

摩擦攪拌接合材の高効率・高精度な良否判定法及び 非破壊強度評価技術の開発

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 加工技術研究部
研究員 山形 亮太

(2021 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021034-C2)

キーワード：摩擦攪拌接合，欠陥解析，非破壊検査

1. 研究の目的と背景

機械・構造部材における接合工程では、低ひずみ、低エネルギーおよび作業環境改善の観点から、溶接に変わる新たな手法として摩擦攪拌接合 (FSW) が注目され、アルミ部材を中心に実用化が進んでいる。FSW では材料ごとにツールの回転速度、送り速度などの適正な接合条件範囲が存在し、その範囲外では欠陥が生じること、接合条件に応じて欠陥の形態が種々異なることが報告されている¹⁾。このような欠陥は使用時に破壊の要因となりやすく、事前の検査工程において適切に検出を行う必要がある。しかし、材料内部に存在する場合にはその位置や形状寸法を精度よく測定するのが容易ではなく、内部欠陥を簡便に定量評価できる手法が望まれている。その一手法として X 線 CT が期待されており、得られた三次元断層画像の解析から、欠陥の位置や形状および寸法などを定量的に精度よく評価することができる。X 線 CT を用いたアルミ材 FSW 継手の欠陥評価に関する検討も行われており、CT 画像解析により接合欠陥が検出でき、その位置や形状寸法の計測が可能であること、接合条件と欠陥の位置や形状に一定の相関があることが指摘されている^{2~3)}。しかし、接合条件を種々変えた際に欠陥寸法や形状がどのように変化するかについての系統的な検討は行われておらず、これらの要因が FSW 継手強度に及ぼす影響について検討された例は少ないのが現状である。

そこで、本研究では、X 線 CT を用いた FSW 継手の良否判定法を構築するための基礎的検討として、A5052 板材に FSW スターインプレートをを行い、接合条件を種々変えることにより内部欠陥の発生形態や形状寸法が異なる複数の板材を作製した。次に、その板材から試験片を切り出し、X 線 CT による欠陥計測を行うとともに、試験片の硬さ試験および静的引張試験を行った。得られた内部欠陥の情報から、静的引張強度と相関性の高い欠陥形状パラメータを特定するとともに、そのパラメータ計測値から静的引張強度を予測する手法についても検討した。

2. 実験方法

2・1 摩擦攪拌接合試験片の作製

供試材の材質はアルミニウム合金 A5052P-H112 であり、長さ 200mm、幅 150mm、板厚 5mm の板材を使用した。引張強度は 243.7MPa である。接合には芝浦機械製マシニング

センタ MPF-2114FS を用いて、ツール回転数 1000rpm、送り速度を 300~1200mm/min の複数の条件で線接合を行った。また今回は、後述する X 線 CT 検査において、材料中の内部欠陥のみを評価できるよう、突合せ面のないスターインプレートで実施した。接合ツールはショルダー径 15mm、プローブ径 5mm、プローブ長 3.9mm のものを使用し、前進角は 3° とした。

2・2 X 線 CT による接合欠陥検査

図 1 に非適正条件で接合された試験片の例として、接合した板材の全体写真と接合部の外観写真および X 線 CT 透過画像を示す。このように、適正接合条件の範囲外では、外観では一見して正常な状態に見えるものでも、内部には送り方向に線状の欠陥が発生していることがわかる。欠陥の詳細情報を調査するため、図 2 に示すように、接合した板材からマシニングセンタを用いて切り出した引張試験片に対して、X 線 CT 撮影した後、CT データ解析・可視化ソフト (Volume Graphics 社製 VG studio max) の欠陥解析機能を用いて試験片内部に発生した欠陥の検出を行った。

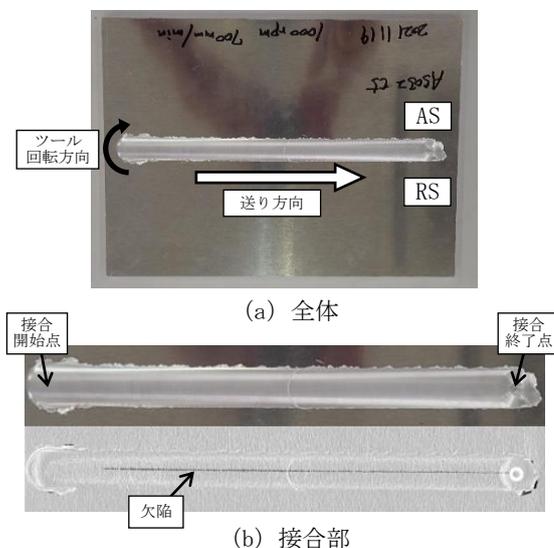


図 1 非適正条件接合での外観および X 線 CT 透過画像の例 (回転数 1000rpm、送り 700mm/min)

