

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14511

研究課題名（和文）Elucidation of interface bonding mechanism and novel-tool strengthening principle in friction assisted joining of Al alloy to CFRTP

研究課題名（英文）Elucidation of interface bonding mechanism and novel-tool strengthening principle in friction assisted joining of Al alloy to CFRTP

研究代表者

GENG PEIHAO (GENG, PEIHAO)

大阪大学・接合科学研究所・特任講師

研究者番号：40900064

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）：当社は、新しい摩擦ツール設計に基づいたアルミニウム/ポリマー材料の摩擦熱補助接合技術を発明しました。新しい摩擦ツールは、局所的な摩擦発熱とアルミニウムの局所的な塑性変形制御により、従来のプロセスにおける接合部の中心部の薄肉化の問題を解決します。従来のプロセスと比較して、この技術はツールの幾何学的パラメータをさらに最適化することにより、接合強度が大幅に向上し、さまざまなサイズ仕様で高強度の Al/CFRP 点接合を実現しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

The Al/CFRP friction-assisted joining technology uses a new concave shoulder tool design to achieve high-strength spot joining of Al/CFRP thin plates. As a new lightweight joining technology, it helps promote the application of Al/polymer material hybrid structure in new energy vehicles.

研究成果の概要（英文）：We invented a friction heat-assisted joining technology for aluminum/polymer materials based on a new friction tool design. The new friction tool solves the problem of thinning in the core area of joints in traditional processes through regional friction heat generation and local plastic deformation control of aluminum. Compared with the traditional process, the joint strength is significantly improved. By further optimizing the tool geometric parameters, this technology has initially achieved high-strength Al/CFRP spot joint with different size specifications.

研究分野：接合構造化解析学

キーワード：Al/CFRP joining

※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。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ピンレス摩擦スポット溶接 (FSpJ) は、スポット構成を持つ金属と CFRTP の信頼性の高い接合を実現する可能性のある有望な接合方法として考えられています。CFRTP と金属合金の間の結合形成に基づいて、プロセス中の熱発生と温度進化の制御が重要であることがよく知られています。プロセスで熱伝達を意図的に制御するためには、プロセスパラメータの選択に加えて、ツール形状の設計と修正が実現可能な方法であると期待されています。現在の調査では、シラン化された Al6061/Carbon fibre-reinforced polyamid-6 (CF/PA6) の結合強度に対するツールの変更の効果が研究されています。FSpJ プロセスでの熱伝達へのツールの変更の影響を理解するのに役立つ有限要素モデルが開発されています。

2. 研究の目的

本研究では、異なるタイプの凹型攪拌ツールを独立して設計し、実験と数値シミュレーションを組み合わせることで、新しい攪拌ツールが Al 合金と CFRP の界面接合時の熱的条件と機械的条件の 2 つの要因に与える影響のメカニズムを詳細に研究し、最適化されたプロセスウィンドウを確立し、Al 合金と CFRP の摩擦点接合の接合効率と接合部の総合的な性能を向上させることを目指しました。

3. 研究の方法

CF/PA6 を含む厚さ 3 mm の炭素繊維強化ポリアミド 6 (CF/PA6) シートが、FSpJ プロセスを介して 2 mm 厚の Al 合金 6061-T6 シートとラップ接合される複合ワークピースとして選択されました。Al 表面のシラン化処理が行われ、Al と CF/PA6 の間の効果的な化学結合を実現しました。図 1 は、FSpJ および開発されたシミュレーションモデルの情報を詳しく示しています。FSpJ プロセスは、商用ソフトウェア Abaqus/Explicit に基づく任意のラグランジュおよびオイラー (ALE) 連成熱機械法を使用してシミュレートされました。一般的な熱源は、摩擦による表面加熱と変形による体積加熱から来ます。本研究では、図 1c に示されているように、4 つのツールが調査されました。一定の突き出し速度 0.1 mm/min と突き出し深さ 0.3 mm の下で、異なる回転速度 (1000 rpm、1250 rpm、および 1500 rpm) が採用されました。

