

熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の特性評価

吉田 昌充, 板橋 孝至, 印南 小冬, 本間 稔規

Properties of Materials Processed by a Fused Deposition Modeling Printer

Masamitsu YOSHIDA, Koji ITABASHI, Kofuyu INNAMI, Toshinori HONMA

キーワード：熱溶解積層, 3Dプリンタ, 機械特性, プラスチック, 圧縮成形

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23万2,336台が出荷され、2019年には3Dプリンタ全体の97.5%を占める552万7,493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、治具等の製作などに活用されはじめている。

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等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等のデータはほとんどない。このことから本報では、いくつかのFDM式3Dプリンタを使って樹脂系や積層厚みなどの造形条件を変えて製作した造形物の機械特性等について評価を行った結果を報告する。

2. 試験方法

2.1 3Dプリンタ及び材料

表1に示す【A】～【D】の4種類のFDM式3Dプリンタを使用した。また材料は、FDM式3Dプリンタで最も使用されているABS樹脂系とポリ乳酸(PLA)樹脂を選定し、上記4機種の3Dプリンタで使用される純正フィラメント材料を使用した。

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、厚さ2mmの曲げ特性及び引張特性用試験片を3Dプリンタで造形した(図1～3)。積

層ピッチやフィラメントの積層方向、成形テーブル温度制御等の設定条件を変えて造形し、種々の試験片を得た。なおいずれの造形物も樹脂が可能な限り充填され、内部空隙が少なくなるような造形設定とした。

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2mm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2mmとした。

表1 試験に使用したFDM式3Dプリンタの主な仕様

3Dプリンタの機種	【A】	【B】	【C】	【D】
型式	Cube X 3D Trio Printer	Value3D MagiX MF-2000	Replicator 2X	Dimension BST768
メーカー	3D Systems	ムトーエンジニアリング	MakerBot	Stratasys
仕様				
最大造形サイズ X*Y*Z (mm)	265×185×240	300×300×300	246×152×155	203×203×305
Z軸解像度 積層ピッチ	0.1, 0.25mm 0.5mm	最小 0.1mm、 最大 0.5mm	最小0.1mm、 最大0.34mm	0.254mm、 0.333mm
使用可能材料	ABS/PLA	ABS/PLA ほか	ABS	ABS
成形テーブル 温度制御	制御機能なし	制御可能 ヒーター付き	制御可能 ヒーター付き	制御機能なし
槽内 温度制御	制御機能なし	制御機能なし	制御機能なし	75℃固定

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、FDM式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樹脂は90℃で4時間以上、PLA樹脂は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2mmの平板が得られる平押し金型を使用し、金型温度はABS樹脂は220℃、PLA樹脂は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(株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。

事業名：職員研究奨励事業（提案部門：技術支援型）

課題名：熱溶解積層型3Dプリンタの成形技術の検討（平成27年度）



図1 3Dプリンタでの造形①



図2 3Dプリンタでの造形②

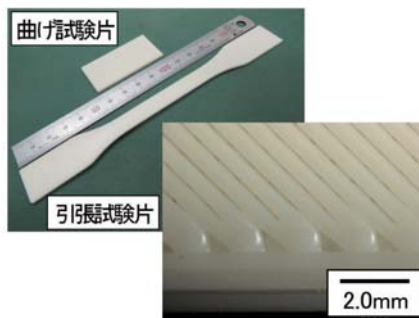


図3 3Dプリンタ造形物と表面状態

2.4 引張特性試験

引張強さ及び引張弾性率の評価は、JIS K 7161に準拠して行った。試験温度は23℃とし、万能材料試験機(株式会社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4)。試験速度は引張強さの測定がABS樹脂系では50mm/min、PLA樹脂系では5 mm/min、引張弾性率の測定はともに1 mm/minとした。

2.5 曲げ特性試験

曲げ強さ及び曲げ弾性率の評価は、JIS K 7171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32mm、試験速度は1 mm/min、試験片数は3片とした(図5)。

2.6 3Dプリンタ造形物の内部観察

3Dプリンタ造形物の内部観察はX線CT装置(株式会社島津製作所製 inspeXio SMX-225CT)を用いて空隙の分布把握を行った。



図4 引張特性試験(引張強さ測定)

