

# 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15報）

—軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発(4)—

岩田 泰我\*、西垣 康広\*、栗田 貴明\*、山田 孝弘\*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XV)

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

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

近年、自動車・航空機産業やスポーツ用品等の幅広い分野で製品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、異種材と接合して使用するマルチマテリアル製品の開発が盛んに行われている。熱可塑性 CFRP（以下、CFRTP と表記）を用いたインサート成形では、複雑形状のマルチマテリアル製品を一体成形できるため、剛性に優れた連続繊維 CFRP をインサート材とすることで、より軽量で機械的特性に優れたマルチマテリアル製品の製造が期待できる。

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維 CFRP のインサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP インサート材を用いて試験片を作製し、接合強度評価と試験片観察を行った。

その結果、インサート材ごとの接合強度やブラスト処理による接合強度向上のメカニズムが明らかとなった。

## 1 はじめに

近年、自動車・航空機産業やスポーツ用品等の幅広い分野で製品の軽量化が求められている。このような背景から比強度、比剛性に優れた CFRP の使用が検討されており、なかでも、金属等の重量部材の一部を CFRP に置き換え、異種材と接合して使用するマルチマテリアル製品の開発が盛んに行われている<sup>1)~4)</sup>。

また、CFRP は強化形態や母材の種類により特性が変化する。近年では、リサイクル性や二次加工性を有する熱可塑性樹脂を母材に用いた CFRTP の利用が求められている。

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、プレス成形と超音波接合による CFRTP の同種材接合や異種材接合を行い、接合技術を確立してきた<sup>5)~12)</sup>。また、昨年度の研究報告（以降、前報と表記）では、強化繊維が短炭素繊維、母材がナイロン 6 (PA6) の CFRTP（以降、CF/PA6 (INJ) と表記）を射出成形と同時にインサート材に接合するインサート成形を行い、炭素鋼をインサート材とした場合の成形条件と接合強度の関係を明らかにした<sup>13)</sup>。インサート成形は短時間で複雑形状の一体成形が可能なることから、マルチマテリアル製品を低コスト化できる。また、剛性に優れる一方で複雑形状の成形が困難な連続繊維 CFRP に CF/PA6 (INJ) をインサート成形することで、軽量で機械的特性に優れ、複雑形状を一体成形したマルチマテリアル製品の製造が期待できる。

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維 CFRP の

インサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP に、CF/PA6 (INJ) をインサート成形し、引張せん断試験により接合強度を評価した。また、CFRTP と連続繊維 CFRP のインサート成形における接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、インサート材接合面観察と接合界面観察を実施したので報告する。

## 2 実験

### 2.1 試験片作製

#### 2.1.1 材料

インサート成形の射出樹脂として、CF/PA6 (INJ) ベレット (LANXESS 製 Durethan TP737-201) を用いた。CF/PA6 (INJ) の繊維体積含有率は 25%、母材の融点は 220℃である。CF/PA6 (INJ) は 80℃のドライエアーで 24 時間、予備乾燥して使用した。また、インサート材として強化繊維が織物の炭素繊維、母材が PA6、熱可塑性ポリウレタン (TPU)、エポキシ (EP) の連続繊維 CFRP を用いた。インサート材の厚みは 2 mm とし、100 mm×25 mm に切断して使用した。

#### 2.1.2 ブラスト処理

前報では、CFRTP と S45C のインサート成形において、S45C 接合面をブラスト処理すると、接合強度が向上することを報告した<sup>13)</sup>。そこで本稿においても、ブラスト処理の効果について検討した。ブラスト処理は、ブラスト処理装置（株）ストレート製 ブラストキャビネット）内でガーネットサンド（(#)80~140 混合品）を、インサート材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。

