

熱可塑性 CFRP（炭素繊維複合材料）の立体成形技術の確立（第2報）

道家 康雄、千原 健司、仙石 倫章、萱岡 誠、西村 太志

Study of the three-dimensional molding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (II)

Yasuo Doke, Kenji Chihara, Tomoaki Sengoku, Makoto Kayaoka and Futoshi Nishimura

熱可塑性CFRPは、易加工性・短時間成形・リサイクル性等の優位点があり、従来、熱硬化性CFRP製品を加工していなかった企業が参入を検討している。本研究では熱可塑性CFRPの立体成形技術の確立と蓄積を目的とし、プレス成形条件を検討する。本年度は、半球モデル金型と電動サーボプレスを用い、クロス材熱可塑性CFRP（以下、「クロス材CFRTP」と表記）のφ65mm円試験片をプレス成形した。昨年度の130mm角試験片のプレス成形と同様、材料の予備加熱温度はマトリックス樹脂の融点以上、金型温度は80℃、プレス速度は200mm/s、において良好な成形品を得ることができた。

また、同様の設備により一方向性熱可塑性CFRP（以下、「UD-CFRTP」と表記）のプレス成形を行い、クロス材CFRTPの結果と比較したところ、予備加熱温度及び金型温度は同様の条件で良好な成形品を得た。しかし、プレス速度はUD-CFRTPでは10mm/s（実験条件中の最低速度）で、良好な成形品となる傾向があった。熱可塑性CFRPの成形では、炭素繊維の構成を考慮し、温度とプレス速度の条件を組み合わせた成形条件の設定が必要である。

1. はじめに

炭素繊維複合材料（CFRP）は、軽量で高強度という特性を活用して、航空宇宙分野や風力発電、スポーツ用品等に利用されている。近年、航空機・次世代自動車産業を中心に、CFRPの更なる利用拡大に向けて研究開発が進められている。特に熱可塑性CFRPは、従来の熱硬化性CFRPと違い、短時間での成形が可能であるとともに、リサイクルにも適しているため、量産製品への応用が期待されている¹⁾。

これまで熱硬化性CFRPの加工技術（成形・切削・穴あけ等）は、企業や研究機関で技術開発が行われ、ノウハウが蓄積されてきた。当所においても、文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム事業における研究で、CFRPの穴あけ装置を開発した²⁾。しかし、熱可塑性CFRPは現段階では一般に普及していない最先端の材料であることから、加工技術や評価方法の情報が不足している。特に製品化にあたっては、曲面立体形状の成形技術が重要な課題となっている。

本研究では、熱可塑性CFRPの基礎的な成形技術の確立とデータの蓄積を目的とし、モデル金型を用いたプレス成形条件の検討と成形品の評価を行っている。昨年度、クロス材CFRTPの基礎的なプレス成形技術として、130mm角試験片を半球モデル金型と電動サーボプレスを用いてプレス成形した結果を報告した³⁾。クロス材CFRTPのプレス成形条件設定に必要な指針を得ることはできたが、多様な成形例に対応するためには、更なるデータの蓄積が必要である。本年度は、クロス材CFRTPのφ65mm円試験片及びUD-CFRTPの130mm角試験片でプレス成形した結果を報告する。

なお、本報告は第63回高分子討論会（高分子学会）

及び第22回秋季大会（プラスチック成形加工学会）における発表^{4) 5)}をまとめた内容である。

2. 実験

2. 1 クロス材CFRTPのプレス成形

2. 1. 1 試験片

クロス材CFRTPは、マトリックス樹脂がPA66である熱可塑性CFRP（Bond-Laminates製TEPEX dynalite201、以下、「CF/PA66」と表記）の板材（厚さ2mm）を用いた。試験片は、ウォータージェット加工機（Flow international corporation製FlowMach3 1313b-XD）によりφ65mm円形に切り出した（以下、「φ65mm円CF/PA66試験片」と表記）。

2. 1. 2 プレス成形

φ65mm円CF/PA66試験片を成形治具で挟み、IRオーブン（ヤマト科学（株）製DIR631）で予備加熱した後、半球モデル金型（図1）と電動サーボプレス（（株）放電精密加工研究所製ZENFormer MPS675DS）を用いてプレス成形した。予備加熱温度は、260℃、280℃、300℃、320℃、金型温度は、30℃、80℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/sの各条件を、適宜、組合せて実験をした。

