

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：55401
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17K06827
 研究課題名(和文) 3Dプリンターで積層造形したシート状プリフォームを立体折り加工して組立てる造形法

研究課題名(英文) Fabrication method to assemble three-dimensional preformed seats laminated and molded with a 3D printer

研究代表者
 山脇 正雄 (yamawaki, masao)
 呉工業高等専門学校・その他部局等・嘱託教授

研究者番号：70700128
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：強度改善に最適な強化繊維配置を設計し、複数層に分けてプリフォームを3Dプリンターで積層造形し、予備成形処理後に金型で一体化する造形手法を検討した。予備成形したプリフォームの直接形成方法を中心に研究を行った。マンドリル型の3Dプリンターの開発を行い、ボルトの試作では3Dプリンターおよび金型を用いた予備成形プリフォームを一体化する試作を実施した。

更に立体的なプリフォームを形成するためにロボットアーム型の3Dプリンターを開発した。材料供給モーターや変位計を実装し、3Dプリンターと同じような操作性で高精度な試作が可能であることを確認した。また造形の自由度を増すための短繊維強化CFRP材料の開発も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

繊維配置の最適設計を反映できるプリフォーム形成を直接形成できる技術を開発することができた。マンドリル型の3Dプリンターではボルトなどの試作では分割されたプリフォームを組み合わせることで有効性が確認できた。ロボットアーム型ではより汎用的で高精度な制御ができるようになり、今後の展開が容易になり適用事例を増やすことができるようになった。3DCADとの連携も視野に入ってきており、今後の立体成形技術として有用な成果が得られたと考えている。

研究成果の概要(英文)：We studied the molding method in which the preform was divided into multiple layers, laminated with a 3D printer, preformed, and then integrated with a mold. Layout of reinforcing fibers in preform are optimal designed for strength improvement. In particular, research has been conducted centering on the direct forming method of preformed preforms. We developed a mandrill type 3D printer, and in the trial production of bolts using CFRP filament, we conducted a trial production in which a preformed preform using the 3D printer and a mold was integrated using the hot mold.

We have also developed a robot arm type 3D printer to direct form a three-dimensional preform. It was confirmed that a material supply motor and a displacement meter were mounted, and high-precision prototypes were possible with the same operation as a 3D printer. A short fiber reinforced CFRP material was also developed to increase the freedom of shaping.

研究分野：材料工学 複合材料 設計・作成プロセス・加工

キーワード：3Dプリンター積層造形 CFRPプリフォーム ホットプレス処理 ロボットアーム形成 短繊維強化樹脂

1. 研究開始当初の背景

樹脂系材料を造形する 3D プリントは、装置価格の低下に伴い多くのユーザーに使われるようになってきた。しかしながら通常の樹脂ではその造形物の機械的強度が弱く、デザインの検証や強度があまり要求されない用途に限定されて普及してきている。このためスーパーエンジニアリング系の材料や強化繊維を含浸させたフィラメント材料が開発され、さらにそれに対応した専用の 3D プリントが開発され、一部の実用化が始まってきている。しかしながらその生産性が低いことに起因して形成物の大きさには制限があり量産を前提とした経済的な利用範囲は狭い。

一方で小型部品に対して樹脂製品が多く普及してきており、強度を改善するために短い繊維を強化樹脂として混入した材料が開発されている。しかし形成方法としては射出成型が利用されており、強化繊維の方向をそろえた形成ができないため、より強化繊維の異方性を有効に活用した強度改善には至っていないものと考えている。この領域に 3D プリントで繊維配置まで適正化して強度改善など技術的な課題が解決できれば、より高性能化を図りながら応用範囲の拡大を図ることができると考えた。

