

次世代ものづくりのための 熱接着フィルムおよび接合面微細突起形状生成を併用した 金属/樹脂異材間高強度超音波溶着技術の研究

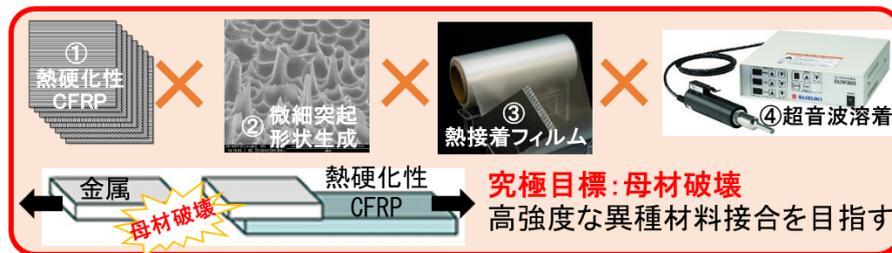
拓殖大学 工学部 機械システム工学科

志村 穰

1. はじめに

筆者らは、熱硬化性 CFRP 板 (CFRP としては熱硬化性が一般的) の内部構造と接着継手強度との関係に着目し、異種材料接合の可能性を追求している^{1,2)}。並行して、接着接合部分のアンカー (投錨) 効果を期待した、マシニングによる接合面の微細形状加工や電気化学的処理を用いたアルミニウム接合面の微細突起形状生成が接合強度に及ぼす影響についても検討を重ねている^{3,4)}。近年ではフィルム状接着剤の熱接着フィルムが登場し、既存接着剤に対する様々なメリット (異種材料接合が可能、工期短縮など) を有するため、筆者らも研究課題の一つとして取り組んでいる⁵⁾。一方で、異種材料接合の有力な手法として溶着技術が挙げられ、なかでも、超音波溶着はポリプロピレンやナイロンなどの熱可塑性樹脂同士の接合において、母材破壊を生じるほど強固な接合が実現している。また、熱可塑性樹脂と金属材料との接合可能性に触れた報告⁶⁾も見られ、将来性が期待される異種材料接合技術と言えるが、熱硬化性樹脂に対しては研究例が少なく、その実現可能性は未知数である。そこで本研究では図 1 の 4 要素「①熱硬化性 CFRP の内部構造利用、②電気化学的処理による接合面微細突起形状生成、③熱接着フィルム、④超音波溶着」を併用し、金属/樹脂異材間高強度接合の実現を最終的な目的とする。

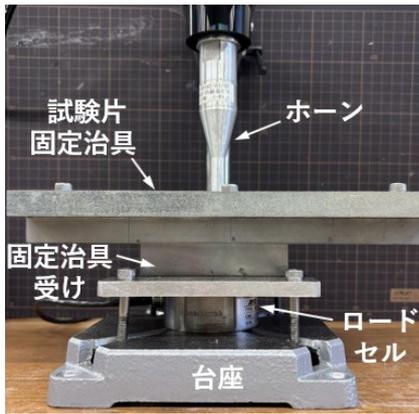
ここではその足掛かりとして実施した、超音波溶着装置の構築および本装置を用いた溶着継手製作と強度評価について報告する。



2. 実験方法

2. 1 超音波溶着装置の構築

図 2(a)に超音波溶着機本体を示す。試験片材料に振動を負荷する超音波溶着機 (スズキマリン社製、超音波小型溶着機 SUW300) とホーン (直径 10mm, 平滑面)、試験片材料を固定する治具、負荷荷重を検出するロードセル (A&D 社製、CMX-500L-U)、およびハンドプレス式台座で構成されている。ハンドプレス式台座上部のアームに SUW300 を固



