

3Dプリンタを用いたCFRP内圧成形技術の開発

小川 仁*, 池田 博行*

抄 録

金型製作の簡略化と複雑形状を有する3次元CFRP中空パイプ部品の試作を行うことを目的として、FDM方式の3Dプリンタを用いた樹脂型の試作と本樹脂型を用いたCFRPの内圧成形技術の開発について取り組んだ。樹脂型を3Dプリンタで造形するにあたって、樹脂材料の温度や積層構造の違いによる材料特性を評価した結果、温度の上昇とともに引張強さと弾性率が低下し、また、積層構造により材料特性が変化する異方性を示すことが確認できた。また、3Dプリンタにて造形した樹脂型を用いたCFRPパイプの内圧成形では、直管部では比較的良好な仕上がり面であったが、曲げ管では湾曲部においてしわや屈服等の成形不良が見られた。

1 はじめに

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、軽量、高強度、さらに耐食性が高いなどその優れた材料特性からスポーツ分野、航空機・自動車などの輸送機器分野、さらにロボット部品や機械装置などの一般産業分野まで利用が拡大している。しかし、CFRP部品の製造はオートクレーブやホットプレスなど高価な成形設備を必要とする場合が多く、成形設備以外にも成形に必要な金型製作にノウハウを有する、機械加工が難しいなど課題が多く、新規参入する企業は少ない状況である。

一方、近年、ものづくりの現場において3Dプリンタの注目度が上昇し、製品試作のモデルや模型の範囲を超えて実際に造形物が製品になる事例も増えている。また、3Dプリンタにより樹脂製品の成形型を造形する事例もあり、大量生産にまでその利用範囲が拡大している。

そこで、3Dプリンタを金型に適応した場合、CADモデルから直接造形できるため金型製作に係るコストや手間の簡略化、割型などの設計が自由に行えるなどの利点があり、複雑形状を有するCFRP部品の成形型として利用可能であると考えられた。本研究では、金型製作の簡略化と複雑形状を有するCFRPの3次元パイプ部品の試作を行うことを目的として、FDM（熱溶解積層）方式の3Dプリンタを用いた成形型の作製と、本成形型を用いたCFRPの内圧成形技術の開発について取り組んだ。

2 方法

2・1 3Dプリンタを用いた成形型の作製について

一般的なCFRP部品は、炭素繊維に熱硬化性エポキシ樹脂が含浸されたプリプレグを用い、これを所定の形状に切断し金型に積層した後、オートクレーブやホットプレスなどの成形設備を用いて加圧・加熱することにより成形される。熱硬化性エポキシ樹脂の硬化温度は約130℃であるため、成形型の耐熱温度は130℃以上が求められる。当センターで保有するFDM方式の3Dプリンタ（FORTUS400mc-S）の対応樹脂はABS、ポリカーボネート、ポリエーテルイミドの3種類であり、本研究ではCFRP成形用樹脂型の素材として荷重たわみ温度が153℃であるポリエーテルイミドを用いた。

FDM方式の3Dプリンタでは、図1に示したように溶融した熱可塑性樹脂をノズルから吐出し、同時にステージを所定の形状に走査し、これを上方に繰り返し実施することで3次元形状が造形されるため、積層の方向により材料特性が変化すると考えられる。

