

熱可塑性 CFRP (炭素繊維複合材料) の立体成形技術の確立 (第 1 報)

道家 康雄、西垣 康広、千原 健司、萱岡 誠、西村 太志

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

Yasuo Doke, Yasuhiro Nishigaki, Kenji Chihara, 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を取り扱っていなかった企業が参入を検討している。熱可塑性CFRPを単純に曲げる技術は存在するが、3次元的な曲面形状を成形することは難しく、先行して成形技術を確認することが必要である。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、評価試験片成形用金型（以下、「モデル金型」と表記）を作製し、電動サーボプレスを用いて市販の熱可塑性CFRPのプレス成形条件を検討した。この結果、材料加熱温度は280℃以上、プレス速度は200mm/s（装置の最高速度）、金型温度は80℃で良好に成形できることを確認した。

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が、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^{1,2)}。

これまで熱硬化性CFRPについては、成形方法から切断・穴あけ等の機械加工、表面処理まで、各企業や研究機関で技術開発が進み、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開発で、CFRPの穴あけ装置を開発した³⁾。しかしながら、熱可塑性CFRPは、現段階では一般市場に普及していない最先端の材料であることから、成形や加工および評価技術に関して研究開発情報が不足しており、関係業界でどのような製品に応用できるかを模索している段階である。これまで、熱可塑性CFRPの切削技術については研究を進めてきた⁴⁾が、今後、熱可塑性CFRPの製品化を検討する上で、成形技術、特に曲面立体形状を成形する技術が重要となる。

本研究では、熱可塑性CFRPの成形加工基礎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評価を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 試験片

材料は、炭素繊維クロス材とPA66の複合材料である熱可塑性CFRP (Bond-Laminates製 TEPEX dynalite201、以下「CF/PA66」と表記) を用いた。各実験に用いる試験片は、ダイヤモンド

ソーによりCF/PA66板材から100mm×100mm×2mmと130mm×130mm×2mmのサイズに切り出した（以下、前者を「100mm角CF/PA66試験片」、後者を「130mm角CF/PA66試験片」と表記）。

2.2 材料加熱方法

2.2.1 材料加熱源の検討

IRオープン(ヤマト科学(株)製DIR631)で加熱し、材料温度の変化を測定した。100mm角CF/PA66試験片を2枚重ね、その中間に熱電対を設置して温度を測定した。なお、加熱源として、「熱風による雰囲気加熱のみ」、「IRヒーター加熱のみ」、及び「IRヒーターと熱風の併用」の3種類で実験を行い、材料温度の上昇を比較した。

2.2.2 加熱冷却による材料の変化の検討

100mm角CF/PA66試験片をIRオープンにより280℃に加熱した直後、水中で急冷した試験片の変化を検討するために、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)により内部構造を観察した。また、加熱後の材料の化学的な変化を検討するために、FT-IR((株)島津製作所製IRPresige-21)により、赤外吸収スペクトルを測定した。

2.3 成形モデル金型

2.3.1 金型仕様設計

別途、秘密保持契約を締結した自動車部品製造企業の協力のもと、自動車部品成形に必要な成形条件を検討するためのモデル金型を設計した。

2.3.2 金型製作

仕様を基本として、別途、共同研究契約を締結した(株)岐阜多田精機と共同でモデル金型の詳細設計を行った。また、本設計に基づき、同社において金型を製作した。

2. 4 プレス成形

2. 4. 1 プレス成形実験

130mm 角 CF/PA66 試験片を成形治具に挟んだ状態で IR オープンにて加熱し、モデル金型を取り付けた電動サーボプレス ((株)放電精密加工研究所製 ZENFormer MPS675DS) (図 1) を用いてプレス成形した。なお、加熱温度は、260℃、280℃、300℃、320℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/s、金型温度は 30℃、80℃の各条件を、適宜、組合せて実験をした。



図 1 電動サーボプレス
(株)放電精密加工研究所製
ZENFormer MPS675DS

2. 5 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 材料加熱方法

3. 1. 1 材料加熱方法の検討

IR オープンにより材料を加熱する際、材料温度がどのように上昇するか解明を試みた。ヒーター設定温度を 350℃とし、材料温度が 280℃以上に上昇するまでの結果を図 2 に示す。熱風のみによる雰囲気制御では、材料の温度上昇が非常に遅く、60 分間経過後も 250℃に達する程度であった。一方、IR ヒーターと雰囲気制御の両方を利用すると、280℃に達する時間が約 14 分間まで短

