

# 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7報）

— FRP-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 (VII)

- Development of joining technology of FRP 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（CFRP）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FRPを効率良く、強固に接合する技術開発を目的とし、FRPに適した接合技術を確立する。

これまでに短時間で接合できる超音波接合技術を利用して熱可塑性CFRP（CFRTP）を用いて同種材接合及び異種材接合を行い、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として、表面改質・表面処理を行っていないCFRTPとアルミニウム合金(A5052)を用いて、超音波縦振動により異種材接合を行い、接合条件を検討し、引張せん断試験により接合強度を評価した。

## 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FRP化するには至らず、マルチマテリアル化が進行しており、FRPと金属を接合する様々な技術開発<sup>1,2)</sup>が行われている。FRPと金属の接合には、表面処理による物理的な結合や表面改質による化学的な結合が利用されている。

これまで当センターでは、CFRTPの製品化に向けた支援を目的として、CFRTPの成形加工技術を確立してきた<sup>3)</sup>。CFRTPの製品化においては、次の段階として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、FRP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FRP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、FRPの製品化に向けて、FRPに適した接合技術の確立が必要不可欠となっている<sup>4,5)</sup>。

本研究では、FRP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、超音波接合を活用してFRPに適した接合技術を確立する。

これまでに超音波接合技術により、CFRTPを用いて同種材接合と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<sup>6-8)</sup>。本年度は、マルチマテリアル化に向けた取り組みの基礎研究として

超音波縦振動によりCFRTPとA5052を用いて異種材料接合を行い、そ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、CF/PA6）とA5052を用い、どちらの試験片も厚さ2mmの板材から100mm×25mmに切り出した。ただし、表面処理や表面改質を行わない試験片を使用した。

### 2.2 超音波接合

CF/PA6とA5052の異種材接合は、A5052を下側にし、その上側にCF/PA6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、DSG2210）を用いて所定の接合条件において超音波接合を行った。ここで接合条件は、振幅は28μm、30μm、32μm、ホーンの設定圧力（加圧力）は0.15MPaとし、加振時間は3秒から6秒まで変え、加振終了後のホルド時間は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にCF/PA6が沈み込んだ量とした。

### 2.3 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。

### 2.4 引張せん断強度

超音波接合によるCF/PA6とA5052の接合強度を把

\* 次世代技術部

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）により行い、接合部が破壊する最大荷重を接合強度とした。また、引張試験後の試験片の界面を走査型電子顕微鏡（日本電子(株)製、JSM IT-100）とマイクロスコープ（(株)キーエンス製、VHX-1000）により観察し、マトリックス樹脂の熔融状態も併せて評価した。

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1 温度履歴

加圧力を 0.15MPa、振幅を 28 $\mu$ m、30 $\mu$ m、32 $\mu$ m、加振時間を 5 秒とし、CF/PA6 と A5052 を超音波接合（CF/PA6-A5052）した時の温度履歴の一例と前報<sup>8)</sup>で報告した CF/PA6 同種材同士を超音波接合（CF/PA6-CF/PA6）した温度履歴の一例（加圧力 0.1MPa、振幅 30 $\mu$ m、加振時間 3 秒）を比較用に合わせて図 1 に示す。図 1 より、CF/PA6-A5052 の温度履歴から、すべての振幅において、超音波加振直後から界面温度はピーク温度（それぞれ約 240 $^{\circ}$ C、約 270 $^{\circ}$ C、約 330 $^{\circ}$ C）まで上昇し、加振終了後は徐々に低下することが分かった。また、界面のピーク温度は振幅が大きい程高くなった。一方、CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴は、加振開始直後に急激に界面温度が上昇し、約 1 秒でピーク温度（約 400 $^{\circ}$ C）になり、その後は徐々に低下し、加振終了後は徐々に低下した。

CF/PA6-A5052 と CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴を比較すると、加振開始直後からピーク温度までの到達時間（温度上昇率）とピーク温度に顕著な違いがあることが分かった。これは材料の比熱、熱伝導率の違いが影響していると考えられる。