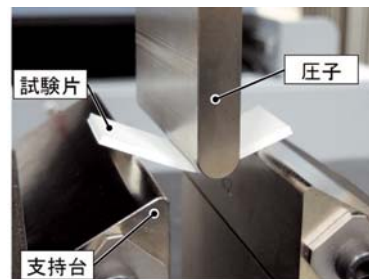


図5 曲げ特性試験

2.7 樹脂充填率

3Dプリンタ造形物の樹脂充填率は、曲げ特性用試験片を使って、JIS K 7222に準拠し測定した見掛け密度の値を、同一材料からなる圧縮成形体の見掛け密度で除して算出した。

3. 試験結果

3.1 PLA樹脂・ABS樹脂製3Dプリンタ造形物の機械特性比較

樹脂系の違いによる3Dプリンタ造形物の機械特性を比較するため、表1に示した機種【A】の3Dプリンタで、材料には色調が白色と黒色のABS樹脂並びにPLA樹脂を使用し、ノズル温度等の造形条件を標準条件で0.5mm積層ピッチで4層を積層して厚さ2mmの3Dプリンタ造形物を製作した。この造形物の曲げ特性並びに引張特性を図6～7に示した。造形物の曲げ強さ、曲げ弾性率、引張強さ並びに引張弾性率は、PLA樹脂の方がABSよりも高くなる傾向を示した。

比較のため、3Dプリンタ造形物に使用した樹脂材料を圧縮成形加工し同様に測定した曲げ・引張特性を表2に示した。この結果、圧縮成形体の曲げ・引張の強さ及び弾性率はPLA樹脂の方がABS樹脂に比べ高いことから、この傾向が3Dプリンタ造形物の機械特性の傾向に現れているものと考えられる。

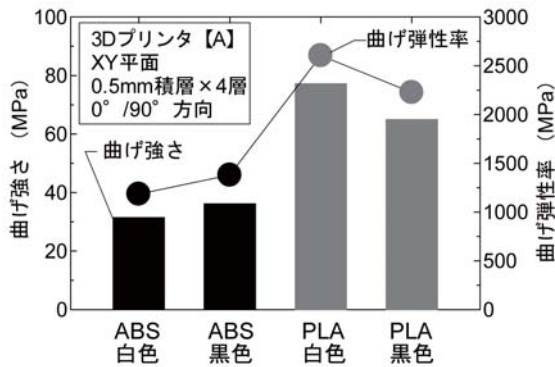


図6 3Dプリンタ造形物(ABS/PLA)の曲げ特性

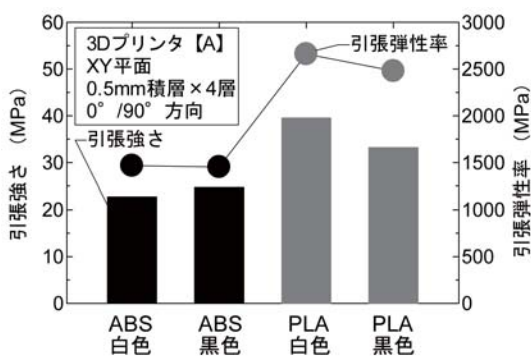


図7 3Dプリンタ造形物(ABS/PLA)の引張特性

表2 圧縮成形体の機械特性

材料	ABS 白色	ABS 黒色	PLA 白色	PLA 黒色
曲げ強さ (MPa)	51	51	84	77
曲げ弾性率 (MPa)	1,950	1,920	3,380	3,190
引張強さ (MPa)	32	33	49	46
引張弾性率 (MPa)	1,710	1,770	3,250	3,110

表3 3Dプリンタ造形物(ABS/PLA)の内部構造・樹脂充填率

試料	造形物の内部構造(X線CT画像)	樹脂充填率
曲げ特性試験片 ABS樹脂 白色 0.5mm積層×4層		0.80~0.82
曲げ特性試験片 PLA樹脂 白色 0.5mm積層×4層		0.91~0.93

3Dプリンタ造形物のX線CT装置で観察した内部構造や樹脂充填率を表3に示した。X線CT画像からは、明色部の樹脂中に暗色部の空隙があることが確認され、PLA樹脂の方がABS樹脂に比べ空隙が少なかった。また見掛け密度から算出した樹脂充填率もPLA樹脂の方がABS樹脂に比べ高く空隙が少ない。このことも上記3Dプリンタ造形物の機械特性の傾向に与える一要因であると考えられる。

