

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06824

研究課題名（和文）同種および異種アルミニウム合金厚板のマルチパス摩擦攪拌接合

研究課題名（英文）Multipass friction stir welding of the same or dissimilar thick aluminum alloy plates

研究代表者

前田 将克（MAEDA, Masakatsu）

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：00263327

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、摩擦攪拌接合装置に求められる高い剛性を緩和するため、溶融溶接で実施されている開口開先に対する多層肉盛充填を摩擦攪拌接合でも可能とする技術の開発を進めた。当初は肉盛材供給口を設けたステーションリーショルダー型ツールを用いて接合を試みたが、肉盛材と継手母材の接合が不十分となることが判明した。その解決を試みたが望ましい成果は得られなかったため、ツールを一般的な形状に戻すと同時に、開先形状を矩形開口開先とした。また、肉盛材は角棒状とした。これにより、開口開先が緻密に充填された継手が得られるようになった。多層多パス接合を摩擦攪拌接合専用機ではなく汎用工作機械でも達成できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肉盛材連続供給による肉盛摩擦攪拌接合が可能であることを実証し、これを応用して低剛性の汎用工作機械でも厚板を多層多パス接合することが可能となった。これは高価な接合専用機がなくとも摩擦攪拌接合が可能であることを提示し、摩擦攪拌接合技術の普及を促進することにつながる。

研究成果の概要（英文）：This study is aimed to develop a method to build-up opened grooves by friction stir welding, as commonly operated in fusion welding, in order to relieve severe requirements on stiffness of friction stir welding machines. In the beginning, newly developed functional stationary-shoulder friction stir welding tool, which can feed welding wires into the welding zone, was applied. However, the stirred zone failed to weld the parent A6061 aluminum alloy plates with the building-up material. Therefore, the tool shape was redesigned to a common monolithic type. The shape of the grooves and the building-up materials were also changed to rectangular shape to fit the tool. By this change, the open grooves were successfully filled by the building-up materials. Finally, 2-layer 4-pass build-up friction stir welding of 10-mm-thick A6061 plates were demonstrated using conventional milling machine.

研究分野：複合材料・表界面工学

キーワード：摩擦攪拌接合 アルミニウム合金 送給肉盛 多層多パス接合 厚板接合 汎用工作機械

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合(FSW)は溶融溶接困難な高強度アルミニウム合金を接合できる画期的な接合法として大きな注目を集め、世界中で活発な技術開発競争が展開されている。構造物の軽量化に対して高強度アルミニウム合金の適用は重要な選択肢であり、従来はその接合が困難であったために適用分野が制限されていた。高強度アルミニウム合金の FSW 技術が確立されれば、リベット穴のような応力集中箇所のない継手を製造可能となることから、さらに薄肉化・軽量化を推進することが可能となる。このように FSW は大きな期待がかけられている一方、従来接合法には見られない問題を複数抱えており、FSW 技術の確立にはこれらの問題解決が不可欠である。

そのような問題の一つに、肉盛接合技術が確立されていないことが挙げられる。そのため、現在は厚板を FSW する場合でもシングルパスで接合を達成せねばならない。これは接合装置や接合ツールの剛性によって接合可能な板厚の上限が決まってしまうことを意味する。高剛性の接合装置や接合ツールは高価かつ短寿命であり、製造単価を著しく増大させる。逆に、アーク溶接で実施されているような多層肉盛 FSW 技術が確立されれば、どのような厚さの部材でも個々の接合装置の剛性に合わせた接合方を設定できるようになる。低剛性で安価な接合装置やツールでも厚板の接合が可能となれば、接合装置として汎用工作機械を流用することさえ可能となることから、FSW の普及が大幅に進むものと予想される。

近年、FSW 用接合ツールを構成するショルダーとプローブのうち、ショルダーを回転させないステーションナリーショルダー型ツールが開発された。そのようなツールの一例を図 1 に示す。ショルダーを回転させないことにより肉盛用材料を接合部に重ねて設置して肉盛接合することを可能とするなど、多くの面で FSW に技術的柔軟性を与えられるようになった。特に、上に挙げた肉盛接合を可能とした点は、従来の FSW が接合時のばり排出により減肉を余儀なくされる問題を解決した。しかし、それでも肉盛材は粉末あるいはバルク材として被接合材の間隙や上部に設置固定する必要があり、接合によって緻密化すると当初の占有体積より減少するのは避けられない。外部から肉盛材を連続的に供給しなければ被接合材や肉盛材の接合面に存在する空隙部を埋めた上でツール通過に伴って排出されるばりを補完することは不可能である。

