

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7報）

—軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発（Ⅱ）—
西垣 康広*、栗田 貴明*、山田 孝弘*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (VII)
Development of multi-material products by weight reduction and combination(Ⅱ)
NISHIGAKI Yasuhiro*, KURITA Takaaki* 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。炭素繊維入三次元造形機で造形したCFRTP と炭素鋼を超音波接合により接合し、引張せん断試験により接合強度の評価を行った。

本年度は炭素鋼表面のブラスト処理条件（粒子サイズ、粒子種）、超音波接合条件を検討し、接合強度からブラスト処理効果を評価した。その結果、炭素鋼表面を約 210 μ m～300 μ m に粒径が分布するガーネットサンド粒子を使用するよりも、約 77 μ m～150 μ m に粒径が分布するガーネットサンド粒子を使用してブラスト処理をすると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^{1)~4)}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⁵⁾と超音波接合による 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^{6)~10)}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ることが課題となっている。一方ハイブリッド成形は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行った。昨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 と炭素鋼を超音波接合してその接合強度を測定し、接合条件と接合強度の関係を評

価した。本年度は超音波接合した CFRTP と炭素鋼の接合強度を向上させるため、ブラスト粒子サイズ、粒子種を検討し、昨年度の実験結果を含め、接合強度からブラスト処理の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 を 8 層、短繊維入 CF/PA6 を 5 層とした。また、S45C は 100mm×12.5mm×2.3mm にレーザーカットし、接合面のみをブラスト処理（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、以下 G1 と表記、(#)80～140 混合品、以下 G2 と表記）と SiC（(#)120～140 混合品、以下 SiC と表記）を使用して所定の吹付条件で、S45C の端部から長手方向に 12.5mm ブラスト処理を行った。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）、最大高さ粗さ（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S45C(BT)の接合は、前報¹⁾と同様にCF/PA6とS45C(BT)のプラスト面の端部から12.5mm重ね合わせて、超音波溶着機(精電舎電子工業製DΣG2200)にセットして、下記の条件で超音波接合した。接合条件は、振幅30μm、ホーンの設定圧力(以下、加圧力と表記)を0.1MPa、加振時間を6秒、7秒として加振終了後のホールド時間を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。

2. 4 引張せん断試験

CF/PA6とS45C(BT)を超音波接合したCF/PA6-S45C(BT)(以下、接合品と表記)の接合強度は、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、接合品の接合強度は、接合部が破壊する最大荷重とした。

2. 5 プラスト処理面の観察

S45Cのプラスト処理面は、三次元粗さ解析電子顕微鏡(ELIONIX製ERA-600)でSEM観察をした。

3. 結果及び考察

3. 1 S45C(BT)の表面粗さ

G1、G2、SiCを使用して30秒プラスト処理をしたS45Cのそれぞれの表面粗さとその累積分布を図1に示す。図1より、G2を使用したS45C(BT30)には約5.5μmの凸が最も多く存在し、0μm~約10μmの分布であった。SiCを使用すると約3.7μmの凸が最も多く存在し、0μm~約10μmの分布であり、G2とSiCを使用したS45C(BT30)の表面粗さの頻度割合は類似していた。また、G1を使用したS45C(BT30)の表面粗さは約9.5μmの凸が最も多く存在し、0μm~約20μmの分布であった。G2、SiCを使用したS45C(BT30)の表面粗さとその分布は、どちらもG1を使用した場合の約1/2倍であった。粒子径が大きいプラスト粒子を用いてS45Cをプラスト処理すると表面粗さは大きく、その分布は広くなり、小さいプラスト粒子を用いてS45Cをプラスト処理すると表面粗さは小さくなり、その分布は狭くなったことからプラスト粒子径と表面粗さは相関があると考えられる。

次にS45Cのプラスト処理時間とプラスト処理前後の表面粗さの関係を図2に示す。図2より、G1、G2、SiCを使用してS45Cをプラスト処理するとRzはそれぞれ15μm~20μm、9μm~11μm、9μm~10μmであり、G1を使用した場合のRzが最も大きく、G2とSiCを使用した場合のRzは同程度の値であった。G1、G2を使用するとプラスト処理時間が15秒の時、Rzは最大となり、15秒以上のプラスト処理ではRzは小さくなるか同程度となる傾向が見られた。

G2の粒子サイズはSiCのそれよりも大きな粒子が存在するため、プラスト処理時間が15秒から60秒までのRzは、SiCを使用した場合よりもG2を使用した場合の方が大きかった。また、Raはすべてのプラスト処理時

