

3D プリンタの造形品質と強度の向上（第1報）

－基本性能の把握－

兵頭敬一郎・疋田武士・佐藤寿喜・佐藤幸志郎
製品開発支援担当

Improvement of 3D Printer Modeling Quality and Strength (1st Report)

－Understanding basic performance－

Keiichiro HYODO・Takeshi HIKIDA・Hisaki SATOU・Koushirou SATOU
Product Design and Development Section

要 旨

令和4年度に3Dプリンタ「Markforged社製 X7」が導入され、企業を対象とした3Dプリンタ利用サービスを提供するにあたり必要となる基本的な造形技術及び造形物の機械的性質について蓄積を行う。本年度は、3Dプリンタ造形物の造形精度の確認、樹脂材料での造形物、樹脂材料に繊維材料を補強材とした複合造形物の強度を確認した。造形品質と強度の向上についての実施データを測定し、活用方法も併せて整備してマニュアル化し、利用サービスを向上させる。

1. はじめに

令和4年度に導入した3Dプリンタ「Markforged社製 X7」は、FFF（フィラメント溶解製法）方式の積層造形装置で、ナイロン樹脂に短繊維 Carbon Fiber（以下、CFと略記する）を混合した樹脂材料 Onyx™を中心に、PLA等の樹脂を使用した造形と、樹脂材料をベースにCFやFiber Grass等の繊維材料と複合造形を行うことができる。プリントヘッドには、樹脂材料と繊維材料それぞれの専用ノズルがあり、樹脂材料に繊維材料を連続的に積層する複合造形により、金属並みの強度が期待できる。（Table 1）

本研究では、3Dプリンタ造形物の造形品質と強度の向上についての実施データを測定し、活用方法も併せて整備してマニュアル化し、利用サービスの向上を図る。

2. 方法

研究には、樹脂材料としてナイロン樹脂に短繊維CFを混合したOnyxを、繊維材料としてCFを用いた。

本機器独自の樹脂材料と繊維材料の複合造形は、専用ノズルから材料が押し出され、繊維材料を骨組みとし、樹脂材料を外側に被覆することで高強度な造形が可能となる。樹脂材料のみでの造形物と、樹脂材料と繊維材料の複合材料による造形物の機械的性質を確認するため、造形精度を確認後、引張試験と曲げ試験を行う。

2.1 造形精度

JIS K 7139:2009 プラスチック試験片 に基づくダンベル型引張試験片（タイプA1形状、平行部幅10mm、厚さ4mm）を造形し、全長の他、平行部の幅と厚さについては中心部と中心部から左右にそれぞれ25mmの3箇所を測定した。（Fig.1）

寸法誤差については、ノギスとマイクロメーターにて計測した実測値を設計値（全長170mm、幅10mm、厚み4mm）で除した値とした。

Table 1 3Dプリンタの仕様

造形方式	FFF（フィラメント溶解製法） 方式
ノズル本数	樹脂材料用1，繊維材料用1
最大造形サイズ	W330mm×D270mm×H200mm
積層ピッチ	0.05mm，0.1mm，0.125mm， 0.2mm，0.25mm
樹脂材料	Onyx，OnyxFR，OnyxFR-A， Nylon white，OnyxESD， Precise PLA，Smooth TPU 95A
繊維材料	Carbon Fiber，Fiber Grass， HSHT Fiber Grass，Kevlar
スライサーソフト	Eiger

2.2 引張試験

樹脂材料の積層ピッチの違いや繊維材料の有無による引張強度の比較, 造形方向による異方性を確認するため, JIS K 7161:2014 プラスチック-引張特性の求め方に基づき Table 2 に示すとおり引張試験を行った。

試験片は, Fig. 1 に示すとおり JIS K 7139 タイプ 1A の寸法に基づき造形した。

造形条件 A は, 基本性能を確認するため, 積層ピッチ 0.1mm, 造形方向を平置きで 6 本造形した。

造形条件 B は, 積層ピッチと造形方向による異方性を確認するため, 積層ピッチ 0.05mm, 0.1mm, 0.125mm, 0.2mm, 0.25mm の 5 条件, 造形方向を Fig. 2 に示すとおり平置き, 横置き, 縦置きの 3 条件, 合わせて 15 本のダンベル型引張試験片を造形した。