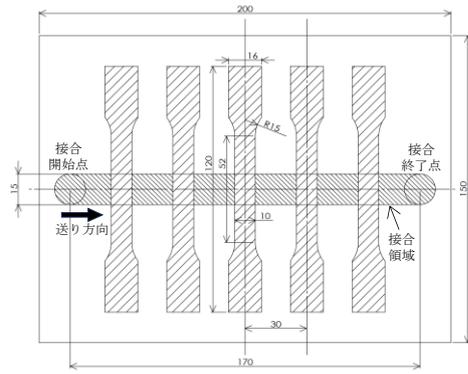


図2 引張試験片形状と切り出し位置

2・3 硬さおよび引張試験

前節で切り出した試験片に対して、断面上の硬さ分布をマイクロビッカース硬度計（アカシ製 MVK-H100）により測定するとともに、万能試験機（エー・アンド・デイ製 RTF-2410）による引張試験を行い、それぞれの結果と内部欠陥との関係について検討した。

3. 実験結果

3・1 接合材内部の X 線 CT 観察および内部欠陥解析

マシニングセンタにて切り出した試験片を X 線 CT で撮影した例として、送り速度 700mm/min の結果を図3に示す。これより、ツールが通過した接合部の内部では複数の点状欠陥が連なるように形成されており、接合時に発生した内部欠陥を非破壊で三次元的に検出できることがわかる。図4にツール送り速度を変えた際の X 線 CT 透過画像を示す。ツール送り速度 500mm/min (0.5mm/r) では内部に欠陥は生じておらず、適正な接合条件範囲内であることを示している。しかし、ツールの送り速度を上げていくと材料中に内部欠陥が現れ、送り速度 700mm/min (0.7mm/r) では点状の内部欠陥が周期的に生じる。さらに、送り速度の増加とともに欠陥サイズも拡大し、やがて欠陥同士が繋がりがり (900mm/min (0.9mm/r))、最終的には1つの連続した大きなトンネル状欠陥に成長する (1100mm/min (1.1mm/r))。

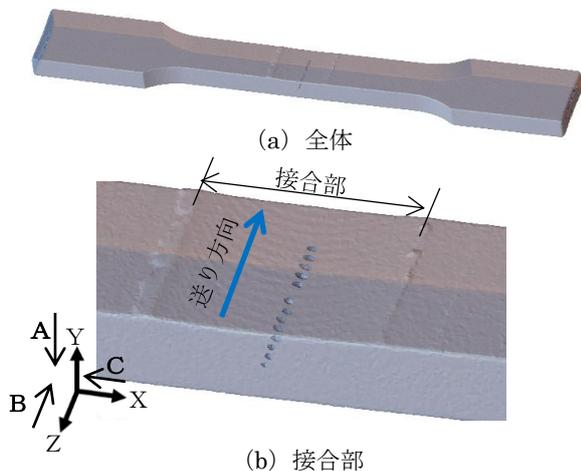


図3 X線CTで撮影した内部欠陥の例
(回転数 1000rpm、送り 700mm/min)