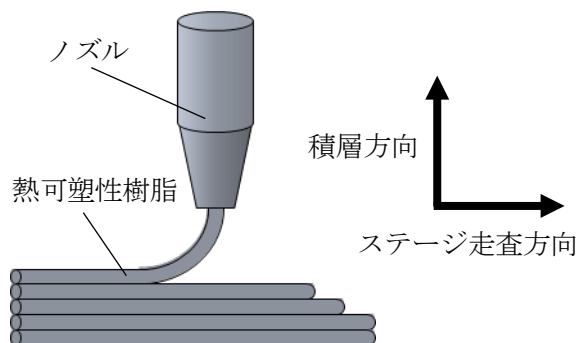


図1 FDM方式3Dプリンタの造形イメージ

* 機械技術担当

そこで、積層方向を変化させた3種類の引張試験片（図2）を作製した。試験片①は樹脂の積層ピッチと引張方向（長手方向）が垂直であり、試験片②は水平となる。試験片③は試験片の厚さ方向に積層され試験片②と同様な形状になると思われたが、先ず幅方向を直線的に積層し次に内部をクロス状に積層するという造形機特有の造形パターンで積層され、その表面性状は前者と全く異なったものであった。これら、3つの試験片について、引張強さと弾性率を評価するとともに、試験時の温度が材料特性に及ぼす影響を調べるため、恒温槽を用いて23℃、60℃、95℃および130℃の環境下での引張試験を実施した。

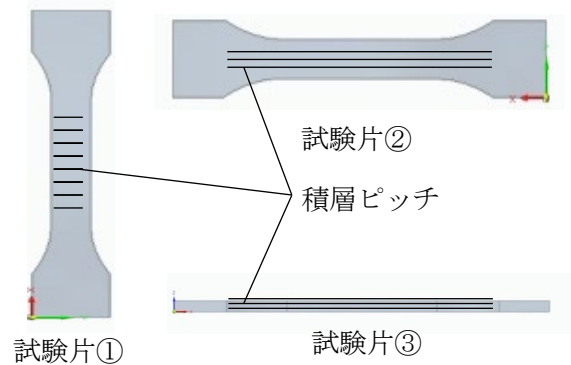


図2 引張試験片の造形方法

次に、引張試験により得られた材料特性に基づきCFRPパイプ成形用の樹脂型を設計し、有限要素解析（ANSYS ver.11）により成形時の応力および変形量を求め、樹脂型の肉厚を選定した。樹脂型は割型とし、外直径30mmのCFRPパイプを成形するために型中央部に直径30mmの半円筒溝を形成した。成形するCFRPパイプは直管と曲げ管の2種類とし、曲げ管については曲率半径60mmの湾曲部を設けた。また、それぞれの樹脂型をフランジで締結し直管と曲げ管が連続する連結管について有限要素解析を行った。図3に連結管の解析モデルを示した。メッシュ接点は134,449、要素数は60,216であった。モデルの片端を拘束し直径30mmの配管内部に0.5MPaの内圧を均等に与え、解析モデルに生じる変形量と応力（安全率）について評価した。

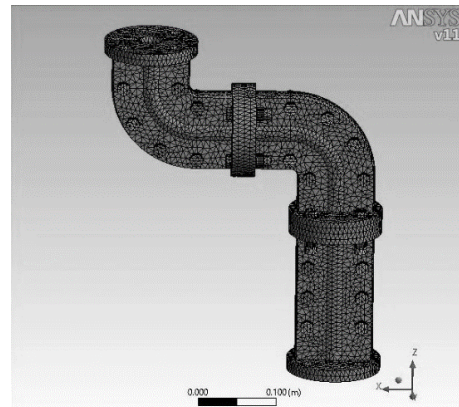
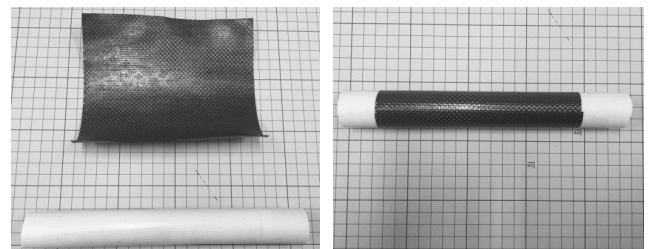