造形条件 C は, 繊維材料の有無での強度を確認するため, 積層ピッチ 0.125mm, CF を 24 層で 6 本造形した。

引張試験は, インストロン社:5969 型試験システムを使用し, ロードセル容量 50kn, 標点間距離 80mm, つかみ具間距離 115mm, 試験速度 1mm/min で評価した。

Table 2 引張試験片の造形条件及び試験条件

造形条件	A	B	C
樹脂材料	Onyx		
繊維材料	—	—	Carbon Fiber
積層ピッチ (mm)	0.1	0.05, 0.1, 0.125, 0.2, 0.25	0.125
内部形状	Solid Fill		
造形方向	平置き	平置き 横置き 縦置き	平置き
試験片本数	6	15	6
引張試験機	インストロン社:5969 型試験システム		
試験片	JIS K 7139 タイプ 1A		
つかみ具間距離	115mm		
標点間距離	80mm		
試験速度	1mm/min		

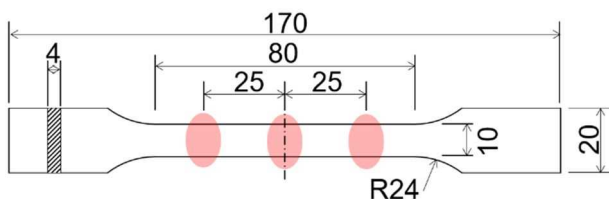


Fig. 1 ダンベル型引張試験片の寸法

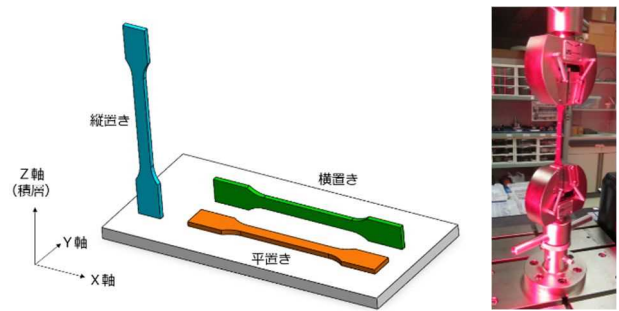


Fig. 2 ダンベル型引張試験片の造形方法と試験機

2.3 曲げ試験

樹脂材料の積層ピッチの違いや繊維材料の有無による曲げ強度を確認するため, JIS K 7171:2016 プラスチック-曲げ特性の求め方に基づき Table 3 に示すとおり曲げ試験を行った。

試験片は, Fig. 3, Fig. 4 に示すとおり JIS K 7171 の推奨試験片の寸法に基づき平置きで造形した。

造形条件 A, B は, 樹脂材料の積層ピッチ 0.1mm と 0.2mm の違いを確認するため各 6 本造形した。

造形条件 C は, 樹脂材料のみの造形と樹脂材料と繊維材料の複合造形との違いを確認するため, 機器指定条件の積層ピッチ 0.125mm で 6 本造形した。

造形条件 D は, 樹脂材料と繊維材料の複合造形における繊維材料の積層数の違いを確認するため 4, 8, 12, 16, 20, 24 層を積層ピッチ 0.125mm で各 1 本造形した。

曲げ試験は, インストロン社:5969 型試験システムを使用し, ロードセル容量 50kn, 支点間距離 64mm, 試験速度 2mm/min で評価した。

Table 3 曲げ試験片の造形条件及び試験条件

造形条件	A	B	C	D
樹脂材料	Onyx			
繊維材料	—	—	Carbon Fiber	
積層ピッチ (mm)	0.1	0.2	0.125	
繊維材料積層(L)数	—	—	24	4, 8, 12, 16, 20, 24
内部形状	Solid Fill			
造形方向	平置き			
試験片本数	6	6	6	各 1
曲げ試験機	インストロン社:5969 型試験システム			
試験片	JIS K 7171 推奨試験片			
支点間距離	64mm			
試験速度	2mm/min			