3.2 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の機械特性

3Dプリンタの各機種による造形物の機械特性の差異を評価するため、次の試験を行った。

表1に示した4機種の3Dプリンタ【A】、【B】、【C】、【D】で、各プリンタに純正の色調が白色のABS樹脂を使用して、ノズル温度等の造形条件は標準条件とし各種積層ピッチで厚さ2mmの3Dプリンタ造形物を製作した。また各純正フィラメントの材料特性を把握し比較するため、圧縮成形体も製作し共に各特性を測定した。図8に曲げ強さ、図9に曲げ弾性率、図10に引張強さ、図11に引張弾性率を示した。

各種プリンタの造形物は、曲げ強さが30~43MPa、曲げ弾性率が1,190~1,930MPa、引張強さが21~37MPa、引張弾性率が1,470~2,270MPaであり、大きな差があることがわかった。同様に測定した圧縮成形体の各特性値から、3Dプリンタ用純正材料の機械特性に差異があり、このことが3D造形物の機械特性に大きく関係していると推察する。

今回測定して得られた造形物の各特性値を通常のプラスチック成形品で得られる他樹脂材料と比較してみた場合、特性値の低強度・低弾性率側ではフィラーを含有しない一般的なグレードのポリプロピレン樹脂に近い値であった。

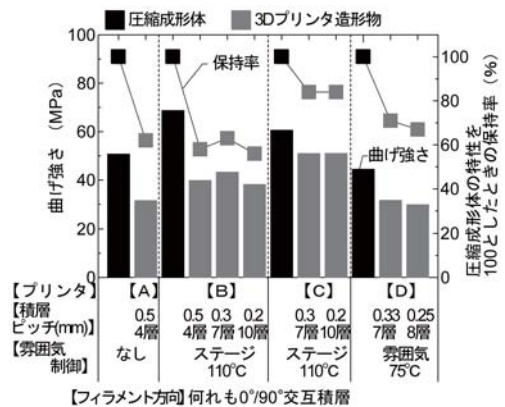


図8 3Dプリンタ造形物と圧縮成形体の曲げ強さ

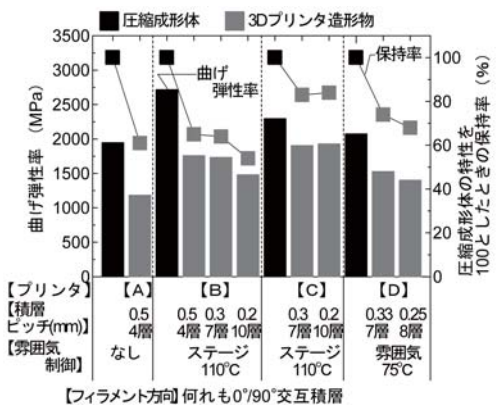


図9 3Dプリンタ造形物と圧縮成形体の曲げ弾性率

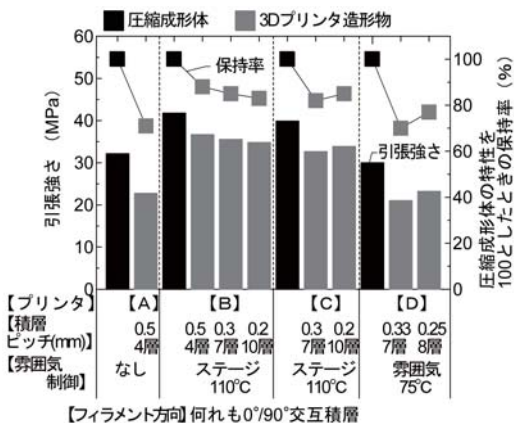


図10 3Dプリンタ造形物と圧縮成形体の引張強さ

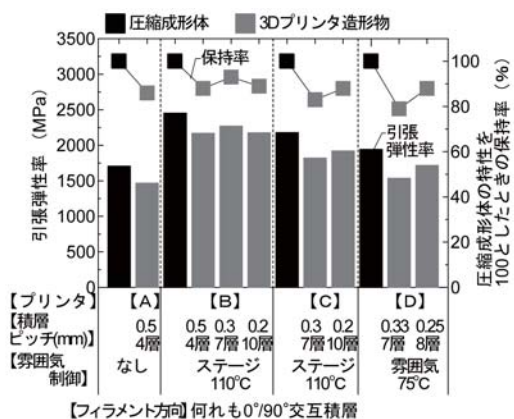


図11 3Dプリンタ造形物と圧縮成形体の引張弾性率

プリンタ造形物の各特性値について、それぞれ圧縮成形体の特性値を100としたときの保持率として換算比較した場合、その保持率は曲げ強さが58~84%、曲げ弾性率が54~84%、引張強さが70~88%、引張弾性率が79~93%であることがわかった。