表1 ツール送り速度ごとの欠陥形態分類

欠陥形態	ツール送り速度 mm/min
①無欠陥	300、500
②不連続欠陥	700、800、900
③連続欠陥	1000、1100、1200

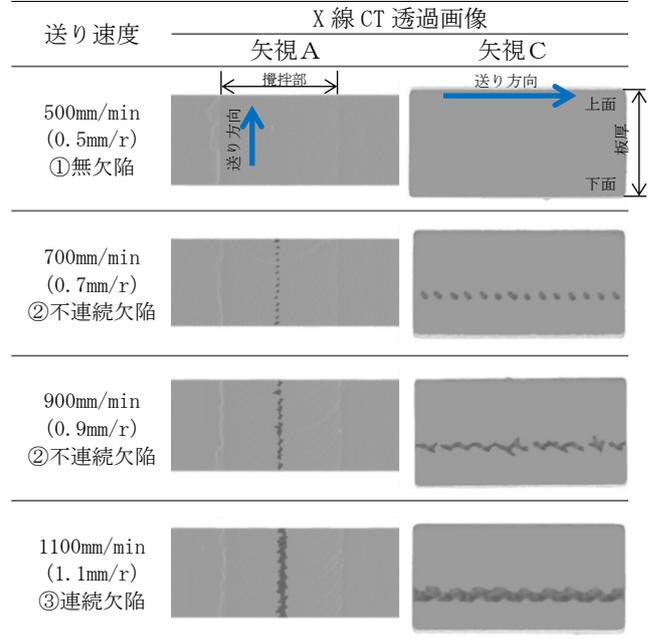


図4 X線CT透過画像

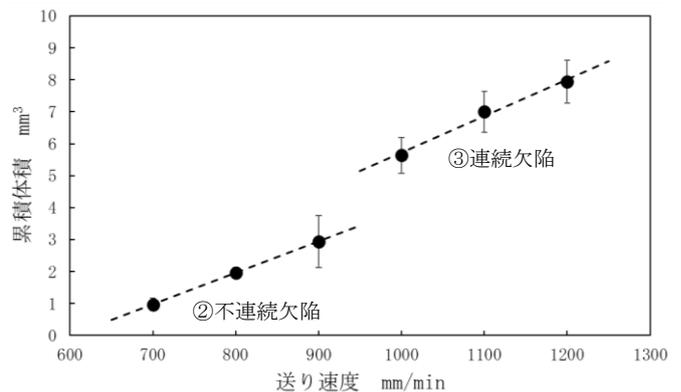


図5 ツール送り速度と累積欠陥体積

そこで、以後は欠陥の形態から、欠陥がないものを①無欠陥、複数の不連続な欠陥からなる②不連続欠陥、1本に繋がった貫通状の欠陥を③連続欠陥の3つの欠陥形態に分類する。各形態ごとのツール送り速度は表1のとおりである。

次に、VG studio max の欠陥解析機能を用いて、材料内部に発生した欠陥の位置やサイズについて検出を行った。欠陥解析機能は、検出した内部欠陥（ボイドや介在物）に対し、それらの位置や体積、外接球の半径、稠密度、球形度などの各種情報の評価及び可視化を行うことができる

表2 内部欠陥の発生間隔

回転ピッチ (送り速度/回転数) mm	欠陥の間隔 mm												平均 mm
0.70	0.67	0.71	0.73	0.60	0.68	0.75	0.78	0.66	0.74	0.65	0.70	0.73	0.70
0.90	0.91	0.92	0.97	0.87	0.76	0.96	0.95	0.88	0.85				0.90
1.10	1.17	0.91	1.03	1.12	1.17	1.10	1.22						1.10

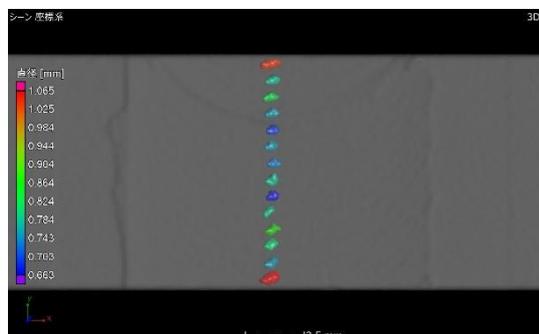


図6 欠陥解析結果 (欠陥外接球直径のコンタ表示)

機能である。まず、図5に欠陥解析機能により算出した、内部欠陥の累積体積とツールの送り速度の関係を示す。送り速度の増加に伴い、欠陥体積も増加するが、欠陥形態が②不連続から③連続欠陥に移る送り速度 900mm/min から 1000mm/min の間において欠陥体積が大幅に増加していることがわかる。次に、図6に欠陥の外接球の直径を算出し色付けを行った結果を示す。このように、欠陥の位置や形状寸法の詳細な評価および可視化を行うことができ、これにより、材料内部の欠陥の正確な分布形態が把握可能となる。また、内部欠陥としての認識や欠陥サイズなどでしきい値を設定してフィルタリングすることも可能であり、従来までの作業者の目視に頼った欠陥検出に比べて、人によるばらつきが少なく再現性のある欠陥検出が可能となっている。