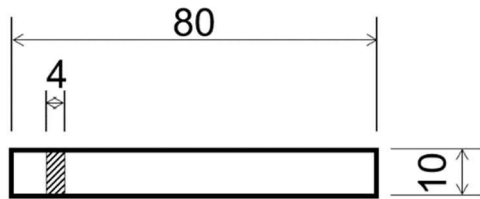


Fig. 3 曲げ試験片の寸法

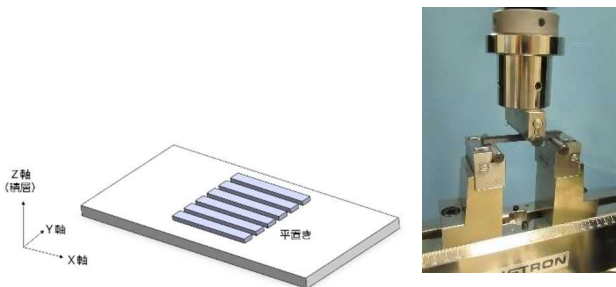


Fig. 4 曲げ試験片の造形方法と試験機

2.4 造形サンプルの試作

Markforged 社が提供している造形サンプルを参考に、樹脂材料、繊維材料、積層ピッチ、内部構造、内部構造断面、球の一部を配置し幅 14mm、長さ 70mm、厚み 4.5mm で造形サンプルを試作した。

2.5 造形物断面の撮影

引張試験による破断の状態を確認するため日本電子(株)製 JSM-IT800SHL にて造形物の破断面を撮影した。

3. 結果

3.1 造形精度

3.1.1 造形条件 A 積層ピッチ 0.1mm

Fig. 5は積層ピッチ 0.1mmの実測値と寸法誤差を示す。全長、幅、厚みの実測値の平均は全て設計値より大きく造形された。寸法誤差については、厚みの値が最も大きく、平置きでの造形であるため、Z軸（積層）方向の寸法誤差が最も大きいことがわかった。