(a) 超音波溶着機本体



(b) 超音波溶着装置制御系

図 2. 本研究で構築した超音波溶着装置

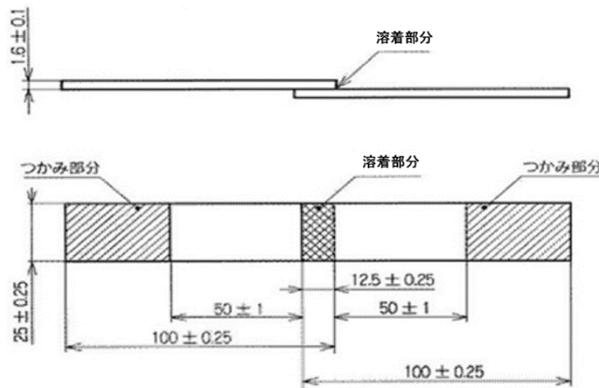


図 3. 溶着継手試験片の寸法形状

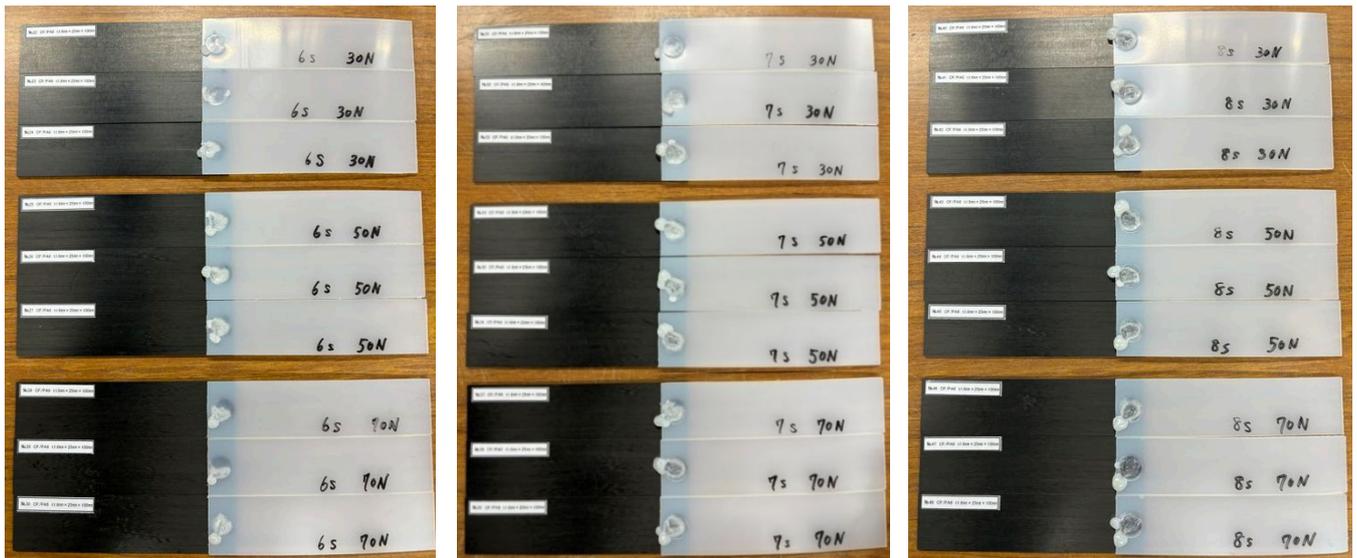
定し、グリップを介して手動によりホーン先端を試験片材料に押し付け、その際の荷重をロードセルで検出する仕組みとした。図 2(b)は超音波溶着装置の制御系を示し、各要素の制御装置と荷重値表示器としてのパソコンで構成される。

2. 2 溶着継手試験片の寸法形状および構成材料

本研究では、図 3 に示す単純重ね合わせ継手を接合試験片の対象とし、寸法形状は JIS K 6850 に準拠したものである。超音波溶着は基本的に熱可塑性の樹脂を超音波による振動と加圧力で瞬時に熔融して接合する技術である。そのため、今回は被着体材料としてナイロン PA6 (スタンダードテストピース社製, 2mm 厚) と熱可塑性炭素繊維強化プラスチック CFRTTP (スピック社製, 一方向性 CF/ポリアミド系, 1.6mm 厚) を用いた。比較対象としてアクリル系接着剤 (デンカ社製, ハードロック C-355-20) により接合した接着継手試験片も製作した。

2. 3 溶着継手試験片の製作

超音波溶着では加圧力と加圧時間が重要になる。そのため、予備実験としてポリプロピレン PP (2mm 厚) を被着体材料とした溶着継手製作を試行した。この結果をもとに、加圧力 30, 50, 70N, 加圧時間 6, 7, 8s を溶着条件として設定した。この溶着条件での組み合わせは 9 種類であり、1 種類につき試験片を 3 本製作するため、合計 27 本となる。図 4