申請者は、FSW の接合機構とに関する基礎的研究と、FSW プロセスの開発に長年携わり、近年では FSW における熱発生・熱供給・抜熱を制御するため、補助加熱機構を内蔵した FSW ツールを開発したほか、水中 FSW に関する研究も進めている。これらの研究の一部は、従来の FSW では得難い特性を有する継手の製造や接合可能条件範囲の拡大などに多くの成果を上げてきた。その過程でツール構造の改良に関して多くのノウハウを得てきた。本研究では、ステーションナリーショルダー型ツールの機構を参考に、外部から肉盛材を連続的に供給しながら複数回の接合処理によって厚板の多層肉盛 FSW を実現することを目標に定めて推進する。図 2 は当初計画で考案したステーションナリーショルダー型ツールの例であり、ステーションナリーショルダーの後部から接合方向を 0° としたプローブの回転位相 270° で肉盛材を供給する方式である。

本研究で取り組むのは、FSW が 1991 年に発明されてから今日まで重大な問題点として広く認識されていながら、その解決法が提示されずに残されてきた課題である。これに対して一つの解決方法を提示し、実証する意義は大きい。本研究構想が依拠するアーク溶接では、溶込深さを越える板厚の材料を溶接するための膨大な研究が積み上げられてきた。この技術ナレッジを FSW にいかに適用していくか、その一端を示す学術的意義もまた大きい。

2. 研究の目的

本研究では、アーク溶接で行われているように、肉盛用材料を継手外部から連続供給しながら開口開先を設けた板材に対して多層肉盛 FSW を行う技術を開発することを目的とする。この目

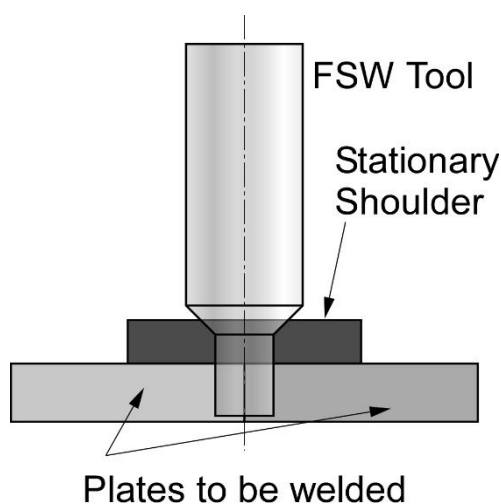


図 1 ステーションナリーショルダー型ツールを用いた板材の突合せ FSW。

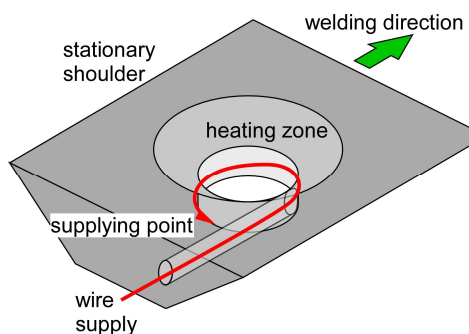


図 2 本研究で試作するステーションナリーショルダーの一例 (概略図)。

的を達成するために3つの課題を設定して進める。すなわち、肉盛 FSW 用ツールの開発、開先形状と接合性の相関の解明、肉盛材材質と接合性の相関の解明である。

肉盛 FSW 用ツールの開発では、ステーションナリーショルダー型ツールをベースに、肉盛材の供給機能、肉盛材の予熱機能、肉盛材と母材の混合攪拌機能を考慮してツール形状の設計を行い、シングルパスの開口開先充填を試みて各機能の検証と改良を進める。熱処理型アルミニウム合金の多くは小径線材として調達することが困難であるため、板材から切り出して作製できるように矩形断面形状の肉盛材を供給できるようにする必要がある。

