

異種材料接合技術の開発

Development of Dissimilar Materials Joining Technologies

技術開発センター
第一開発室 主任技師
博士 (工学) 牟 用煥
Yonghwan Mo

技術開発センター
開発管理室
舩添 太一
Taichi Masuzoe

技術開発センター
第一開発室 室長
博士 (工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
第一開発室 主任技師
福永 勝彦
Katsuhiko Fukunaga

技術開発センター
第一開発室 技師
近藤 加寿心
Kazushi Kondou

要 旨

本研究は、異種材料の接合強度を向上させることを目指している。近年、宇宙関連と自動車等の省エネルギー化において軽量化と高機能化が求められる中で、複合材料の使用が増加しているが、異種材料の効果的な接合技術の確立はまだ不十分である。今回は、摩擦重ね接合 (FLJ) を利用し、アルミニウムと熱可塑性および熱硬化性 CFRP の接合を行った。専門的なツールと治具を設計・製作し、材料を固定するための治具も設置した。さらに、ブラスト処理を施すことで接合強度が大幅に向上した。アルミニウムと CFRP の接合において、強力で耐久性がある接合が確認され、これにより、FLJ の技術が異種材料接合において高い有効性を持つことが示された。今後、接合条件のさらなる最適化、性能評価の継続、および特定のニーズに応じた製品開発を進めていく。

Abstract:

This research aims to improve joining techniques for dissimilar materials. In recent years, as the demand for lightweight and high-performance materials has increased, the use of composite materials has also risen. However, the establishment of effective joining techniques for dissimilar materials remains inadequate. Utilizing friction lap joining (FLJ), we joined aluminum with both thermoplastic and thermoset CFRPs. Specialized tools and fixtures were designed and manufactured. Additionally, joining strength was significantly enhanced through blast surface treatment. In the joining of aluminum and CFRP, strong and durable joints were achieved, showing the high effectiveness of FLJ technology in dissimilar material joining. From now on we will continue to optimize joining conditions, evaluate performance, and develop products for specific needs.

1. 緒言

人工衛星や飛行機などの構造部品では軽量化と強度向上が重要な課題となり、コストの削減やペイロードの増加、長期間の運転などに直結している。CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics、炭素繊維樹脂) と金属の異種材料の接合は、部材の高機能化、軽量化と強度向上の課題を解決するための重要な開発である。異種材料を接合することで、金属の強度や耐久性を維持でき重量の軽減が可能になり、熱膨張率の違いや振動などの問題を解決し、安定性を確保することもできる。一方で、CFRP と金属を効果的に接合するための技術開発や、最適な材料組み合わせの探求、維持管理や耐久性の向上などが課題となっている¹⁾。

現在、航空機等で使用されている CFRP は、ボルトやリベット等の機械的接合や接着剤を用いた接着接合により接合されている。金属材料同士に接合した場合と比較して、せん断破断力及び引張り破断力が低下する傾向である。CFRP と金属の異種材料の強固な接合は、今後、航空宇宙産業以外の様々な分野でも活躍が期待される。

2. 金属・樹脂異種材料接合

樹脂・CFRP と金属との異種材料接合法として、接着剤を用いる接着法、リベットなどの機械的締結法、金属材料を加熱して樹脂を溶融して接合する熱圧着 (融着) 法などがある。近年、接着剤やリベット等を用

いずに、金属と樹脂等を直接接合する方法も求められており、熱圧着法において、レーザ加熱や摩擦発熱を用いる方法が提案されている。

このように接合処理の信頼性・コスト等の問題、多様な金属種に対応できない等から、幅広い普及には至っておらず、信頼性の高い高強度で低価格の「異種材料接合技術」が望まれていた。

2.1 開発目標

金属と樹脂の異種材料接合には、異なる熱膨張率、熱影響部、表面処理、形状による接合などの課題がある。これらの課題を解決するため、新たな接合方法を開発する。特に、材料選定、接合パラメータの最適化、接合設計、表面処理に注力し、接合部の品質向上を目指す。

