

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第9報）

－CFRTP-金属接合技術の開発－

西垣 康広*、仙石 倫章*、鈴木 貴行*、山田 孝弘*

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (IX)

- Development of joining technology of CFRTP and metal-

NISHIGAKI Yasuhiro*, SENGOKU Tomoaki*, SUZUKI Takayuki* and YAMADA Takahiro*

温室効果ガス削減に向けて自動車・航空機産業においては世界的に軽量化に取り組み、軽量かつ高強度の特性を有する炭素繊維複合材料（以下、CFRPと表記）の利用が拡大している。しかし、コスト面からCFRPと金属を組み合わせたマルチマテリアル化が進行しており、これに対応するための異種材料接合が必要とされている。本研究では熱可塑性CFRP（以下、CFRTPと表記）を効率良く、強固に接合する技術開発を目的とし、CFRTPに適した接合技術を確立する。

これまで短時間で接合できる超音波接合技術を利用して、CFRTPの同種材接合及び、異種材接合における接合条件を検討し、接合強度を評価してきた。本年度はマルチマテリアル化に向けた基礎研究において、CFRTPとアルミニウム合金（以下、A5052と表記）の接合強度の向上を目的として、CFRTPとA5052の界面に注目してA5052のブラスト処理及び、CFRTPとA5052の接合界面にインサート材を挿入することを検討した。

1. はじめに

近年、温室効果ガス削減に向けた世界的な取り組みにおいて軽量化は必須条件であり、軽量かつ高強度という優れた特性を有するCFRPは、次世代自動車・航空機産業を中心に利用拡大に向けた製品開発が進められている。しかし、コスト面から全てをCFRP化するには至らず、マルチマテリアル化が進行しており、CFRPと金属を接合する様々な技術開発¹⁾²⁾が行われている。

当センターではこれまでにCFRTPの製品化に向けて、CFRTPの成形加工技術³⁾を確立してきた。CFRTPの製品化においては、成形部品を他の部品（部材）と接合する技術が必要となっている。現在、CFRTP部品と他の部品（例えば金属部品）の接合は、穴をあけてボルトで固定する機械的締結と接着剤による接着が中心である。しかし、機械的締結では、穴あけ加工時にCFRTP部品の繊維が破損する危険性や工程数の増加、接着では所定の強度を発現させるための接着剤の養生に時間がかかる等の課題がある。そこでCFRTPの製品化に向けてCFRTPに適した接合技術の確立が必要不可欠となっている⁴⁾⁵⁾。

本研究ではCFRTPを効率良く強固に接合する技術を開発することを目的とし、超音波縦振動を活用してCFRTPに適した接合技術⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾を確立する。これまでに超音波接合技術により、CFRTPの同種材接合と異種材接合やCFRTPとA5052の異種材接合の接合条件を検討し、引張せん断試験による接合強度を評価してきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

本年度はマルチマテリアル化に向けた基礎研究において、CFRTPとA5052の接合強度を向上させることを目的として、A5052のブラスト処理及び、CFRTPと

A5052の接合界面にインサート材を挿入することを検討した。CFRTPとA5052を超音波接合し、その接合条件と引張せん断試験による接合強度からブラスト処理効果とインサート材の使用効果を評価して知見を得たので報告する。

2. 実験

2.1 試験片

試験片は、マトリックス樹脂がナイロン6のCFRTP（Bond-Laminates製TEPEX 202、以下、CF/PA6と表記）とA5052を用いた。CF/PA6は厚さ2mmの板材から100mm×25mmに切り出して使用し、A5052はシャーリングカットし、ブラスト処理（以下、BTと表記）を行ったものを使用した。

2.2 接合強度向上に向けた検討

CFRTPとA5052の接合強度を向上させるためにインサート材の使用とA5052の表面処理を検討した。

インサート材は厚さ0.08mmの熱接着フィルム（（株）アイセロ製FIXELON RS1（以下、RS1と表記））をCF/PA6とA5052の重ね合わせ部分と同じ面積となるように25mm×12.5mmにカットし、CF/PA6とA5052の重ね合わせ部分に挿入して超音波接合を行った。