開先形状と接合性の相関の解明では、開口開先の形状と肉盛材の充填挙動、継手組織や血管の形成の相関を明らかにする。

肉盛材材質と接合性の相関の解明では、接合する母材と同種材を肉盛材とするだけでなく、異種材料との組み合わせも検討する。

3. 研究の方法

供試材には接合条件範囲が広く確保できる A6061-T6 アルミニウム合金（以下 A6061P）を使用した。板厚は 5 mm と 10 mm の 2 種類とした。開口開先形状は $45^\circ+45^\circ$ の V 開先、ルート間隙 0 mm としして実験を開始したが、次章で述べるように良好な結果が得られなかったため、矩形開口開先に変更した。肉盛材には TIG アーク溶接用 A4032 ワイヤのほか、同種材として A6061-T6 を板から角棒状に切り出して使用した。FSW ツールは、当初、図 2 に示したステーションナリーショルダー型ツールの開発を目指したが、材料供給点の接合方向に対する位相を変えても良好な結果が得られなかったため、一般的な形状である図 3 に示す形状・寸法の FSW ツールを SKD61 熱間金型鋼丸棒材から機械加工により作製して使用した。

接合条件として、汎用立フライス盤による接合を想定して、ツール回転数は 1100 rpm、ツール前進角は 3° で固定し、接合送り速度を 0.5 ~ 10 mm/s の範囲で変化させた。接合開始時の予熱のための dwell 時間は 30 s とした。

接合後、得られた継手の外観および断面組織を光学顕微鏡により観察した。また、継手強度を室温での引張試験により評価した。引張試験片は接合部が平行部中央を横断するように JIS13B 号試験片に準拠してサンプリングした。

4. 研究成果

(1) ステーションナリーショルダー型ツールを用いたワイヤ材供給による肉盛摩擦攪拌接合

図 4 はワイヤ肉盛材を供給可能なステーションナリーショルダー型ツールを使用して V 開先を設けた A6061P どうしを接合速度 0.5 mm/s で接合した継手の断面マクロ組織である。図中の印はプローブ中心の通過位置、AS はツール回転方向と接合方向が同じとなる前進側 (Advancing side)、RS は逆方向となる後退側 (Retreating side) であることを示す。継手底部には母材を攪拌して形成された攪拌部 (SZ) が形成され、特徴的なオニオンリングのコントラストを呈している。その上部には大きな空隙が観察され、肉盛材は空隙の上に乗った状態で盛られている。母材と肉盛材の混合はほとんど生じていない。

この問題を解決するために、ステーションナリーショルダーのワイヤ肉盛材供給点をプローブの AS 端、RS 端、後端となるものをそれぞれ作製して接合を試みたが、好ましい改善は見られなかった。また、肉盛材がショルダー内を通過中に予熱できるようにしたステーションナリーショルダーも作製して接合を試みたところ、ショルダー内でのワイヤ断線が頻発して安定供給に支障が生じる。

以上の結果から、ステーションナリーショルダー型ツールを用いて外部から連続的に肉盛材を供給しながら FSW を施工するのは困難であると判断した。これに代わる肉盛 FSW ツールを設計するために FSW ツールに求められる機能として、肉盛材を接合中のプローブ近傍に送給する機能、塑性流動中の母材と混合するのに適した温度まで肉盛材を加熱する機能、攪拌中の母材や肉盛材が外部に漏出しないように閉じ込める機能を付与することを考えた。その結果、図 3 に示す一般的な形状のショルダーとプローブが一体となったツールを採用することとした。