開発目標は、以下の2点とした。

- ①接合部の破壊レベルを2kN以上の接合強度に達すること
- ②接着剤や機械的締結による接合品に比べ、1.2倍以上の接合耐久性を実現すること

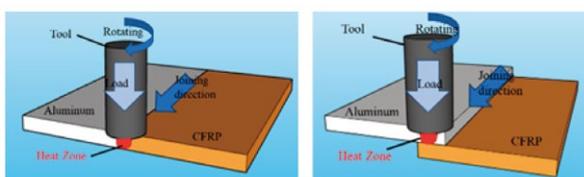
さらに、本研究開発により「高強度」「軽量化」を同時に満たす接合技術を開発し、宇宙・航空機、自動車、建設分野での利用を目指す。

3. 実施内容及び考察

3.1 FSW, FLJ 接合

金属同士の摩擦攪拌接合 (FSW 接合、Friction Stir Welding) は、Fig.1(a) に示す。ツールと呼ばれる回転体を摩擦熱により軟化した金属に挿入し、ツールのショルダー部とプローブにより金属を攪拌することで接合を行う。

これに対し摩擦重ね接合 (FLJ 接合、Friction Lap Joining) は、金属とCFRPの両材料間の攪拌の必要が無く、プローブありとプローブなしのフラットなツールを用いて接合を行うことが可能であり、接合時にツールのプローブの摩耗やショルダー部の変形が生じにくい。ツールと金属の摩擦発熱を利用した重ね接合法である。その概略図をFig.1(b)に示す。ツールの回転と押し付けることから摩擦発熱により金属表面を加熱し、その熱伝導により接合界面の樹脂を熔融する方法であり、ツールを移動させることにより金属と樹脂の連続した重ね継手が得られ、密着性に優れ、良好な継手強度が得られる²⁾。



(a)FSW joining (b) FLJ joining

Fig.1 Schematic image of friction joining.

3.2 FSW 装置への改造

FSW と FLJ 接合試験には、ツールの固定と回転、ツール移動が必要である。当社の摩擦肉盛り装置 (日東制機株式会社製、HFC-35 III -2.0) と 3 次元加工機 (碌々スマートテクノロジー株式会社製、HC-658 II) の改造を行い、接合試験治具と回転ツールも設計・製作した。改造した装置の試験の結果、アルミ板 (JIS A5052-H112) 2 枚の FSW 接合が可能になった。その接合品を Fig.2 に示す。



Fig.2 FSW joined aluminum plates. (A5052)

3.3 FLJ ツール

直径 20mm 回転ツール (超硬製) のプローブの有りとなしの影響も確認した。Fig.3 に示したプローブ (直径 8mm, 長さ 3mm) 有りおよびプローブなしのツールを用いて FLJ 接合を行った。

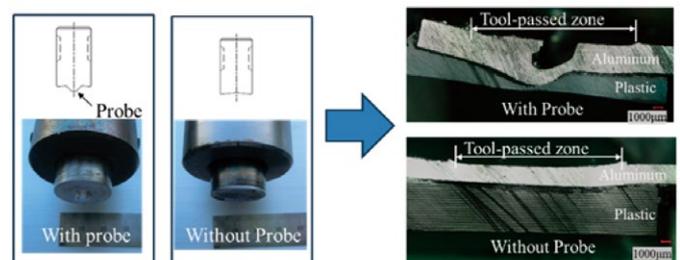


Fig.3 Appearance of the tool and cross section of the joint.

その継手の断面写真を Fig.3 に示す。プローブ有りのツールを用いて接合した場合では、アルミ板上のツール通過部に溝状の欠陥が形成され、プローブの挿入により変形したアルミ板が樹脂側に大きく押し込まれた。これは樹脂が熔融して、変形に対する抵抗が小さくなり、プローブが挿入されることで形成されたと考えられる。また、アルミと樹脂の両材料間の攪拌部は形成されていない。これに対し、プローブ無しツールでは、ツール通過部に欠陥は認められず、強固な接合継手が得られることが明らかになった³⁾。以上の内容から、今後の接合試験はプローブなしのツール利用する。

3.4 熱可塑性 CFRP とアルミの FLJ 接合

FLJ 接合では、FSW 接合同様に送り速度、ツール回転速度およびツール押し付け荷重 (挿入深さ) によって入熱が変化し、入熱に依存してアルミ (A5052) と CFRP の接合強度は変化する。そのため、最適接合条