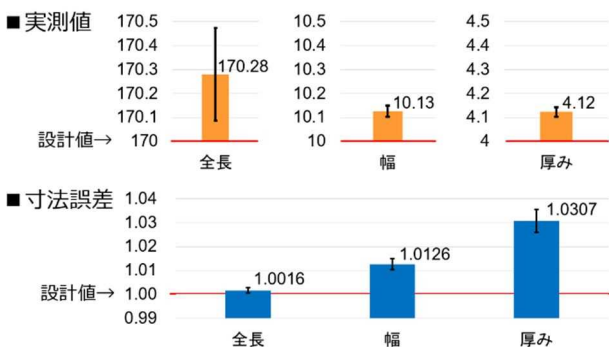


Fig. 5 積層ピッチ 0.1mmの実測値と寸法誤差

3.1.2 造形条件 B 積層ピッチ 0.05~0.25mm

Fig. 6は積層ピッチ 0.05mm~0.25mmの実測値と寸法

誤差を示す。

全長、幅、厚みの実測値は全て設計値より大きく、X軸、Y軸方向に比べZ軸（積層）方向がより大きく造形された。

寸法誤差で確認すると、全ての積層ピッチにおいてZ軸（積層）方向の寸法誤差が大きいことがわかった。

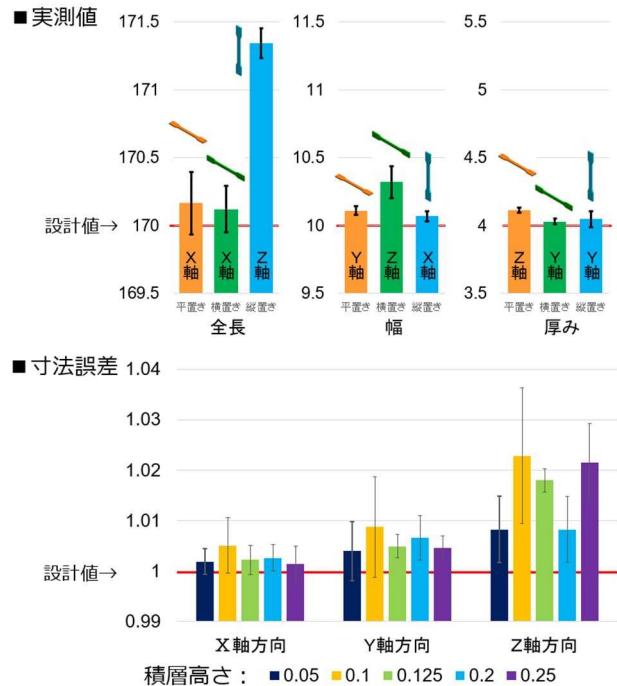


Fig. 6 積層ピッチ 0.05mm~0.25mmの実測値と寸法誤差

3.2 引張試験

Fig. 7は、樹脂材料 Onyx を積層ピッチ 0.1mm と 0.2mm でそれぞれ平置き、縦置き、横置きで造形した引張試験片の応力-ひずみ線図を示す。

横置きと平置きは、破壊までほぼ同じ傾向を示しているが、縦置きはひずみが小さく、積層面から破壊され、異方性を持つことが確認できた。これは、Fig. 8 に示すとおり縦置きの試験片がほとんど伸びずに積層面で破壊されていることから確認できる。

Fig. 9は、樹脂材料 Onyx を積層ピッチ 0.2mm で造形した引張試験片の応力-ひずみ線図である。

Fig. 10は、樹脂材料 Onyx を積層ピッチ 0.125mm、繊維材料 CF を 24 層で造形した引張試験片の応力-ひずみ線図である。応力は、実測した平行部の寸法より算出した。

0.2mmOnyx 試験片及び 0.125mmOnyxCF 試験片はどちらも最大応力を過ぎるまでほぼ同じ傾向を示しており、最大応力後は、試験片の破壊状況により差異が生じている。

0.2mmOnyx 試験片は塑性変形後に最大応力で破断しているため、非線形部分があるが、0.125mmOnyxCF 試験片の線図には、非線形部分はほぼなく、CFの有無で試験片

の破壊プロセスに大きな差異があることがわかった。

Fig. 11 は降伏点応力について, Fig. 12 は引張弾性率について Onyx のみで造形した試験片と Onyx と CF を 24 層で複合造形した試験片とを比較した。

