

令和 6 年 7 月 1 日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05121

研究課題名（和文）摩擦攪拌点接合による異材接合部の界面制御のための接合条件最適化指針の明確化

研究課題名（英文）Clarification of Guideline to Optimization of Joining Conditions to Control the Interface of Dissimilar Material Joints obtained Friction Stir Spot Welding

研究代表者

津村 卓也（Tsumura, Takuya）

沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：00283812

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：難燃性マグネシウム（Mg）合金とめっき鋼板との摩擦攪拌点接合（FSSW）において、(1)インプロセス計測（接合工程中の計測）の測定システム構築、(3)接合条件がインプロセス計測と継手強度に及ぼす影響の検討、の一部を実施した。また制御方式が異なる2種類の装置を用い、両者の異種金属接合性の比較検討も追加で実施した。他方、(2)ツール形状・材質がインプロセス計測と継手強度に及ぼす影響の検討、および難燃性Mg合金とチタン（Ti）合金との異種金属FSSWは実施できておらず、接合部界面制御のための接合条件（ツール形状・材質、接合条件）の抽出や、その最適化指針を得ることまでには至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

難燃性マグネシウム合金とめっき鋼板・チタン合金との摩擦攪拌点接合（FSSW）に関する報告、並びに異種金属のFSSW接合において、接合条件が接合工程中の計測と継手強度に及ぼす影響の検討に関する報告のいずれも見当たらない。また、ツール挿入量の制御方式間、特に異種金属の接合における相互比較を行った例は見当たらない。本研究は、異種金属のFSSW接合の機構解明だけでなく、新たに開発されつつある軽合金と異種材料接合によるそのマルチマテリアル化などへのFSSWの適用範囲拡大に寄与する。また輸送機器軽量化により、エネルギー消費量やCO2排出量の削減に貢献し、SDGsの観点から波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：In the friction stir spot welding (FSSW) of flame-retardant magnesium (Mg) alloy and plated steel sheet, (1) a measurement system for in-process measurement (measurement during the welding process) was established, and (3) the effects of welding conditions on in-process measurement and joint strength were examined. In addition, a comparative study of the dissimilar metal weldability of the two methods was conducted using two types of equipment with different control methods. On the other hand, (2) the effects of tool shape and material on in-process measurement and joint strength, and dissimilar metal FSSW of flame-retardant Mg alloy and titanium (Ti) alloy were not conducted, and therefore it was not possible to extract welding conditions (tool shape and material, welding conditions) for joint interface control or obtain optimization guidelines.

研究分野：溶接・接合工学

キーワード：難燃性マグネシウム合金 めっき鋼板 ツール位置制御接合 ツール荷重制御接合 接合中ツール荷重
接合中ツール側温度 接合中材料側温度 引張せん断強度

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

地球温暖化への影響度が高い二酸化炭素 (CO₂) は、2017 年度国内総排出量の約 18% を運輸部門が占め、CO₂ の削減には輸送機器の軽量化効果が高い。中でも自動車分野では、ハイブリッド化・電動化のための大容量バッテリー搭載に伴う車両重量の増加対策として、車体軽量化が強く望まれている。車体軽量化には、マグネシウム (Mg) 合金、アルミニウム (Al) 合金、チタン (Ti) 合金などの軽合金を適用することが効果的である。金属材料中で密度が最小かつ資源量が豊富な Mg 合金は、これまで低強度と可燃性のため用途制約があったが、高強度・難燃性 Mg 合金の開発でその欠点が克服された。他方 Ti 合金は、軽量・高耐食性の特徴がある。またこれら金属材料は、プラスチックや複合材料などと比較してリサイクル性が相対的に高い。

軽合金を車体へ適用する際、最適構造の観点から鋼板と組み合わせるマルチマテリアル化が必須であり、異種金属の接合が重要な技術課題となる。車体での異種金属の接合法として、スポット溶接、セルフピアスリベット、フロードリルスクリューなどの点接合や、レーザーろう付け、接着などの線接合があるが、施工・リサイクル性などの点で、固相接合法である摩擦攪拌点接合 (FSSW) や摩擦攪拌接合 (FSW) が相対的に優れている。Al 合金と鋼板との点接合では、抵抗スポット溶接における種々の問題点を改善した接合法としてリアドア等に FSSW が適用されるなどの実用化も進んでおり、申請時点でも多くの報告があった。しかし、我々の報告以外に難燃性 Mg 合金/めっき鋼板の FSSW は見当たらず、難燃性 Mg 合金/Ti 合金の FSSW は他に例が無かった。また、異種材料の FSSW における継手特性に及ぼす接合ツール形状の影響、特に接合ツールの材質や固定ツールの形状・材質の影響を検討した報告が無く、ツール形状・材質や接合条件がインプロセス計測に及ぼす影響など、本研究で企画した内容を検討した報告は見当たらなかった。