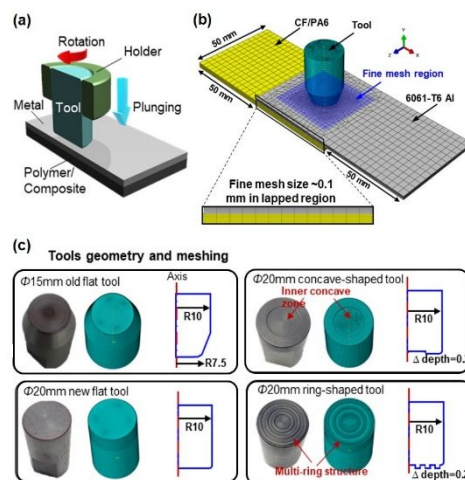


図 1 (a) FSpJ プロセスを示す概略図; (b) 有限要素モデル

4. 研究成果

図 2a は温度場分布を示しています。熱流動分布に類似して、Al 合金ゾーンの中心部の温度は初期時間 (~1 秒) に急速に上昇し、OT 接合部ではツール投影領域の下で内部が高温で外部が低温の分布を示しました。特に設計された凹凸およびリング状のツールは、ツール投影領域の下で Al 合金ゾーンの内部が低温で外部が高温になりますが、RT 接合部では高温領域が最小限です。ツール構造に関係なく、CF/PA6 側には比較的高温領域を持つ薄い熱伝導層が形成されます。そのため、CF/PA6 の熱伝導率が低いからです。

図 2b は、接合部の異なる界面位置での温度履歴を示しています。凹状およびリング状のツールの場合、新しい平坦なツールと比較して界面温度の増加率が低いことも確認でき、リング状のツールは環状の凹部のため、最も低い温度を示します。各ツールのピーク界面温度は、プロセス中に熱分解点 (>340°C) よりも高い値に達し、上記の実験結果と一致する熱分解および分解現象の存在を示しています。

図 3 は、異なるツールと回転速度で摩擦スポット溶接された AA6061-T6 および CF/PA6 接合部の引張せん断試験結果を示しています。平坦ツールの直径が増加すると、回転速度に関係なく最大引張せん断力

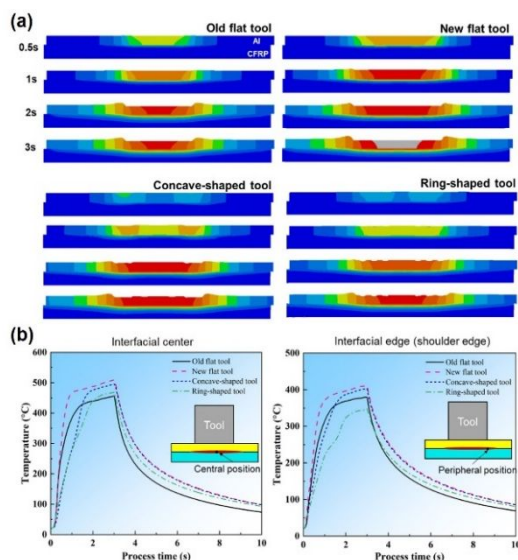


図 2 (a) 温度場のツール改良への影響; (b) 1250 rpm 回転速度での Al/CFRTP 接合部の熱履歴。

が増加することが期待されます。最大引張せん断力は、回転速度が 1000 rpm から 1500 rpm に増加するにつれて増加傾向を示し、新しい平坦ツールを除いています。新しい平坦ツールの場合、最大引張せん断力は、1250 rpm で 1000 rpm と比較して著しく向上します。ただし、回転速度が 1500 rpm に増加すると、CF/PA6 の広範な熱分解のため、若干減少します。平らなツールと比較して、凹凸形状のツールとリング状のツールの両方が、回転速度に関係なく、Al 合金と CF/PA6 が FSpJ を使用して強度を増すことを可能にします。平均接合強度は、最大引張せん断力をシミュレートされた溶融面積で割った比率によって計算され、その結果は図 7b に示されています。再度、CT および RT 接合部は、他の接合部と比較して明らかに強度が向上しており、特に回転速度が 1250 rpm の場合に最高の強度が得られます。

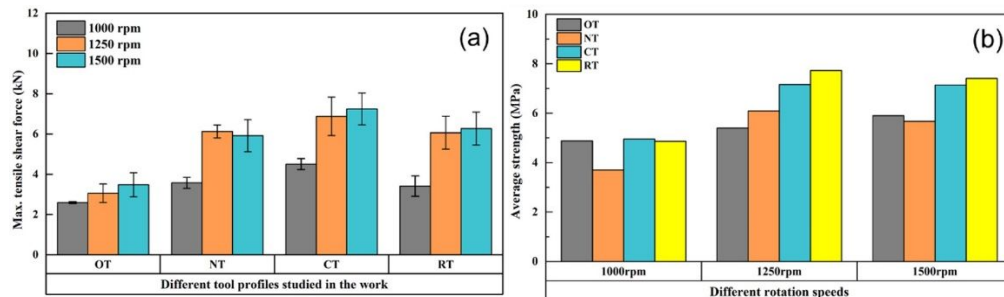


図 3 (a)引張せん断試験結果および (b) AA6061-T6 および CF/PA6 接合部の平均強度。平均強度は、最大引張せん断力をシミュレートされた溶融面積で割った値です。

