

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11報）

—軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発(3)—

岩田 泰我*、西垣 康広*、栗田 貴明*、山田 孝弘*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XI)

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

IWATA Taiga*, NISHIGAKI Yasuhiro*, KURITA Takaaki* and YAMADA Takahiro*

地球温暖化防止のため、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おり、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、車体重量の軽量化が求められている。このため、部品の一部を比強度、比剛性に優れた炭素繊維強化複合材料（以下、CFRP と表記）へ置き換え、金属等の異種材と接合し使用するマルチマテリアル化に関する開発が盛んに行われている。

本研究では炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料（以下、CFRTP と表記）と炭素鋼のマルチマテリアル化に向けた検討として、低コスト化・品質安定化を目的としたインサート成形技術の基礎研究を実施した。本年度はCFRTP とブラスト処理した S45C のインサート成形品の接合強度測定および接合面の EDS 分析を行い、成形条件が接合強度に及ぼす影響を評価した。その結果、金型及び S45C の加熱、シリンダ温度の上昇、保圧の増加により接合強度が向上する傾向が見られた。

1 はじめに

近年、地球温暖化防止のため、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・航空機産業においては、二酸化炭素の排出規制が年々厳しくなっているため、機体重量の軽量化が求められている。このような背景から様々な分野において比強度、比剛性に優れた CFRP の使用が検討されており、なかでも金属部材の一部を CFRP に置き換え、金属等の異種材と接合し使用するマルチマテリアル化に関する開発が盛んに行われている^{1)~4)}。

一方で、サーキュラーエコノミーの観点から CFRP のリサイクルが注目されており、母材に熱可塑性樹脂を用いることでリサイクル性を有する CFRTP の産業利用が期待されている。当センターでは、これまでに CFRTP のマルチマテリアル化に向けて、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。

しかし、CFRTP のマルチマテリアル化においては CFRTP の成形に加え、二次加工や異種材との接合等の工程が必要であることから製造コストが高くなるというデメリットがある。一方で、CFRTP の射出成形と接合を同時に行うインサート成形は、短時間で一体成形が可能なることからマルチマテリアル製品の低コスト化が期待できる。

そこで、本研究では CFRTP のマルチマテリアル製品の製造コスト低減および品質安定化のため、CFRTP と炭素鋼のインサート成形技術の開発を行った。先行研究

^{11, 12)}では、マルチマテリアル製品開発の基礎研究として CFRTP と炭素鋼を超音波接合し、引張せん断試験により接合強度を測定することで接合条件と接合強度の関係を明らかにした。また、炭素鋼接合面のブラスト処理が接合強度に及ぼす影響について評価した。

本年度は、CFRTP と炭素鋼のインサート成形の基礎研究として炭素鋼接合面のブラスト処理の有無および成形条件がインサート成形品の接合強度に及ぼす影響を評価したので報告する。

2 実験

2.1 試験片作製

2.1.1 材料

試験片材料として強化繊維が短炭素繊維、母材がナイロン 6 の CFRTP ペレット（LANXESS 製 Durethan TP737-201）を用いた（以下、CF/PA6 と表記）。CF/PA6 の繊維体積含有率は 25%、融点は 220℃である。CF/PA6 は水分除去のため 80℃のドライエアーで 24 時間程度、予備乾燥して使用した。また、被着材として 100 mm×25 mm×2.3 mm にレーザーカットし、接合面をブラスト処理した炭素鋼を用いた（以下、S45C と表記）。

2.1.2 ブラスト処理

先行研究より、CFRTP 板材と S45C の超音波溶着において S45C 接合面にブラスト処理を施すことで、アンカー効果による接合強度の向上を報告した。そこでインサート成形においてもブラスト処理の有無が接合強度に及ぼす影響について検討した。ブラスト処理はブラスト処理装置（株式会社ストレート製 ブラストキャビネット M 15-959）を用いて行った。ブラスト処理は、ブラスト処理装置内でサンドブラスト用ガーネットサンド

* 次世代技術部

(#80~140 混合品) を、S45C の端部から長手方向 12.5 mm の領域に吹き付けた。吹付条件は、吹付圧力 0.6 MPa、吹付距離 100 mm、吹付時間 30 秒とした。

2.1.3 インサート成形

インサート成形は型射出成形機（株式会社ソディック製 TR75VRE）を用いて行った。試験片形状を図 1 に示す。試験片は 100 mm×25 mm×2.3 mm の CF/PA6 および S45C を端部から 12.5 mm 重ね合わせた形状とし、試験片作製用金型に設置した S45C 接合面上に溶解した CF/PA6 を射出して成形した。成形条件は金型温度（80 °C、100 °C）、S45C 温度（室温、80 °C、100 °C）、シリンダ（樹脂材料を加熱する機構）温度（260 °C、280 °C）、保圧（35 MPa、100 MPa）を検討した。

表 1 に示す成形条件で 6 種類の試験片を作製し、各試験片を sample1~6 と表記する。成形条件と接合強度の関係を明らかにするため、各試験片の接合強度を以下の 4 水準で比較した。