2. 研究の目的

この解決策として、3D プリントで強化繊維が最適配置されたプリフォームを形成し、それを金型で成型加工しながら一体化することで強度の高い小型部品ができるという発想を得て研究に着手することにした。小型部品の形状に対して強化する方向を定め、その方向に繊維が層内で配設できるように平面的なプリフォームを 3D プリントで形成し、金型を用いて予備成形を行う。その後、複数のプリフォームを重ね金型を用いて一体化成型することで、強化したい方向に繊維が配設された小型部品を実現することができる。通常は金型を用いた成形手法はコストアップになるため、実用化が難しい面がある。しかし、標準的な形状を対象とし、小型で強度が要求される用途を見出すことができれば、複数の製品を一度に金型で成型することができ製造コストを下げることができ実用的な製品の製造手段として本技術が有用になると考えている。本件研究ではプリフォームに適した形状を成形できる 3D プリント装置を開発し、プリフォームとしての最適形状の検討や組み立て方法を検討し、新しいものづくりの手法を研究することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、すでに開発が完了している CFRP 専用の 3D プリントを用いてプリフォームを形成、それを金型を用いて予備加工するところから実験に着手した。かさ歯車のようなターゲットを想定し、平面的なプリフォームから金型を用いた予備成形を試みた。この方式でもある程度の予備加工ができることが分かったが、目指す予備成形品の大きさやその精度を考えると、予備加工を自動化するためには金型とプレス方法に多大な手間とノウハウの蓄積が必要ながわかった。このため基本方針として、3 次元的なプリフォームを直接成型できる専用の 3D プリントを開発することに変更した。適用分野によって繊維配設の最適化が異なるため、ある程度装置を専用化する必要がある。本研究では 2 種類の 3D プリントを試作することにした。一種類目はマンドリル型のステージを持つ 3D プリントであり、2 種類目は直接立体成形ができるロボットアームを利用した 3D プリントである。マンドリル型の 3D プリントではボルトをターゲットとして円筒状のプリフォームを形成し、金型を用いて

ねじ山の最終成形を行った。ロボットアーム型では、3Dプリンタとしての射出を行うためのノズル部分をアームに実装し、汎用的な動作制御をおこなうためのソフトウェアの開発を行った。3次元形状を精度良く形成するためのセンサーをアームヘッドに装着し高精度な形成ができるようにした。さらに利用する材料として、連続繊維を用いたCFRPだけでなく、短繊維強化CFRPフィラメントの開発を行い、両方の材料を併用することで、強度を実現しつつ様々な形状を形成できるように研究を進めた。

4. 研究成果

4-1) プリフォームの予備成形実験

まず、平面的なプリフォームから、かさ歯車形状の予備成形実験を行った。図1は予備成形実験に用いた金型である。図2左はCFRP用3Dプリンタで連続繊維CFRPを積層造形した円環状のプリフォームであり、このプリフォームを加熱した金型を用いて図2右のように成形した。当初はこういった形状の複数の予備成形品を金型を用いて一体化して小型部品を形成することを目指していたが、この予備成形をするために多くの手間と労力を必要とし、汎用的な製造方法として活用することが難しいことから、予備成形したプリフォーム自体を3Dプリンタで直接的に形成する方向で研究を進めることに変更した。そのため3Dプリンタを開発し、小型部品の試作を行うことにした。



図1 金型

図2 プリフォームと成型後の形状

4-2) マンドレル型の3Dプリンタの開発とスプリングとボルトの試作

最終形状が円筒形の部品を作るためには、3Dプリンタの造形ステージとしてマンドレルを採用し、ボルトの試作を行った。プリフォームを形成するための3Dプリンタを図3に示す。回転動作をするマンドリルに上方のノズルから樹脂あるいはCFRPフィラメントを射出してマンドレルの上に積層造形を行う。マンドレルとしては図3ではアルミなどの金属円筒を利用しているが、ボルトの場合は、CFRPのコアロッドを用意して、その上にCFRPを成形することにした。造形方向としては、マンドレルにフープ/ヘリカル巻きを形成する場合や、マンドレルの軸方向に繊維を配設する場合などのバリエーションがある。プリンターの制御はg-codeを利用してこれらの繊維配置ができるようにした。

このプリンタを用いてまずスプリングを試作した。マンドリル上に連続CFRPフィラメントでスプリング形状を成形し、その後取り外して特殊な金型に挿入し、圧力をかけて最終形状に仕上げる。3Dプリンティング直後では密な形成物になっていないが、圧力の印加でスプリングとして機能することが確認できた。