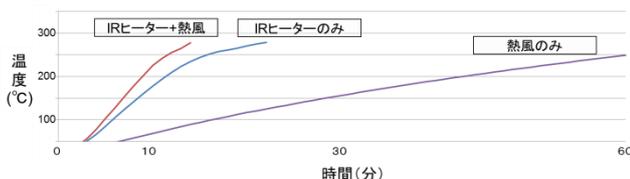
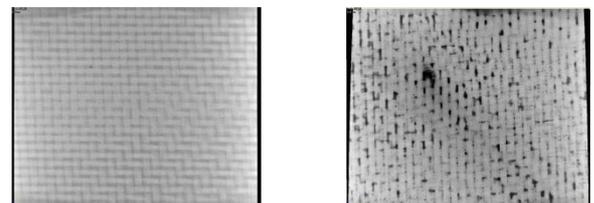


図 2 IR オープン加熱による材料温度変化
(ヒーター設定温 : 350℃)

縮することができた。このことから、CF/PA66 を短時間で加熱するためには、IR ヒーターが有効であることを確認した。

3. 1. 2 加熱冷却による材料の変化の検討

IR オープンによる加熱急冷後の CF/PA66 試験片の X 線 CT 画像を図 3 に示した。未処理試験片では、炭素繊維クロスの織り目は整然としており、繊維間の隙間が少なかったのに対し、加熱急冷後では炭素繊維間の隙間が多く観察された。これは、加熱によりマトリックス樹脂 (PA66) が軟化して炭素繊維間が広がり、織り目が乱れた状態のまま急冷により樹脂が固化したため、炭素繊維間の空隙が多くなったと考えられる。この炭素繊維の乱れや空隙は、試験片が軟化している状態でプレス成形することで減少させることができると考えられる。また、IR オープンによる材料加熱では、加熱温度が高くなると材料表面に茶色い着色が認められた。これは材料の酸化劣化によるものと考えられる。そこで、材料表面の赤外吸収スペクトルを測定した結果を図 4 に示す。材料が酸化劣化した場合、1750 cm^{-1} 付近 (図 4 丸印付近) に吸収ピークが現れるが、本測定では明確なピークが認められなかった。つまり、目視で確認できる程度の着色は認められるが、材料を大きく劣化させるような変化ではないと考えられる。



未処理 280℃
図 3 IR オープンによる加熱急冷後の CF/PA66

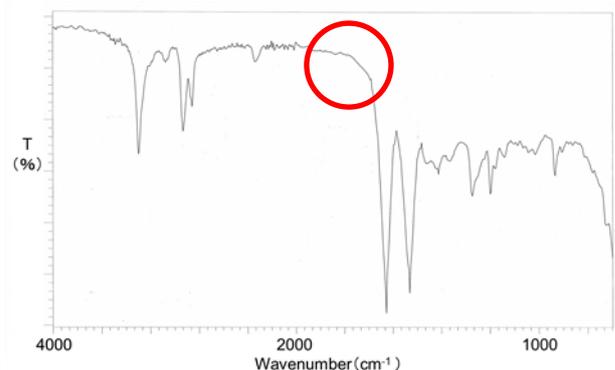


図 4 加熱急冷した CF/PA66 表面の赤外吸収スペクトル

3. 2 プレス成形

3. 2. 1 金型及び治具

作製したモデル金型の概要図を図 5 に示す。本金型を用いて、CF/PA66 板材を $\phi 30\text{mm}$ の半

球形状にプレス成形することが可能であることを確認した。また、図 5 中の成形治具は材料の加熱後の運搬を容易にするとともに、材料の温度低下を防ぐ効果があった。今回のプレス成形では材料の温度管理が重要であるため、本成形治具の利用は非常に有意義であると考えられる。