A5052のブラスト処理は、CF/PA6と重ねる部分のみとし、ブラスト処理装置（STRAIGHT製ブラストキャビネット M 15-959）内でサンドブラスト用ガーネットサンド（(#)50～70混合品）を吹付圧力0.6MPa、吹付距離50mm、吹付角度45°とし、吹付時間を5秒、30秒、60秒として行った。ブラスト処理前後の表面粗さは、表面粗さ測定機（アメテック（株）製フォームタリサーフPGI NOVUS）により測定し、算術平均粗さ（以下、Raと表記）と最大高さ（以下、Rzと表記）を算出した。

* 次世代技術部

2. 3 超音波接合

CF/PA6 とブラスト処理した A5052(BT)及び、インサート材として RS1 を使用して CF/PA6 と A5052 を端部から 12.5mm 重ねて治具にセットし、超音波溶着機（精電舎電子工業（株）製 DΣG2210）を用いて所定の接合条件において超音波接合（以下、それぞれ CF/PA6-A5052(BT)及び、CF/PA6-RS1-A5052 と表記）した。接合条件は、振幅 30μm、ホーンの設定圧力（以下、加圧力と表記）0.15MPa、加振時間は 4 秒から 6 秒まで変え、加振終了後のホールド時間は 10 秒とした。なお、加振時間は超音波を加振した時間、接合エネルギーは超音波接合中に試験片に与えたエネルギー、沈込量は加振時間中とホールド時間中に CF/PA6 が沈み込んだ量とした。

2. 4 温度履歴

超音波接合における基礎的な実験条件を検討するために温度履歴測定を行った。温度履歴測定は、CF/PA6 と A5052(BT)及び、インサート材を使用した CF/PA6 と A5052 の重なり部分の中心付近に φ0.1mm の熱電対を埋め込み、データロガーを用いて各接合条件における試験片の温度変化を測定した。

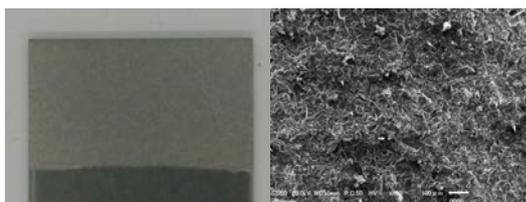
2. 5 引張せん断強度

CF/PA6-A5052(BT)及び、CF/PA6-RS1-A5052 の接合強度を把握するために、シングルラップ継手試験による引張せん断試験を万能材料試験機（（株）島津製作所製 AG-IS 100kN）により行った。接合強度は接合部が破壊する最大荷重とした。また、A5052 のブラスト処理面を走査型電子顕微鏡（日本電子（株）製 JSMIT-100）で観察し、引張試験後の試験片の界面をマイクロスコープ（（株）キーエンス製 VHX-1000）により観察し、マトリックス樹脂やインサート材の熔融状態も併せて評価した。

3. 結果及び考察

3. 1 ブラスト処理効果の検証

前報⁹⁾で報告した CF/PA6-A5052 の接合強度を向上させるために A5052 表面へのブラスト処理を検討した。ブラスト処理 30 秒後の写真の一例を図 1 (a)に、二次電子像（SEM 画像）の一例を図 1 (b)に示す。すべてのブラスト処理時間において A5052 表面は図 1 に見られる



(a) A5052(BT30) (b) A5052(BT30)、×100

図 1 A5052(BT30)ブラスト処理面の写真と SEM 画像

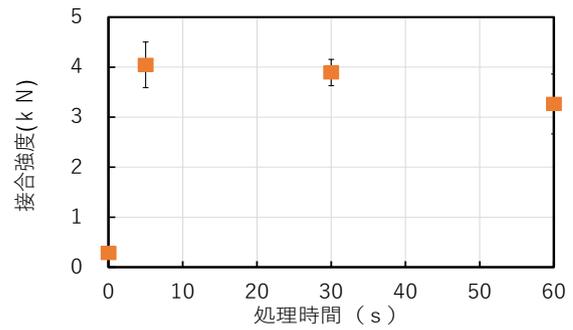


図 2 ブラスト処理時間と接合強度

ような凹凸が生成していた。ブラスト処理前の A5052 の Ra は 0.24μm、Rz は 1.62μm、ブラスト処理後の Ra は約 4.2μm、Rz は約 34.1μm であり、バラつきは小さかった。