#### 3. 2 接合強度評価

CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係を図 2 に示す。図 2 より、振幅が 28 $\mu$ m では、加振時間が 4 秒以下では接合ができず、5 秒では接合強度のバラつきが大きく、6 秒の時の接合強度は 5 秒の時の接合強度より低下する傾向が見られた。振幅が 30 $\mu$ m では、加振時間が 3 秒以下では接合できず、4 秒では接合強度が低く、バラつきが大きかった。5 秒の時に接合強度は最大となり、6 秒では低下する傾向が見られた。振幅が 32 $\mu$ m では、加振時間が 3 秒では接合強度は非常に低く、4 秒と 5 秒の時の接合強度は同程度であったが、5 秒の時の接合強度はバラつきが大きくなる傾向が見られた。

これらの結果から、加振時間と接合強度には明確な相関関係は見られなかったが、振幅により接合強度が最大になる加振時間が存在することが分かった。

それぞれの振幅において接合強度が最大となる加振時間では、界面のマトリックス樹脂は十分に熔融していると考えられる。また、接合強度のバラつきは、マトリックス樹脂の界面での熔融量と界面での存在量、アルミニウム合金の表面状態が関係していると考えられる。加振

時間が短い場合はマトリックス樹脂の界面での熔融量が少ない又は安定しないため、界面での熔融量が異なり接合強度に影響したと考えられる。一方、加振時間が長い場合は、炭素繊維がはみ出し、炭素繊維上のマトリックス樹脂の界面での存在量が減少することが接合強度に影響したと考えられる。また、アルミニウム合金の表面酸化膜の厚さにより接合強度が異なることから、アルミニウム合金の表面状態が接合強度に影響したと考えられる。

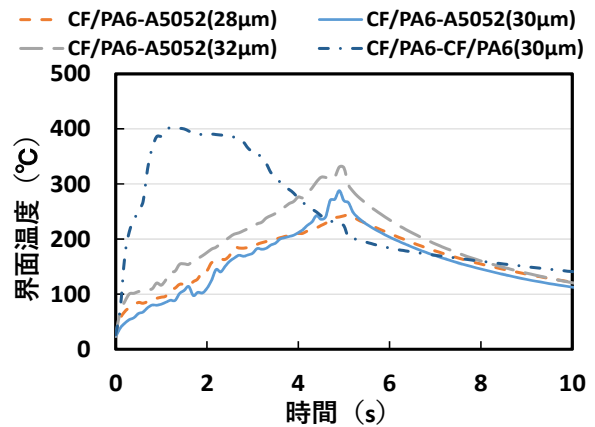


図 1 CF/PA6-A5052 と CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴 (CF/PA6-A5052 : 加圧力 0.15MPa, CF/PA6-CF/PA6 : 加圧力 0.1MPa)

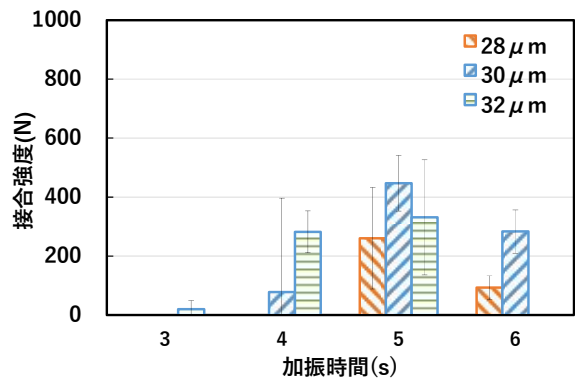


図 2 CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

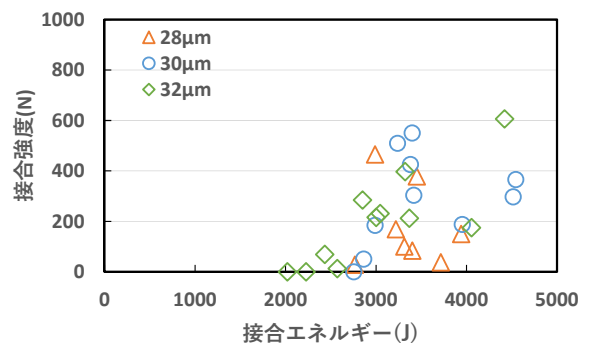


図 3 CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

次に CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと接合強度の関係を図3に示す。図3より、CF/PA6 と A5052 を接合するためには、振幅が 28 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$  では接合エネルギーが 2800J 以上必要であることが分かった。また、振幅が 32 $\mu\text{m}$  では接合エネルギーが 2400J 以上で接合が可能であったが、接合エネルギーが 2600J 未満では接合強度が低かった。