\* 次世代技術部

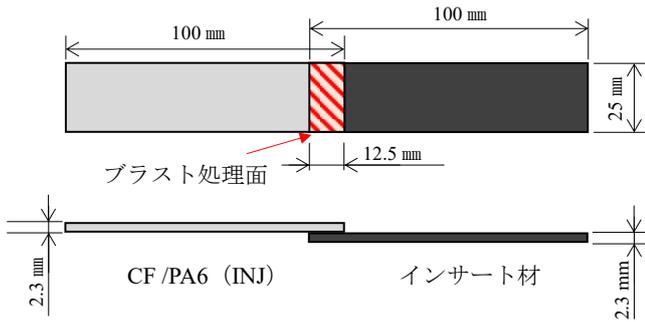


図1 試験片形状の概略図

### 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）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の長方形を端部から12.5 mm重ね合わせた形状とし、インサート材接合面上に溶解したCF/PA6 (INJ)を射出して成形した。成形条件は、金型温度100 °C、インサート材温度100 °C、成形温度（CF/PA6 (INJ)の温度）280 °C、保圧35 MPaとした。試験片はインサート材3種類とブラスト処理の有無の組合せで6種類とした。以降、試験片はインサート材（CF/PA6、CF/TPU、CF/EP）とブラスト処理の有無（BT、non）の組合せで表記する。

## 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）島津製作所製 AG-IS 100kN）を用いて引張せん断試験を行った。前報では、JIS K 6850に準拠した引張せん断試験を実施したが、引張荷重の軸と接合面が試験中にずれることで曲げ変形が発生し、射出樹脂側で母材破壊する現象が見られた。このため、ISO 19095の試験規格を参考にして図2に示すような治具を作製し、引張せん断試験を行った。試験片の射出樹脂側を治具の凸部に固定し、インサート材側に引張荷重を負荷することで試験を行った。試験速度は1 mm/minとした。

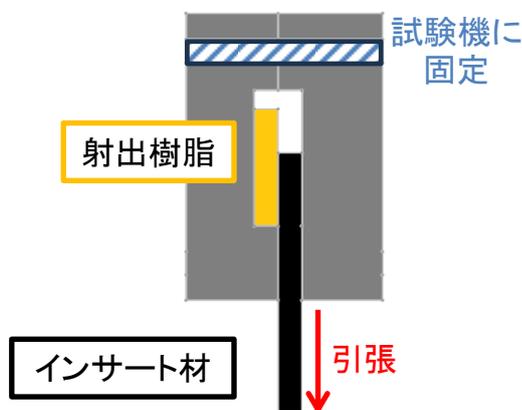


図2 引張せん断試験治具を用いた試験方法

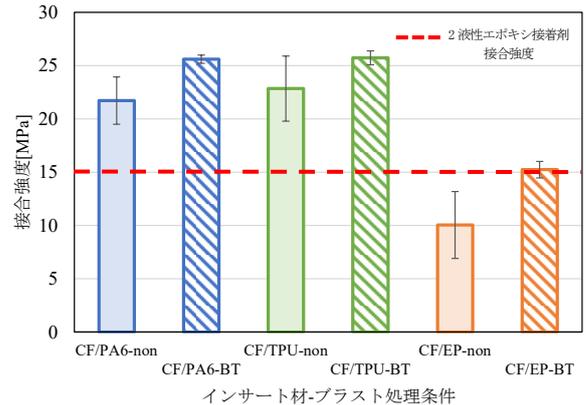


図3 各試験片の接合強度

### 2.2.2 試験片観察

接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、成形前のインサート材接合面を共焦点顕微鏡（レーザーテック（株）製 OPTICS HYBRID L3/405 nm レーザー+RGB）で観察し、表面粗さを評価した。

また、試験片の接合界面を小型低真空電子顕微鏡（日本電子（株）製 JSM-IT100）でSEM観察した。

## 3 結果および考察

### 3.1 接合強度評価

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3に示す。

図3より、インサート材の母材がCF/PA6 (INJ)と同様であるCF/PA6-nonの接合強度は、約22 MPaであった。ここで工業用に用いられる二液性エポキシ接着剤の接着強度を測定すると約15 MPaであり、CF/PA6-nonの接合強度はその値を上回った。CF/PA6-nonはインサート材の母材がPA6であり、融点が約220 °Cと成形温度よりも低いため、インサート成形時に接合界面が熔融することで接合強度が発現したと考えられる。またCF/PA6-BTの接合強度は約26 MPaであり、前報と同様にブラスト処理によって接合強度が向上した。この傾向はブラスト処理により接合面に生成された凹凸とCF/PA6 (INJ)とのアンカー効果によるものと考えられる。