Onyx に CF を複合造形することで降伏点応力, 引張弾性率ともに大きく向上した。

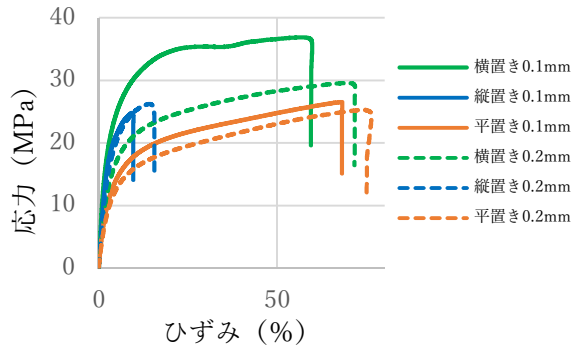


Fig. 7 積層ピッチ 0.1mm と 0.2mm, 3 タイプの造形方向で造形した引張試験片の応力-ひずみ線図



Fig. 8 積層ピッチ 0.1mm, 3 タイプの造形方向で造形した引張試験片

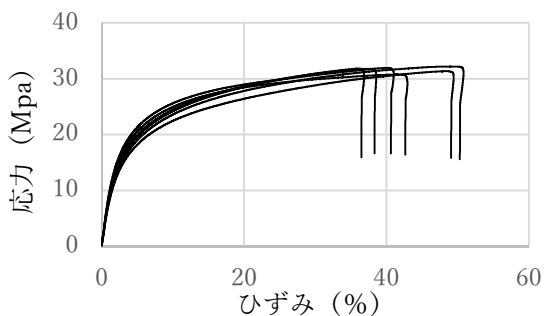


Fig. 9 Onyx を平置き 0.2mm で造形した引張試験片の応力-ひずみ線図

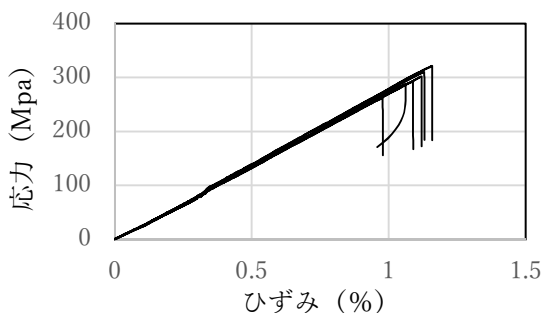


Fig. 10 Onyx に CF を平置き 0.125mm で複合造形した引張試験片の応力-ひずみ線図

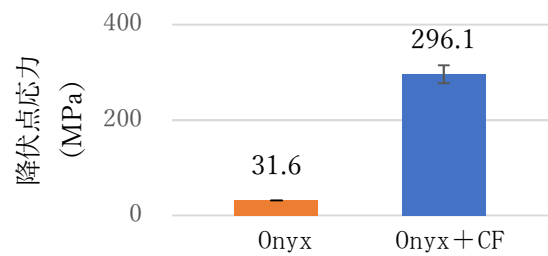


Fig. 11 Onyx 平置き 0.2mm と Onyx に CF を平置き 0.125mm で複合造形した引張試験片の降伏点応力の比較

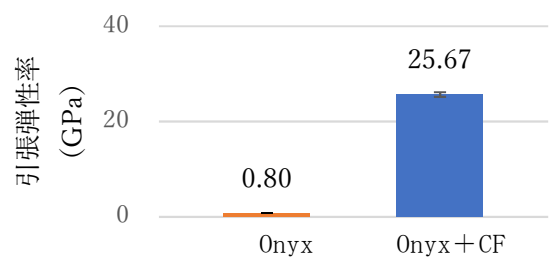


Fig. 12 Onyx 平置き 0.2mm と Onyx に CF を平置き 0.125mm で複合造形した引張試験片の引張弾性率の比較

3.3 曲げ試験

Fig. 13 は, 樹脂材料 Onyx を積層ピッチ 0.1mm と 0.2mm で造形した試験片と, 樹脂材料 Onyx と繊維材料 CF24 層による複合造形の試験片とを比較した曲げ試験の代表的な実験結果の荷重-たわみ線図を示す。

Onyx で造形した試験片は積層ピッチ 0.1mm と 0.2mm 共に同じような傾向で大きな違いは見られなかったが, Onyx と CF との複合造形による試験片は最大荷重が 400N 以上と大きく異なり, その際の変位は約 4mm と小さい。

Fig. 14 は, CF の積層(L)数の違いによる, たわみと荷重の関係を示す. CF の積層数が 4L から 24L と増えるに従い最大荷重が大きくなるとともに変位は小さくなった。

Fig. 15 に示すとおり曲げ試験後の試験片の状態を確認すると, CF4L の湾曲はほとんどなく, CF20L と CF24L は湾曲部の外側に亀裂が入っていることが確認できた。

これらのことから, CF の積層数を変化させることで造形物の剛性をコントロールすることが期待できる。

3.4 造形サンプルの試作

Fig. 16 は, 試作した造形サンプルの設計図と造形サンプルを示す。

内部構造断面は, 積層途中で一時停止後にマスキングし, 造形完了後にマスキングを剥がすことで内部構造が見えるようにした。また, 樹脂材料, 積層ピッチ, 内部構造, 繊維材料の種類を表す文字を立体的に造形した。