他の例としてボルトの試作を実施した。マンドレルステージの代わりにCFRPのコアロッドを用意し、その周りにフープ巻き



図3 マンドレル型 3Dプリンタ



図4 スプリングとボルトの試作結果

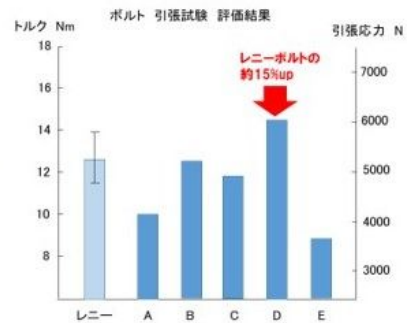


図5 ボルトの引張試験結果

で厚みを調整、ねじピッチでねじ山の形成を行い、金型を用いて最終形状に仕上げる、ねじ山の補強のためにプリフォームとして軸方向に強化繊維を配設したカバーを成形し一体化することで強度を確保することができた。引張試験を行った結果、レニーと呼ばれる短繊維強化樹脂ボルトに比較して 15%程度強いボルトを作ることができた。断面解析を行った結果、改良すべき点が明らかとなり、次の試作でさらに強度の改善を実施する予定である。図4に試作したスプリングとボルトの外形写真を、図5に引張試験結果を示す。

4-3) ロボットアーム型 3D プリンタの試作と精度向上の取り組み

立体的なプリフォーム形状を直接形成するためには、3次元的な凹凸に沿ってノズル先端に角度をつけながら積層を行う必要があり、ロボットアームを用いた 3D プリンタを開発することにした。ノズルと材料供給のためのモーターをアームの先端に配置し、モーターはマイコンで制御して積層造形に必要な材料を射出するようにしている。3D プリンタの外観を図6に示す。これらの制御を行うためにソフトウェアを開発した。DENSO 社の ORiN2 を使い、開発環境は Microsoft Visual Studio であり、使用した言語は Visual Basic である。3D プリンタとして汎用的に利用するために、既存の 3D プリンタと同様のユーザーインターフェースを開発し、操作性を向上させた。制御系パネルの例を図7に示す。ノズルの位置設定や補正が容易にできるようになった。また 3次元制御を汎用的かつ容易にするために、3D プリンタに類似して外部で作成したデータをロードする方式とし、その形式は 3D プリンタで利用している g-code と類似のデータ形式とした。3DCAD などから算出した座標情報を csv 形式で読み込むことができる。さらには通常の 3D プリンタで利用する g-code を csv ファイルに変換するプログラムも開発した。3次元の直接立体成型で最も重要となるのが、ノズル先端と下地レイヤまでの距離である。この制度を向上させるために、アームの先端にレーザー変位計を取り付け、下地層ま

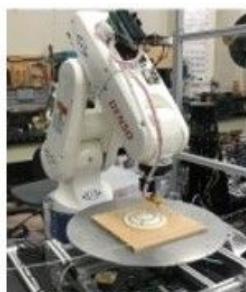


図6 ロボットアーム型 3Dプリンタ



図7 制御系パネル

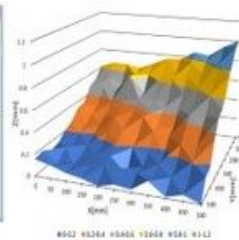


図8 レーザー変位計による平面度測定結果

で距離を 0.02mm 程度の精度で測定できるようにした。位置補正を行いながら造形を進めることができる。この変位計を用いてステージの平面度を測定した結果を図 8 に示す。この情報はシステム中に記憶しており、造形を行いながらノズルの高さや座標の補正をすることができ、基本的な動作で均一な造形ができることを確認することができた。他の例としては、下地層として 0.15mm_{p-p} 程度の凹凸の上に CFRP フィラメントを配置した場合、補正前では形成されたフィラメントの幅は 0.8-1.0mm ± 0.44mm 程度のばらつきで仕上がっていたが、補正を用いることにより ± 0.16mm のばらつきに抑えることが確認できた。

本研究ではロボットアーム関連の開発が大きい項目になってしまったため、ロボットアームで試作したプリフォームで小型部品を形成するところまでは到達できなかった。しかし、基本的な機能は実現できたため、今後新しい適用分野を見出し、小型部品の最適繊維配置設計を行い、試作を実施する予定である。