次に A5052 のブラスト処理時間と CF/PA6-A5052(BT) の接合強度の関係を図 2 に示す。図 2 より、ブラスト処理時間が 5 秒と 30 秒の接合強度は同程度であったが、60 秒では低くなる傾向が見られた。これはブラスト処理後の A5052 の表面粗さが関係していると考えられる。ブラスト処理時間が 5 秒の時の CF/PA6-A5052(BT)の接合強度はバラつきが大きかったため、A5052 のブラストの処理時間を 30 秒とした。

3. 2 温度履歴

加圧力を 0.15MPa、振幅を 30μm、加振時間を 6 秒として超音波接合した、CF/PA6-A5052(BT)と CF/PA6-RS1-A5052 及び、CF/PA6-A5052 の温度履歴の一例を図 3 に示す。図 3 より、ブラスト処理した A5052 を使用した CF/PA6-A5052(BT)とブラスト処理をしていない A5052 を使用した CF/PA6-A5052 の温度履歴は類似しており、界面温度は超音波加振直後からピーク温度まで上昇し、加振終了後は徐々に低下した。界面温度はブラスト処理した A5052 を使用した方が若干高い傾向が見られた。これはブラスト処理により A5052 表面に凹凸が生成し、凸部がエネルギーダイレクターとして機能した

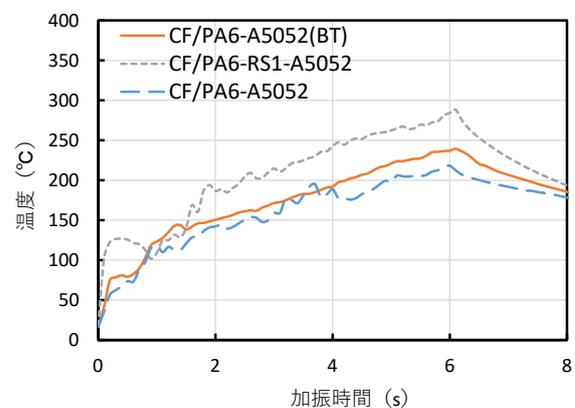


図 3 CF/PA6 と A5052 の温度履歴
(加圧力 0.15MPa、振幅 30μm、加振時間 6s)

ためと考えられる。

次に CF/PA6-RS1-A5052 と CF/PA6-A5052 の温度履歴を比較すると、RS1 の使用により超音波加振開始直後から界面温度は急激に上昇し、加振時間が 0.3 秒の時、界面温度は約 120℃となった。加振時間が 1 秒以降の界面温度は、超音波加振中はピーク温度まで上昇し、加振終了後は徐々に低下した。また、同一加振時間での界面温度を比較すると RS1 を使用した場合は RS1 を使用しない場合に比べ、約 50℃から 70℃高かった。

3. 2 接合強度評価

3. 2. 1 ブラスト処理効果

CF/PA6-A5052(BT)と CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係を図4に示す。図4より、加振時間が長くなると接合強度が高くなる傾向が見られたが、加振時間が 6 秒の時の接合強度は、5 秒の時よりも若干低くなった。また、加振時間が 4 秒と 5 秒の時の接合強度のバラつきは大きかった。これはブラスト処理による A5052 の表面粗さが均一でないことが影響していると考えられる。また、A5052 表面をブラスト処理していない CF/PA6-A5052 の接合強度は、加振時間が 4 秒から 6 秒の時、260N~450N であったが、30 秒のブラスト処理をすることにより 2810N~4120N となり、約 9 倍~約 14 倍となることがわかった。A5052 をブラスト処理すると凹凸が生成し、アンカー効果により接合強度が向上したと考えられる。

