

# 中央凹型回転ツールによるアルミ合金と CFRP の摩擦圧接技術に関する研究開発

大阪大学 接合科学研究所  
 特任講師 PEIHAO GENG

(2021 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021033-C2)

キーワード：摩擦圧接，凹型回転ツール，アルミ合金と CFRP，数値解析

## 1. 研究の目的と背景

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. 研究方法

CF を含む 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。

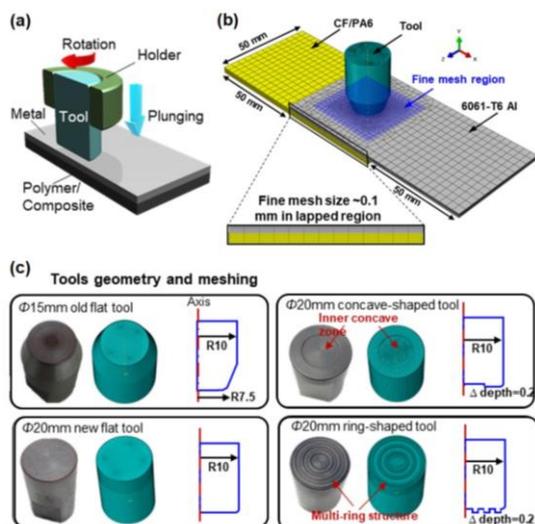


図 1 (a) FSpJ プロセスを示す概略図；(b) 有限要素モデル；(c) ツール情報

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、汎用ソフトウェア 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 1 c 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。

## 3. 研究成果

図 2 a 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、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、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。これは、CF/PA6 の熱伝導率が低いからです。

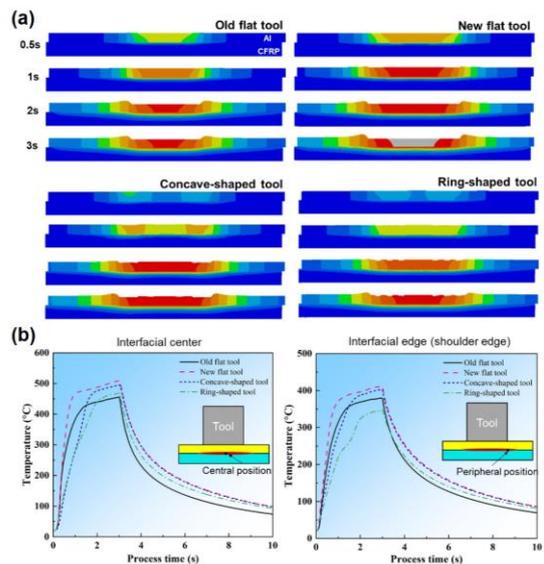


図 2 (a) 温度場のツール改良への影響；(b) 1250 rpm 回転速度での Al/CFRTP 接合部の熱履歴。

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3b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。

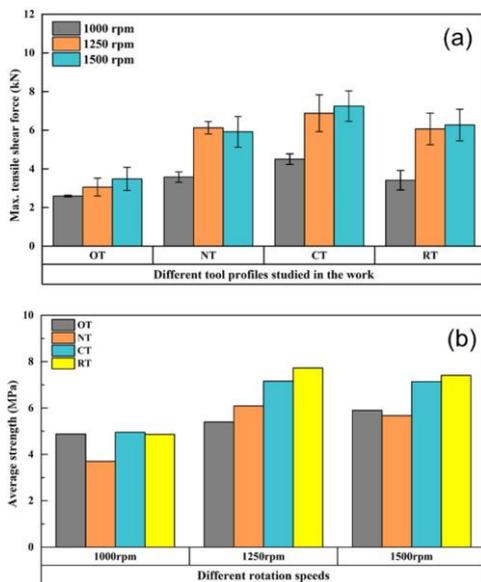


図3 引張せん断試験結果および (b) AA6061-T6 および CF/PA6 接合部の平均強度。平均強度は、最大引張せん断力をシミュレートされた溶融面積で割った値です。

図4(a)では、結合界面の中心から異なる位置までの230°C以上および340°C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]のシラン化鋼と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、接合時間として約3.0秒が推奨されます。