球の一部を造形することで, 積層ピッチの違いによる造形物の表面の状態を確認することができた。

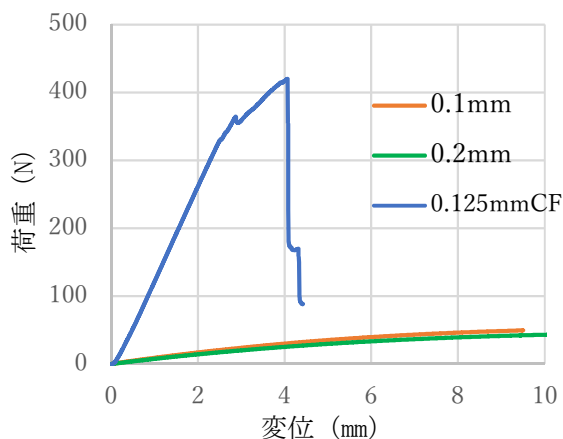


Fig. 13 Onyx0.1mmと0.2mm, OnyxとCFの複合造形による3点曲げ試験の荷重-変位線図



Fig. 16 造形サンプルの設計図と造形サンプル

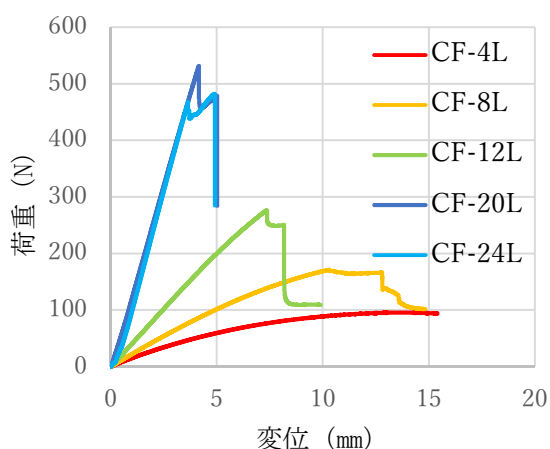


Fig. 14 Onyx平置き0.125mm 繊維材料CFの積層 (L) 数の違いによる3点曲げ試験の荷重-変位線図



Fig. 15 Onyx0.125mm 繊維材料CFの積層 (L) 数の違いによる3点曲げ試験片

3.5 造形物断面の撮影

Fig. 17は、引張試験による破断の状態を確認するためFE-SEMにて造形物の破断面を撮影したものである。

引張試験片のモデル内部の充填率が100%になるようSolidで造形しているため隙間はほとんどみられず、0.2mmの積層ピッチの精度や造形パスの角度、破断の様子が確認できた。

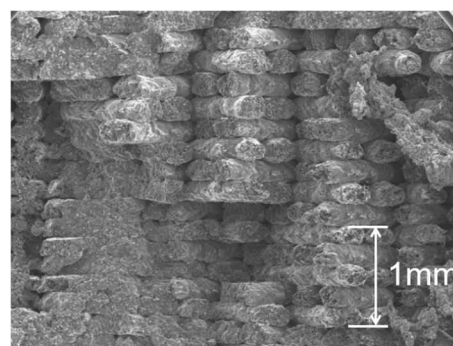


Fig. 17 樹脂材料Onyx積層ピッチ0.2mmの破断面

4. 考察

造形精度については、Z軸(積層)方向の寸法誤差が大きいため、造形の際には精度が必要な部分がX軸かY軸方向になるよう造形方向を考慮する必要がある。

引張試験の結果、造形方向による異方性があることから強度が必要な造形物の造形方向に工夫が必要であることと、CFとの複合造形により引張強度が大きく向上することが確認できた。

曲げ試験の結果、CFとの複合造形により最大荷重が大きく向上した。また、CFの積層数が最大荷重に関する可能性があることから、CFの積層数を変化させることで、造形物の剛性をコントロールすることが期待できる。

参考文献

- 1) 佐藤幸志郎:3D プリンタ活用における造形技術等の研究, 大分県産業科学技術センター研究報告書(2013)
- 2) 船田昌:3D プリンタによる造形品質の向上(第2報), 大分県産業科学技術センター研究報告書(2016)
- 3) 疋田武士他:3次元技術を利用した3Dプリンタ出力物の比較強度試験(第1報), 大分県産業科学技術センター研究報告書(2020)