(a) 6 秒/50, 60, 70N

(b) 7 秒/50, 60, 70N

(c) 8 秒/50, 60, 70N

図 4. 本超音波溶着装置で製作した PA6/CFRTP 単純重ね合わせ継手

に上記溶着条件で製作した PA6/CFRTP 単純重ね合わせ継手を示す。PA6, CFRTP ともに熱可塑性樹脂であり、ホーンからの加圧と振幅により発熱、熔融させることが肝要である。本研究で使用した CFRTP は母材樹脂がポリアミド系であり、ペアの PA6 と類似材料であり融点が 220°C あたりで近いが熱伝導率が異なる。そのため、ホーン先端を CFRTP 側に当てた場合、PA6 側に当てた場合の両方を検討したところ、前者では発熱・熔融を確認できず、両材料を接合できなかった。一方、後者では図 4 に示すように PA6 の表面に明らかな溶着痕が見られ、両材料の接合が確認された。ただし、加圧時間、加圧力を大きくするほど、溶着痕が顕著になるため、形状精度や意匠性に難が生じると言える。この対策の一案として、熱接着フィルム（アイセロ社製、フィクセロン RE2 柔軟タイプ、80 μ m 厚）を両材料間に挿入した上で溶着する継手試験片も製作した。この場合、同一条件の溶着に対し、PA6 表面の溶着痕抑制が期待される。これによって、外観上の改善に寄与する可能性が考えられる。

2. 4 接着継手試験片の製作

超音波溶着による継手の強度評価のため、比較対象として接着剤を使用した継手を製作した。継手の寸法形状は図 3 に準拠している。接着剤は C-355-20 を使用した。継手材料の端から 12.5mm の範囲（接着面）にサンドブラスト（#320、ガラスビーズ）を施しアセトンにより脱脂、洗浄した。次いで、専用治具にて試験片材料を接着、固定した。この際に 0.15mm のすきまゲージを噛ませて接着層の厚さを管理している。その後、24 時間の自然乾燥と定温乾燥機による 80°C、2 時間の養生を行った。

2. 5 強度評価試験

溶着継手の強度評価のため精密万能材料試験機（A&D 社製、テンシロン RTG-1310）を用いた引張せん断試験を行う。図 5 のように、継手試験片を掴み部にセットし、変位速度

1mm/min を負荷しつつ、破断に至るまでの荷重およびクロスヘッド変位を計測する。試験時の曲げの影響を除去するため継手端部に当て板を貼付した。実験回数は各継手 3 回である。本研究では継手が破壊する時の荷重値を継手強度と定義した。これは溶着の場合、加圧力や加圧時間により接合面積が不明確となるためである。

3. 結果および考察

図 6 は引張せん断試験結果の一例である。図 6(a)は加圧時間 7 秒、加圧力 70N の場合の溶着継手、図 6(b)は接着継手の場合の荷重－変位線図をそれぞれ示す。溶着継手の場合は破断に至るまでの挙動が線形的である。これは他の溶着条件で製作した場合でも同様であった。対して接着継手では荷重、変位ともに溶着継手の数値を遙かに凌駕し、荷重－変位線図は非線形的な挙動を示した。これは、溶着継手に比較して接合面積が大きいため、破断に至るまでに PA6 被着体が大きく変形したことに起因する。継手の重ね合わせ面は $25 \times 12.5 \text{ mm}^2$ (312.5 mm^2) であるが、今回使用したホーン先端は $\phi 10 \text{ mm}$ であり、正味接合面は 78.5 mm^2 程度と想定される。このように、溶着継手の荷重・変位が伸びなかった要因の一つとして正味接合面の不足が考えられ、この点は今後の検討課題として挙げられる。上述のように溶着継手の場合、接合面積の実測が困難なため、荷重－変位線図における