件を探し、その接合強度などと比較しながら検証する必要がある。

3.4.1 最適 FLJ 接合条件

アルミ (A5052) と熱可塑性 CFRP の FLJ 接合における回転および送り速度の影響を調べた。なお、大きさはアルミ (A5052) と熱可塑性 CFRP ともに 150mm × 100mm × 2mm とした。CFRP としては、ポリアミド 66 (PA66) に 20% の炭素繊維を添加した試作熱可塑性 CFRP 板を使用した。Fig.4 には、回転速度が 2000rpm と一定にし、送り速度が 400、1200、2000mm/min の場合のアルミと熱可塑性 CFRP の FLJ 接合界面の温度変化を示す。

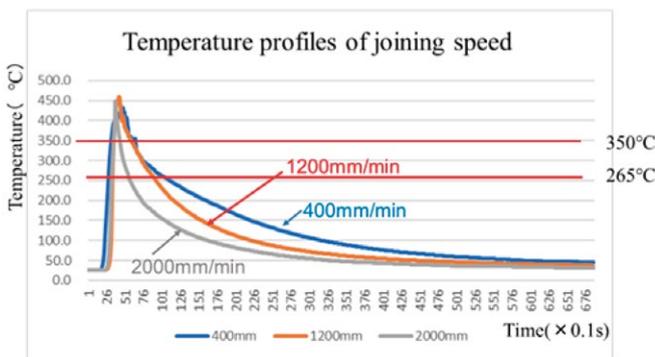


Fig.4 Temperature profiles of the joint by joining speed. (Joining conditions: tool rotation 2000 rpm, insertion 0.9 mm, tilt angle 3 degrees)

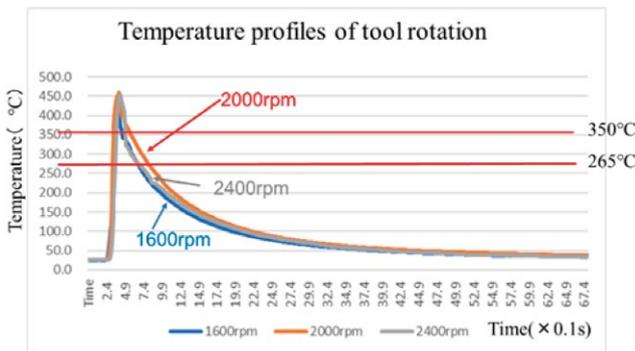


Fig.5 Temperature profiles of the joint by tool rotation. (Joining conditions: joining speed 1200mm/min, insertion 0.9 mm, tilt angle 3 degrees)

そして、Fig.5 には、送り速度が 1200mm/min 一定で回転速度が 1600rpm、2000rpm、2400rpm の場合の温度変化を示す。測定地点にツールが接近すると温度が急上昇し、ツール通過後は速やかに低下した。どの送り速度でも、ツール通過部の中央での最高温度は約 450°C であり、送り速度の差による最高到達温度の大きな違いは見られなかった。ただし、最高到達温度は、熱可塑性 CFRP のマトリックスである PA66 の融点 (265°C) および熱分解温度 (350°C) を上回っている。この温度以上に加熱される時間は送り速度が増加すると

短くなる。したがって、送り速度の増加とともに熱可塑性 CFRP の熱分解は抑制されるが、その一方で PA66 が溶融状態でアルミに密着する時間は短くなり、濡れ広がり面積が減少し、界面の反応時間が短くなるため、接合面積が減少する傾向がある。

いずれの送り速度でも、ツール通過部では軟化したアルミと熱可塑性 CFRP がツールの押し付け荷重によって下凸型に変形した。送り速度が低下すると、Fig.6 に示すように変形量が増加し、溶融した熱可塑性 CFRP がツール通過部の外側に押し出される量が増加し、熱可塑性 CFRP の板厚も減少した。

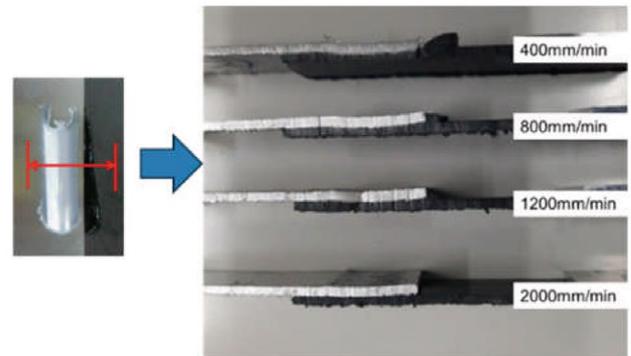


Fig.6 Comparison of cross sections by joining speed. (tool rotation:2000 rpm)

3.4.2 引張り試験結果

各条件で接合した接合品について引張り試験を行う。その引張り試験結果と条件との比較で最適接合条件を検証した。Fig.7 に示すように接合品から引張りせん断試験片を製作する。

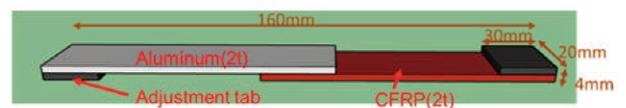


Fig.7 Test piece for tensile shear test.