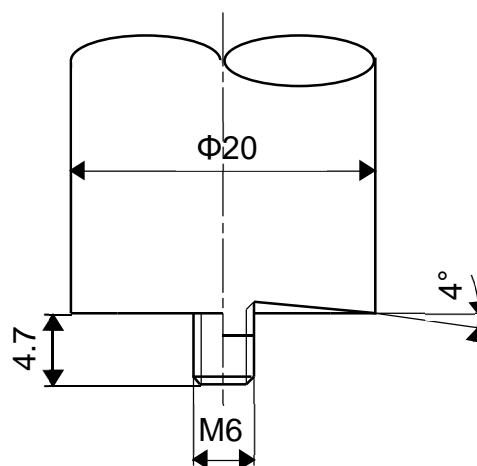


図 3 本研究で使用した FSW ツール。

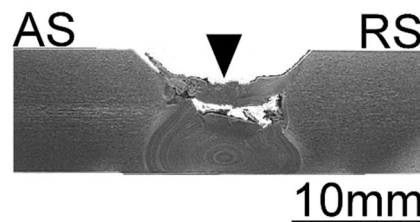


図 4 ステーションナリーショルダー型ツールを用いてワイヤ肉盛材を供給しながら接合した継手の断面マクロ組織。

(2) 一般的 FSW ツールを用いた肉盛摩擦攪拌接合

一般的な FSW ツールを用いる場合、肉盛材は接合部前方の開口開先とショルダーの間に生じる間隙から送給しなければならない。この間隙の形状は開先形状によって決まるため、角棒状肉盛材を送給できるように矩形開口開先を設けることとした。肉盛材の予熱は、この間隙に露出したプローブに肉盛材を直接押し当てることで達成し、材料の封止は肉盛材の送給速度を制御することで実現する。本研究では肉盛材を固定しないため、接合中に肉盛材が座屈変形して送給できなくなる可能性があるため、FSW ツールの前方を押圧板が走行して肉盛材の板面法線方向への座屈変形を抑制するようにした。

図 5 に肉盛材を A6061 角棒（幅 5 mm、厚さ 5 mm）とし、開先をルート厚さ 1 mm、幅 2.5+2.5 mm、深さ 4 mm の矩形開口開先として、種々の接合速度で板厚 5 mm の A6061P を FSW した継手の断面マクロ組織を従来の I 開先突合せ FSW 継手と比較して示す。いずれの接合速度においても I 開先継手は継手中央部の厚さが被接合材の厚さから減少しているが、開口開先を設けた肉盛 FSW では 1 mm/s よりも高い接合速度で厚さが増加している。

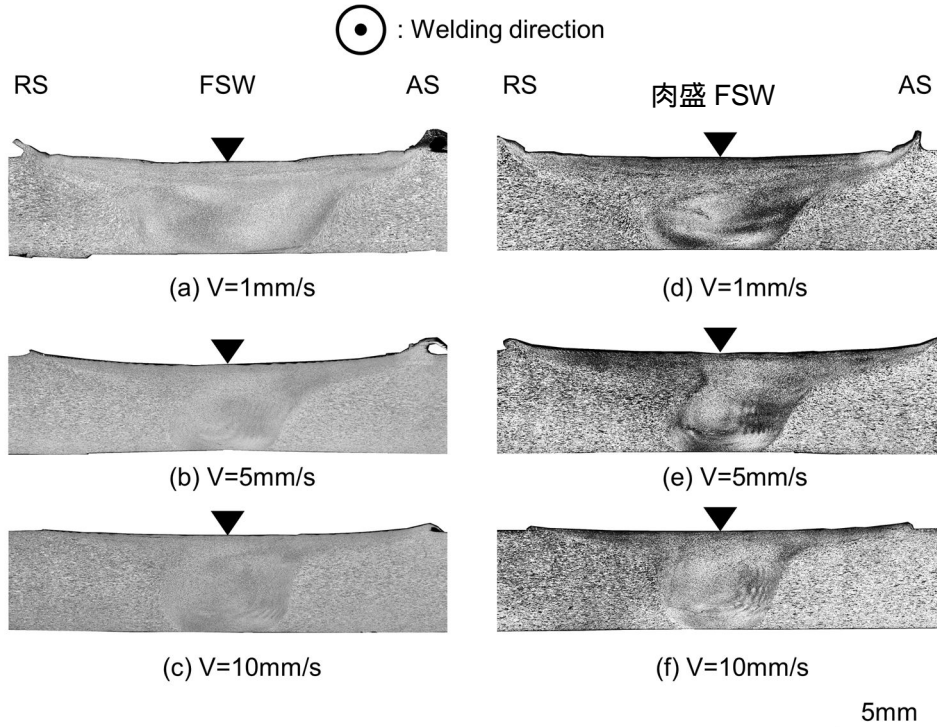


図 5 継手断面マクロ組織の比較。(a)~(c) 通常の I 開先突合せ FSW 継手、(d)~(f) 肉盛 FSW 突合せ継手。

図 6 は接合速度 5 mm/s で接合した肉盛 FSW 継手（図 5(e)）の AS の SZ と熱加工影響部（Thermo-mechanically affected zone: TMAZ）境界近傍の光学顕微鏡ミクロ組織である。図中の白色破線に沿って接合面の先在酸化膜が断続的に分布した Lazy S が形成されており、十分な攪拌による酸化膜の破壊分散が達成されていないことがわかる。これは、肉盛材を送給することによって接合面が AS 母材/肉盛材界面と肉盛材/RS 母材界面の 2 面に増加するとともに、これらの接合面が最も強く攪拌できるツール回転軸の走行線からオフセット配置されるためであると考えられる。