いずれの振幅においても接合エネルギーと接合強度は密接な関係があり、CF/PA6 と A5052 を約 200N 以上の接合強度で接合する場合は、接合エネルギーが 2800J 以上必要であると考えられる。

次に CF/PA6-A5052 の沈込量と接合強度の関係を図4に示す。図4より、振幅が 28 $\mu\text{m}$  では沈込量が 0.65mm 未満では接合できなかった。また、振幅が 30 $\mu\text{m}$  では沈込量が 0.50mm 未満、振幅が 32 $\mu\text{m}$  では沈込量が 0.70mm 未満では接合することができなかった。

いずれの振幅においても沈込量と接合強度は密接な関係があり、沈込量が多い場合は接合強度が高くなる傾向が見られた。約 200N 以上の接合強度で接合する場合は、0.90mm 以上の沈込量が必要であると考えられる。

次に CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと沈込量の関係を図5に示す。図5より、接合エネルギーと沈込量はいずれの振幅においても比例関係であることが分かった。接合エネルギーが低い場合は、CF/PA6 のマトリックス樹脂が十分溶融していないため沈込量が少ないが、接合エネルギーが高い場合は、マトリックス樹脂が十分に溶融しているため、沈込量が多くなったと考えられる。

### 3. 3 接合界面評価

振幅 30 $\mu\text{m}$ 、加振時間 4 秒（接合強度 0N、接合エネルギー2755J、沈込量 0.476mm）と振幅 30 $\mu\text{m}$ 、加振時間 5 秒（接合強度 423N、接合エネルギー3381J、沈込量 0.998mm）で接合した CF/PA6-A5052 の引張試験後の界面写真、二次電子像（SEM 像）及びマイクロスコプの 3D イメージを図6(a),(c),(e)と(b),(d),(f)にそれぞれ示す。図6(a),(b)の界面写真より、どちらの CF/PA6 も沈み込むだけでなく、炭素繊維とマトリックス樹脂がはみ出していた。また、引張試験後の CF/PA6 界面はいずれも平坦であった。これはマトリックス樹脂が溶融した状態で A5052 と接するため、A5052 の表面形状が転写され、平坦になったと考えられる。

接合強度が 0N であった CF/PA6-A5052（加振時間 4 秒）の CF/PA6 界面は、図6(c)の SEM 像より平坦な部分、小さな気泡と炭素繊維上のマトリックス樹脂が少なくなった部分が観察され、図6(e)の 3D イメージよりマトリックス樹脂が存在しない部分（炭素繊維）は観察されなかった。これらの結果と接合エネルギー、沈込量から、マトリックス樹脂は溶融していたが溶融量が不十分であったと考えられる。

一方、接合強度が 423N であった CF/PA6-A5052（加振時間 5 秒）の CF/PA6 界面は、図6(d)の SEM 像より

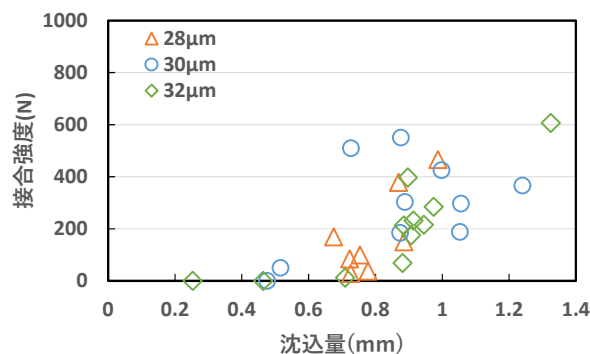


図4 CF/PA6-A5052 の沈込量と接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

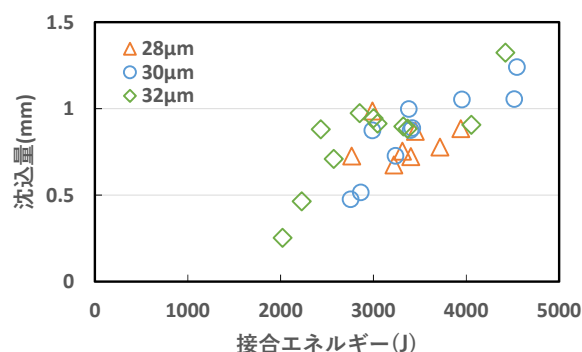


図5 CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと沈込量の関係 (加圧力 0.15MPa)