引張りせん断試験片は、継手を接合方向と垂直に幅 20mm の短冊状に切り出した試験片である。試験に際しては、曲げモーメントの発生を防ぐため試験片にスペーサを固定して、継手の接合方向と垂直に荷重を加え、破断に至るまでの最大荷重を測定する。なお、継手の引張り方向は CFRP 板の短手方向に一致する。引張り試験は、クロスヘッドスピード 2mm/min にて、それぞれの接合条件で接合した継手に対して、2~4 回ずつ引張りせん断試験を行いその結果を Fig.8 に示す。

いずれも熱可塑性 CFRP 板の母材部で破断が生じ、全ての接合品は母材破壊レベルを示している。そして、熱可塑性 CFRP のみの引張りせん断荷重は 3336.4N であり、その前後の引張りせん断荷重を表している。

Fig.9 に FLJ 接合を施したアルミと熱可塑性 CFRP 継手の引張りせん断試験後の試験片のマッチング破面および破断場所と接合部との関係が明らかになる側面からの外観を示す。

主軸回転：2400rpm、送り速度：400mm/min での接合品では引張りせん断破断荷重 1675.67N で母材破壊ではなく界面の破断を示している。低速の移動により接合部の接合強度が弱くなっていると考えられる。Fig.10 はその破断部外観図を示す。

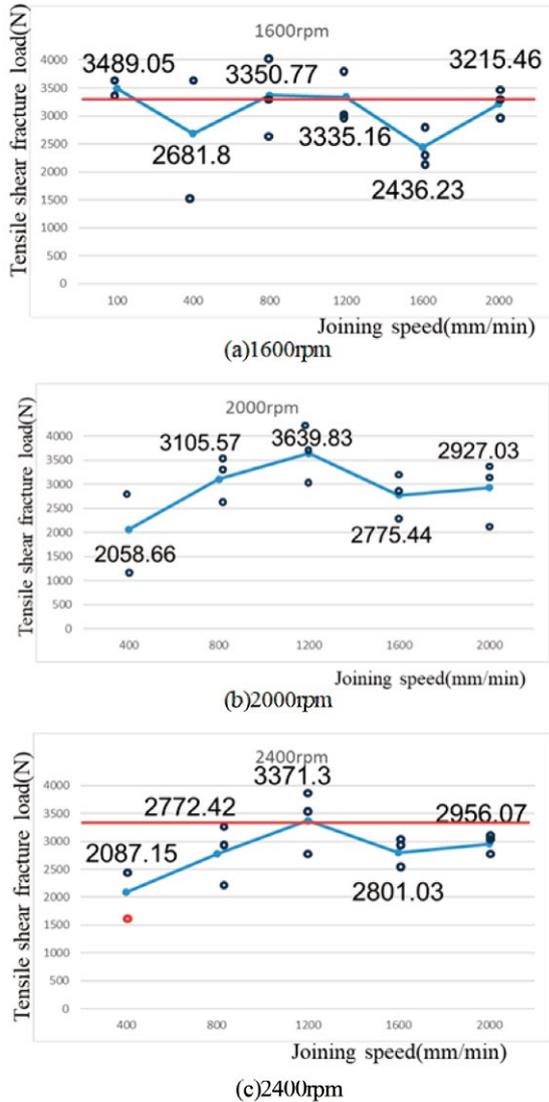


Fig.8 Results of tensile shear fracture load under each condition. (Insertion : 0.9mm, Tilt angle : 3degrees)

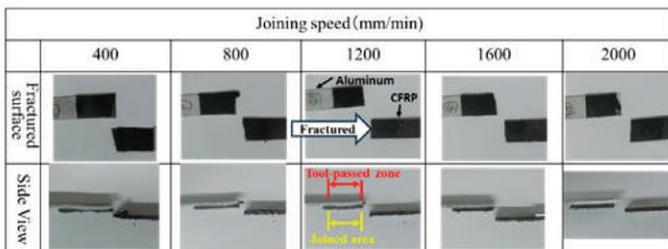


Fig.9 Fractured surfaces and side views of FLJ joints formed at various joining speeds after tensile shear test. (tool rotation:2000 rpm)