2. 研究の目的

FSW や FSSW による軽合金とめっき鋼板や Ti 合金などとの重ね接合では、下板の表面状態が接合強度に大きく影響を及ぼすことが明らかとなっていた。そこで、異種金属の FSW や FSSW による重ね継手強度とその信頼性をさらに向上させるためには、

- (a) 上板の減肉防止とともに塑性流動の促進と塑性流動の領域拡大を図る。
- (b) 下板側の表面処理層・表面汚染層を接合界面から効率的に除去する。
- (c) 圧着領域で露出した下板新生面と上板の接合強度を向上させる。

すなわち、上下板間の接合界面制御が必要であると考えた。

これまでに FSSW においては、めっき鋼板のめっき種類、固定ツールの形状・材質、上板合金の成分元素と下板側の表面処理層や下板合金の成分元素の相互作用が、(a)～(c)の向上に寄与することが明らかとなっていた。しかし継手の十字引張強度は、引張せん断強度の 1/10～1/20 と低く、継手垂直方向の荷重に対する強度の向上が望まれた。このためには、インプロセス計測をリアルタイムにかつ精密に計測しつつ、適切なプローブ長・プローブ先端形状・熱伝達係数の接合ツールや固定ツールを用い、ツール挿入時と挿入後のツール保持時で接合条件を二段階に変化させるなどの制御により、(a)～(c)をさらに向上させることが必要と考えた。

そこで本研究では、難燃性 Mg 合金とめっき鋼板・Ti 合金との異種金属 FSSW 接合において、4 年の研究実施期間内で、[1]インプロセス計測 (接合工程中の計測) の測定システム構築、[2]ツール形状・材質がインプロセス計測と継手強度に及ぼす影響の検討、[3]接合条件がインプロセス計測と継手強度に及ぼす影響の検討、の 3 項目を実施し、接合部の界面制御のための接合条件 (ツール形状・材質、接合条件) の抽出と、その最適化指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

研究開始当初、数値制御立フライス盤のみでの FSSW 接合実験を計画していたが、研究実施 2 年目に、ロボット FSW 装置の無償貸与と本校設置が急遽決まった。これまでに FSW や FSSW のツール挿入量の制御方式は、位置制御、荷重一定制御、ツールトルク一定制御の 3 種類が開発されていたが、これら制御方式間、特に異種金属の接合における相互間の比較を詳細に行った例は見当たらなかった。そこで、表 1 に示す制御方式の異なる 2 種類の装置を用い、両者の異種金属接合性を比較検討することも追加目的として実施した。

表 1 使用した FSSW 実験装置と接合条件およびインプロセス計測量の比較

名称 (メーカー：形式)	数値制御立フライス盤 (牧野フライス：KE-55)	ロボット FSW 装置 (トライエンジニアリング：R-FSW 1)
制御方式	位置制御	荷重一定制御
接合条件 (指令量)	○ツール回転数 ・ツール挿入速度 ・ツール挿入位置 ・ツール保持時間	○ツール回転数 ・ツール挿入荷重 ・ツール挿入時間
インプロセス 計測量	・ツール挿入力 ○ツール側温度 ○材料側温度	・ツール先端位置 ・ツール挿入力 ○ツール側温度 ○材料側温度

(2) インプロセス計測量（接合工程中の計測量）の測定方法

①荷重測定

図 1 に示す 3 成分動力計測定システムを使用し、接合中の材料にかかる力を測定した。接合材料の固定治具を 3 成分圧電型動力計の上に固定し、マルチチャンネルチャージアンプ、データ収集システムを接続、さらにデータ収集システムからデータ収集用 PC に USB 接続し、データ収集用 PC にインストールした専用ソフトで荷重データを記録した。記録した荷重データのうち、動力計の面垂直方向の力 (F_z) をツール挿入力として評価した。