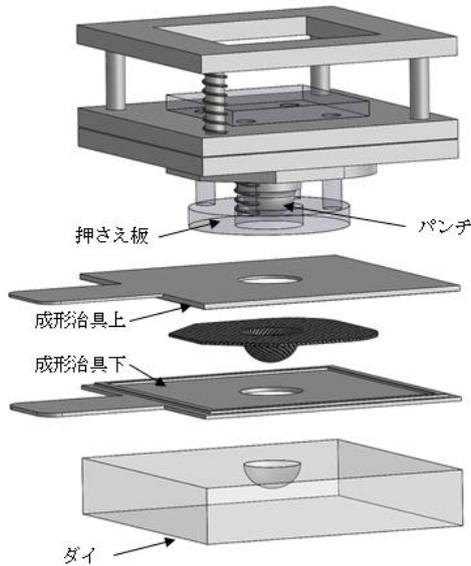


図 5 モデル金型概要図

3. 2. 2 材料加熱温度の効果

プレス速度を 200mm/s と一定とし、材料加熱温度を変化させた成形品の外観を図 6 に示す。加熱温度 260℃では成形品周辺に大きな折れ皺が発生した。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ある。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。PA66 の融点は約 265℃であり、融点以上に充分加熱することが必要である。今回の材料 (CF/PA66) では、材料の運搬時の熱損失も考慮して、280℃以上に加熱すれば立体成形が可能となることがわかった。しかしながら、成形した試験片は底部表面が光沢不良となった。これは立体成形によりマトリックス樹脂が塑性変形し、金型底面のマトリックス樹脂が不足したことにより、底面に十分なプレス圧が伝わっていないことが原因と考えられる。加熱温度を高くすることにより樹脂の流動がよくなり、少しは改善が見られた。しかし、加熱が高温すぎると材料表面が着色 (酸化) するという問題があり、光沢不良は加熱温度の調節だけでは改善できなかった。その他、光沢不良対策として、成形品底部分のマトリックス樹脂不足を補う方法として試験片の厚みを増加さ

せる、また、金型に成形品部分の隙間厚を調整できる機能を持たせる等が考えられ、今後、更なる検討が必要である。

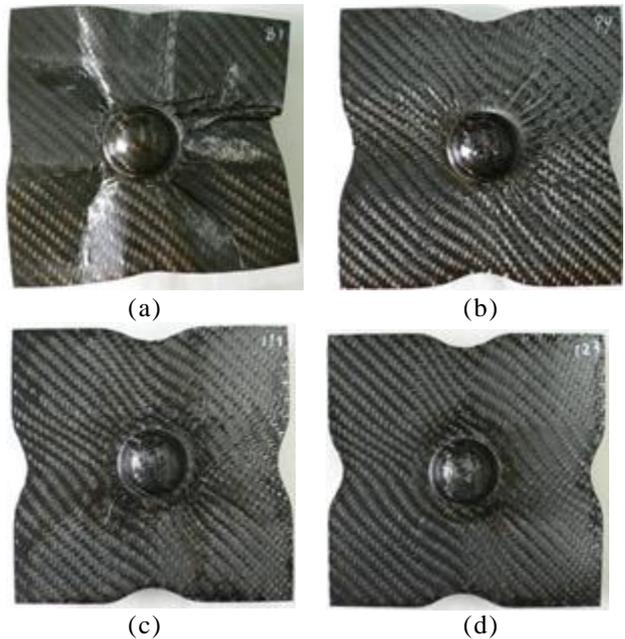


図 6 加熱温度の違いによる CF/PA66 成形品
プレス速度：200mm/s、加熱温度：260℃(a)、
280℃(b)、300℃(c)、320℃(d)

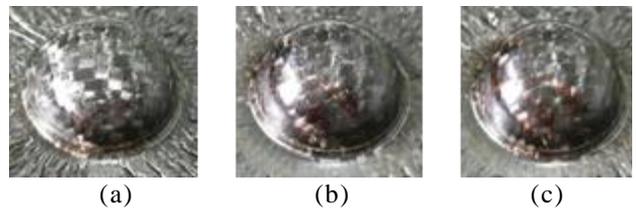


図 7 プレス速度の違いによる CF/PA66 成形品
加熱温度：280℃、プレス速度：10mm/s(a)、
100mm/s(b)、200mm/s(c)

3. 2. 3 プレス速度の効果

加熱温度を 280℃と一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図 7 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、プレス速度 200mm/s において比較的良好な成形品を成形することができた (前述のとおり、半球形状底部において、マトリックス樹脂の不足による光沢不良は認められる)。事前加熱によるプレス成形では、材料を金型に設置すると材料温度が降下し、プレス時に上部金型が材料に接触すると、更に温度が降下する。温度が低くなると材料が変形しにくくなるため、短時間でプレス可能な条件が良いと考えられる。今回の実験ではプレス速度は材料の温度変化に大きく影響しており、高速での成形が有利となると考えられる。

