

# 現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第3報）

—軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発（Ⅰ）—

西垣 康広\*、仙石 倫章\*、鈴木 貴行\*、山田 孝弘\*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (Ⅲ)

Development of multi-material products by weight reduction and combination(Ⅰ)

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

地球温暖化防止において温室効果ガスの排出量削減に向けた取り組みが世界的に行われている。特に自動車産業においては二酸化炭素の排出規制が厳しく軽量化が求められている。このため、金属の一部を軽くて強度が高い炭素繊維複合材料（以下、CFRP と表記）へ置き換えたマルチマテリアル化が進行している。これに伴い、異種材料の接合技術が必要となっている。

本研究ではマルチマテリアル製品開発の基礎研究において必要となる、熱可塑性炭素繊維複合材料（以下、CFRTP と表記）と炭素鋼の接合強度を向上させる技術開発を行った。接合強度の評価は、炭素繊維入り三次元造形機で造形した CFRTP と炭素鋼を超音波溶着により接合し、引張せん断試験により行った。金属表面のブラスト処理条件、超音波溶着条件を検討し、接合強度からブラスト処理効果を評価した。その結果、炭素鋼表面にブラスト処理をすることにより接合強度が向上することがわかった。

## 1. はじめに

近年、地球温暖化防止において温室効果ガスの排出量削減に向けた取り組みが世界的に行われている。特に自動車産業においては、二酸化炭素の排出規制が年々厳しくなっているため、軽量化が求められている。更に産業用機械においても省エネルギーの観点から軽量化が望まれている。このため、金属から軽くて強度が高い CFRP へ置き換わりが進んでいる。しかしながら、CFRP は製造コストが高いことから一部の金属の代替にとどまり、マルチマテリアル化が進行している。これに伴い、異種材料の接合技術が必要となり、様々な技術開発<sup>1)~4)</sup>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、プレス成形技術<sup>5)</sup>と超音波溶着による CFRTP の同種材接合や異種材接合及び CFRTP とアルミニウム合金の接合技術の開発<sup>6)~10)</sup>を行い、プレス成形技術と接合技術を確立してきた。マルチマテリアル製品の製造では、CFRP の成形、二次加工、そして金属との接合等の各工程が必要であることから製造コストが高くなり、課題となっている。

本研究ではマルチマテリアル製品の製造コスト低減のため、CFRTP と金属のハイブリッド成形技術の開発を目的とした。ハイブリッド成形を行うことにより短時間で一体成形ができるため、製造コストを下げることができる。

本年度はマルチマテリアル製品開発の基礎研究において必要となる CFRTP と炭素鋼の接合強度を向上させる技術開発を行った。CFRTP は市販されている織物材でなく、連続繊維入 CFRTP と短繊維入 CFRTP を三次元

造形機で造形したものを使用し、炭素鋼と超音波溶着により接合した。CFRTP と炭素鋼の接合強度を向上させることを目的として、炭素鋼表面へのブラスト処理条件と超音波溶着条件を検討し、接合強度からブラスト処理効果を評価したので報告する。

## 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（以下、CF/PA6 と表記）と炭素鋼（以下、S45C と表記）を用いた。CF/PA6 は三次元造形機（Markforged 製 Mark Two）により、100mm×12.5mm×2.3mm に造形したものを使用した。CF/PA6 の積層構成は短繊維入 CF/PA6 を 5 層、連続繊維入 CF/PA6 層を 8 層、短繊維入 CF/PA6 を 5 層とした。また、S45C はレーザーカットし、ブラスト処理（以下、BT と表記）したものを使用した。

### 2.2 ブラスト処理

ブラスト処理は、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）を所定の吹付条件で、S45C の端部から長手方向に 12.5mm 吹き付けた。吹付条件は、吹付圧力 0.6MPa、吹付距離 100mm、吹付時間を 15 秒、30 秒、60 秒、120 秒とした。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）と最大高さ粗さ（以下、Rz と表記）を算出した。

### 2.3 超音波接合

CF/PA6 と S45C(BT)の構造を図 1 に示す。図 1 に示すように CF/PA6 と S45C(BT)のブラスト面の端部から 12.5mm 重ね合わせて、超音波溶着機（精電舎電子工業

