

熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の機械特性

吉田 昌充, 可児 浩, 瀬野 修一郎, 大市 貴志, 山岸 暢

Mechanical Properties of Materials Processed by a Fused Deposition Modeling Printer

Masamitsu YOSHIDA, Hiroshi KANI, Shuichiro SENO,
Takashi OHICHI, Tohru YAMAGISHI

キーワード：3Dプリンタ, 熱溶解積層, 機械特性, プラスチック

1. はじめに

近年, 各種の3Dプリンタが市販されており, 中でも熱溶解積層型 (Fused Deposition Modeling, 以下FDM式とする) 3Dプリンタは, 安価な個人用途向けから業務用まで様々な機種が販売されており, 2015年では23万2336台が出荷され, 2019年には3Dプリンタ全体の97.5%を占める552万7493台の出荷予測とする調査報告もある¹⁾。このFDM式3Dプリンタは, 溶融した熱可塑性プラスチックをソフトクリームのように, ノズルからフィラメントを吐出・積層することで, 金型を使うことなく迅速に成形体を造形することが可能な装置であり, 近年では製品や部品のデザイン開発, 治具などの製作などに活用されはじめている。

一方, プラスチック成形体の製造は, 射出成形などで行われているが, 金型を製作する必要がありこれにかかる費用が少なくないことから, 生産量の多い成形体の製造には経済的に有利であるが, 生産量が少ないものには不向きである。

3Dプリンタは上記用途での利用にとどまらず, 生産量の少ないプラスチック成形体の製造などでの活用も期待されるが, この造形物についての機械特性などのデータはあまり明らかにされていない。このことから当场ではこれまでにいくつかのFDM式3Dプリンタで製作した造形物の機械特性の評価を行ってきた²⁾。3Dプリンタの機種の違いによる影響を明らかにした前報に続き, 本報告では3Dプリンタの機種を一種類に固定し, フィラメントの材料に使用する樹脂系や造形時の樹脂の吐出量など, さらに詳細な造形条件の影響を明らかにすることを目的に, 造形物の機械特性を評価した結果について報告する。

2. 試験方法

2.1 3Dプリンタ及び材料

図1, 表1に示す仕様のFDM式3Dプリンタ (プリンタ (株)製CUBIS CBS-150) を使用した。また材料には, このプリンタに純正のフィラメント材料であるABS樹脂系とポリ乳酸 (PLA) 樹脂系の2種類を使用した。



図1 試験に使用した3Dプリンタ

表1 試験に使用した3Dプリンタの仕様

造形方式	熱溶解積層法(FDM)
最大造形サイズ	幅185×奥行き140×高さ125mm
造形スピード	20~120mm/sec
ノズル数	1
ノズル径	直径0.4mm
積層ピッチ	0.15~0.4mm
フィラメント材料の直径	φ1.75mm
フィラメント材料	ABS樹脂, PLA樹脂
ノズル温度	200~230°C
成形テーブル温度制御	65~110°C

2.2 3Dプリンタによる特性評価用試験片の製作

特性評価に使用する試験片は, 曲げ特性評価用と引張特性評価用試験片の2種類を3Dプリンタで, 表2に示す設定条

事業名：経常研究

課題名：熱溶解3Dプリンタ造形物の機械特性向上に関する研究
(平成29~30年度)

件で造形した（図2～5）。プリンタ造形物を構成するフィラメントの充填パターン角度を0°/90°交互積層，45°/135°交互積層の2条件，フィラメント材料の吐出量の設定を3条件で造形し，種々の試験片を得た。

曲げ特性評価用の試験片形状は，JIS K 7171を参考に長さ50mm×幅25mm×厚さ2.4mmとした。また引張特性評価用は，JIS K 7161-2の1B試験片形状で厚さ2.4mmとした。