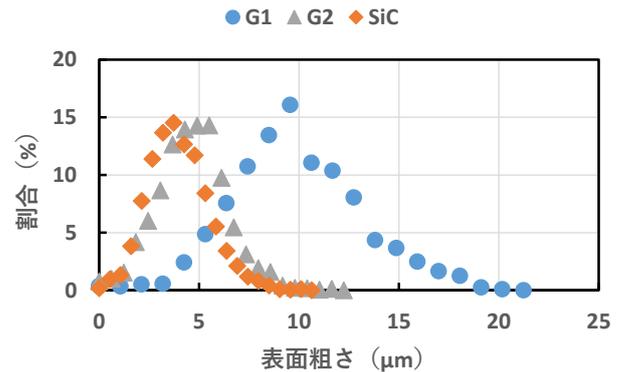


図1 S45C(BT30)の表面粗さと累積分布

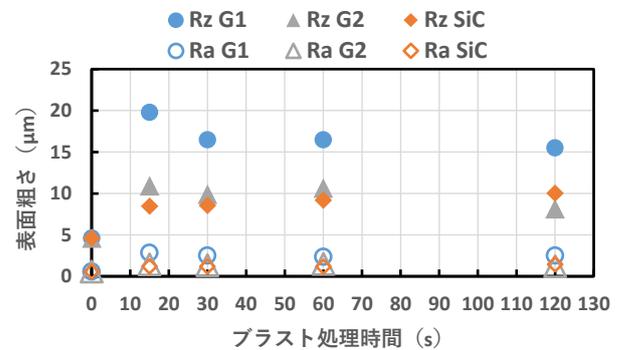


図2 プラスト処理前後のS45Cの表面粗さ

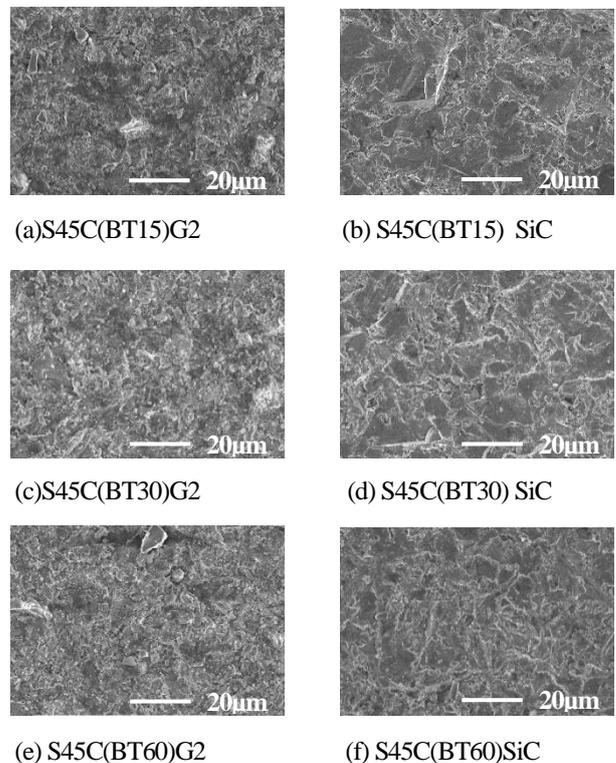


図3 S45C(BT)のプラスト処理面のSEM像

間において R_z と同様な傾向が見られ、ブラスト処理時間が長くなると一定の値になる傾向が見られた。これはブラスト処理時間が 15 秒までは、S45C が研削されるため表面粗さは大きくなる傾向が見られるが、15 秒よりもブラスト処理時間が長くなると初期に生成した凹凸はブラスト粒子により研削されるため表面粗さは小さくなり、その後は一定の値になると考えられる。

次に G2 と SiC を使用して 15 秒、30 秒、60 秒ブラスト処理した S45C(BT) 表面の SEM 像を図 3 に示す。図 3 より、G2 を使用して S45C をブラスト処理するとブラスト処理時間が 15 秒、30 秒、60 秒と長くなってもブラスト処理面の凹凸は類似した形状をしており、顕著な違いは見られなかった。また SiC を使用して S45C をブラスト処理した場合も G2 を使用して S45C をブラスト処理した場合と同様に、ブラスト処理時間が長くなってもブラスト処理面の凹凸は類似した形状をしており、顕著な違いは見られなかった。