\* 次世代技術部

製 DΣG2200) にセットした。超音波溶着による接合条件は、振幅 30 $\mu\text{m}$ 、ホーンの設定圧力（以下、加圧力と表記）0.1MPa、加振時間は5秒 から7秒まで変え、加振終了後のホルド時間を 10 秒とした。なお、加振時間は超音波振動を加振した時間とした。

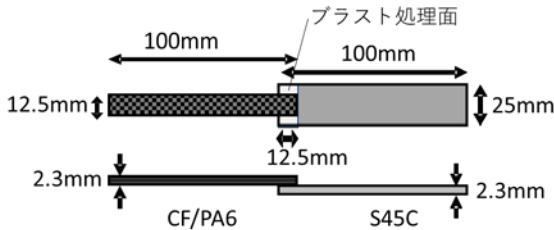


図1 CF/PA6 と S45C の構造

## 2. 4 引張せん断試験

CF/PA6 と S45C(BT)を超音波溶着した CF/PA6-S45C(BT)（以下、接合品と表記）の接合強度を把握するため、シング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。接合品の接合強度は、接合部が破壊する最大荷重とした。

## 2. 5 ブラスト処理面と破断面の観察

S45C(BT)のブラスト処理面を三次元粗さ解析電子顕微鏡（ELINIX 製 ERA-600）で観察し、引張せん断試験後の破断面をマイクロスコープ（(株)キーエンス製 VHX-1000）により観察した。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1 S45C(BT)の表面粗さ

ブラスト処理前後の S45C(BT)の表面粗さとその頻度割合を図2に示し、図3には S45C(BT)の表面粗さとその累積分布を示す。図2より S45C(BT15)の表面には、約 11.5 $\mu\text{m}$  に凸のピークが存在することがわかった。また、S45C(BT30)と S45C(BT60)の表面には、それぞれ約 9.5 $\mu\text{m}$  と約 9.0 $\mu\text{m}$  に凸のピークが存在し、S45C(BT120)の表面には約 9.0 $\mu\text{m}$  に凸のピークが存在することがわかった。図3より、S45C(BT15)、S45C(BT30)、S45C(BT60)、S45C(BT120)の表面粗さ50%値はそれぞれ、約 11.5 $\mu\text{m}$ 、約 9.1 $\mu\text{m}$ 、約 8.8 $\mu\text{m}$ 、約 7.6 $\mu\text{m}$  であった。これは S45C のブラスト処理時間が長くなると初期に生成した大きな凸はブラスト処理により削られるため、小さくなる方へシフトしたと考えられる。また、S45C(BT30)と S45C(BT60)のブラスト処理面では凸のピークや表面粗さの分布に顕著な違いは見られなかったが、S45C(BT120)のブラスト処理面では他のブラスト処理時間のブラスト処理面よりも小さな凸が存在することがわかった。

次に S45C(BT)のブラスト処理面の SEM 像を図4に示す。図4よりいずれのブラスト処理時間においてもブラスト処理面の凹凸は同様な形状をしており、顕著な違い