- ①S45C 接合面のブラスト処理の有無
- ②金型温度および S45C 温度条件
- ③シリンダ温度条件
- ④保圧条件

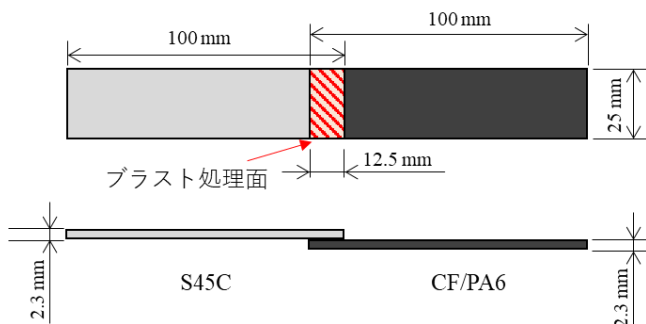


図 1 試験片形状の概略図

表 1 試験片成形条件一覧

試験片名	ブラスト 処理	金型 温度[°C]	S45C 温度[°C]	シリンダ 温度[°C]	保圧 [MPa]
sample 1	無	80	室温	260	35
sample 2	有	80	室温	260	35
sample 3	有	80	80	260	35
sample 4	有	100	100	260	35
sample 5	有	100	100	280	35
sample 6	有	100	100	260	100

2.2 評価方法

2.2.1 引張せん断試験

試験片の接合強度を評価するため万能試験機（株式会社島津製作所製 AG-IS 100kN）を用いて、引張せん断試験を行った。試験条件は JIS K 6850 に準拠し、試験速度 1 mm/min とした。引張荷重の軸と接合面が合致するように同板厚の当て板を貼り付け、引張せん断試験を実施した。接合品の接合強度は、接合部が破壊する最大応力とした。

2.2.2 試験片観察

試験片の接合状態を評価するため、小型低真空電子顕微鏡（日本電子株式会社製 JSM-IT100）を用いて、引張せん断試験後の S45C 接合面の EDS 分析を実施した。

3 結果及び考察

3.1 引張せん断試験

3.1.1 ブラスト処理条件の検討

引張せん断試験により得られた各試験片の接合強度を図 2 に示す。

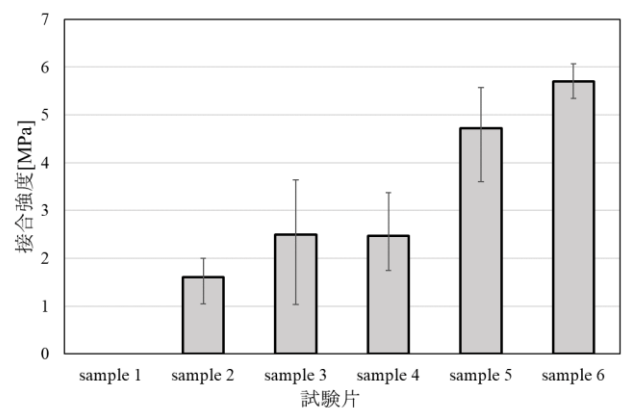


図 2 各試験片の接合強度

S45C 接合面にブラスト処理をしていない sample 1 は脱型時に接合面が剥離した。一方、ブラスト処理をした sample 2 の接合強度は約 1.6 MPa であった。これらの結果より、インサート成形においても S45C 接合面のブラスト処理は、接合強度の向上に寄与することが示唆された。sample 2 の接合強度はブラスト処理により S45C 接合面に生成された凹凸と CF/PA6 とのアンカー効果により向上したと考えられる。

3.1.2 金型および S45C 温度条件の検討

図 2 より、金型及び S45C を 80 °C に加熱した sample 3 の接合強度は、室温の S45C を成形に用いた sample 2 の接合強度の約 1.6 倍となり、金型及び S45C 温度が高いほど接合強度が高くなる傾向が見られた。インサート成形において射出充填される CF/PA6 は、S45C 接合面に接触すると冷却されるため、粘度が増加し S45C 接合面の凹凸への流入が阻害される。sample 3 は S45C を 80 °C に加熱することにより CF/PA6 の冷却に伴う粘度増加を抑制したため、接合強度が向上したと考えられる。

一方、金型及び S45C 温度を sample 3 より 20 °C 高い 100 °C に設定した sample 4 の接合強度は、sample 3 と比較し顕著な違いは見られなかった。

3.1.3 シリンダ温度条件の検討

図 2 より、シリンダ温度を 280°C に設定した sample 5 の接合強度は、260°C に設定した sample 4 の接合強度の約 1.9 倍となり、成形時に CF/PA6 の温度が高いほど接合強度が高くなる傾向が見られた。これは CF/PA6 の温度が高いほど粘度が低い状態で S45C 接合部の凹凸に流入することが要因であると考えられる。また前述のとおり、CF/PA6 が射出充填される際には金型壁面および接合面に接触し冷却されるが、同時に接合面の温度は上昇する。接合面における CF/PA6 の冷却に伴う粘度増加は CF/PA6 の温度が高いほど抑制されると考えられるため、前述の要因と複合して接合強度の向上に寄与したと考えられる。