図 5. 溶着継手試験片の引張せん断試験

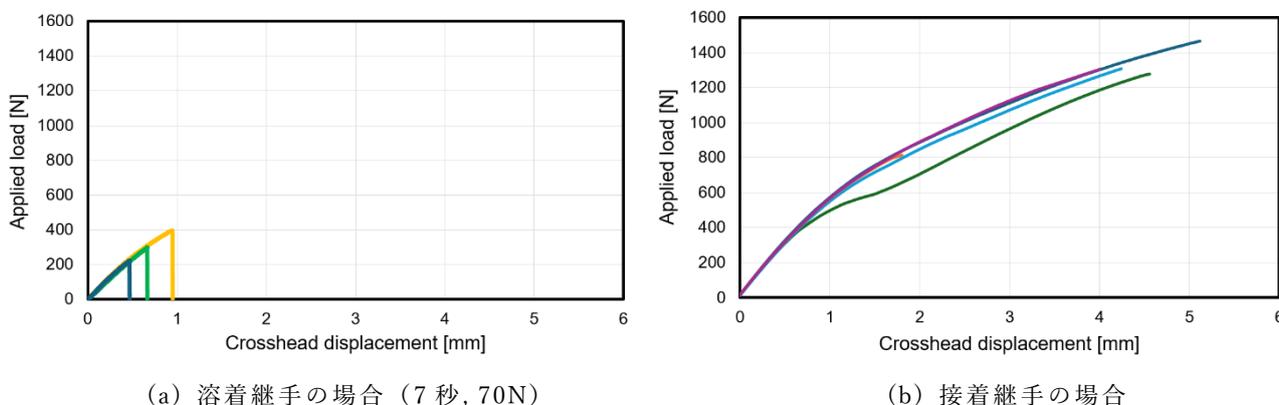


図 6. 引張せん断試験結果一例

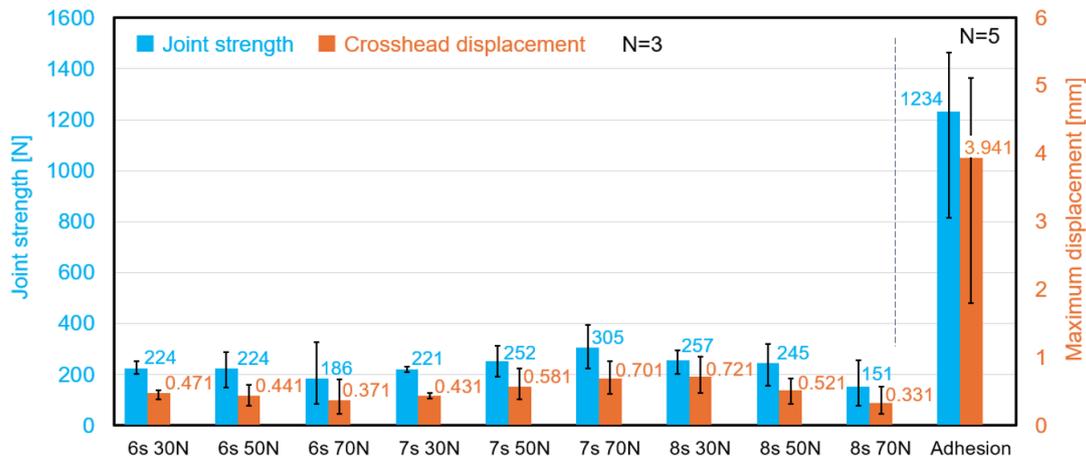


図 7. 継手強度および最大変位の算術平均値

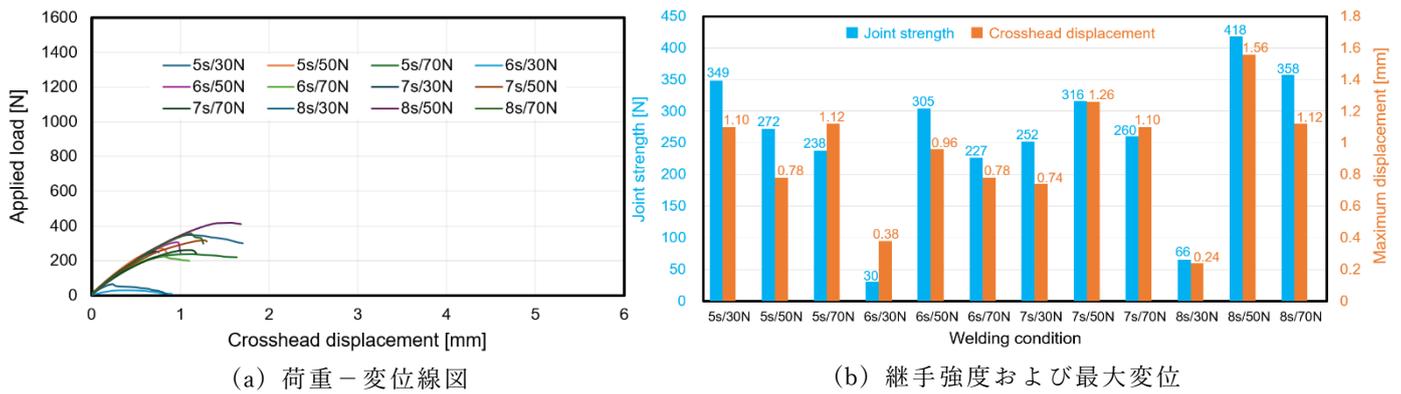


図 8. 熱接着フィルムを併用した場合

最大荷重値を継手強度，その際のクロスヘッド変位を最大変位と定義し，これらを算術平均として整理したものが図 7 である．図中のエラーバーは最大・最小を示す．この図によると，本研究で設定した溶着条件のうち，加圧時間 7 秒・加圧力 70N が最良と言えるが，接着継手の場合に遠く及ばない結果であった．溶着継手の破断面を観察したところ，溶融していたのは PA6 材のみであり，相手側の CFRTP は溶着に寄与していない状態であった．接合界面において両材料を溶融，接合させることを鑑みると，ホーン接触による加圧・振幅負荷を CFRTP 側にて行うことが肝要と言える．