以上の結果より、熱可塑性 CFRP とアルミ (A5052) の接合では、いずれの条件でも良好な接合ができるが 2000rpm の 1200 ~ 2000mm/min が適正な接合条件である。

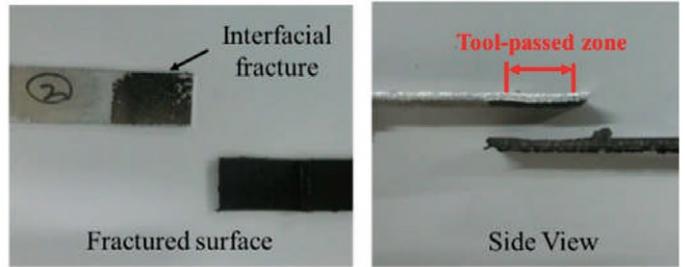


Fig.10 Fractured surfaces and side views of tool rotation 2400rpm, joining speed 400mm/min, broken part appearance.

3.5 熱硬化性 CFRP とアルミの FLJ 接合

熱硬化性の性質により予想通り接合はしなかったが、熱硬化 CFRP の表面に熱可塑性樹脂 (PA6) の接着層を有する場合には、FLJ 接合により接合可能と考えられる⁴⁾。接合部に 300 μ m 厚みの PA6 接合基材を追加で挿入して FLJ 接合を実施したところ、熱硬化 CFRP (150 × 100 × 2mm) とアルミ (A5052, 150 × 100 × 2mm) の接合が確認できた。今後、熱硬化性 CFRP を接合対象とする場合、表面への熱可塑性樹脂の接着層形成とともに、熱可塑性樹脂を介在させて接合する必要がある。Fig.11 にその接合品と接合部の断面図を示す。

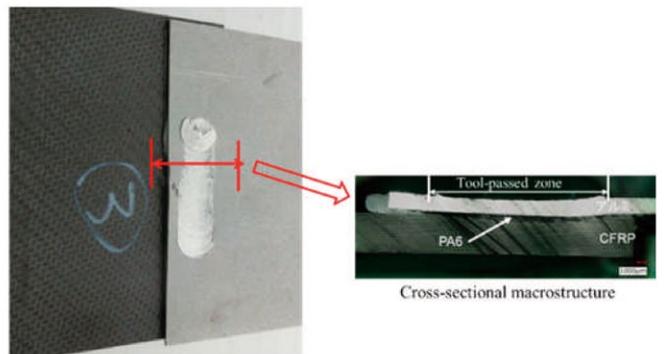


Fig.11 Cross-section macrostructure of a joint between aluminum plate and thermoplastic CFRP plate.

3.5.1 最適 FLJ 接合条件

FLJ 接合プロセス (アルミ + PA6 + エポキシ母材熱硬化性 CFRP) における接合部の温度プロファイルを Fig. 12、13 に示す。数秒程度の短時間で 400°C を超える温度まで接合部の温度が上昇可能であり、熱融着に適するポテンシャルを有することが確認できた。また、回転ツールの回転速度と送り速度に適切な接合条件範囲が存在することが確認できた。温度範囲から回転ツールの回転数が 2000 rpm 付近で、送り速度が 100 ~ 400 mm/min 付近のときに良好な接合が可能であった。

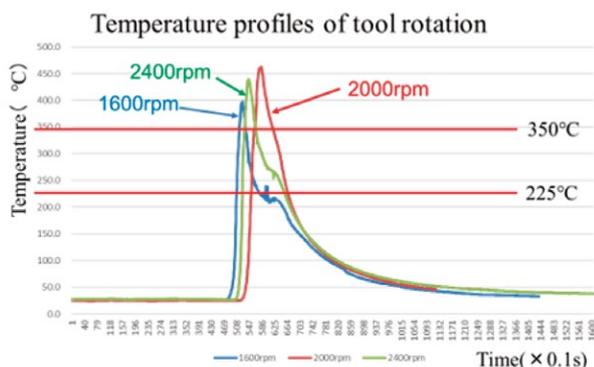


Fig.12 Temperature profiles of the joint by tool rotation.
(Joining conditions: joining speed 400mm/min, insertion 0.9 mm, tilt angle 3 degrees)