3.3 ABS系3Dプリンタ造形物のフィラメント角度と機械特性

ABS樹脂系材料を使用し、3Dプリンタ造形物を構成する微細なフィラメントの配置角度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の評価を行った。

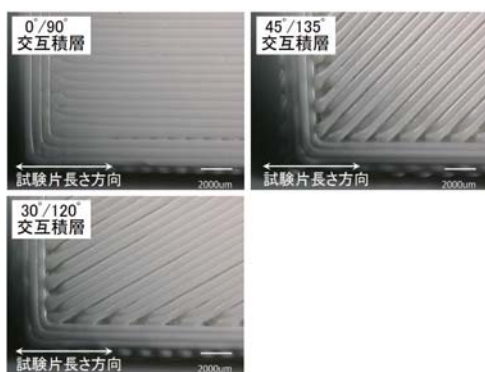


図12 3Dプリンタ造形物のフィラメント配置角度

4種類の3Dプリンタ【A】、【B】、【C】、【D】を使って、図12のように試験片造形物の長さ方向に対してフィラメントの配置角度を0°/90°交互積層、30°/120°交互積層、45°/135°交互積層の条件で造形物を製作し、各特性を測定した。

図13に曲げ特性、図14に引張特性を示した。

3Dプリンタの機種で傾向は異なるが、フィラメント配置角度の違いで造形物の機械特性が異なり、曲げ弾性率・引張弾性率については、おおむね0°/90°交互積層した方が45°/135°交互積層したものよりも高くなる傾向にあった。特にプリンタ【A】、【B】の造形物では、これに加えて曲げ強さ・曲げ弾性率でもこの傾向が顕著に見られ、特性値が高い順にフィラメント角度0°/90°、30°/120°、45°/135°となった。曲げ試験・引張試験時に試験片に力のかかる方向と同じ方向に造形物中の微細フィラメントが配置されているためフィラメント角度0°/90°で最も高い値が得られたものと考えられる。微細フィラメント同士や積層ピッチ間の密着度合いもこれらの特性値に大きな影響を与えるものと考えられる。

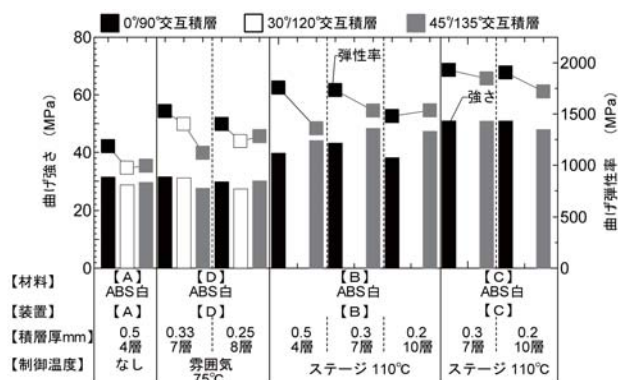


図13 3Dプリンタ造形物のフィラメント角度と曲げ特性

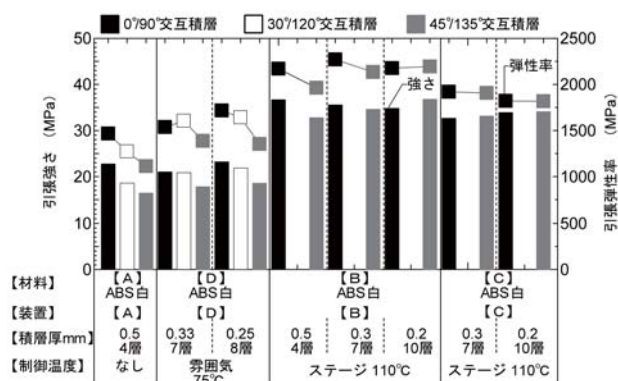


図14 3Dプリンタ造形物のフィラメント角度と引張特性

3.4 ABS系3Dプリンタ造形物のステージ温度と機械特性

ABS樹脂系材料を使用し3Dプリンタ【B】を使って、造形条件のひとつであるステージ温度を50°C、70°C、90°C、100°C、110°Cと変えた時に得られるプリンタ造形物の機械特性についての評価を行った。図15に曲げ強さ、図16に曲げ弾性率、図17に引張強さ、図18に引張弾性率を示した。曲げ強さ・弾