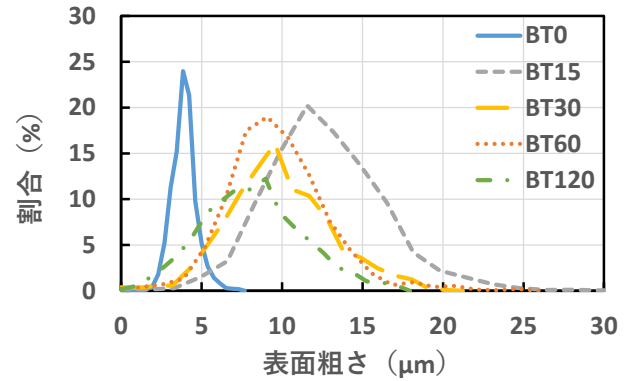


図2 ブラスト処理前後の S45C(BT)の表面粗さと頻度割合

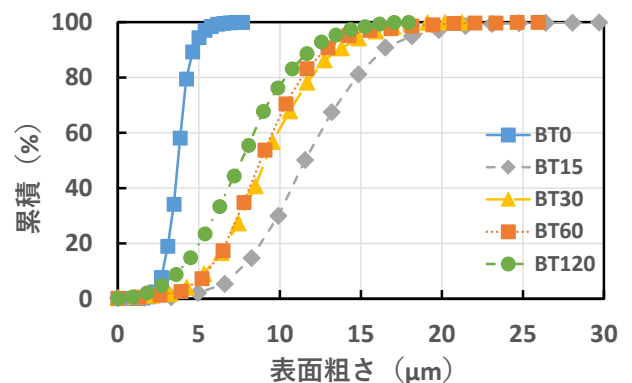


図3 ブラスト処理前後の S45C(BT)の表面粗さと累積分布

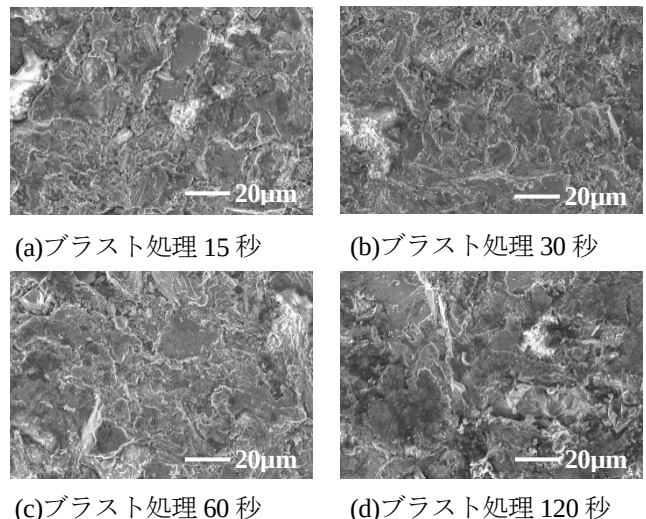


図4 S45C(BT)のブラスト処理面の SEM 像

は見られなかった。

ブラスト処理前後の S45C(BT)の表面粗さ測定の結果から算出した Ra、Rz と S45C(BT)のブラスト処理時間の関係を図5に示す。図5より、S45C(BT)の Ra と Rz は共にブラスト処理時間が 15 秒までは大きくなる傾向が見られたが、それより長いブラスト処理時間では同程度もしくは若干小さくなる傾向が見られた。

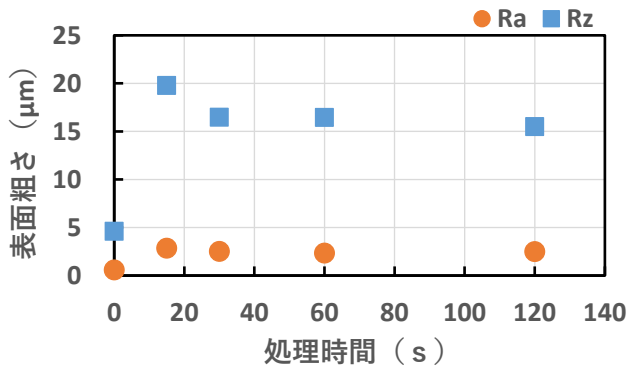


図5 S45C(BT)のブラスト処理時間とブラスト処理前後の表面粗さ

### 3. 2 接合強度

#### 3. 2. 1 ブラスト処理時間との関係

S45C(BT)のブラスト処理時間と接合品の接合強度の関係を図6に示す。図6より、加振時間が6秒で超音波溶着した接合品の接合強度は、S45C(BT)のブラスト処理時間が30秒まではブラスト処理時間が長くなると高くなる傾向が見られた。しかし、S45C(BT30)、S45C(BT60)、S45C(BT120)を使用して超音波溶着した接合品それぞれの接合強度は同程度であった。このため、ブラスト処理時間が30秒以上ではブラスト処理時間と接合品の接合強度には、明らかな優位性が見られなかった。また、S45C(BT30)、S45C(BT60)、S45C(BT120)とCF/PA6の接合強度は、ブラスト未処理のS45Cを使用した接合品の接合強度の約1.23倍となった。

