

# 熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の機械特性向上の検討

吉田 昌充, 可児 浩, 瀬野修一郎, 大市 貴志, 山岸 暢

## Improvement of Mechanical Properties of FDM 3D Printed Objects

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, ガラス繊維

### 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<sup>1)</sup>。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るため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プリンタは先に述べた用途での利用にとどまらず、このような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<sup>2),3)</sup>。本報告では、3Dプリンタ造形物の機械特性向上を目的に、プラスチック成形体の特性向上に使われる技術のひとつであるガラス繊維を複合化した材料をフィラメントに使用したときの造形物の機械特性評価を行った結果について報告する。

### 2. 試験方法

#### 2.1 3Dプリンタ

図1、表1に示す仕様のFDM式3Dプリンタ (プリンタス (株)製CUBIS CBS-150) 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 フィラメント材料

フィラメントには、ABS樹脂系とポリ乳酸 (PLA) 樹脂系の2種の材料を検討した。

ガラス繊維を複合化したABS樹脂のプリンタ用フィラメント材料は、市販のプラスチック成形材料であるガラス繊維 (GF) 含有率30%の強化ABS (テクノ UMG (株)製130G30, メ

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)

ルトフローレイト (MFR) : 10g/10min) やガラス繊維を含有しない2種類の非強化ABS ([テクノ UMG (株)製130, MFR : 18g/10min], [旭化成(株)製 スタイラック190F, MFR : 47g/10min]) の各ペレットを所定のガラス繊維含有率になるような比率で配合・混合し, 90°Cで4時間以上乾燥した後に単軸押出機 (Brabender 社製 EXTRUSIOGRAPH 19/25D) を用いて, シリンダ温度160~230°C, φ 3 mm 径ダイスノズル温度220~230°Cで熔融混練・均質化し, GF含有率が0%, 5%, 10%, 15%, 17.5%で, 直径が1.75mm前後のフィラメント材料を得た (図2~3)。

ポリ乳酸樹脂 (PLA) のガラス繊維を複合化したプリンタ用フィラメント材料は, 市販のプラスチック成形材料であるガラス繊維含有率30%のGF強化PLA (ユニチカ(株)製 TE-8003G30), ガラス繊維を含有しない非強化PLA (ユニチカ(株)製 TE-2000) の各ペレットを所定のガラス繊維含有率になるような比率で配合・混合し, 80°Cで4時間以上乾燥した後に単軸押出機を用いて, シリンダ温度150~190°C, φ 3 mm 径ダイスノズル温度180~190°Cで熔融混練・均質化し, GF含有率が7.5%, 10%, 15%で, 直径が1.75mm前後のフィラメント材料を得た。

また, 機械特性比較用にガラス繊維を含有しないフィラメント材料として, 使用した3Dプリンタに純正のABS樹脂及びPLA樹脂フィラメント材料をそれぞれ使用した。



図2 押出機でのフィラメント材料の製作



図3 製作したフィラメント材料

2.3 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に示す設定条件で造形した (図4~6)。このとき, フィラメント材料の吐出量の設定を変えて材料充填率の異なる試験片を得た。

曲げ特性評価用の試験片形状は, JIS K 7171「プラスチック-曲げ特性の求め方」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「プラスチック-引張特性の求め方-第2部」の1B試験片形状で厚さ2.4mmとした。

表2 造形物製作時のプリンタ設定条件

	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°C	210°C
成形テーブル温度	110°C	70°C
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	0°/90°	
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	

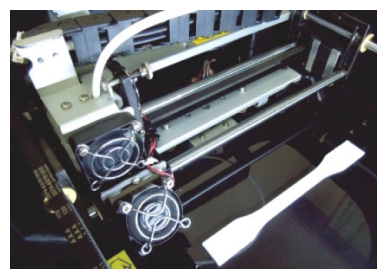


図4 3Dプリンタでの造形

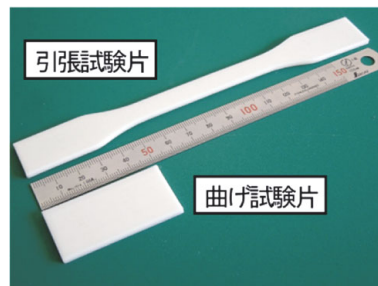


図5 3Dプリンタで製作した造形物

フィラメント充填パターン角度0°/90°

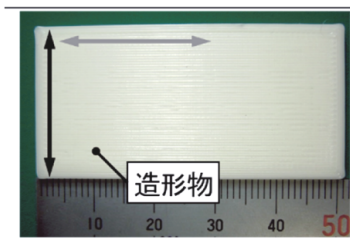


図6 3Dプリンタ造形物のフィラメント充填パターン角度

## 2.4 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、2.2節に示した条件で乾燥後、JIS K 7151「熱可塑性プラスチック材料の圧縮成形試験片」に準拠し、平押し金型で長さ180mm×幅150mm×厚さ2.4mmの平板を圧縮成形した。このとき、金型温度は、ABS樹脂系が220℃、PLA樹脂系が200℃とした。成形した平板を試験片製作機（㈱東洋精機製作所製サンプルマシンMD）などで切削加工し、2.3節に示した3Dプリンタ造形物と同形状の曲げ・引張特性用試験片を得た。

## 2.5 各特性の評価試験方法

プリンタ造形物の曲げ特性、引張特性、断面観察、材料充填率、フィラメント材料の流動特性について、評価試験を行った。

曲げ最大応力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（㈱島津製作所製オートグラフAG-100kNXplus）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）。