性率及び引張強さは、おおむねステージ温度が高くなるほど特性値が高くなる傾向を示した。また引張弾性率は、ステージ温度の影響がほとんどみられなかった。ステージ温度が高いほど3Dプリンタのノズルから吐出・積層された微細フィラメント同士の密着度が高くなり、これらの特性値が高くなる一要因であると考えられる。

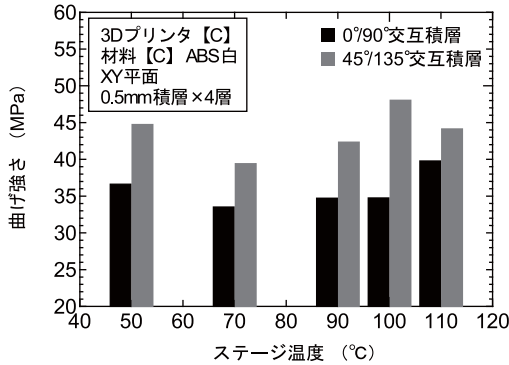


図15 3Dプリンタ造形物のステージ温度と曲げ強さ

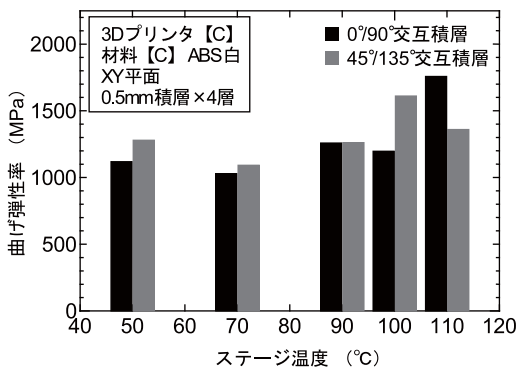


図16 3Dプリンタ造形物のステージ温度と曲げ弾性率

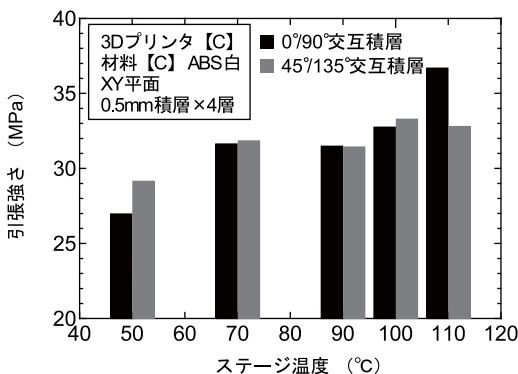


図17 3Dプリンタ造形物のステージ温度と引張強さ

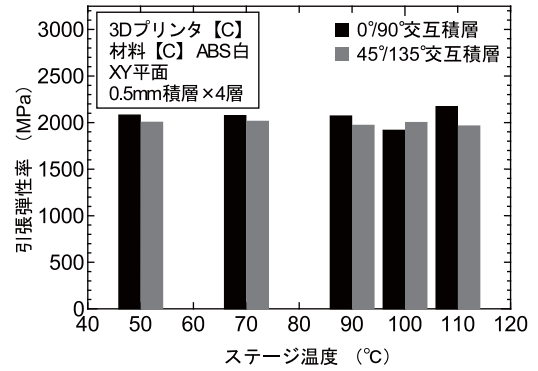


図18 3Dプリンタ造形物のステージ温度と引張弾性率

4. まとめ

4機種FDM式3Dプリンタを使って樹脂系や積層厚みなどの造形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) 3Dプリンタ造形物の曲げや引張の強さ・弾性率は、ABS樹脂系よりもPLA樹脂系の方が高い。
- (2) 各種の3Dプリンタで製作したABS樹脂系造形物の強度は、機種の違いや材料グレード、積層厚などの製作条件により、機械特性が大きく異なる。
- (3) ABS樹脂系3Dプリンタ造形物は、圧縮成形加工した成形体に比べ、曲げ・引張強さで5～8割程度、曲げ・引張弾性率で5～7割程度であった。これは樹脂の充填率や層間の密着性が大きく影響するものと考えられる。

今後さらに3Dプリンタでの造形方向を変えた場合や材料に繊維強化樹脂等を使用した造形物の諸特性評価を行ってみたい。

謝辞

(株)Will-E並びに(株)東穂には、3Dプリンタを使って曲げ特性評価用及び引張特性評価用の試験片の製作において、ご協力をいただきました。

また本研究で使用した万能材料試験機、試験片製作機及び3Dプリンタ【A】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。

以上、記して感謝いたします。

引用文献

- 1) Gartner: Forecast, 3D Printers, Worldwide, 2015