次に加振時間が7秒で超音波溶着した接合品の接合強度も、加振時間が6秒で超音波溶着した接合品の接合強度と同様の傾向が見られ、ブラスト処理時間が30秒以上でブラスト処理したS45C(BT)を使用した接合品の接合強度は同程度であった。このため、ブラスト処理時間が30秒以上ではブラスト処理時間と接合品の接合強度には、明らかな優位性が見られなかった。

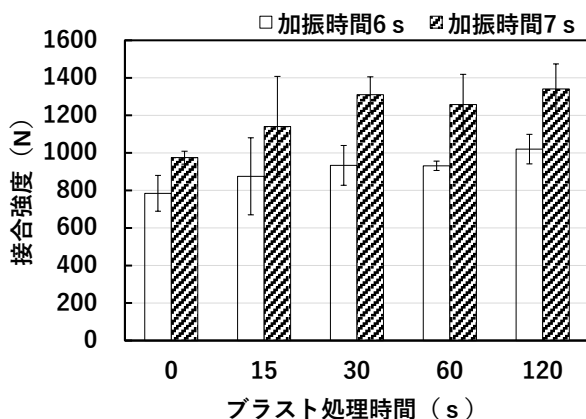


図6 S45C(BT)のブラスト処理時間と接合品の接合強度

また、S45C(BT30)、S45C(BT60)、S45C(BT120)とCF/PA6の接合強度はブラスト未処理のS45Cを使用した接合品の接合強度の約1.24倍となった。これらの結果からいずれの加振時間においてもブラスト処理をしたS45C(BT)とCF/PA6の接合強度は高くなったことから、S45Cへのブラスト処理は接合品の接合強度の向上に有効であることがわかった。

#### 3. 2. 2 表面粗さとの関係

S45C(BT)のRzと接合品の接合強度の関係を図7に示す。図7よりRzが大きくなると接合品の接合強度は低下する傾向が見られたことから、Rzと接合品の接合強度は明らかな相関は見られなかった。また、S45C(BT)のRaと接合品の接合強度の関係もRzと接合品の接合強度の関係と同様な傾向が見られ、Raと接合品の接合強度は明らかな相関は見られなかった。これは木村らの表面粗さと接合強度は関係が見られないという報告<sup>11)</sup>と一致する結果であった。

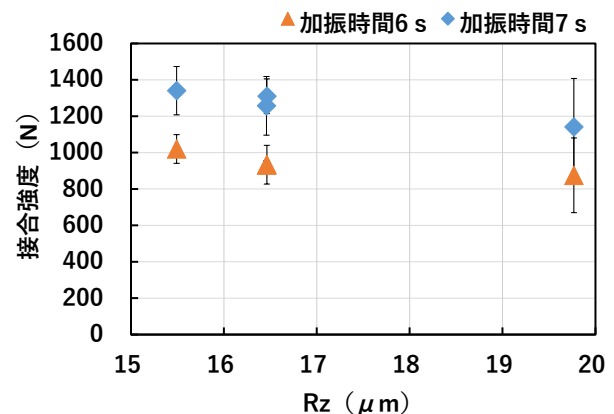


図7 ブラスト処理前後のS45C(BT)のRzと接合品の接合強度

### 3. 3 破断面観察

加振時間が7秒で超音波溶着した接合品の引張せん断試験後の破断面の写真を図8に示す。図8(a)から図8(c)より、S45C(BT15)、S45C(BT30)、S45C(BT60)とCF/PA6を超音波溶着し、引張試験をした接合品は界面破壊であったが、図8(d)より、S45C(BT120)とCF/PA6を超音波溶着し、引張試験をした接合品は界面破壊でなく、母材破断であった。

次に母材破断した接合品の破断面のCF/PA6とS45C(BT120)を拡大して観察した画像をそれぞれ図9(a)、図9(b)に示す。図9(a)より、CF/PA6の破断面はマトリックス樹脂が溶融した様子が観察され、図9(b)より、S45C(BT120)の破断面には超音波溶着したCF/PA6が観察された。この結果からS45Cにブラスト処理をすることにより生成した凹凸にCF/PA6がアンカー効果で強固に接合したため、母材破断したと考えられる。