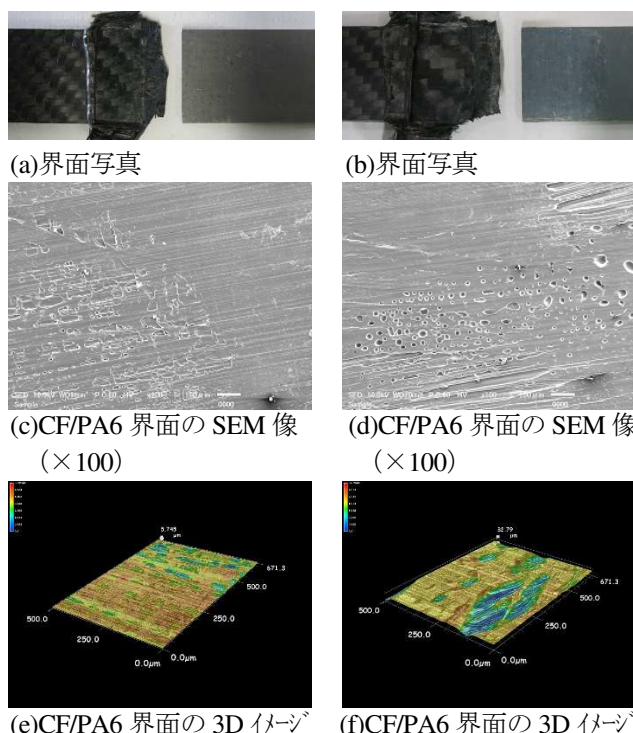


図6 CF/PA6-A5052 の界面観察

(a),(c),(e)加圧力:0.15MPa, 振幅:30 $\mu\text{m}$ , 加振時間:4 秒

(b),(d),(f)加圧力:0.15MPa, 振幅:30 $\mu\text{m}$ , 加振時間:5 秒

平坦な部分、気泡部分と炭素繊維上にマトリックス樹脂が存在しない部分（A5052側にCF/PA6が固着）が観察され、図6(f)の3Dイメージより炭素繊維上のマトリックス樹脂が存在しない部分が観察された。これらの結果から、マトリックス樹脂は十分に溶解していたと考えられる。

#### 4. まとめ

CF/PA6-A5052の接合条件を検討し、接合強度を評価して次の結果を得た。

- 1) CF/PA6-A5052の界面の温度履歴は、すべての振幅において超音波の加振直後からピーク温度まで徐々に界面温度が上昇し、加振終了後は徐々に低下することが分かった。また、CF/PA6-CF/PA6の界面の温度履歴とは異なる傾向を示すことが分かった。
- 2) 振幅、加振時間によりCF/PA6-A5052の接合強度は異なるが、超音波縦振動によりCF/PA6とA5052を接合することができた。また、振幅により接合強度が最大になる加振時間には違いがあることが分かった。
- 3) CF/PA6-A5052の接合エネルギーと接合強度には密接な関係があることが分かり、CF/PA6とA5052を約200N以上の接合強度で接合する場合は、2800J以上の接合エネルギーが必要であると考えられる。
- 4) CF/PA6-A5052の沈込量と接合強度は密接な関係があり、いずれの振幅においても沈込量が大きい場合は、接合強度が高くなることが分かった。また、約200N以上の接合強度で接合する場合は、0.90mm以上の沈込量が必要であると考えられる。
- 5) CF/PA6-A5052の接合界面の観察から、接合強度が430NであったCF/PA6界面のマトリックス樹脂は十分溶解していたが、接合できなかったCF/PA6界面のマトリックス樹脂は、溶解量が不十分であったと考えられる。

#### 【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、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、ご指導・ご助言をいただきましたこと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