さらに、材料内部に周期的に発生する②不連続欠陥の間隔について調査を行った。図7はツール送り速度 700mm/min (0.7mm/r) で材料内部に発生した欠陥の間隔を測定したものである。これより、約 0.7mm ごとに欠陥が発生しており、これはツール1回転あたりの移動量である回転ピッチ 0.7mm/r と一致している。表2に示すように送り速度 900mm/min、1100mm/min についても同様の結果が得られることから、欠陥はツール1回転ごとに発生していることが明瞭に確認できる。これらの結果から、X線CTを欠陥形状寸法の計測に用いることにより、異なる接合条件下での欠陥情報について、定量的な比較検討が可能となることがわかった。今後はツール形状や軌跡と欠陥形状の比較などを行い、欠陥発生メカニズムの解明についてより詳細に検討する予定である。

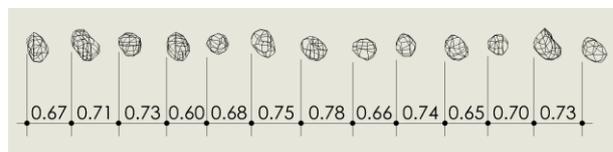
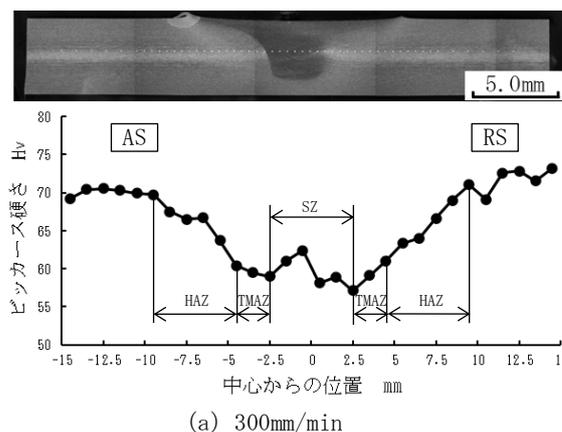


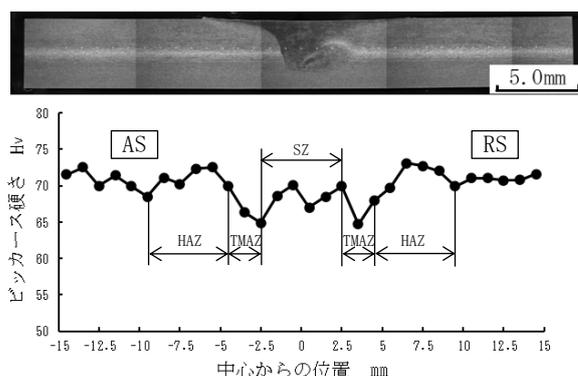
図7 欠陥の発生間隔 (送り速度 700mm/min (0.7mm/r))

3・2 硬さ試験結果

ビッカース硬さ測定結果との例として、ツールの送り速度 300mm/min および 1200mm/min で接合を行った接合材の結果を図8に示す。硬さは接合面から 2mm 内側の断面で測定を行った。300mm/min、1200mm/min とともに接合領域の硬さは母材部よりも低く、攪拌部 (SZ) と熱加工影響部 (TMAZ) との境界付近に最軟化点が存在している。送り速度で比較すると 300mm/min のほうが 1200mm/min に比べて硬度の低下が大きく、より軟化していることがわかる。



(a) 300mm/min



(b) 1200mm/min

図8 硬さ分布

また、300mm/minでは母材部と熱影響部(HAZ)の境界付近から軟化しているが、1200mm/minでは熱加工影響部(TMAZ)と熱影響部(HAZ)の境界付近から軟化しており、硬度低下の領域が狭い結果となった。

3.3 引張試験結果

接合材の静的引張強度 TS (MPa)とツール送り速度の関係を図9に示す。図中の破線は母材強度243.7MPaを示している。欠陥形態の違いに着目すると、①無欠陥よりも②不連続欠陥のほうが引張強度は高く、送り速度の増加とともに引張強度も増加し、送り速度800mm/minで最大値となった。しかし、③連続欠陥になると引張強度は大幅に低下することがわかる。