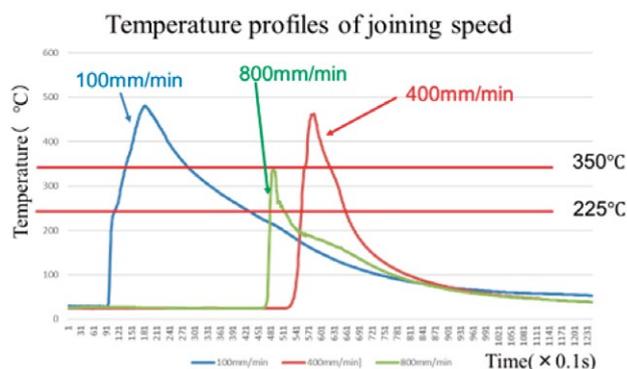


Fig.13 Temperature profiles of the joint by joining speed.
(Joining conditions: tool rotation: 2000 rpm, insertion: 0.9 mm, tilt angle: 3 degrees)

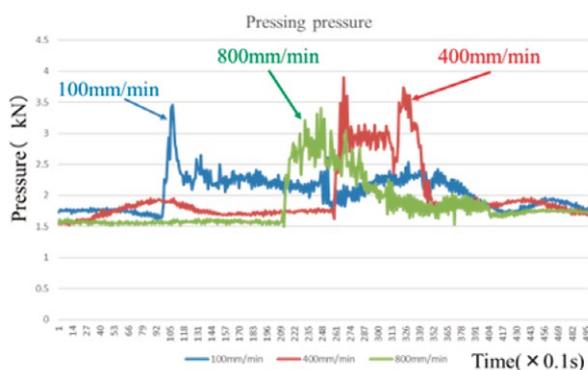
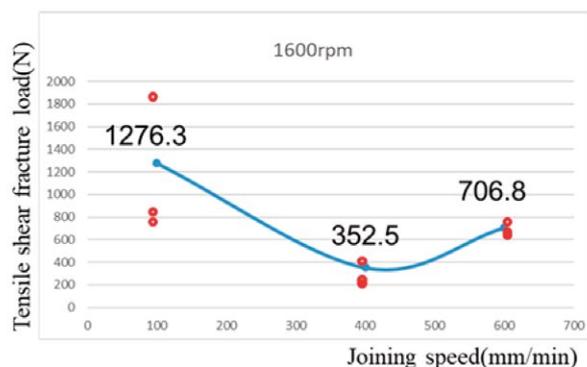


Fig.14 Change in pressing pressure with respect to joining speed.
(Joining conditions: tool rotation 2000 rpm, insertion 0.9 mm, tilt angle 3 degrees)

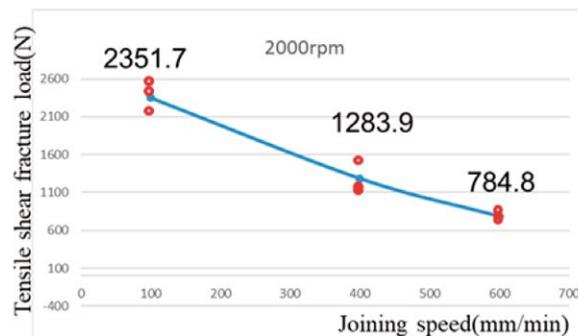
しかし、送り速度が 800 mm/min と大きい場合は、接合部への熱伝達が不十分で接合強度不足となり、接合可能ではあったものの、容易に手で剥がせるレベルの接合であった。送り速度が 100 mm/min の場合は、回転ツールから十分な熱量が PA6 シートに伝わって樹脂が熱分解し接合すると考える。そして、送り速度に対する圧力変化も確認しその変化を Fig.14 に示す。送り速度に対して押付け圧力変化はあるが、送り速度、回転などの影響はなかった。