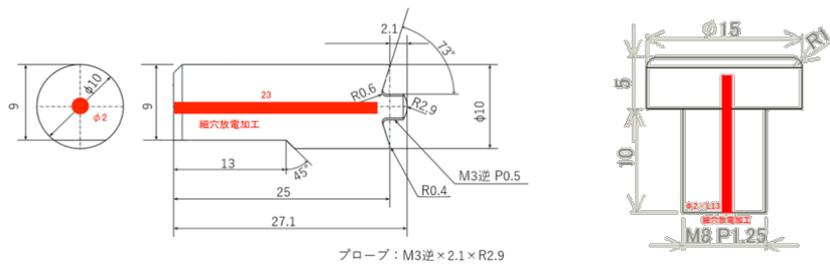
図 1 使用した 3 成分動力計測定システム（キスラー）

②位置測定

ロボット FSW 装置の加圧ヘッド部にレーザ変位計（キーエンス：LK-G150）を固定し、接合材料固定治具の基準位置表面からレーザ変位計までの距離を、8ch 高速データロガーで記録した。レーザ変位計とツール先端までの相対位置を加味し、距離データからツール先端位置として評価した。

③温度測定

ツール側温度、および材料側温度を測定するため、図 2 に示した箇所に K 型熱電対を埋め込んだツールと裏あてを用いた。熱電対の先端位置は、ツールプローブ根元、および裏あて表面からそれぞれ 2 mm の位置とし、その位置まで直径 2 mm の細穴放電加工を施した。熱電対先端の温度は、図 3 に示した温度測定システムにより、USB 端子に装着した PC 通信ユニットを介してデータ収集用 PC に送られ、インストールされた専用ソフトで温度データとして記録した。記録した温度データはそれぞれツール側温度、および材料側温度として評価した。



(a) ツール（プローブ長 2.1 mm の場合）

(b) 裏あて

図 2 使用した接合ツールおよび裏あての形状と熱電対埋め込み位置



図 3 使用した温度測定システム（アドバンテスト：無線データロガー WM2000 シリーズ）

高速回転しているツールと温度測定ユニットとの相対位置が接合中に変化しないよう、ツールホルダに対して温度測定ユニットを固定し、保持する温度測定ユニットホルダーを 3D プリンターで作成して使用した。

(3) 接合実験方法

長さ 100 mm、幅 30 mm、厚さ 2 mm の難燃性 Mg 合金板 (AZX611)、同一形状で厚さ 0.8 mm の溶融亜鉛めっき鋼板 (GI) と合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA) を用いた。ショルダ径 10 mm、プローブ M3 逆ネジピッチ 0.5、プローブ長 1.9、2.0、2.1 mm の SKD61 工具鋼 ツールを用いた。接合実験は、AZX611 板を上に鋼板を下に重ね、30 mm の重ね代で接合材料の固定治具に固定して行った。両制御方式に共通した接合条件：ツール回転数は、 $1750 - 3500 \text{ min}^{-1}$ で変化させた。

数値制御立フライス盤の負荷を危惧し、位置制御方式ではツール挿入速度を当初 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ としていたが、ロボット FSW 装置でのツール挿入速度の計測結果と比較し、10、50、100、150、200 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ で変化させた。ツール挿入位置は、ツール先端が AZX611 板表面に接触してからの板厚方向の送り量とし、2.0、2.2、2.4 mm で変化させた。またツール保持時間は、ツールが挿入位置に到達してからツール引き抜きまでの時間とし、5、8、10、15 s で変化させた。

荷重一定制御方式では、ツール挿入荷重を 2500、2750、3000、4230、5820、7280 N で変化させ、ツール挿入時間をツール挿入荷重が設定値に到達してからツール引き抜きまでの時間とし、15 s 一定とした。

(4) 継手評価の方法

得られた継手の接合状況を、実験後に治具から外す際に外れた、保管中や後述の加工の際に外れた、継手が得られて強度評価までできた、の 3 種類で評価した。

また継手強度の評価は、JIS Z 3136 を参考に、引張試験機 (島津：AG-10kNIS) を使用しクロスヘッドスピード $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ の条件で引張せん断試験を行った。その際、試験材幅 30 mm ではチャックした際に引張軸とのズレが生じてしまうため、チャック部幅が 20 mm となるよう幅を狭める加工を行い、AZX611：2 mm、GI および GA：0.8 mm の板厚差を考慮して、単軸引張になるようにスペーサーを挟み込み実施した。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