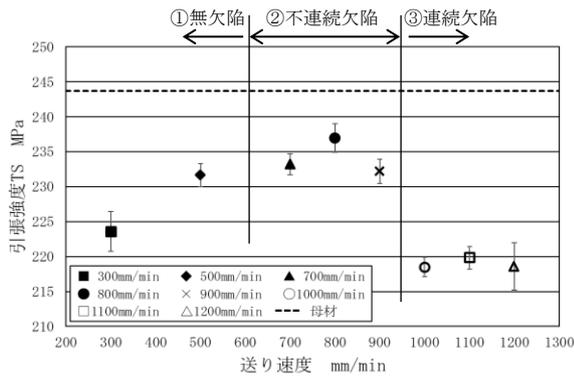


図9 ツール送り速度と引張強度

4. 考察

4.1 内部欠陥が引張強度に与える影響

欠陥解析によって検出した欠陥の半径・体積などの欠陥サイズ、欠陥発生位置、稠密度・球形度など欠陥形状に関するパラメータ27個と引張強度との相関を調査した。その中で比較的高い相関が見られた上位4個のパラメータを表3に示す。最も相関が高いパラメータは欠陥の最大体積であり、次いで、最大投影面積 zx 面、最大投影面積 yz 面、最大表面積となり、いずれも欠陥サイズに関するパラメータであった。ここで、 zx 面は図3の矢視Aから見た面の投影面積である。 yz 面は図3の矢視Cから見た面、すなわち、引張試験の引張方向に直交する面である。図10に上位4個のパラメータと引張強度の相関図を示す。これらの中では、(a)最大体積が最も引張強度と良い線形相関があることがわかる。特に、②不連続欠陥と③連続欠陥の両データ群は明確に離れており、②不連続欠陥から③連続欠陥へ成長する際に、結果として体積が大きく増加したことを示している。このことが関係して、図9中において引張強度が大きく低下したものと考えられる。

4.2 引張強度の予測

前節より材料内部に発生する欠陥サイズの増加が引張強度低下に寄与していることがわかった。そこで、 X 線CT計測結果に基づく良否判定法として、静的引張強度 TS と

表3 欠陥パラメータと引張強度の相関関係

欠陥パラメータ	相関係数 R
最大体積 mm^3	-0.94
最大投影面積- zx mm^2	-0.93
最大投影面積- yz mm^2	-0.93
最大欠陥表面積 mm^2	-0.92

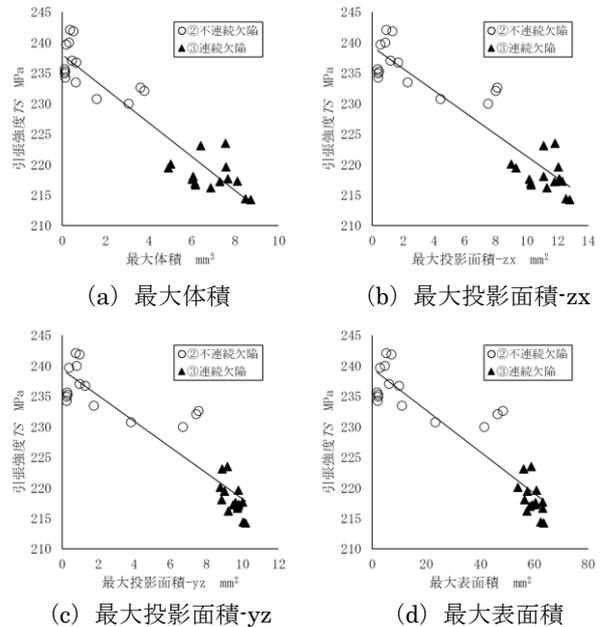


図10 欠陥情報と引張強度の相関関係

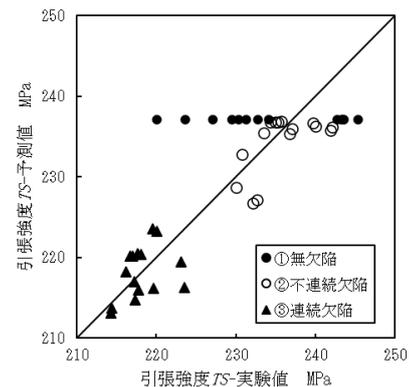


図11 引張強度 TS 予測結果

の相関が最も高かった欠陥情報である欠陥最大体積 V_{max} を説明変数とする回帰分析を行い、引張強度 TS (目的変数)を予測する式(1)を作成した。

$$TS = -2.76253 V_{max} + 237.12655 \dots (1)$$

図11は式(1)を用いて予測した引張強度と実際の引張強度の相関関係(回帰式の当てはまりの良さ)を表したものである。図中の(210, 210)と(250, 250)を結ぶ直線に沿っていれば、回帰式の当てはまりが良いということを意味する。②不連続欠陥、③連続欠陥の各値は比較的直