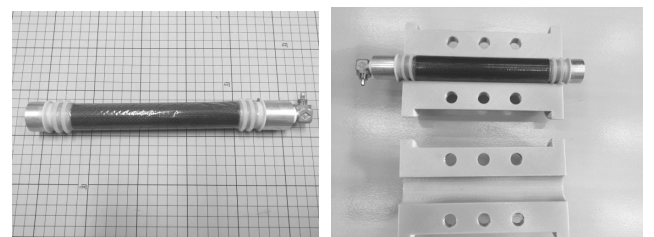
図3 3Dプリンタにより造形した樹脂型

2・2 CFRPパイプの内圧成形について

3Dプリンタにより成形した樹脂型を用いてCFRPの内圧成形を実施した。プリプレグには厚み0.19mmの一方向材（東レ株式会社製 P3252S-20）と厚み0.24mmのクロス材（東レ株式会社製 P6343B-05P）を用いた。プリプレグの積層は図4に示したように、耐熱且つ伸縮性のあるシリコンチューブ（日星電気株式会社製RSチューブ（内径26mm、肉厚1.5mm））に、先ず一方向材を4層（厚み0.76mm）巻付け、その上にクロス材を1層（厚み0.24mm）巻付けた。プリプレグの総厚さは1mmである。次に、成形時におけるエポキシ樹脂と成形型との溶着を回避するために、離型フィルムで被覆し、シリコンチューブの両端を空気漏れを防ぐためにシール処理を施した後樹

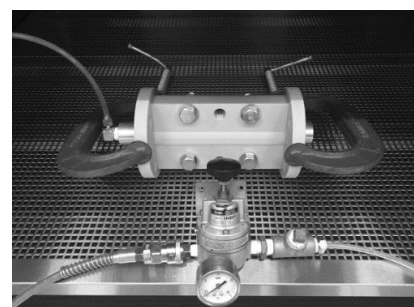


プリプレグの切断 シリコンチューブへの巻付け



離型フィルムによる被覆

樹脂型への設置



電気炉を用いた内圧成形

図4 CFRPパイプの内圧成形方法

脂型に投入した。この状態のまま樹脂型を電気炉に設置し、シリコンチューブの内側から 0.4MPa の内圧をかけ、130°Cで 1 時間加熱しエポキシ樹脂を硬化させた。

3 結果および考察

3・1 樹脂型の異方性および温度依存性について

図 5 および図 6 に積層方向を変化させた引張試験片を 3D プリンタにより造形し、23°C、60°C、95°C および 130°C に保持された恒温環境下で引張試験を行った場合の引張強さと弾性率を示した。引張強さは引張方向と樹脂の積層方向が 90 度となる試験片②が最も高く、積層方向が平行である試験片①に比べて 2 倍程度高い。また、いずれの試験片も試験温度の上昇とともに引張強さが低下し、CFRP の成形温度である 130°C の場合では 23°C の半分程度まで低下することが確認できた。一方、弾性率は試験片①と②が同程度であり、試験片③がわずかに低い値を示し、引張強さと同様に試験温度の上昇とともに低下する傾向を示した。

このように、樹脂型の素材であるポリアーテルイミドは温度の上昇とともに引張強さと弾性率が低下し、さらに、FDM 方式の 3D プリンタによる造形では積層方向により特性が異なる異方性を示すことが確認できた。実際に 3D プリンタにより樹脂型を造形する場合には、形状により積層構成が複雑に変化するため設計時の安全率は一般的な金属に比べ高めに設定しておく必要があると考えられる。

3・2 成型型の有限要素解析および造形について

有限要素解析における材料物性値は、図 5 および図 6 の結果から、CFRP の成形温度である 130°C での最も低い値を用い、また、ポアソン比を 0.36 とし、解析を行った。図 7 に樹脂型配管部の肉厚を 3mm とし、許容引張強さを 17.7MPa とした場合の応力状態（安全率）を示した。直管部に比べて曲げ管部で高い値を示し、最も応力が高い位置での安全率は約 3 となった。

CFRP の内圧成形では型内部から一定の静荷重が付与されるため、安全率 3 で樹脂型の破壊が生じないと想定し、解析結果に基づき配管部の肉厚を 3mm とし、実際に 3D プリンタにて樹脂型を造形した。