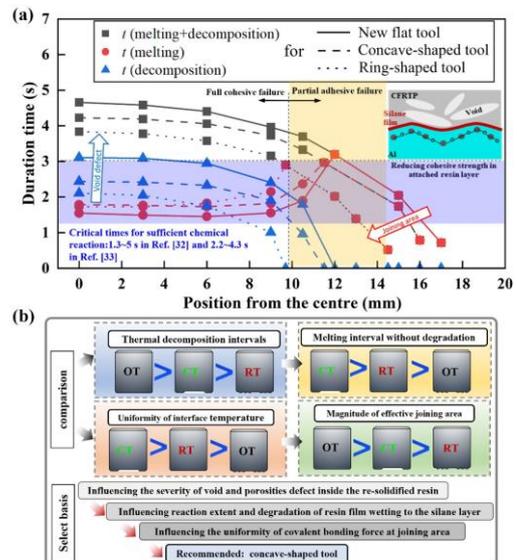


図4 (a) 異なる領域における溶融および分解の持続時間の比較; (b) 熱的要因の観点からの改善メカニズムの図解。

図4(b)は、熱的要因の観点から、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、熔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、熔融樹脂が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、熔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。

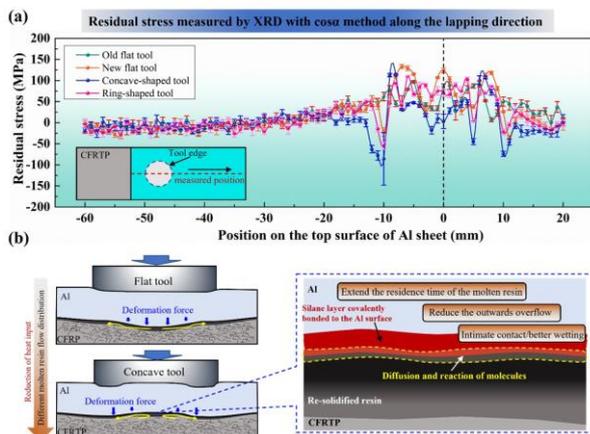


図5 (a) 異なるツールを使用した接合後のシート長方向に沿った表面残留応力の比較；(b) 機械的要因の観点からの改善メカニズムの図解。

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く、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。ツール肩の下の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た。

#### 4. 結論

- 1) ツールの形状に関係なく、共有結合が界面接着力を支配し、Al合金/シラン層界面にナノスケールのトランス相層が存在し、シラン層/CFRTP複合材界面に拡散層が存在します。すべての種類の接合部で熔融領域に空隙欠陥が現れますが、そのサイズは他の接合部よりも大きく、熱投入量が大きいため、NTで大きくなります。
- 2) すべての接合部で接着および凝集破壊が発生し、後者がCF/PA6複合材の熔融領域を支配します。CT接合部は、AlとCF/PA6の間の接合を最大引張せん断力で実現し、一方、リング状ツールは最高の平均引張せん断強度を生み出します。NTの場合、引張せん断力が低下するのは、マイクロスケールの空隙と気孔の広範な形成と融合によるものです。
- 3) 検証された熱伝達シミュレーション結果によると、ツールの凹型構造は摩擦熱を生成する摩擦面積を大幅に減少させ、Al側からCF/PA6側への熱伝導を減少させます。これにより、CT接合部ではより均一な温度分布が生成され、同じ直径の他のツールよりも大きな熔融（接合）面積が生成されます。
- 4) CT接合部の性質向上の理由として、熱的要因と機械的要因の両方が分析されます。凹型ツールはより大きな共有結合面積（均一な温度分布と十分な化学反応時間）を生成し、良好なウェットング条件で界面のマクロメカニカルインターロッキングを改善し、また接合後の引張り残留応力も低下させます。

## 謝 辞

この研究は、公益財団法人天田財団（AF-2021033-C2）の助成を受けて行われました。

## 参考文献

- 1) Choi JW, Morisada Y, Liu H, Ushioda K, Fujii H, Nagatsuka K, Nakata K. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and carbon fibre reinforced plastic. Science and Technology of Welding and Joining. 2020 Oct 2;25(7):600-8.
- 2) Kimiaki N, Hironobu T, Bolyu X, Atsuki T, Kazuhiro N. Effect of silane coupling on the joint characteristics of friction lap joined Al alloy/CFRP. Welding International. 2018 May 4;32(5):328-37.
- 3) Nagatsuka K, Xiao B, Wu L, Nakata K, Saeki S, Kitamoto Y, Iwamoto Y. Resistance spot welding of metal/carbon-fibre-reinforced plastics and applying silane coupling treatment. Science and Technology of Welding and Joining. 2018 Apr 3;23(3):181-6.