2. 2 UD-CFRTPのプレス成形

2. 2. 1 試験片

マトリックス樹脂がPA6であるUD-CFRTP（以下、「CF/PA6」と表記）のシート材（TenCate製UD-CARBON/PA6 TAPE）を130mm角に切断し、炭素繊維の方向が「0°/90°/90°/0°」となるように4枚重ね、この操作を4回繰り返すことで16枚のシートを

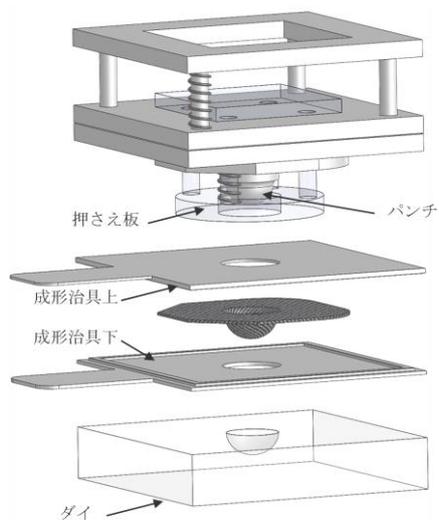


図1 半球モデル金型概要図

積層した。積層シートを熱プレス（240℃、10分間予備加熱後 1MPa で 1分間保持）することで厚さ 2mm の CF/PA6 積層板を作製し、成形用試験片（以下、「130mm 角 CF/PA6 試験片」と表記）とした。

2. 2. 2 プレス成形

130mm 角 CF/PA6 試験片を成形治具で挟み、IR オープンで予備加熱した後、半球モデル金型と電動サーボプレスを用いてプレス成形した。マトリックス樹脂が PA6（融点 225℃）であることを考慮して、予備加熱温度は、220℃、240℃、260℃、280℃、金型温度は、30℃、80℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/s の各条件を、適宜、組合せて実験をした。

2. 3 成形品の評価

成形品外観及び切断面は、目視により評価した。成形品内部は X 線 CT システム（エクストロン・インターナショナル（株）製 Y.CT PrecisionS）により非破壊検査をした。また、成形品内部の炭素繊維を観察するため、樹脂に埋設して研磨した試験片を、金属顕微鏡（（株）ニコン製 光学顕微鏡 LV-UDM）により観察した。

3. 結果及び考察

3. 1 φ65mm 円 CF/PA66 試験片のプレス成形

3. 1. 1 予備加熱温度の効果

プレス速度を 200mm/s、金型温度を 80℃と一定とし、予備加熱温度を変化させた成形品の外観を図 2 に示す。予備加熱温度 260℃では半球部周辺に大きな折れ皺が発生するとともに、半球底部に割れが発生した。これは、材料温度が低く十分に軟化していなかったため、成形時、試験片に負荷がかかり、無理な変形をしたためで

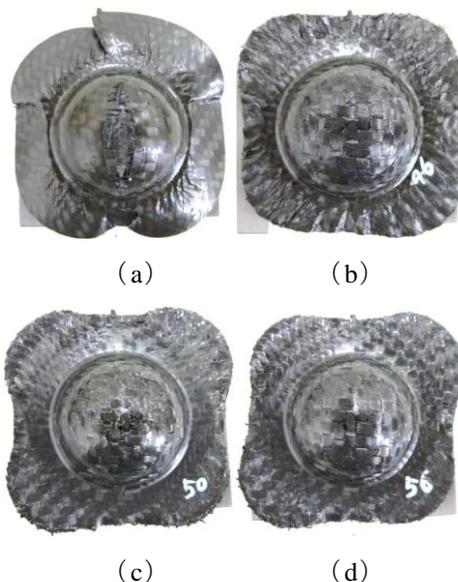


図2 予備加熱温度の違いによる CF/PA66 成形品
プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃、
予備加熱温度:260℃ (a) , 280℃ (b) ,
300℃ (c) , 320℃ (d)

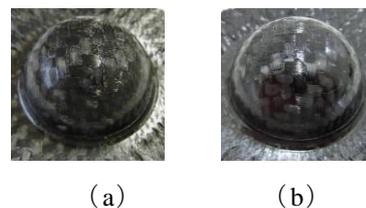


図3 金型温度の違いによる CF/PA66 成形品
予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、
金型温度:30℃ (a) , 80℃ (b)