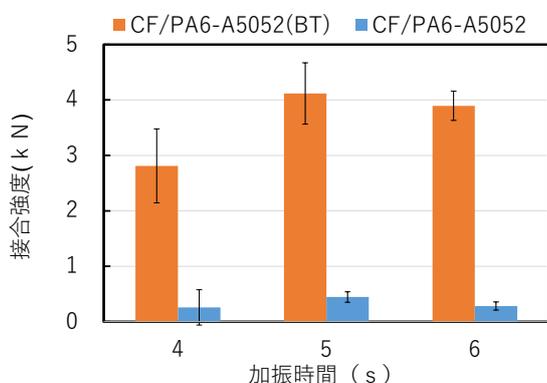


図4 CF/PA6-A5052(BT)と CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度

3. 2. 2 インサート材使用効果

CF/PA6-A5052 の接合強度を向上させるために、CF/PA6 と A5052 の重ね合わせ部にインサート材を挟むことを検討した。CF/PA6-RS1-A5052 と CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係を図5に示す。図5より、加振時間が 4 秒から 6 秒の時の接合強度は同程度であり、バラつきは小さかった。インサート材を使用していない CF/PA6-A5052 の接合強度は 260N~450N であったが、インサート材として RS1 を使用することにより、3400N~3450N となり、約 7 倍~約 13 倍となることがわかった。これは温度履歴から CF/PA6-RS1-A5052 の界面温度

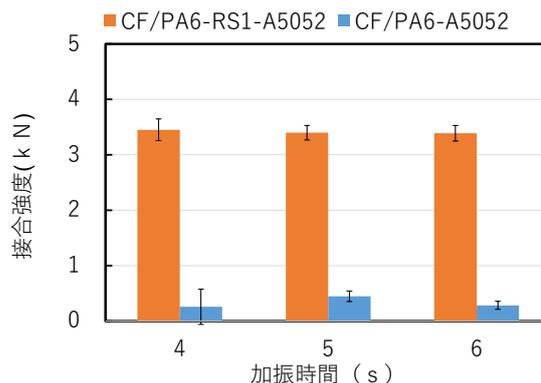


図5 CF/PA6-RS1-A5052 と CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度

は CF/PA6-A5052 の界面温度よりも高く、超音波加振直後から急激に上昇したことから、まず RS1 が溶融し、CF/PA6 と A5052 の接合に寄与したと考えられる。RS1 の使用により CF/PA6-A5052 の接合強度が向上するだけでなく、3200J 以上の接合エネルギーにおいて接合強度は低下することなく、同程度となることがわかった。

3. 3 接合界面評価

3. 3. 1 ブラスト処理

加振時間が 4 秒から 6 秒で超音波接合した CF/PA6-

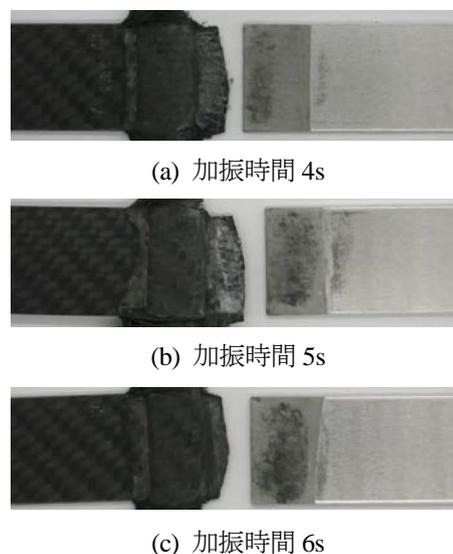


図6 引張試験後の CF/PA6-A5052(BT)の破断面写真



(a) CF/PA6 破断面、×50 (b) A5052(BT)破断面、×50

図7 引張試験後の CF/PA6-A5052(BT30)の破断面画像 (加振時間 6s)

A5052(BT)の引張試験後の破断面の写真を図6(a)から(c)にそれぞれ示し、加振時間が6秒で超音波接合したCF/PA6-A5052(BT)の引張試験後の破断面画像を図7(a)、(b)に示す。CF/PA6-A5052の引張試験後のA5052の破断面にはCF/PA6が存在しなかったが、図7と図8より、いずれの加振時間においてもCF/PA6-A5052(BT)の引張試験後のA5052の破断面には、CF/PA6の一部が存在した。以上よりブラスト処理は接合強度の向上に寄与したと考えられる。

