014), 1.
- 2) 坂村勝, 大石郁, 大田耕平, 竹保義博, 水成重順, 藤井英俊: 軽金属溶接, 52-12 (2014), 453.
- 3) 坂村勝, 大石郁, 大田耕平, 竹保義博, 水成重順, 藤井英俊: 溶接学会論文集, 34-1 (2016), 8.
- 4) 松葉朗, 坂村勝, 竹保義博: 特許第 6977996 号 (2018).
- 5) T. Miyazawa, Y. Iwamoto, T. Maruko and H. Fujii: Development of Ir based tool for friction stir welding of high temperature materials, Science and Technology of Welding and Joining, 16-2 (2011), 188.
- 6) 薄田真一, 三宅将弘, 佐藤裕, 粉川博之, 大森俊洋, 石田清仁, 今野晋也, 朴勝煥, 杉本一等, 平野聡: 溶接学会全国大会講演概要, 95 (2014), 18.
- 7) 佐藤裕, 薄田真一, 粉川博之, 山崎繁一, 辻あゆ里, 上西昇, 池ヶ谷明彦, 森口秀樹, 石塚浩: 溶接学会全国大会講演概要, 96 (2015), 60.
- 8) 宮崎博香, 内海慶春, 津田圭一: SEI テクニカルレビュー, 187 (2015), 70.