CF/TPU-nonの接合強度は約22 MPaであり、CF/PA6-nonと同程度の接着強度であった。これはCF/PA6-nonと同様、成形時にインサート材接合界面が熔融することで接合強度が発現したと考えられる。CF/TPU-BTの接合強度は約26 MPaであり、CF/PA6-BTと同様の傾向を示した。

CF/EP-nonの接合強度は約10 MPaであり、CF/PA6-nonに比べて低い接合強度であった。前述のとおり、CF/PA6-nonは、接合界面の熔融により接合強度が発現したが、CF/EP-nonは母材が熱硬化性樹脂であるため接合界面が熔融せず、CF/PA6-nonに比べて接合強度が低くなったと考えられる。一方、CF/EP-BTの接合強度は

約 15 MPa であり、二液性エポキシ接着剤の接着強度と同程度であった。このため、ブラスト処理は熱硬化性 CFRP をインサート材とする場合でも、接着強度を向上させる手法として有用であると考えられる。

### 3.2 試験片観察

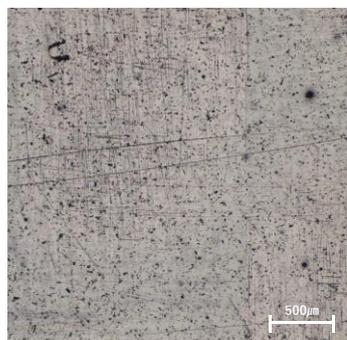
#### 3.2.1 インサート材接合面観察

接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、試験片観察を行った。共焦点顕微鏡で観察した CF/EP-non と CF/EP-BT の成形前のインサート材接合面を図 4(a)、(b) にそれぞれ示す。

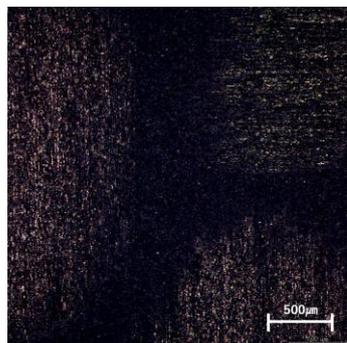
図 4(a)より、CF/EP-non インサート材接合面は、全体的に微細な傷が存在するものの、単位面積あたりの算術平均粗さ  $S_a$  が  $1.9 \mu\text{m}$  と、平滑な状態であった。

一方、図 4(b)より、CF/EP-BT インサート材接合面の左側と右下には白線が縦方向に揃った領域が見られ、右上には白線が横方向に揃った領域が見られた。これらは織物構造の炭素繊維束領域であると考えられる。また、その繊維束領域間には黒色の領域が見られた。これらは母材の樹脂領域であると考えられる。 $S_a$  は  $10.2 \mu\text{m}$  であり、CF/EP-non の約 5 倍であった。

繊維束領域と繊維束間の樹脂領域の位置関係を明らかにするため、図 4(b)の観察範囲と同じ縦  $3 \text{ mm}$  × 横  $3 \text{ mm}$  で、高さ  $80 \mu\text{m}$  の範囲を三次元粗さ解析した。CF/EP-BT の三次元解析画像を図 5 に示す。図 5 より、CF/EP-BT インサート材接合面における繊維束領域の高さが、樹脂領域



(a) CF/EP-non



(b) CF/EP-BT

図 4 インサート材接合面画像 ( $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ )

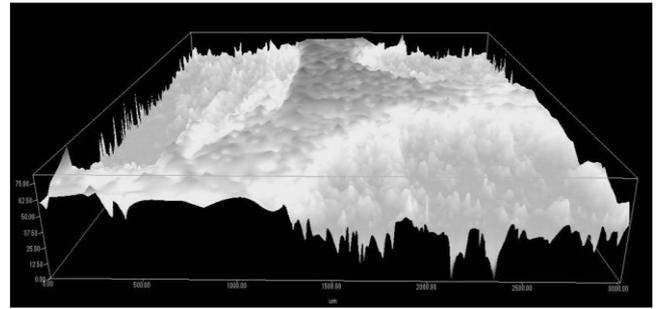
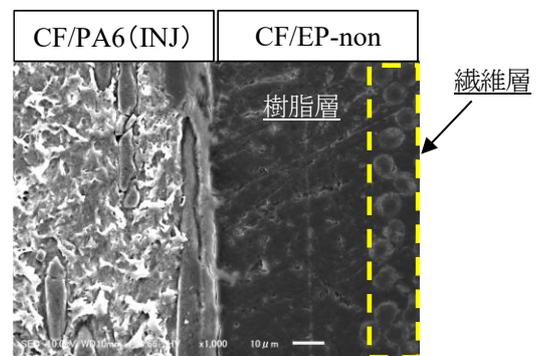


図 5 CF/EP-BT インサート材接合面の三次元解析画像 (縦  $3 \text{ mm}$  × 横  $3 \text{ mm}$  × 高さ  $80 \mu\text{m}$ )

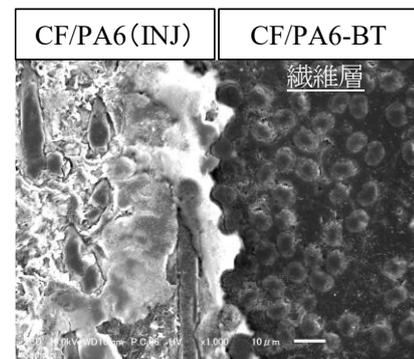
よりも約  $20 \mu\text{m}$  低いことが観察された。また繊維束領域と樹脂領域のそれぞれに微細な凹凸が観察され、CF/EP-BT インサート材接合面は、領域間の大きな凹凸とブラスト処理による微細な凹凸が複合化した表面であることが分かった。CF/EP-BT の接合強度は、大小の凹凸が複合化したインサート材接合面と CF/PA6 (INJ) とのアンカー効果により、CF/EP-non と比較して約 1.5 倍高くなったと考えられる。また、この傾向はインサート材として織物の連続繊維 CFRP を用いる場合に発現すると考えられる。

#### 3.2.2 試験片接合界面観察

CF/EP-non と CF/EP-BT の試験片側面の SEM 像を図 6(a)、(b) にそれぞれ示す。図中の左側の領域が CF/PA6 (INJ)、右側がインサート材である。



(a) CF/EP-non



(b) CF/EP-BT

図 6 試験片側面の SEM 像

図 6(a)より、CF/EP-non インサート材の接合面には母材の樹脂層があり、接合面から約 40  $\mu\text{m}$ 離れた点線で囲う領域に炭素繊維の繊維層が見られた。CF/EP-non において、CF/PA6 (INJ) は平滑なインサート材樹脂層と接合していた。

一方、図 6(b)より、CF/EP-BT インサート材の接合面には繊維層が見られた。CF/EP-BT において、CF/PA6 (INJ) はブラスト処理により露出したインサート材繊維層と接合していた。ブラスト処理したインサート材を用いたインサート成形品の接合界面は、上記のような接合状態であるため、アンカー効果により接合強度が向上したと考えられる。

#### 4 まとめ

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維CFRP のインサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP インサート材に CF/PA6 (INJ) をインサート成形し、接合強度評価と試験片観察を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) インサート材の母材に熱可塑性樹脂である PA6、TPU を用いた試験片は、接合界面が熔融することで高い接合強度を示した。
- (2) インサート成形時に接合面が熔融しない EP でもブラスト処理により接合強度が向上した。
- (3) ブラスト処理による接合強度向上は、①繊維束領域-樹脂領域間の大きな凹凸とブラスト処理による微細な凹凸が複合化した表面のアンカー効果と、②ブラスト処理により部分的に露出したインサート材繊維層と CF/PA6 (INJ) の接合によるものと考えられる。また、この傾向はインサート材に織物の連続繊維 CFRP を用いる場合に発現すると考えられる。

#### 【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
- 13) 岩田ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp35-38, 2023