図 4 によると，PA6 の溶着痕が目立ち，外観上の問題点として先に触れた．この対策の一案として熱接着フィルムを両材料間に挿入し溶着促進を試みた．図 8 に熱接着フィルム併用溶着継手の引張せん断試験結果を示す．図 8 (a) は荷重－変位線図であるが，溶着のみの図 7 (a) とは異なり，破断に至るまでの挙動は非線形的であった．図 8 (b) は継手強度と最大変位を示す．実験回数は 1 回であり参考データ扱いであるが，荷重，変位いずれも増加傾向が見られる．熱接着フィルムを介すことで接合面積が増加することが一因と推察される．熱接着フィルムを併用した場合，溶着のみの場合よりも少ない溶着時間で継手強度が大きくなる傾向を示したため，PA6 の溶着痕が抑えられると想定したが，問題は依然として解消していない．これはホーン先端形状の影響が考えられるため，今回使用した円形以外も検討する必要がある．

4. まとめ

本研究では，“熱硬化性 CFRP の内部構造利用”，“電気化学的処理による接合面微細突起形状生成”，“熱接着フィルム”，“超音波溶着”の 4 要素を併用し，金属と樹脂による異材間高強度接合の実現を最終的な目的としている．その足掛かりとして，超音波溶着装置の構築および本装置を用いた熱可塑性樹脂の溶着継手を製作し，引張せん断試験による強度評価を行った．これまでに得られた知見を以下に記す．

- (1) 荷重制御形式の超音波溶着機装置を構築し，PA6 および CFRTP による熱可塑性樹脂同士の接合を試みた．その結果，PA6 材にホーン先端を当てる場合に接合できることが確認された．対して，CFRTP 側より溶着する場合は接合できなかった．
- (2) 製作した PA6/CFRTP 溶着継手の引張せん断試験を行い，継手強度を調査したところ，接着継手に比較して 1/4 程度に留まる結果であった．これは，PA6 材のみの溶融によって溶着されていることに起因する．

- (3) 溶着継手の強度不足を改善するため、熱接着フィルムを接合界面に挿入することを試行した。実験回数が少なく参考程度であるが、今回対象にした溶着条件においては総じて強度、変位ともに増加傾向が示唆された。
- (4) 今後の課題として、両界面の溶融による接合の実現のために、ホーン先端形状の更なる検討や溶着条件の最適化が挙げられる。これらの検討項目に一定の目途が立ち次第、熱硬化性 CFRP への展開、接合面に対する電気化学的処理による微細突起形状の適用について、順次取り組む予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 志村 穰, 伊藤 駿, “被着体に擬似等方性 CFRP を用いた単純重ね合わせ接着継手の強度予測に関する研究”, 日本接着学会第 61 回年次大会講演要旨集, pp. 82-83, 2023.
- 2) J. Shimura, M. Miyagawa and S. Kurosaki, “Tensile Shear Strength Characteristics for Adhesively Single-lap Joints Composed of Quasi-isotropic Laminated CFRPs and Aluminum Alloy”, Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Application Engineering 2021, pp.177-181, 2021.
- 3) 三原美暉, 堤 博貴, 黒崎 茂, 志村 穰, “被着体接着面のデンプル付与による継手強度向上の試み”, 日本機械学会関東学生会第 59 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, 1111, 2020.
- 4) 伊原久美子, 大槻直也, 伊藤 浩, 黒崎 茂, 志村 穰, “微細突起形状の接着面を有する単純重ね合わせ接着継手の引張せん断強度特性”, 日本機械学会関東学生会第 58 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, 1203, 2019.
- 5) 白井伸幸, “熱接着フィルムを用いた樹脂と金属の接着とその自動車部材への応用”, 工業材料, Vol.65, No.6, pp.59-63, 2017.
- 6) 関 篤揮, “CFRTP の溶着・接合技術について”, 工業材料, Vol.68, No.3, pp.66-69, 2020.