3.5.2 引張り試験結果

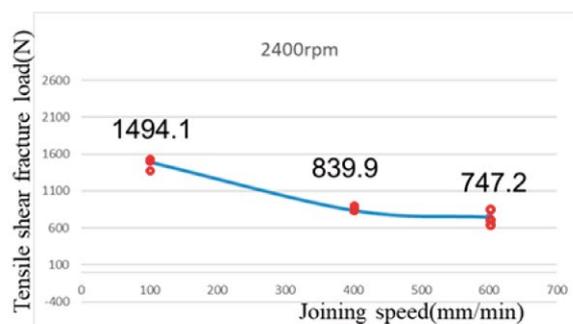
各条件での接合品の引張り試験を行った。その引張り試験結果と条件からの比較で最適接合条件が明らかになる。3.4.2 項に示すように接合品から引張り試験片を製作し試験を行った。引張り試験は、クロスヘッドスピード 2mm/min にて、それぞれの接合条件で接合した継手に対して、5 回ずつ試験を行いそのなかの最高値と最低値を除いた 3 回の結果を利用した。その結果を Fig.15 に示す。



(a)1600rpm



(b)2000rpm



(c)2400rpm

Fig.15 Results of tensile shear fracture load under each condition.
(Insertion : 0.9mm, Tilt angle : 3degrees)

いずれも熱硬化性 CFRP 板とアルミの界面の破断になっている。Fig.16 に FLJ 接合を施したアルミと熱硬化性 CFRP 継手の引張りせん断試験後の試験片のマッチング破面および破断場所の外観を示す。

CFRP の一部がアルミ表面にとられるほどの強固な接

合強度 (2.3kN) が確認できた。熱硬化 CFRP を接合対象とする場合、表面への熱可塑性樹脂の接着層形成とともに、十分な量の熱可塑性樹脂を介在させて接合する必要がある。



Fig.16 Appearance of the broken parts.

以上の結果より、熱硬化性 CFRP とアルミの接合では、2000rpm の 100mm/min が適正な接合条件である。その条件で製作した接合品と既存の接合方法であるボンドの接合品及び M3 ボルト接合品の比較を行った。その結果を Fig.17 に示す。

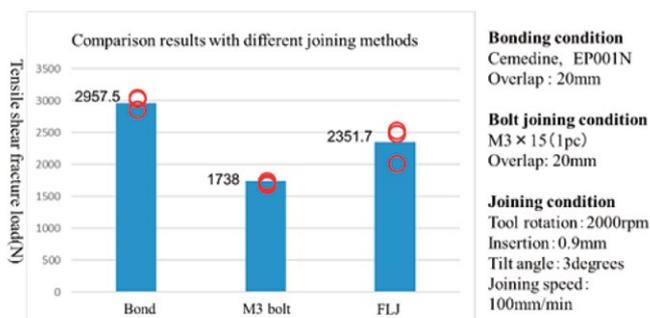


Fig.17 Comparison results with different joining methods.

結果から開発目標である接着剤接合方法 (2.9kN) の 1.2 倍の接合力は達成できなかったが、機械的なボルト接合(1.7kN) との比較では 1.2 倍の接合力を示した。今後、接合条件改善及び介在する熱可塑性樹脂の調査が必要である。

3.6 ブラスト表面処理による接合部の影響

表面処理技術を使用し、材料の界面を調整することで、アンカー効果による接合の強度や相性を向上させることができる。金属と CFRP の接合部の表面に前処理としてブラスト処理にて材料や条件に合わせた検証を行った。Fig.18 にブラスト処理の概要を示す。



Fig.18 Schematic image of blast surface treatment.

- ブラスト処理の目的は、以下の 4 点である。
- ①汚れ、酸化物、錆などの不純物を取り除き表面を清浄化する。
 - ②溶射材料がより良い接触を確保し、接合の強度や密着性が向上するための表面粗化になる。
 - ③表面に微小な圧縮応力が生じ、表面硬度や耐摩耗性が向上し、溶射層の接合強度が高まる。
 - ④表面に微細な凹凸や穴が形成され、溶射材料が溶射面により良く絡み合い、溶射層の密着性を向上させる。

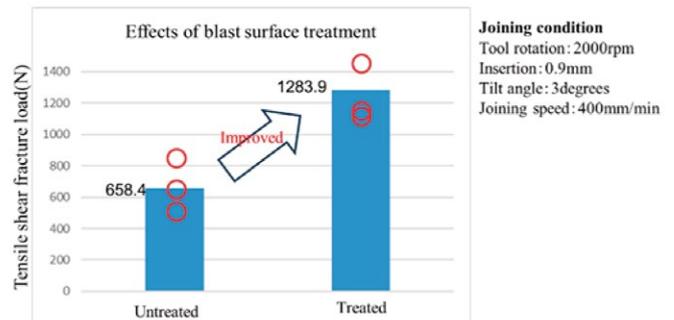


Fig.19 Effects of blast surface treatment.