3.1.4 保圧条件の検討

図 2 より、保圧を 100 MPa に設定した sample 6 の接合強度は、35 MPa に設定した sample 4 の接合強度の約 2.3 倍となり、成形時の保圧が高いほど接合強度が高くなる傾向が見られた。これは保圧を高くすることにより S45C 接合面の凹凸に CF/PA6 が流入したことが要因であると考えられる。

以上の 4 条件の検討においては、保圧の増加が接合強度の向上に最も寄与することが確認された。一方で保圧の増加によりバリ等の成形不良の発生や金型の損傷が懸念されるため、製品・金型形状等を考慮し保圧を検討する必要がある。

3.2 試験片観察

3.2.1 破断面観察

sample 6 の引張せん断試験後の S45C および CF/PA6 破断面を図 3 (a)、(b) に示す。sample 6 には界面破壊が生じており、sample 2～5 も同様に界面破壊が生じた。引張せん断試験後の S45C 破断面には黒色の痕跡が確認された。この黒色痕は接合強度が高い試験片ほど広い領域で確認される傾向にあった。



(a) S45C の破断面

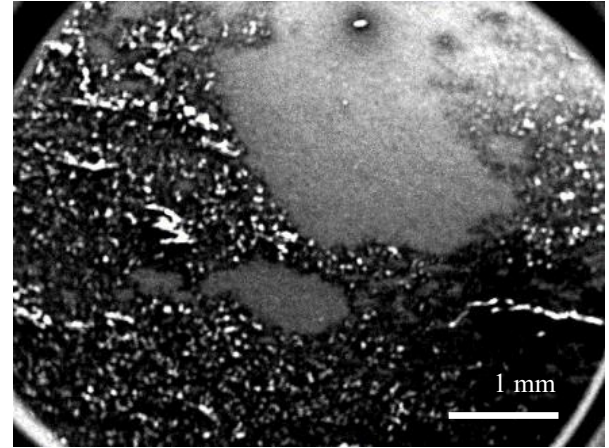
(b) CF/PA6 の破断面

図 3 引張せん断試験後の sample 6 の破断面

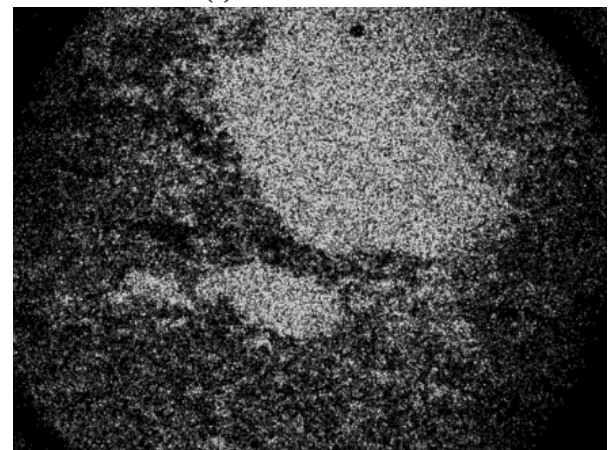
3.2.2 EDS 分析

図 3 (a) の S45C 破断面の黒色痕周辺を EDS 分析した。sample 6 の EDS 分析範囲、Fe の元素マッピング像、C の元素マッピング像をそれぞれ図 4 (a)～(c) に示す。図 4 (b)、(c) の元素マッピング像に白色で表示された領域が Fe お

よび C の分布領域である。EDS 分析の結果、図 4 (a) に示した EDS 分析範囲の灰色の領域からは Fe が、黒色痕からは C が検出された。この結果より S45C 破断面の黒色痕は CF/PA6 と考えられ、破断後の S45C 破断面に凝集破壊した CF/PA6 が残存したと考えられる。



(a) EDS 分析範囲



(b) Fe の元素マッピング像



(c) C の元素マッピング像

図 4 sample 6 の EDS 分析

4 まとめ

CFRTP と炭素鋼のインサート成形の基礎研究として、炭素鋼接合面のブラスト処理の有無および CFRTP の射出成形条件がインサート成形品の接合強度に及ぼす影響を評価した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) S45C 接合面のブラスト処理は接合強度の向上に寄与することが示唆された。
- 2) 金型及び S45C を加熱することで接合強度が向上する傾向が見られた。一方、80 °C と 100 °C の条件では接合強度に顕著な差は見られなかった。
- 3) シリンダ温度が高いほど接合強度が向上する傾向が見られた。
- 4) 保圧は高いほど接合強度が高くなる傾向が見られ、本年度の検討においては保圧の増加が接合強度の向上に最も寄与することが分かった。
- 5) せん断強度が高いほど S45C 破断面に凝集破壊した CF/PA6 が残存する傾向が見られた。

【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) 三瓶ら, レーザー加工学会誌, Vol.22, No.3, 2015
- 2) 永塚ら, 溶接学会全国大会講演概要集, No.95, pp54-55, 2014
- 3) 原賀・佐藤, 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, 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) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp35-38, 2023