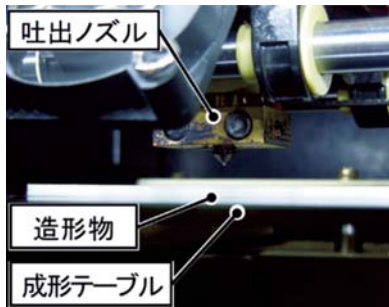


図2 3Dプリンタでの造形①

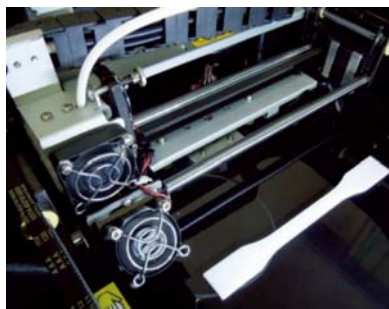


図3 3Dプリンタでの造形②

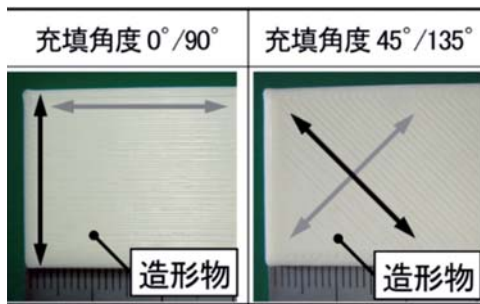


図4 3Dプリンタ造形物のフィラメント充填パターン角度

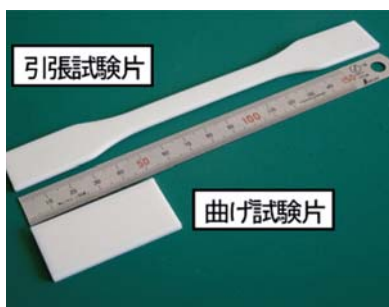


図5 3Dプリンタで製作した造形物

表2 造形物製作時のプリンタ設定条件

設定項目	使用フィラメント	ABS樹脂フィラメント プリンタ造形物	PLA樹脂フィラメント プリンタ造形物
積層ピッチ	0.3mm		
積層数	8層		
造形物の製作方向	・成形テーブルのXY平面上に平行 ・試験片の長手方向をX軸方向に設定		
ノズル温度	230℃	210℃	
成形テーブル温度	110℃	70℃	
造形物の外壁枚数	3		
フィラメント出力速度	30mm/sec		
フィラメント間隔充填率設定	1.0		
フィラメントの充填パターン	Rectilinear (格子)		
フィラメントの充填パターン角度	① 0°/90° , ② 45°/135°		
フィラメント材料吐出量	① 標準, ② 15%増量, ③ 30%増量		
天面パネルの開閉状態	造形時は, パネル閉		
正面パネルの開閉状態	造形時は, パネル閉		

2.3 圧縮成形による特性評価用試験片の製作

3Dプリンタに使用されている純正フィラメントの材料特性を把握し，3Dプリンタで製作した造形物の機械特性との比較を行うため，一般的なプラスチックの成形加工方法である圧縮成形法でも試験片を製作した。

3Dプリンタの純正材料フィラメントを市販のプラスチック成形材料と同様の長さのペレット形状にカットし，ABS樹脂系は90℃で4時間以上，PLA樹脂系は80℃で4時間以上，熱風循環式オーブンで予備乾燥後，JIS K 7151に準拠し圧縮成形を行った。この時，金型には長さ180mm×幅150mm×厚さ2.4mmの平板が得られる平押し金型を使用し，金型温度はABS樹脂系は220℃，PLA樹脂系は200℃とした。上記で得られた平板から2.2節に示した3Dプリンタで製作した曲げ・引張特性用試験片と同形状のものを試験片製作機（㈱東洋精機製作所製サンプルマシンMD）などを使用し切削加工した。

2.4 引張特性試験

引張最大応力及び引張弾性率の評価は，JIS K 7161「プラスチック引張特性の求め方」に準拠して行った。試験温度は23℃とし，万能材料試験機（㈱島津製作所製オートグラフAG-100kNXplus）を用い，試験片数は3片とした（図6参照）。試験速度は，引張最大応力の測定については各プラスチック成形材料の試験方法を参考に，ABS樹脂系では50mm/min，PLA樹脂系では5mm/min，引張弾性率の測定は共に1mm/minとした。

2.5 曲げ特性試験

曲げ最大応力及び曲げ弾性率の評価は，JIS K 7171「プラスチック曲げ特性の求め方」に準拠して行った。試験温度は23℃とし，万能材料試験機を用いて支点間距離は40mm，試験速度は1mm/min，試験片数は3片とした（図7参照）。