そこで金属に対し表面処理を施してから接合に供し、接合後の継手の界面の構造を変化させ、さらなる強固な接合継手の形成を試みた。ブラスト表面処理を施したアルミニウム合金 (A5052) と熱硬化性 CFRP の接合品と表面処理を行ってない受入材の引張りせん断結果を Fig.19 に示す。アンカー効果の付与を狙いとしたブラスト処理の接合品の強度が 2 倍向上した。これらのアンカー効果は、アルミに対して極めて有効であると考えられる。

3.7 曲面形状の FLJ 接合

さらに、板形状ではなく曲面形状の FLJ 接合を検討した。Fig.20 に曲面形状があるアルミパイプと CFRP パイプの接合概略図を示す。ツールの回転とアルミパイプに押し付けることから摩擦発熱により差し込んでいる CFRP のパイプの接合ができる方法である。

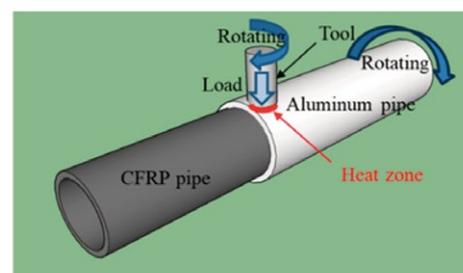


Fig.20 Schematic image of FLJ.

3次元加工機に回転装置を設置しツールを利用して接合試験を行った。Fig.21 にその様子と接合品を示す。

φ 35 アルミパイプ、PA6 シートと φ 30 熱硬化性 CFRP を利用しテストを行った。



Fig.21 FLJ joining test (a) and Joined product (b).

曲面接合を行った結果、接合はできなかったが、回転ツールの加圧を均一に維持し、接合後の冷却固化までの接合部位の固定がプロセス上重要であることが分かった。特に、設備化を想定する場合、回転ツールを当てる角度が異なると、設備自体の自重が大きいため、接合部位の加圧力に影響し、加圧力の均一な維持が非常に困難になる。今後は、圧力制御と接合条件、接合強度との関係、および接合部の状態確認などの検証が必要である。

4. まとめ

ブラスト表面処理を施したアルミ (A5052) を用いて、熱可塑性 CFRP と熱硬化性 CFRP による FLJ 異種材接合を行った。表面処理および接合条件と接合特性に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) アルミ板と熱可塑性 CFRP との接合は、十分な強度を確保できた。
- 2) アルミ板と熱硬化性 CFRP との接合は、熱可塑性樹脂の介在により接合が可能になった。
- 3) アルミ板と熱硬化性 CFRP の接着剤接合方法の 1.2 倍の接合力は達成できなかったが、ボルト接合との比較では 1.2 倍の接合力が確認できた。
- 4) 接合部の表面にブラスト処理を行うことで、2 倍の接合強度や相性を向上させた。
- 5) 曲面の FLJ では、回転ツールを当てる角度の変動による加圧力の影響を確認した。

そして、今後は以下を計画している。

- 1) 異種材料の接合条件改善と性能評価を行う。
 - ・最適接合条件、接合力のばらつきなどの改善
 - ・性能としては、接着剤接合 1.2 倍の接合力を目標
- 2) 接合条件改善により、FSW 専用装置の設計と製作を検討する。
- 3) 顧客や宇宙関連企業を把握し、市場ニーズを把握する。
- 4) 顧客ニーズに合わせた製品開発を進める。

謝辞

本研究は、宇宙関連機器研究開発支援事業の一環で行ったものです。ここに改めて、ご支援とご協力いただいた福岡県半導体・デジタル産業振興会議殿、福岡県工業技術センター殿とオガワ機工株式会社殿へ厚くご礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中田一博ら：マルチマテリアルの異種材接着・接合技術、シーエムシー出版、2018
- 2) 永塚公彬ら：溶接学会論文集 第 33 巻 第 4 号 (2015) 317-325
- 3) 永塚公彬：軽金属 第 71 巻 第 9 号 (2021), pp. 429-434
- 4) Kazuto TANAKA et al., : Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 69, No.5, May 2020 379-385