当初研究目的の [1] が達成され、[3] の一部が実施された。また当初予定には無かった、位置制御方式の数値制御立フライス盤と荷重一定制御方式のロボット FSW 装置を用いた異種金属接合性の比較検討も追加実施した。

ツール先端位置の時間変化から、ロボット FSW 装置のツール挿入速度は、位置制御方式で当初予定のツール挿入速度のおよそ 24 倍の $120 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ と分かり、位置制御方式でのツール挿入速度の適正範囲が見出された。このツール挿入速度範囲内では当初危惧していたツール回転速度低下や接合状況への影響は無く、ツール挿入力の最大値は $1900 - 2250 \text{ N}$ で、ツール挿入速度とツール挿入力の最大値とは比例していた。

位置制御方式で、ツール挿入速度 $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、ツール保持時間 15 s 一定とし、ツール回転数 2500 min^{-1} 、 3000 min^{-1} 、ツール挿入位置 2.2 mm 、 2.4 mm で変化させた接合を行い、ツール挿入力、ツール側温度、および材料側温度の接合中の変化を計測した。その結果、この接合条件では、ツール挿入力の最大値が $5000 - 6700 \text{ N}$ 、ツール側温度の最高値が $395.9 - 404.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、材料側温度の最高値が $360.7 - 380.2 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。接合実験を各条件で 5 回行い、得られた引張せん断試験結果の破断荷重は、平均値で $748.4 - 1067.8 \text{ N}$ 、これはツール回転数およびツール挿入量の増加により伴い増加した。

荷重一定制御方式で、ツール回転数 3000 min^{-1} 、ツール挿入時間 15 s 一定、ツール挿入荷重 $4230 - 7280 \text{ N}$ の範囲で変化させた接合では、ツール先端位置がある一定値を越えると破断荷重が $1000 - 4000 \text{ N}$ となること、これまでの結果と同様に GI を下板とした場合の破断荷重が GA の破断荷重の 2 倍から 4 倍程度高くなった。またツール挿入時間 15 s 一定、ツール挿入荷重 $2500 - 3000 \text{ N}$ の範囲、ツール回転数 $1750 - 3000 \text{ min}^{-1}$ の範囲で変化させた接合では、双方の接合パラメータ増加に伴い良好な継手が得られる範囲が拡大した。ツール挿入荷重 2750 N 、ツール回転数 2000 min^{-1} の接合中ツール挿入力、すなわち材料側にかかる荷重は 3000 N に到達したのち一度低下し、再度増加して最高 3500 N に到達した。このツール挿入力の最大値は、ツール挿入荷重 2500 N 、ツール回転数 2000 min^{-1} の場合は 3000 N 、ツール挿入荷重 3000 N 、ツール回転数 2750 min^{-1} の場合は 4200 N であった。また材料側温度の最高値は、 $190 - 270 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲で変化し、ツール挿入荷重とツール回転数では、後者の影響をより強く受ける傾向にあった。

(2) 得られた成果の国内外における位置付けとインパクト

研究終了時点において、難燃性 Mg 合金とめっき鋼板・Ti 合金との FSSW に関する報告、並びに異種金属 FSSW 接合において、接合条件がインプロセス計測と継手強度に及ぼす影響の検討に関する報告のいずれも見当たらない。また、ツール挿入量の制御方式間、特に異種金属接合における相互の比較を詳細に行った例は見当たらない。

(3) 今後の展望

当初研究目的の [2]、および難燃性 Mg 合金/ Ti 合金の FSSW は実施できておらず、接合部界面制御のための接合条件（ツール形状・材質、接合条件）の抽出や、その最適化指針を得ることまでには至らなかった。今後、位置制御方式と荷重一定制御方式の異種金属接合性の比較検討とともに、これら未達事項を継続して実施していく予定である。また、上下板間の接合界面制御のための (a)～(c) の更なる向上手段として、ロボット FSW 装置特有のツール引き抜き時に生じる水平方向のブレを積極的に活用した、接合界面の面積増加と継手十字引張強度の向上にも取り組む。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------