図 4(a)では、結合界面の中心から異なる位置までの 230℃以上および 340℃以上の界面温度の持続時間をさらに比較し、欠陥形成の重症度とアミドとエポキシ基シラン層との化学反応の程度を詳細に示しています。理論的にはアミドとエポキシ基グループの間で迅速な化学反応が起こりますが、反応時間は、溶融樹脂によるシラン化された Al 合金のウェット状態と接合中の表面汚染に影響を受けます。Choi ら[1]は、シラン化された Ti 合金と CF/PA6 の FSW における溶融間隔と破壊強度を関連付けました。彼らの研究では、溶融時間が約 1.3 秒の回転速度 100 rpm で作成された接合部は、界面で破壊されましたが、溶融時間が 5~10.3 秒の回転速度 125~175 rpm で作成された接合部は CF/PA6 マトリックスで割れ、最高の強度を示しました。彼らの測定結果では、十分な化学反応時間は 1.3~5.0 秒の間にあることを示唆しています。Kimiaki ら[2]は、シラン化された Al と CF/PA6 の FLJ における接合速度に関連する溶融間隔が 2.2~4.3 秒の範囲内で、シラン層と PA6 の間の十分な反応時間であることを報告しました。Nagatsuka ら[3]によるシラン化鋼と CF/PA6 の抵抗スポット溶接の研究によると、溶融時間が約 1.2 秒の低溶接電流 (5kA) は、限られた接合領域を生み出しました。また、湿った地面の Al 合金と CF/PA6 を直接接合する場合、Al 表面の酸化物または水酸化物化合物と PA6 との間の強力な水素結合を得るために、約 3.0 秒の臨界溶融間隔が必要でした。現在の結果によると、図 4(a)に示されているように、溶融間隔が 3.0 秒未満であることがわかるツール投影領域の下に完全な凝集破壊が発生し、ツール形状に関係なく、ツール投影領域の端からの距離に応じて部分的な界面粘着破壊が発生し、未接合または弱接合領域が、不完全な化学反応によるものであるため、溶融間隔を延長することで回避できます。提示された研究からは、保守的な溶融間隔として約 3.0 秒が推奨されます。

図 4(a)では、結合界面の中心から異なる位置までの 230℃以上および 340℃以上の界面温度の持続時間をさらに比較し、欠陥形成の重症度とアミドとエポキシ基シラン層との化学反応の程度を詳細に示しています。理論的にはアミドとエポキシ基グループの間で迅速な化学反応が起こりますが、反応時間は、溶融樹脂によるシラン化された Al 合金のウェット状態と接合中の表面汚染に影響を受けます。Choi ら[1]は、シラン化された Ti 合金と CF/PA6 の FSW における溶融間隔と破壊強度を関連付けました。彼らの研究では、溶融時間が約 1.3 秒の回転速度 100 rpm で作成された接合部は、界面で破壊されましたが、溶融時間が 5~10.3 秒の回転速度 125~175 rpm で作成された接合部は CF/PA6 マトリックスで割れ、最高の強度を示しました。彼らの測定結果では、十分な化学反応時間は 1.3~5.0 秒の間にあることを示唆しています。Kimiaki ら[2]は、シラン化された Al と CF/PA6 の FLJ における接合速度に関連する溶融間隔が 2.2~4.3 秒の範囲内で、シラン層と PA6 の間の十分な反応時間であることを報告しました。Nagatsuka ら[3]によるシラン化鋼と CF/PA6 の抵抗スポット溶接の研究によると、溶融時間が約 1.2 秒の低溶接電流 (5kA) は、限られた接合領域を生み出しました。また、湿った地面の Al 合金と CF/PA6 を直接接合する場合、Al 表面の酸化物または水酸化物化合物と PA6 との間の強力な水素結合を得るために、約 3.0 秒の臨界溶融間隔が必要でした。現在の結果によると、図 4(a)に示されているように、溶融間隔が 3.0 秒未満であること