3. 2. 4 金型温度調節

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 8 に示す。いずれも半球形状への成形は可能であったが、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ることがわかった。前述のとおり、CF/PA66 の立体成形では、成形時の材料温度が成形性に大きく影響している。材料の温度低下を防ぎ、マトリックス樹脂が十分に軟化している状態でプレス成形するためには、金型温度も高い方が有利である。本実験から、金型温度を 80℃にすることは成形性の改善に有効であることがわかった。材料の成形可能温度を考慮すると、金型温度は更に高い方が有利であると考えられるが、高温では成形品の固化が不十分となることが予想される。金型温度の設定では、成形性の優位性と成形品の固化条件を考慮して検討する必要がある。

3. 2. 5 成形品内部の評価

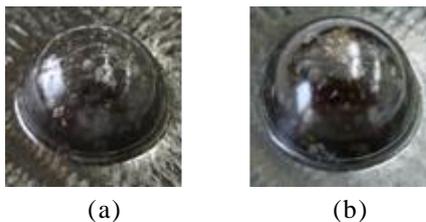


図 8 金型温度の違いによる CF/PA66 成形品
加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s
金型温度：30℃(a)、80℃(b)

本実験において、最も外観が良好であった成形品（加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s、金型温度：80℃）の X 線 CT 像を図 9 に示す。炭素繊維層間の剥離による空隙は認められず、内部においても良好な成形品であることが示された。一方、成形品の切断面観察写真を図 10(a) に示す。炭素繊維層間の剥離は認められず、成形品内部は綺麗な層構造を維持している。これは X 線 CT の結果と一致しており、非破壊検査による内部層構造評価が妥当であったことがわかる。また、成形品底部の切断面（図 10(a)丸印）を拡大した金属顕微鏡観察画像を図 10(b)に示す。同一層内において、炭素繊維束が一様に分布している部分と、炭素繊維の密度が低下している部分が観察されたが、炭素繊維と樹脂との界面剥離による空隙は認められなかった。製品強度をシミュレーションする際には、炭素繊維と樹脂との界面剥離が無いだけでなく、炭素繊維の分布が均一となることが必要であると考えられる。今後、成形条件を確立するにあたり、成形品内部の炭素繊維分布状態も評価する必要がある。

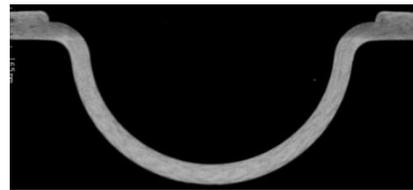


図 9 成形品（加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の X 線 CT 像

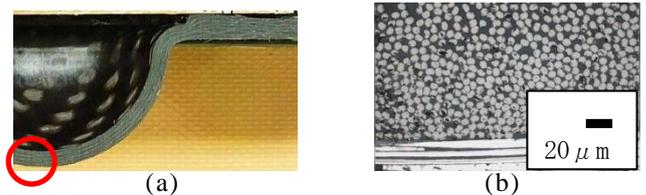


図 10 成形品（加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の切断面観察写真(a)及び金属顕微鏡観察画像(b)

4. まとめ

本研究により次の結果を得た。

- 1) 熱可塑性 CFRP の加熱方法において、IR ヒーターが加熱時間の短縮に有効であることを確認した。
- 2) 加熱により材料表面が変色するが、IR 測定では検出ができない程度であった。
- 3) 熱可塑性 CFRP のプレス成形条件を検討するために、φ30mm の半球形状を成形するためのモデル金型を作製した。
- 4) モデル金型による熱可塑性 CFRP (CF/PA66) のプレス成形において検討した条件の中では、材料加熱温度は 280℃以上、プレス速度は 200mm/s、金型温度は 80℃において良好な成形品を得ることができた。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、共同で金型製作していただいた(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) 高橋ら,持続可能社会に向けた次世代熱可塑性 CFRP 入門 セミナー資料,Science & Technology, 2012
- 2) 熱可塑性 CFRP の最新プレス加工技術, プレス技術, Vo;51, No.7, pp17-39,2013
- 3) 柘植ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.1, pp20-23,2013
- 4) 加賀ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.1, pp24-27,2013