4-4) 短繊維強化樹脂材料の研究と試作

試作を進める上で、連続繊維 CFRP 材料は細かい形状には適用しにくい面もあることがわかってきた。現状のプラスチック製小型部品では短繊維の CFRP ペレットを射出成型で形成しているが、射出成型では強化繊維の配設を細かく制御することができないため、製品としての強度改善には十分に寄与できていない面もある。今回は 0.2-0.4mm 程度の比較的長い短繊維強化の CFRP フィラメントを試作し、3D プリンタで積層する試作を行った。その結果、積層パスに沿って繊維を配設することができ、引張試験片強度として 100MPa が得られた。従来プラスチックの 5 倍程度強度が実現できていることになる。これまで利用してきた連続繊維強化のフィラメントでは 600MPa 程度の強度であるが、様々な形状が実現しやすい短繊維 CFRP 材料と組み合わせることにより、埋め込み形状の最適化など高精度化などにも適用できると考えている。上記のロボットアーム型ではチェンジャーを用いて両方の射出ができるように計画している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masao Yamawaki, Yousuke Kouno	4. 巻 27
2. 論文標題 Fabrication and mechanical characterization of continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic using a preform by three-dimensional printing and via hot-press molding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Composit Materials	6. 最初と最後の頁 209-219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09243046.2017.1368840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山脇正雄	4. 巻 60
2. 論文標題 繊維強化樹脂の積層造形による3Dプリンタの可能性と部品設計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ツールエンジニア	6. 最初と最後の頁 48-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 広岡伸樹、山脇正雄	4. 巻 18
2. 論文標題 3DプリンタによるCFRP積層造形技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 マテリアルステージ	6. 最初と最後の頁 52-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐々木 菜緒, 山脇 正雄
2. 発表標題 ロボットアームを用いたCFRP形成用3Dプリンタの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 講演番号A-1-18
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山脇 正雄
2. 発表標題 3Dプリンタによる連続繊維CFRTPで積層したボルトの試作と評価結果
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議JCCM-10 講演番号3A-06
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山脇 正雄
2. 発表標題 3Dプリンタ 新しい積層造形手法の検討
3. 学会等名 第7回 複合材成形のための3Dプリンティングに関するワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山脇正雄、広岡伸樹
2. 発表標題 3Dプリンタにより積層造形された連続繊維CFRTPによる小型部品の試作と評価結果
3. 学会等名 第9回日本複合材料会議JCCM-9 講演番号2A-09
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山脇正雄
2. 発表標題 小型パーツで実用化を目指すCFRP 3Dプリンティング技術
3. 学会等名 第4回 複合材成形のための3Dプリンティングに関するワークショップ 日本複合材料学会研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 広岡伸樹、山脇正雄
2. 発表標題 Evaluation of Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic Washers Made by Three-Dimensional Printer
3. 学会等名 15th JapanInternational SAMPE Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山脇正雄、河野洋輔、広岡伸樹
2. 発表標題 Evaluation of Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic Washers Made by Three-Dimensional Printer
3. 学会等名 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山脇正雄、野波諒太、上岡真太郎
2. 発表標題 3Dプリンタを用いた短繊維強化樹脂の積層造形と特性
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議 (JCCM-11) 講演番号 2 B-03
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山脇正雄
2. 発表標題 3Dプリンタによる炭素繊維強化プラスチック成型の最新動向
3. 学会等名 和元年度年度次世代ものづくり技術セミナー ひろしまAM研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木菜緒, 山脇正雄
2. 発表標題 ロボットアームによる7軸3Dプリンタの高精度化
3. 学会等名 令和元年度(第70回)電気・情報関連学会中国支部連合大会 講演番号R19-16-01-02
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山脇正雄
2. 発表標題 CFRP積層造形用3Dプリンタと材料の開発状況
3. 学会等名 令和元年度(第70回)電気・情報関連学会中国支部連合大会 講演番号R19-16-01-03
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山脇正雄	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 469
3. 書名 3Dプリンタ用材料開発と造形物の高精度化	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----