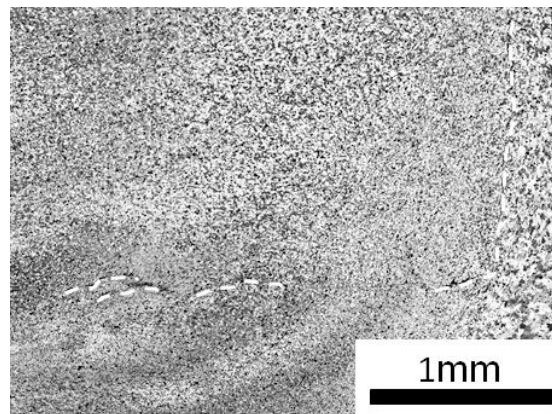


図 6 SZ/TMAZ 境界近傍に形成された Lazy S。

この Lazy S が継手強度に与える影響を調べるために引張試験とその破面観察を実施した。図 7 に継手の引張強さと接合速度の相関を示す。接合速度の上昇とともに継手強度が向上するが、肉盛材幅を 6 mm とした場合、接合速度 5 から 10 mm/s にかけて継手強度の急激な低下がみられる。引張試験後の試験片の破断位置を図 8 に示す。接合速度 1 mm/s では接合部から離れた熱影響部（Heat affected zone: HAZ）で破断しているのに対して、強度低下が見られた 5, 10 mm/s の継手では SZ と TMAZ の境界で破断していることがわかる。これは図 6 の白色破線で示した位置

と一致しており、先在酸化物の分散が十分に行われないと継手強度に悪影響が現れることがわかる。

(3) 2層肉盛摩擦攪拌接合

前節の結果から、比較的良好な継手特性が得られる開先形状、肉盛材幅、接合速度を明らかにすることができたので、これらの条件を軸に、厚さ 10 mm の板を 2 層に分けて肉盛 FSW した。1 層目は通常の I 開先突合せ接合同様とし、2 層目は 1 層目の接合でショルダー径 10 mm のツールが通過できるようにするために幅 5.5+5.5 mm の矩形開口開先を設けた。この開口幅は 2 層目を接合する FSW ツールのプローブ径よりも広いため、中央部で最初に接合した後、AS、RS の順に 3 パス構成の接合とした。図 9 は接合速度 10 mm/s として 2 層 4 パス接合した肉盛 FSW 継手の断面マクロ組織である。本研究では 4 パス全て同じ接合方向としているが、1 層あたり複数回のパスで構成される場合は接合方向を変えるだけで欠陥が形成されやすい AS を SZ 中央に集め、最終パスでこれらの欠陥を補修肉盛する接合方案も策定可能となる。

図 10 に 2 層 4 パス肉盛 FSW 継手の継手強度の接合速度との相関を示す。図中の三角形プロットと破線は 1 層 1 パスの通常の I 開先突合せ FSW 継手の継手強度である。このように、高剛性の接合装置を必要とする 1 パスでの接合とほぼ同等の継手強度が 2 層多パス接合でも達成できることがわかる。

多数回のパスを繰り返しても継手強度が低下しない原因として、接合中の温度履歴が考えられる。まず多層とすることで、初層の接合はショルダー径を縮小したツールを使用するため、入熱が抑制される。続けて行われる接合パスにおいても、母材板厚が大きいことで抜熱が迅速に行われ、最高到達温度が抑制される。K 種熱電対を用いた温度計測で、1 パスの通常の FSW で最高到達温度が 700 K 程度に達する接合速度において、2 層 4 パスで接合した場合は、パスによって若干の差異はあるが、521~580 K と計測された。すなわち、100 K 以上低温で接合が行われており、これが HAZ の拡大を抑制している効果が表れていると考えられる。