3.3.2 インサート材使用

加振時間が4秒から6秒で超音波接合したCF/PA6-RS1-A5052の引張試験後の破断面の写真を図8(a)から(c)にそれぞれ示し、加振時間が6秒で超音波接合したCF/PA6-RS1-A5052の引張試験後の破断面画像を図9(a)、(b)に示す。図8と図9より、いずれの加振時間においてもCF/PA6の破断面は白くなっていたことから、RS1は完全に溶解していたと考えられる。また、A5052の破断面にはフィルム状ではなく一度溶解したと思われるRS1が見られ、一部CF/PA6の付着も観察された。以上より、超音波振動により界面のRS1が溶解し、CF/PA6-A5052の接合強度の向上に寄与したと考えられる。

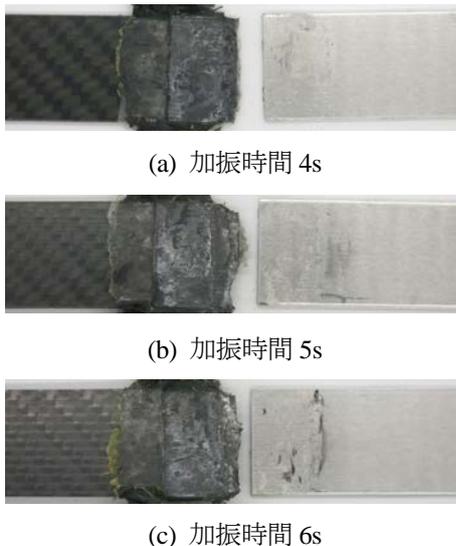
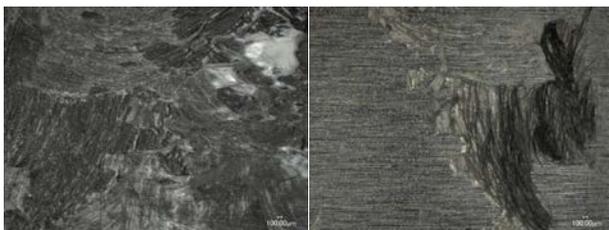


図8 CF/PA6-RS1-A5052の破断面写真



(a) CF/PA6 破断面、×50 (b) A5052 破断面、×50
図9 引張試験後のCF/PA6-RS1-A5052の破断面画像
(加振時間6s)

4. まとめ

CF/PA6-A5052の接合強度を向上させるためにA5052表面のブラスト処理とインサート材の使用を検討した。その結果、次のことがわかった。

- 1) ブラスト処理したA5052のRaは4.2 μm であり、Rzは34.1 μm であった。
- 2) A5052表面をブラスト処理することによりCF/PA6-A5052(BT)の接合強度は約9倍～14倍となり、接合強度の向上に寄与したと考えられる。
- 3) CF/PA6-A5052(BT)の温度履歴は、CF/PA6-A5052の温度履歴よりも若干高い傾向が見られたが、類似した傾向であった。
- 4) RS1を使用したCF/PA6-RS1-A5052の界面温度は、加振開始直後に急激に上昇し、加振時間が1秒以降はCF/PA6-A5052(BT)やCF/PA6-A5052の温度履歴と類似した傾向を示した。
- 5) CF/PA6-A5052(BT)の引張試験後のA5052(BT)破断面にはCF/PA6の一部が存在した。
- 6) RS1を使用することにより、CF/PA6-A5052の接合強度は約7倍～約13倍となり、接合強度の向上に寄与したと考えられる。
- 7) RS1を使用したCF/PA6-RS1-A5052の引張試験後のA5052破断面には溶解したRS1と一部CF/PA6の付着も観察された。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたりFIXELON RS1をご提供いただきました株式会社アイセロ様に感謝申し上げます。また、本研究の遂行にあたりご指導・ご助言をいただきました共同研究先の岐阜大学工学部仲井教授と名合特任教授に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 三瓶和久ら、レーザー加工学会誌, Vol.22, No.3, 2015
- 2) 永塚公彬ら、溶接学会全国大会講演概要集, No.95, pp54-55, 2014
- 3) 道家ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp45-48, 2016
- 4) 原賀康介・佐藤千明、自動車軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, 2015
- 5) 中田一博、異種材料接合, pp95-120, 日経BP社, 2014
- 6) 道家ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp44-47, 2017
- 7) 西垣ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp45-48, 2018
- 8) 西垣ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp43-46, 2019
- 9) 西垣ら、岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp65-68, 2020