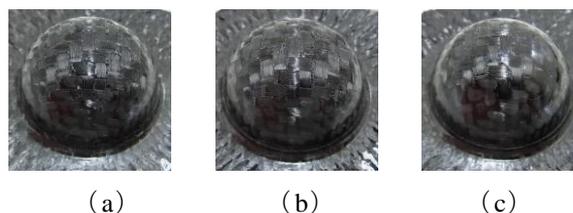


図4 プレス速度の違いによる CF/PA66 成形品
予備加熱温度:280℃、プレス速度:10mm/s (a) ,
100mm/s (b) , 200mm/s (c)

ある。予備加熱温度が 280℃以上では、割れることなく半球状に成形が可能であった。この結果は CF/PA66 の 130mm 角試験片（以下、「130mm 角 CF/PA66 試験片」と表記）と同様であり、φ65mm 円試験片においても PA66 の融点（265℃）以上に充分加熱することで立体成形が可能であることがわかった。

3. 1. 2 金型温度の効果

予備加熱温度を 280℃、プレス速度を 200mm/s で一定とし、金型温度を変化させた成形品の外観を図 3 に示す。半球底部の光沢を比較すると金型温度が 80℃における成形品の方が良品であった。本結果も 130mm 角 CF/PA66 試験片と一致しており、金型温度は高温である方がプレス成形には有利である。

3. 1. 3 プレス速度の効果

予備加熱温度を 280℃、金型温度を 80℃に一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図 4 に示す。プレス速度にかかわらず、半球形状への成形は可能であったが、半球底部の光沢を比較すると、プレス速度 200mm/s における成形品が最も良品であった。本結果も 130mm 角 CF/PA66 試験片と一致しており、良好な成形品を得るためには、試験片形状によらず、短時間でのプレス成形が有利であると考えられる。

3. 1. 4 成形品内部の評価

本実験において外観が良好であった成形品の一例（加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s、金型温度：80℃）の X 線 CT 像を図 5、切断面観察写真を図 6 (a)、切断面を拡大した金属顕微鏡観察像を図 6 (b) に示す。炭素繊維層間の剥離空隙は認められなかったが、炭素繊維と樹脂の界面の一部に空隙を確認した。

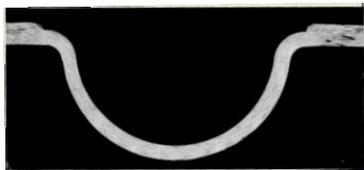


図 5 成形品（予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の X 線 CT 像

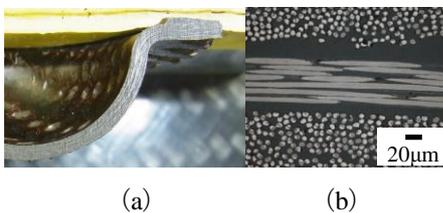


図 6 成形品（予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の切断面観察写真 (a) 及び金属顕微鏡観察画像 (b)

3. 2 130mm 角 CF/PA6 試験片のプレス成形

3. 2. 1 予備加熱温度の効果

プレス速度を 10mm/s、金型温度を 80℃と一定とし、予備加熱温度を変化させた成形品の外観を図 7 に示す。予備加熱温度 220℃では、半球周



(a) (b)



(c) (d)

図 7 予備加熱温度の違いによる CF/PA6 成形品
プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃、
予備加熱温度:220℃ (a) , 240℃ (b) ,
260℃ (c) , 280℃ (d)



(a) (b)

図 8 金型温度の違いによる CF/PA6 成形品
予備加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、
金型温度:30℃ (a) , 80℃ (b)



(a) (b) (c)

図 9 プレス速度の違いによる CF/PA6 成形品
予備加熱温度:240℃、金型温度:80℃、プレ
ス速度:10mm/s (a) , 100mm/s (b) , 200mm/s

辺部で炭素繊維が大きく乱れた成形品となった。これはクロス材 CFRTP と同様、材料温度が低く、マトリックス樹脂の流動性が低い状態でプレス成形したため、試験片が無理な変形をしたと考えられる。予備加熱温度が 240℃以上では、半球周辺部で炭素繊維が大きく乱れることなく成形が可能であった。本試験片のマトリックス樹脂は PA6 であり、その融点は 225℃である。予備