図6 引張特性試験（引張最大応力測定）

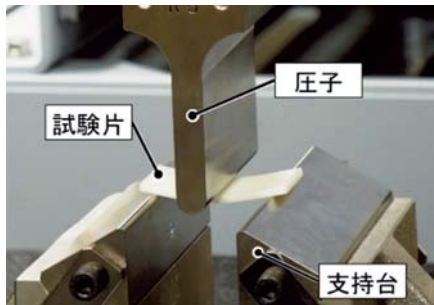


図7 曲げ特性試験

2.6 プリント造形物の断面形状観察

3Dプリント造形物の断面形状観察には、走査型電子顕微鏡（日本電子(株)製JSM-6610LA）を使用した。

2.7 樹脂充填率

3Dプリント造形物の樹脂充填率は、次のようにして求めた。JIS K 7222「発泡プラスチック及びゴム－見掛け密度の求め方」を参考にして、製作した曲げ特性用試験片造形物の質量を長さ・幅・厚さから算出した体積で除して見掛け密度の値を求め、この値を同一材料からなる圧縮成形体の密度で除して算出した。試験片数は3片とした。なお圧縮成形体の密度の測定は、JIS K 7112「プラスチック－非発泡プラスチックの密度及び比重の測定方法」の水中置換法で行った。

3. 試験結果

3.1 ABS樹脂系3Dプリント造形物の機械特性

ABS樹脂系材料を使用し、3Dプリント造形物製作時の樹脂の吐出量を変えて造形した時、機械特性がどのように変化するかについて評価した。樹脂の吐出量は、装置設定の標準値、15%増量、30%増量の3条件とした。併せて造形物を構成するフィラメントの充填パターン角度を0°/90°交互積層、45°/135°交互積層の2条件とした。図8に曲げ最大応力、図9に曲げ弾性率を示す。なお図中（ ）内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示した。

たものである。プリント造形物の曲げ最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ40%程度にとどまるが、吐出量30%増量時では80%程度に向上した。プリント造形物の曲げ弾性率は、吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。樹脂吐出量が標準では圧縮成形体に対する保持率で31~47%であったが、30%増量した場合保持率で81~83%に向上した。

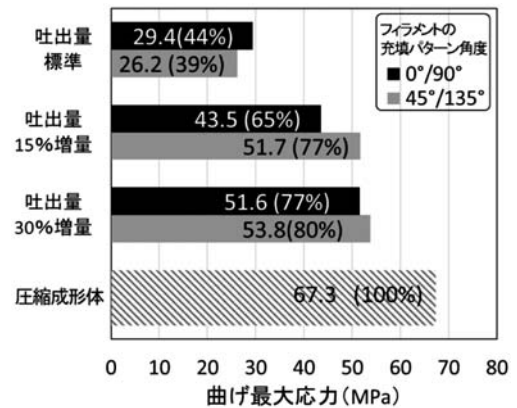


図8 ABS樹脂系3Dプリント造形物の曲げ最大応力

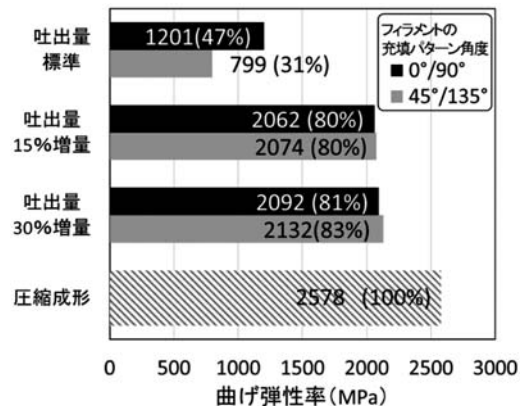


図9 ABS樹脂系3Dプリント造形物の曲げ弾性率

上記曲げ特性と同様に、引張特性についての試験を行った。図10に引張最大応力、図11に引張弾性率を示す。なお図中（ ）内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示したものである。プリント造形物の引張最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ43~55%にとどまるが、吐出量30%増量時では89~91%に向上した。プリント造形物の引張弾性率は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ60%程度にとどまるが、30%増量時では90%を超える高い値を示した。