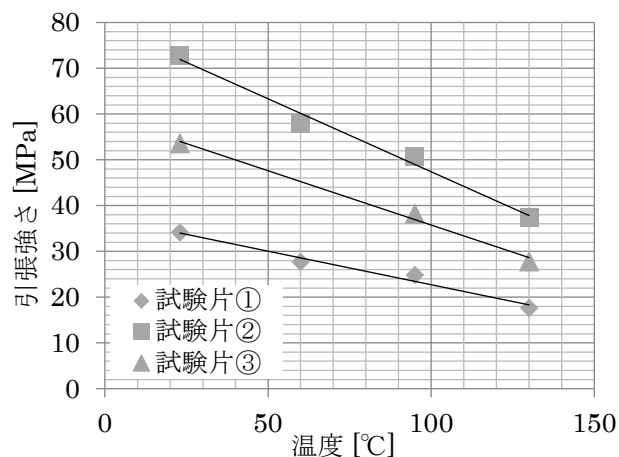


図 5 積層方向と試験温度の違いによる引張強さ

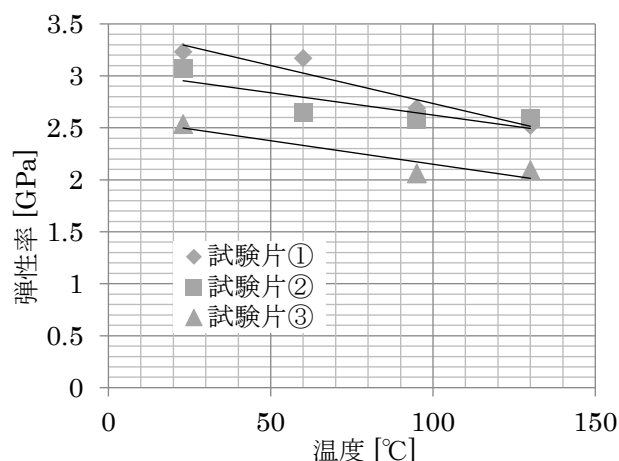


図 6 積層方向と試験温度の違いによる弾性率

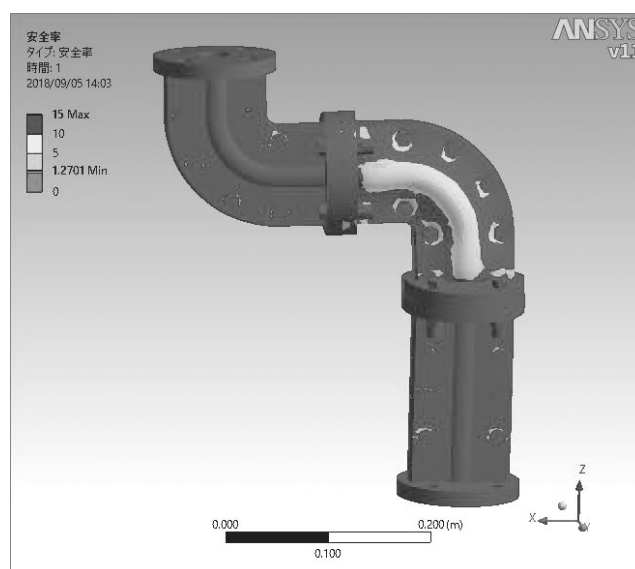


図 7 樹脂型の応力状態（安全率）解析結果

図 8 に 3D プリンタにて造形した直管と曲げ管を示した。1 組の割型を造形するのに要した時間は 17 時間程度であり、連結管は 34 時間で造形できた。造

形した樹脂型は一般的な金型に比べ強度や表面粗さおよび離型性は劣るものの、金型製作に係る時間や手間は大幅に削減できると考えられる。

3・3 CFRPパイプの内圧成形

樹脂型を用いて CFRP の直管および曲げ管、さらに連結型を用いて連結管を成形した。図 9 に連結管成形用の割型と CFRP プリプレグを積層するシリコンチューブを示した。フランジ部および割型は M12 サイズのボルトを用いて締結した。