3. 2 接合強度

3. 2. 1 ブラスト処理時間との関係

S45C のブラスト処理時間と加振時間が 6 秒と 7 秒で超音波接合した接合品の接合強度の関係を図 4、図 5 にそれぞれ示す。図 4 より、G2 を使用した S45C(BT) と CF/PA6 の接合品の接合強度は、S45C のブラスト処理時間が 60 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が、S45C のブラスト処理時間が 60 秒と 120 秒では同程度であった。また、SiC を使用した S45C(BT) と CF/PA6 の接合品の接合強度は、ブラスト処理時間が 30 秒以上ではブラスト処理時間が長くなると接合強度は高くなる傾向が見られた。

ブラスト処理時間が 30 秒以上では、G2 を使用した場合の接合強度が最も高くなる傾向が見られ、SiC を使用した場合の接合強度は、すべてのブラスト処理時間において最も低くなることがわかった。ブラスト処理時間が 15 秒はブラスト処理時間が 30 秒以上と比べると短いため、ブラスト処理面の凹凸が一樣でないと考えられ、ブラスト処理時間が 30 秒以上の接合強度と異なる傾向が表れたと考えられる。

次に図 5 より、G2 を使用した S45C(BT) と CF/PA6 の接合品の接合強度は、S45C(BT) のブラスト処理時間が 60 秒までは同程度であったが、120 秒では若干高くなる傾向が見られた。また SiC を使用した S45C(BT) と CF/PA6 の接合品の接合強度は、ブラスト処理時間が 30 秒以上では G2 を使用した場合の接合強度と同様な傾向が見られた。いずれのブラスト処理時間においても接合強度は、G2 を使用した場合が最も高く、SiC を使用した場合はすべてのブラスト処理時間において最も低くなった。

CF/PA6 と S45C(BT) を加振時間が 6 秒よりも 7 秒で超音波接合するとすべてのブラスト処理時間において接合強度は高くなることがわかった。

加振時間が 6 秒と 7 秒で S45C(BT) と CF/PA6 を超音波接合する場合、G1、G2 を用いて S45C をブラスト処理することにより、未処理の S45C と CF/PA6 の接合強度よりも高くなった。これはアンカー効果により接合強度が高くなったためと考えられる。このことから、S45C へのブラスト処理は接合品の接合強度の向上において有効であると考えられる。

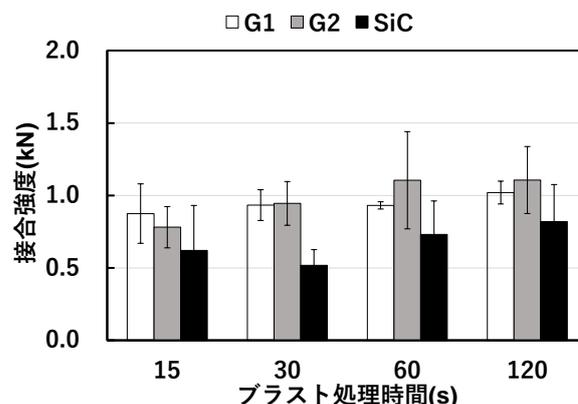


図 4 S45C(BT) のブラスト処理時間と接合品の接合強度 (加振時間 6 秒)

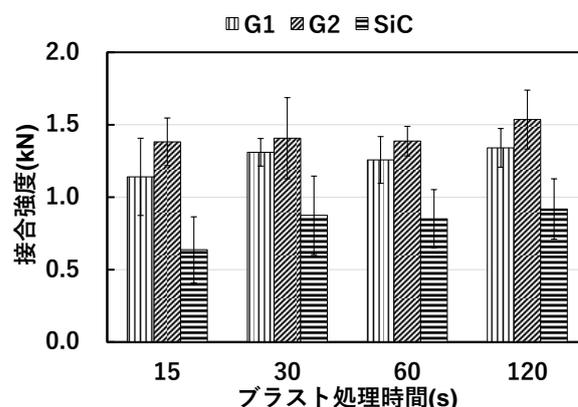


図 5 S45C(BT) のブラスト処理時間と接合品の接合強度 (加振時間 7 秒)