がわかるツール投影領域の下に完全な凝集破壊が発生し、ツール形状に関係なく、ツール投影領域の端からの距離に応じて部分的な界面粘着破壊が発生し、未接合または弱接合領域が、不完全な化学反応によるものであるため、溶融間隔を延長することで回避できます。提示された研究からは、保守的な溶融間隔として約 3.0 秒が推奨されます。

図 4(b)は、熱要因の観点から、凹型ツールによって最大引張せん断力が得られる理由を図式化して説明しています。凹型ツールは、平らなツールと比較して熱分解欠陥を減少させます。また、リング状のツールよりも大きな有効接合面積とより均一な界面温度を提供します。その結果、再結晶化した樹脂とシラン層の間に強力な共有結合力が均一に形成され、最高の接合総合強度に寄与します。凹型ツールの前提条件として熱分解の有害な影響を最小限に抑えることで、接合強度をさらに向上させることが期待されます。

熱的要因に加えて、ジョイントの形状や応力分布などの機械的要因も最終的なジョイント性能に影響を与える可能性があります。平らなツールと比較して、凹型ツールは Al 合金側の上方変形により、一定程度、溶融樹脂の排出に制限的な影響を及ぼすと予想されます。これは、溶融樹脂が平らなツールと比較して外側に流出するよりも、溶融樹脂が TAZ 中心に集中し、Al 合金側に浸透することを好むことを示唆しています。これにより、溶融樹脂の広範な流出が減少し、素裸の炭素繊維の生成と界面接着の弱体化が防がれます。平らなツールやリング状のツールと比較して、凹型ツールでは、より不均一な接合界面構造が、凹型ツールでのマクロメカニカルインターロッキングを強化すると推定されます。現在の調査では、Al 合金表面にシラン層があるため、地面の Al 合金の表面粗さによるアンカリング効果は物理的な接着に影響を与える重要な要素ではありません。

物理的または化学的な結合の形成に機械的応力の影響を予測するのは難しいため、現在の調査では、異なるツールによって形成される応力状態を暗示的に明らかにするために、1250 rpm での接合部の上面の残留応力が XRD 法によって測定されました。図 5(a)は、XRD 法によって測定されたシート長方向に沿ったジョイントの残留表面応力を比較し、接合領域周辺で著しい応力変動を示しています。重なり合った領域の外側では、表面残留応力が低いレベル、つまりほぼゼロに減少し、著しい熱誘起残留応力はないことを示唆しています。ツール肩の下領域の残留応力は引張性の性質を持ち、ツール肩の中心から端に向かって、最初に最大の引張応力に達し、その後圧縮されます。接触領域の端近くでは、残留応力が最大の圧縮応力に達し、その後、短い距離で低レベルに減少します。比較によると、凹型ツールは接合領域周辺で低い引張応力と最高の圧縮残留応力を生成し、残留応力状態がジョイント強度に与える負の影響を低減します。FSpJ による異種 Al/CFRTP ジョイントの残留応力は、プロセス中のワークピースの熱および変形履歴に関連しており、また接着界面の相互作用応力に影響を受けます。これは、接着界面の拡大および収縮に関連しています。なぜ凹型ツールによって残留応力状態が改善されるのかについては、将来の研究で調査されるでしょう。

結論として、図 5(b)に示すように、機械的要因の観点から、凹型ツールによるジョイント強度の向上は、機械的相互ロックと Van der Waals 力を促進することによる改善された物理的な接着力と、接合後の接合部領域内の引張り残留応力の緩和に帰因します。要約すると、熱的および機械的要因の組み合わせの観点