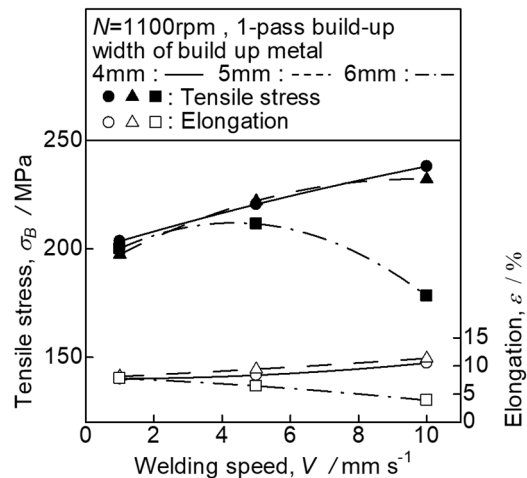


図 7 肉盛 FSW 継手引張強さの接合速度依存性。

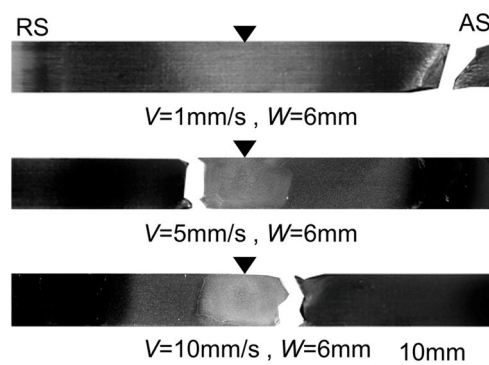


図 8 肉盛材幅 6 mm とした肉盛 FSW 継手の引張破断位置。

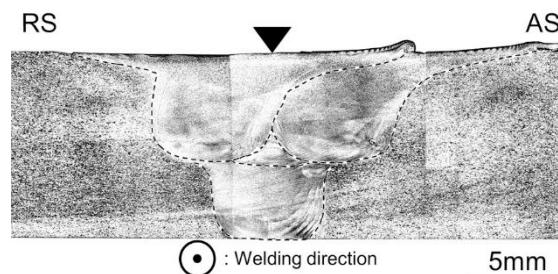


図 9 2 層 4 パス肉盛 FSW 継手断面マクロ組織。

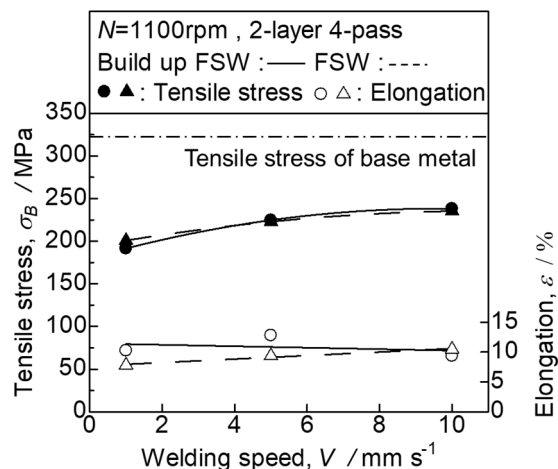


図 10 2 層 4 パス肉盛 FSW 継手引張強さの接合速度依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 濱名晃平, 前田将克
2. 発表標題 外部供給バルク材を用いた6061アルミニウム合金摩擦攪拌接合継手の開先充填状態と継手特性
3. 学会等名 溶接学会 2022年度秋季全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱名晃平, 前田将克
2. 発表標題 外部供給バルク材を用いたA6061アルミニウム合金肉盛摩擦攪拌接合継手における攪拌量の影響
3. 学会等名 軽金属学会第143回秋期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱名晃平, 前田将克
2. 発表標題 外部供給バルク材を用いた 6061アルミニウム合金2層肉盛摩擦攪拌接合
3. 学会等名 軽金属学会第144回春期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱名晃平, 前田将克
2. 発表標題 外部供給バルク材を用いたマルチパス 肉盛摩擦攪拌接合における6061アルミニウム合金継手の継手組織と機械的性質
3. 学会等名 溶接学会 2023年度春季全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------