3. 2. 2 表面粗さとの関係

表面粗さ R_z とそれぞれの接合品の接合強度の関係を図 6 に示す。図 6 より、G2 と SiC を使用して S45C のブラスト処理を行うと R_z は同程度であったが、接合強度は SiC 処理よりも G2 処理をした S45C を使用した接合品の方が高かった。G1 処理後の R_z は、G2 処理後の R_z の約 2 倍であったが、接合強度は類似した値であったことから、 R_z と接合品の接合強度は明らかな相関は認められなかった。また、S45C(BT) の R_a と接合品の接合強度の関係も R_z と接合品の接合強度の関係と同様な傾向が見られ、 R_a と接合品の接合強度は明らかな相関は認められなかった。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¹²⁾と一致した。

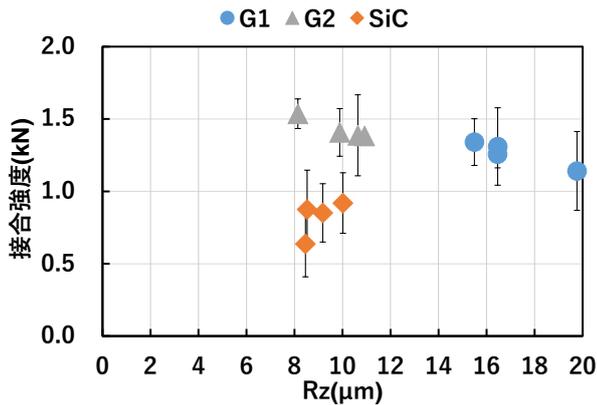


図6 G1、G2、SiCにより30秒ブラスト処理したS45CのRzと接合品の接合強度

3.3 引張試験後の試験片観察

G2とSiCを使用してS45Cをそれぞれ15秒、30秒、60秒ブラスト処理し、CF/PA6と加振時間が7秒で超音波接合した接合品の引張せん断試験後の試験片の写真を図7(a)~(f)に示す。図7(a)~(f)より、G2を使用したS45C(BT)とCF/PA6の接合品を引張試験すると母材破断する試験片が約9割であり、残りは界面破壊であった。また、SiCを使用したS45C(BT)とCF/PA6の接合品を引張試験すると母材破断する試験片は約4割であり、残りは界面破壊であった。G1を使用した場合はSiCを使用した場合と同様な傾向が見られ、界面破壊が多かった。G2を使用した場合の接合強度は、G1、SiCを使用した場合よりも高かったため、母材破断が多かったと考えられ、G1、SiCを使用した場合は、G2を使用した場合より接合強度が低かったため、界面破壊の割合が多くなったと考えられる。

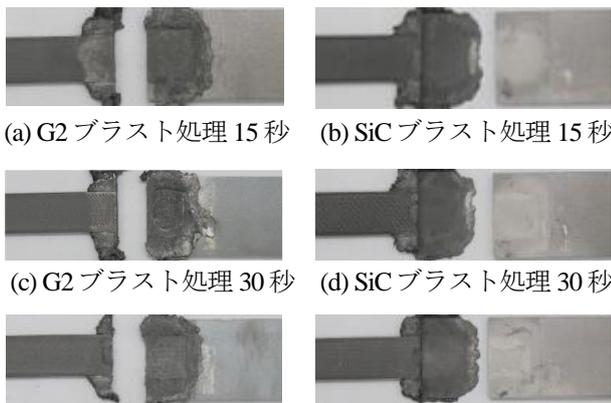


図7 接合品の引張せん断試験後の試験片(加振時間7秒)

4. まとめ

CF/PA6とS45C(BT)の接合品の引張せん断試験を行い、接合強度からブラスト粒子サイズ、ブラスト粒子種がブ

ラスト処理効果に与える影響を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) G2、SiCを使用したS45C(BT)の表面粗さ(Ra、Rz)は同程度であり、類似した傾向が見られた。
- 2) G2、SiCを使用したS45C(BT)のブラスト処理面は、SEM像からブラスト処理時間に関わらず、類似した表面形状であった。
- 3) いずれの加振時間においても、G2を使用したS45C(BT)とCF/PA6の接合品の接合強度が最も高くなる傾向が見られたが、SiCを使用したS45C(BT)とCF/PA6の接合品の接合強度は最も低かった。
- 4) G2を使用した接合品の接合強度は、未処理のS45Cの接合品の接合強度よりも高かったことから、G2を使用したブラスト処理は、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) G2を使用した接合品を引張試験すると母材破断する試験片数が約9割であったが、G1、SiCを使用したS45C(BT)とCF/PA6の接合品の引張試験では母材破断した試験片は約4割であった。

【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朝美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) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp45-48, 2022
- 12) 木村ら, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会, pp441-442, 2015