図 10 に連結管を用いて成形した CFRP パイプの全体像、図 11 に直管部および曲げ管部の拡大像を示した。直管部は比較的良好な仕上がり面となり、樹脂型の積層ピッチが鮮明に転写されている。一方、曲げ管の湾曲部ではしわや屈折が発生し、これは CFRP プリプレグの外周に巻いた離型フィルムに起因したものである。離型フィルムを伸縮性のあるシリコンチューブに変化させたがしわや屈折の不良現象は改善できず、また、離型剤を樹脂型に塗布した場合には CFRP 成形品の離型が困難であった。湾曲部の曲率をもう少し大きくする必要があると考えられる。

4 まとめ

自由曲面を持つ複雑形状の CFRP パイプを 3D プリンタにより造形した樹脂型を用いて成形することを目的として、成形型に用いる樹脂材料（ポリエーテルイミド）の材料特性を評価した。FDM 方式の 3D プリンタによる造形では積層方向により引張強さや弾性率が異なり、さらに、試験温度の上昇とともにそれらの特性は低下することが確認できた。また、得られた材料特性を基に有限要素解析を用いて樹脂型を設計し、3D プリンタにより造形した。

造形した樹脂型を用いて CFRP 曲がりパイプを成形した結果、直管部では比較的良好な仕上がり面であったが、湾曲部、特に内側部においてしわや屈折などの成形不良が見られた。

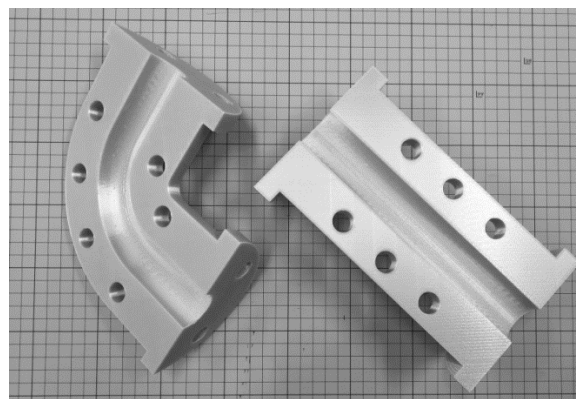


図 8 3D プリンタにより造形した樹脂型

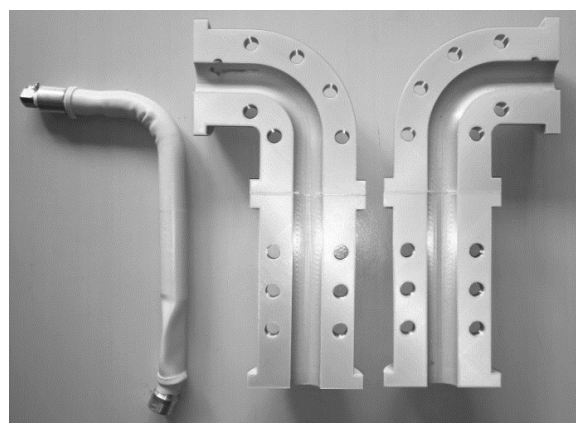
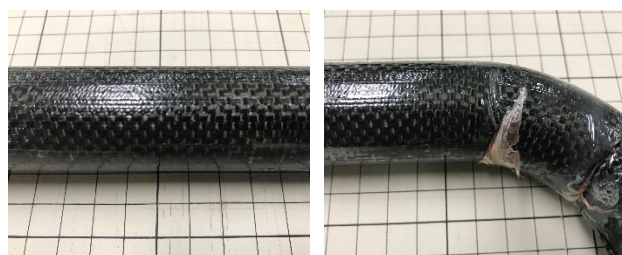


図 9 CFRP 内圧成形用シリコンチューブと樹脂型



図 10 連結樹脂型で成形した CFRP パイプ



直管部

湾曲部

図 11 直管部および湾曲部の拡大像