加熱温度が融点以上で成形が可能であったことは、マトリックス樹脂が PA66 (融点 265℃) であったクロス材 CFRTP と同様の結果となった。

3. 2. 2 金型温度の効果

加熱温度を 240℃、プレス速度を 10mm/s で一定とし、金型温度を変化させた成形品の外観を図 8 に示す。成形品底部の光沢を比較すると金型温度が 80℃における成形品の方が良品であり、金型温度は高温が有利であるというクロス材 CFRTP の結果と一致した。

3. 2. 3 プレス速度の効果

予備加熱温度を 240℃、金型温度を 80℃ に一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図 9 に示す。プレス速度によらず、半球形状への成形は可能であった。しかし、半球底部の光沢を比較すると、クロス材 CFRTP では試験片形状によらず 200mm/s において相対的に良好な成形品を得たのに対し、本試験片 (UD-CFRTP) では 10mm/s において良好な成形品を得た。これは、炭素繊維素材の構成の違いが原因であると考えられる。プレス成形では、マトリックス樹脂が容易に変形できる温度の保持が必要であるため、一般に高速成形が有利である。今回、遅いプレス速度 (10mm/s) で外観の光沢が最も良好な成形品が作製できたことは、単に材料温度の優位性だけで成形条件を設定してはいけないことを示唆している。CFRTP の最適なプレス成形条件を考えるためには、素材構成ごとに温度とプレス速度の条件を組み合わせたデータを蓄積する必要がある。

3. 2. 4 成形品内部の評価

本実験において、外観が良好であった成形品の一例 (加熱温度: 240℃、プレス速度: 10mm/s、金型温度: 80℃) の X 線 CT 像を図 10、切断面観察写真を図 11 (a)、切断面を拡大した金属顕微鏡観察像を図 11 (b) に示す。炭素繊維層間の剥離は認められなかったが、金属顕微鏡観察において多くの微細な空隙を確認した。CFRTP のプレス成形では、外観上、良好な成形品であっても、内部に空隙が多い場合があるため、成形品の外観と内部の両方を評価し、成形条件を検討する必要がある。

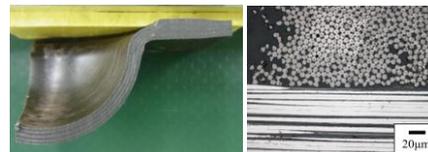
4. まとめ

本研究により次の結果を得た。

- 1) クロス材 CFRTP である $\phi 65\text{mm}$ 円 CF/PA66 試験片のプレス成形では、検討した条件中、予備加熱温度は 280℃以上、金型温度は 80℃、プレス速度は 200mm/s において良好な成形品を得ることができ、同素材の 130mm 角試験片と同じ結果となった。同素材の半球モデル金型によるプレス成形では、試験片形状に関わらず成形条件の設定指針は同じで良いことがわかった。



図10 成形品 (予備加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃) の X 線 CT 像



(a) (b)

図11 成形品 (加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃) の切断面観察写真 (a) 及び金属顕微鏡観察画像 (b)

- 2) UD-CFRTP である 130mm 角 CF/PA6 試験片のプレス成形では、検討した条件中、予備加熱温度は 240℃以上、金型温度は 80℃、プレス速度は 10mm/s において良好な成形品を得ることができた。この結果を 130mm 角 CF/PA66 試験片と比較すると、予備加熱温度はマトリックス樹脂の融点以上、金型温度は高温ということで、同様の傾向が見られたが、プレス速度については逆の結果となった。これは、熱可塑性 CFRP の素材構成の違い (クロス材と一方向性材) による炭素繊維の動き易さが一因と考えられる。熱可塑性 CFRP のプレス成形では、素材構成ごとに温度条件とプレス速度条件を組み合わせた成形条件の設定とデータの蓄積が必要である。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、金型製作にご協力いただいた(株)岐阜多田精機様に深く感謝いたします。

本研究遂行にあたり、関連情報を提供していただいた太平洋工業 (株) 様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 熱可塑性 CFRP の最新プレス加工技術, プレス技術, Vol.51, No.7, pp.17-39, 2013
- 2) 柘植ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 1 号, pp.20-23, 2013
- 3) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.35-38, 2014
- 4) 道家ら, 高分子学会予稿集, Vol.63, No.2, pp.7722-7723, 2014
- 5) 道家ら, 成形加工シンポジウム'14 予稿集, pp.471-472, 2014