線に沿っており、良好な適合性を示している。ここで、②不連続欠陥、③連続欠陥のみの予測値と実験値の関係は $R=0.94$ (決定係数 $R^2=0.88$)であり、予測値は実験値に対して概ね $\pm 5\%$ (10~12MPa)の範囲内に入っている。これより、FSW 接合材が欠陥を有する場合には、X線CTによる欠陥体積評価によって静的引張強度 TS が比較的良好な精度で推定でき、強度の判定基準値を設定することで接合材の良否判定が可能になると思われる。しかし、式(1)の説明変数が欠陥最大体積 V_{max} のみであるため、①無欠陥($V_{max}=0$)については、ツール送り速度の違いにかかわらず予測値が一定(237.1MPa)となり、式(1)に対してデータが大きくばらついていることがわかる。そのため、①無欠陥を含めて予測した引張強度と実際の引張強度の相関関係は $R=0.83$ (決定係数 $R^2=0.68$)になり、適合性が悪化する結果となった。このことから、欠陥の有無にかかわらず、同一の式により統一的な予測を行うには、欠陥情報のみならず、硬さなど他の要因を考慮した強度予測が必要であると考えられる。そこで今後は、FSW 接合により生じる材料の軟化が引張強度に与える影響について、詳細な検討を行う予定である。

今回の実験は欠陥の影響のみに着目するためFSWスターインプレートをを行ったが、今後は突合せ接合に適用し、欠陥だけでなく突合せ面に生じるルートフローなどの影響調査をするなど、より実用的な研究が必要と考えられる。また、X線CTで取得した欠陥形状を考慮したCAEシミュレーションを用いて、欠陥の形状寸法が材料の引張破壊に及ぼす影響についても、現在解析的検討を行っているところである。

5. 結論

A5052 板材に対してツール送り速度を種々変えてFSWスターインプレートをを行い、X線CT撮影により欠陥の発生やその形状寸法がどのように変化するのか調査した。また、各接合試験片において、定量化した内部欠陥情報と引張強度との関係について検討し、以下の結果が得られた。

(1) ツール送り速度が小さいと欠陥は生じないが (①無欠

陥)、送り速度が700mm/min (0.7mm/r)以上になると点状の②不連続欠陥が発生した。さらに、送り速度の増加に伴い欠陥サイズが増加し、送り速度1000mm/min (1.0mm/r)以上では1つの繋がったトンネル状の③連続欠陥になることがわかった。

(2) 引張強度は、欠陥形態が①無欠陥よりも②不連続欠陥のほうが高い結果となり、ツール送り速度800mm/minで最大となった。しかし、送り速度の大きい③連続欠陥域では引張強度が大きく低下する結果となった。

(3) 引張強度と相関性の高いパラメータとして、欠陥体積が大きく関係していることがわかった。特に、一本の連続した欠陥となる③連続欠陥域では欠陥体積が大きく増加する傾向があり、これが引張強度を低下させる一要因であった。

(4) 最大欠陥体積を説明変数とした回帰分析により引張強度の予測式を作成した。その結果、欠陥を有する試験片(②不連続欠陥、③連続欠陥)の強度を予測すると、予測強度と実際の引張強度との相関関係(決定係数)が $R^2=0.88$ となり、有欠陥材に対しては良否判定に適用可能な良好な関係式が得られた。

(5) しかし、①無欠陥材を含めて強度予測を行うと、予測精度が低下した。これは、欠陥以外の要因が引張強度低下に影響を与えているためと考えられる。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団からの2021年度奨励研究助成(若手研究者枠)AF-2021034-C2により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, (2019), 22-24, 産報出版
- 2) R. F. Hamade and A. M. R. Baydoun: Materials and Design, 162 (2019), 10-23.
- 3) A. Wójcicka, K. Mroczka and M. Kowalski: Metallurgy and Foundry Engineering, 44-3 (2018), 145-152.