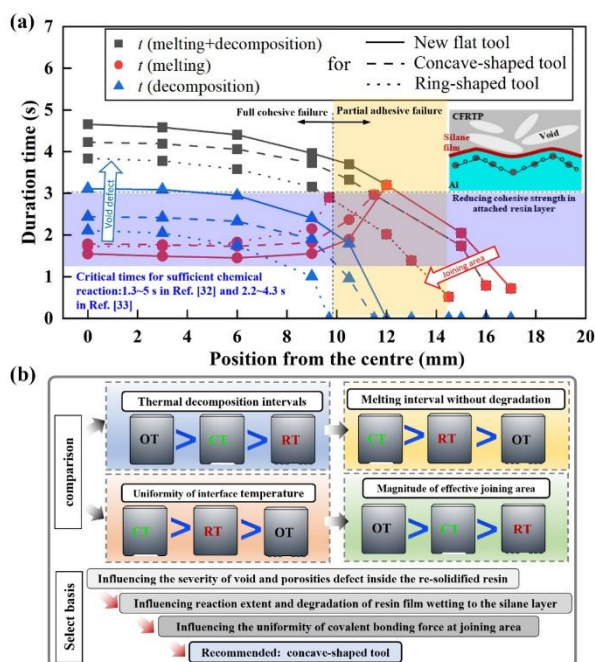


図 4 (a) 異なる領域における溶融および分解の持続時間の比較; (b) 熱的要因の観点からの改善メカニズムの図

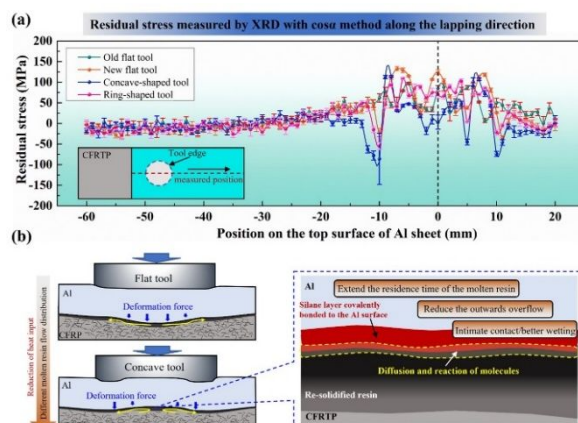


図 5 (a) 異なるツールを使用した接合後のシート長方向に沿った表面残留応力の比較; (b) 機械的要因の観点からの改善メカニズムの図解。

から、凹型ツールは、十分な化学反応とプロセス中の効果的な接合領域に加えて。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Geng Peihao, Morimura Masashi, Wu Song, Liu Yong, Ma Yunwu, Ma Ninshu, Aoki Yasuhiro, Fujii Hidetoshi, Ma Hong, Qin Guoliang	4. 巻 79
2. 論文標題 Prediction of residual stresses within dissimilar Al/steel friction stir lap welds using an Eulerian-based modeling approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 340～355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmapro.2022.05.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Geng Peihao, Morimura Masashi, Ma Ninshu, Huang Wenjia, Li Weihao, Narasaki Kunio, Ogura Takuya, Aoki Yasuhiro, Fujii Hidetoshi	4. 巻 310
2. 論文標題 Measurement and simulation of thermal-induced residual stresses within friction stir lapped Al/steel plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Processing Technology	6. 最初と最後の頁 117760～117760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmatprotec.2022.117760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Geng Peihao, Ma Hong, Li Weihao, Murakami Kazuki, Wang Qian, Ma Ninshu, Aoki Yasuhiro, Fujii Hidetoshi, Chen Chuantong	4. 巻 254
2. 論文標題 Improving bonding strength of Al/CFRTP hybrid joint through modifying friction spot joining tools	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part B: Engineering	6. 最初と最後の頁 110588～110588
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compositesb.2023.110588	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Weihao, Geng Peihao, Wang Qian, Ma Ninshu, Zhao Shuaijie, Chen Chuantong	4. 巻 24
2. 論文標題 Effect of thermal condition on isothermal-pressing joined strength of silanized Al alloy/carbon fiber-reinforced polyamide-6	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 8035～8052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmrt.2023.05.043	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Li Weihao, Geng Peihao, Ma Ninshu, Chen Chuantong	4. 巻 38
2. 論文標題 Effect of thermal-mechanical conditions on strength of silanized Al alloy/CFRTP hybrid joint made by thinning-controlled hot pressing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 108507～108507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mtcomm.2024.108507	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Geng Peihao, Ma Hong, Zhao Pengkang, Ma Ninshu, Takuya Miura, Fujii Hidetoshi	4. 巻 325
2. 論文標題 Effect of tool revolutionary pitch on heat transfer and material flow in Al/steel friction stir lap welding	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Materials Processing Technology	6. 最初と最後の頁 118306～118306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmatprotec.2024.118306	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Weihao Li, Peihao Geng, Ninshu Ma, Aoki Yasuhiro, Fujii Hidetoshi
2. 発表標題 Al/CFRTP摩擦スポット接合における接合強度に及ぼすツール変更の影響
3. 学会等名 溶接学会全国大会講演
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 摩擦攪拌接合用ツール及び摩擦攪拌点接合法	発明者 麻 寧緒	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-179991	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------