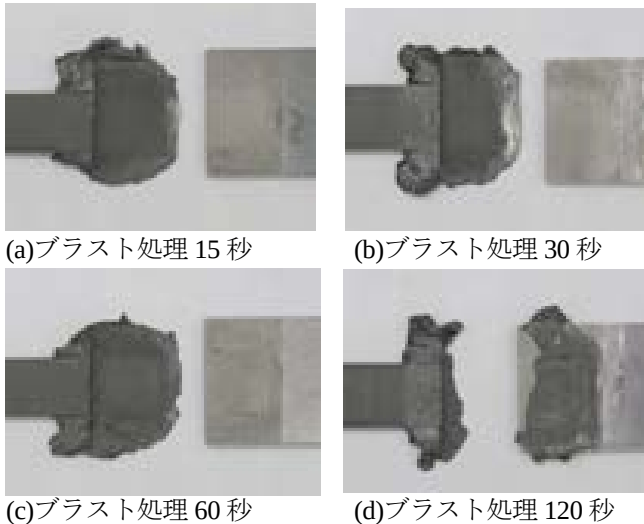


図8 引張せん断試験後の各接合品の破断面写真

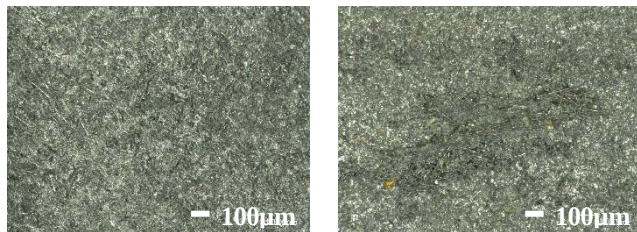


図9 引張せん断試験後のCF/PA6-S45C(BT120)の破断面画像

#### 4. まとめ

CF/PA6 とブラスト処理した S45C(BT) を超音波溶着し、引張せん断試験を行い、接合品の接合強度から S45C(BT) 表面のブラスト処理効果の検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) S45C のブラスト処理時間が 15 秒の時、S45C(BT) の表面粗さ (Ra、Rz) は最大となったが、それ以上の時間 S45C のブラスト処理を行っても S45C(BT) の表面粗さに明らかな違いは見られず、S45C(BT) の表面粗さは同程度または若干小さくなった。
- 2) S45C(BT) のブラスト処理面は、SEM 像からブラスト処理時間 (15 秒、30 秒、60 秒、120 秒) に関わらず、類似した表面形状であることがわかった。
- 3) いずれの加振時間においても、S45C(BT) のブラスト処理時間は長い方が接合品の接合強度は高くなる傾向が見られたが、30 秒以上ブラスト処理をした S45C(BT) と CF/PA6 の接合強度は同程度であった。
- 4) ブラスト処理をした S45C(BT) と CF/PA6 を加振時間が 6 秒と 7 秒で超音波溶着した接合品の接合強度は、S45C(BT0) を使用した接合品の接合強度のそれぞれ約 1.23 倍と 1.24 倍となった。このことから、ブラスト処理は接合強度向上に有効であることがわかった。
- 5) S45C(BT) の表面粗さ (Ra、Rz) と接合品の接合強度には、明らかな相関は見られなかった。

- 6) S45C のブラスト処理時間が 15 秒、30 秒、60 秒、加振時間 6 秒で超音波溶着した接合品の引張試験後の破断面はすべて界面破壊であったが、S45C(BT120) と CF/PA6 を加振時間 7 秒で超音波溶着した接合品の引張試験後の破断は母材破断であった。
- 7) それぞれの接合品の引張試験後の破断面は、ブラスト処理時間 (15 秒、30 秒、60 秒) に関係なく類似していた。
- 8) 接合品を引張試験した後のすべての S45C(BT) の破断面には CF/PA6 の一部が存在した。これは S45C のブラスト処理により生成した凹凸に CF/PA6 がアンカー効果で接合したためと考えられる。

#### 【謝 辞】

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国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学工学部の仲井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) 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
- 4) 中田一博，異種材料接合，pp95-120，日経 BP 社，2014
- 5) 道家ら，岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4，pp45-48，2016
- 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
- 10) 西垣ら，岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.2，pp71-74，2021
- 11) 木村ら，2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会，pp441-442，2015