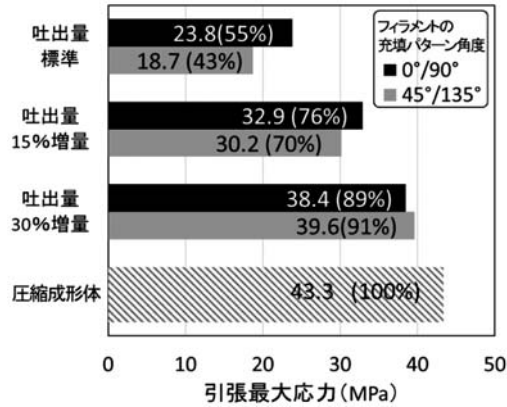


図10 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の引張最大応力

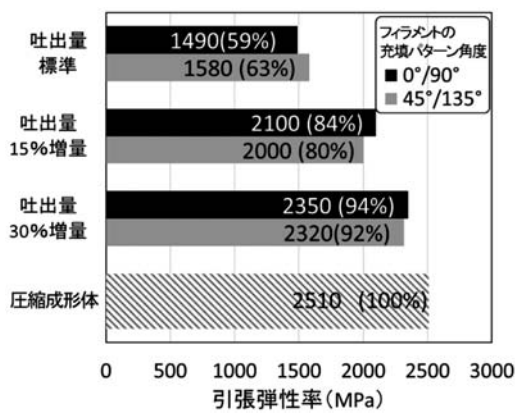


図11 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の引張弾性率

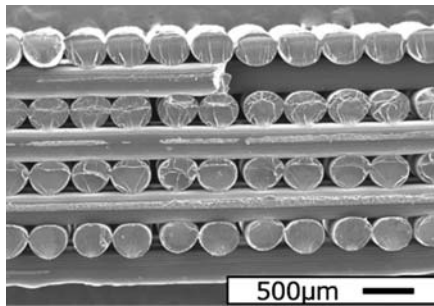


図12 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の断面形状 (樹脂の吐出量：標準)

3Dプリンタ造形物の曲げ最大応力・弾性率、引張最大応力・引張弾性率は、製作時の樹脂の吐出量設定で大きく変化する傾向が見られた。樹脂の吐出量を標準条件で製作したプリンタ造形物について、走査型電子顕微鏡で観察した断面形状を図12に示した。この顕微鏡写真から、プリンタ造形物は微細なフィラメントが整列し積層構造を保持しているが、フィラメント同士が密着していない箇所や空隙があることが確認された。プリンタ造形物の空隙が機械特性に与える影響を確認するため、造形物の樹脂充填率を測定した(図13参照)。プリンタ造形物の樹脂充填率は、樹脂の吐出量を増量することで高くなり、空隙が少なくなる傾向が見られた。

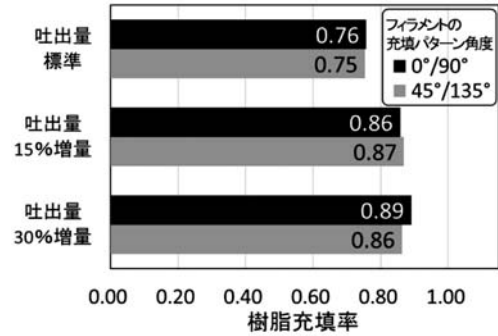


図13 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の樹脂充填率

3.2 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の機械特性

PLA樹脂系フィラメント材料を使って製作したプリンタ造形物についても、前節と同様に機械特性の差異を評価した。図14に曲げ最大応力、図15に曲げ弾性率、図16に引張最大応力、図17に引張弾性率を示す。なお図中()内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示したものである。プリンタ造形物の曲げ最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。樹脂の吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ48~58%にとどまるが、30%増量時では81~95%に向上した。曲げ弾性率も同様に、吐出量が多いほど高くなった。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ55%にとどまるが、30%増量時では81~95%に向上した。

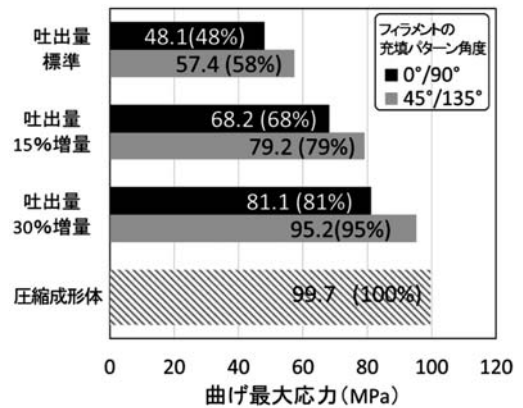


図14 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の曲げ最大応力

プリンタ造形物の引張最大応力についても曲げ特性と同様に、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ56~58%にとどまるが、30%増量時では圧縮成形体とほぼ同等の95~100%の高い値を示した。

PLA樹脂系材料を使用し製作したプリンタ造形物についても、樹脂充填率が機械特性に与える影響を確認するため、樹脂充填率を測定した(図18参照)。造形物の樹脂充填率は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を確認した。

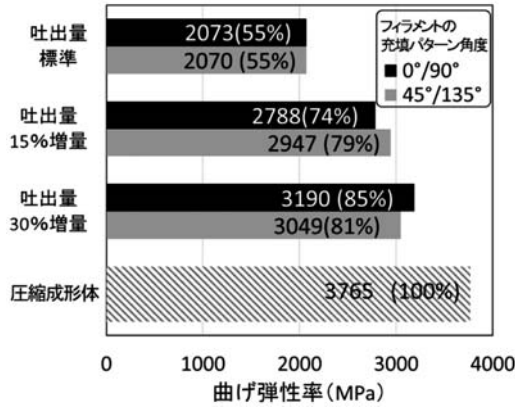


図15 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の曲げ弾性率

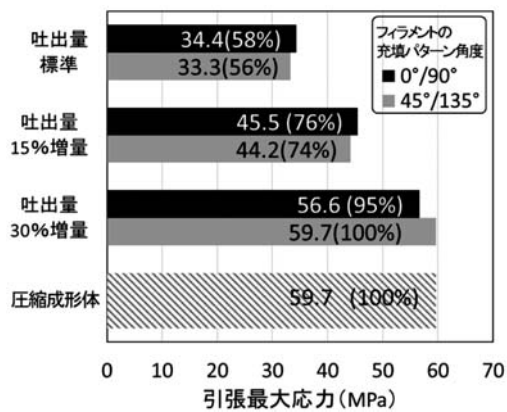


図16 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の引張最大応力

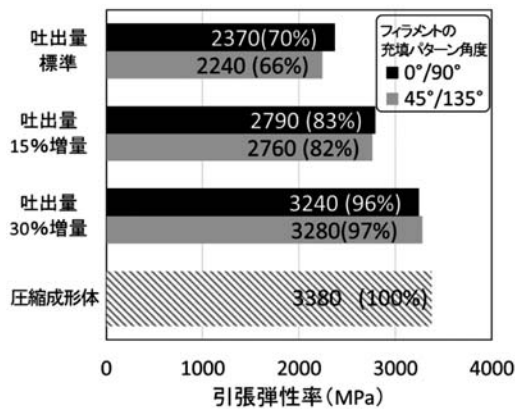


図17 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の引張弾性率

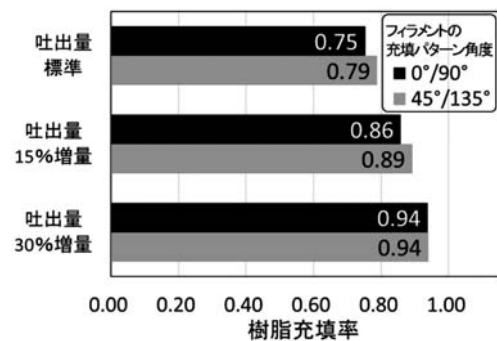


図18 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の樹脂充填率

3.3 ABS樹脂・PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の機械特性比較

3.1節, 3.2節に示したABS樹脂系・PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の23℃における曲げ・引張の最大応力や弾性率を比較した。フィラメント充填角度や材料の吐出量を同一条件で製作した造形物の比較では、PLA樹脂系のプリンタ造形物の方が何れの特性も高い傾向を示した。この傾向は、3Dプリンタ造形物の製作に使用したフィラメント材料を圧縮成形して得た成形体同志で比較した場合にも見られることから、樹脂材料自身の機械特性の差によるものと推察する。

4. まとめ

FDM式3Dプリンタを使い、フィラメント材料の樹脂系や樹脂の吐出量、フィラメント充填パターン角度の条件を変えて製作した造形物の機械特性について評価を行い、次の結論が得られた。

- (1) ABS樹脂系・PLA樹脂系プリンタ造形物の曲げ・引張の最大応力や弾性率は、吐出量を調節し樹脂充填率を上げるほど、高くなることがわかった。
- (2) プリンタ造形物の樹脂充填率を調整することで、造形物の曲げ・引張の最大応力や弾性率は、同一材料を圧縮成形加工した成形体に比べ、7～9割程度の特性値が得られることがわかった。
- (3) 同一機で製作したプリンタ造形物の23℃での曲げや引張の最大応力・弾性率は、ABS樹脂系よりもPLA樹脂系の方が高いことがわかった。

今後3Dプリンタ造形物の材料に繊維強化樹脂を使用した造形物の機械特性評価を行っていく。

謝辞

本研究で使用した万能材料試験機および試験片製作機は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Gartner : Forecast, 3D Printers, Worldwide, 2015
- 2) 吉田昌充・板橋孝至・印南小冬他：熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の特性評価, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.315, pp123-127, (2016)