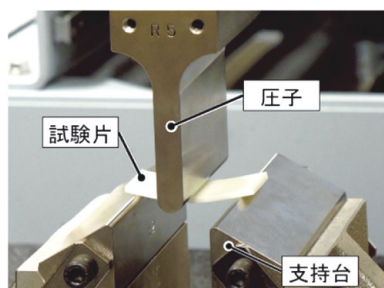


図7 曲げ特性試験

引張最大応力及び引張弾性率の評価は、JIS K 7161-1「プラスチック-引張特性の求め方-第1部」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、試験片数は3片とした（図8）。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ともに1mm/minとした。



図8 引張特性試験（引張最大応力測定）

プリンタ造形物の断面構造観察には、走査型電子顕微鏡（日本電子製JSM-6610LA）を使用した。

プリンタ造形物の材料充填率は、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。

フィラメント材料の直径は、ノギスを使って20箇所を測定した。

フィラメント材料の溶融時の流動特性として、JIS K 7210-1「プラスチック-熱可塑性プラスチックのメルトマスフローレイト及びメルトボリュームフローレイトの求め方-第1部」に準拠して、メルトボリュームフローレイト（MVR）を測定した。試験条件はABS樹脂の標準条件である220℃、10kgとした。

## 3. 試験結果

### 3.1 ABS/GF複合材を使った3Dプリンタ造形物の機械特性

ABS樹脂にガラス繊維を複合化したフィラメント材料を使用した3Dプリンタ造形物の機械特性がどのように変化するかについて、GF含有率やフィラメント材料の吐出量を変えて造形し評価した。このうち、GF含有率10%と15%については、材料の溶融時の流動特性MVRを調整した①・②の2種類を使用した。また、フィラメント材料の吐出量は、装置設定の標準値と15%増量の2条件とした。図9に曲げ最大応力、図10に曲げ弾性率を示す。

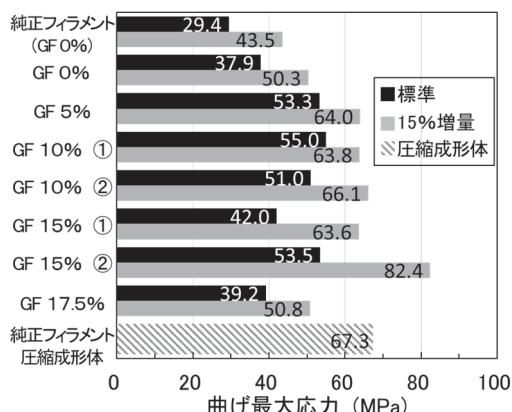


図9 ABS/GF 複合材プリント造形物の曲げ最大応力

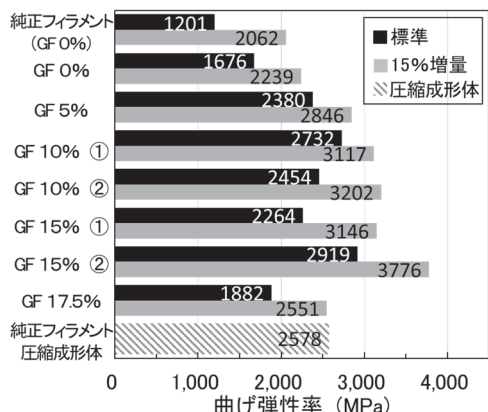


図10 ABS/GF プリント造形物の曲げ弾性率

プリント造形物の曲げ最大応力や曲げ弾性率は、GFを5～17.5%含有したフィラメント材料を使用することで、GFを含有しない純正フィラメントの造形物に比べ、高い値を示した。また造形時のフィラメント材料の吐出量を15%増量した造形物の方が、標準吐出量の造形物より曲げ最大応力・弾性率ともに高い値を示した。GF含有材料を使用することで造形物の曲げ特性は、純正フィラメント材料の圧縮成形体と同等以上の特性値が得られ、中でも材料がGF含有率15%②で樹脂吐出量を15%増量した造形物が、最も高い値を示した。

図11にプリント造形物の断面構造を示す。プリント造形物を構成する細いフィラメント中に、複合化したGFがフィラメントと同方向に配向・分散していることを確認し、GFの

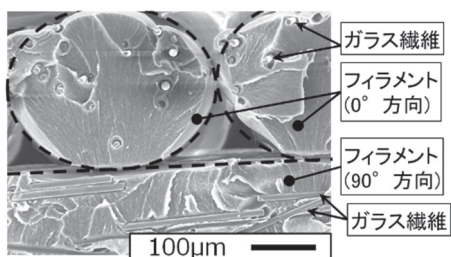


図11 ABS/GF プリント造形物の断面構造 (GF含有率5%, フィラメント材料吐出量: 標準)

補強効果により曲げ最大応力や曲げ弾性率が向上したものと考える。通常、圧縮成形や射出成形で製作したプラスチック成形体は、ガラス繊維含有率が増加するとともに曲げ最大応力や曲げ弾性率が高くなる傾向を示すが、GF含有率15%①やGF含有率17.5%のプリント造形物はガラス繊維含有による補強効果が低い結果となった。そこで造形物の材料充填率(図12)やフィラメント材料の溶融時の流動特性(図13)を調べたところ、GF含有率15%①やGF含有率17.5%の造形物は、材料充填率が低く空隙が多い傾向にあった。また、これら造形物に使用したフィラメント材料はMVRが小さく、溶融時の流動性が悪いことからプリント造形物製作時の熔融粘度が高くなり、得られた造形物の材料充填率が低くなったものと推察する。これに対し、GF複合フィラメント材料のMVRを大きくし流動性を調節したGF含有率10%②やGF含有率15%②のフィラメント材料では、最大曲げ応力や弾性率が向上する動きが見られた。

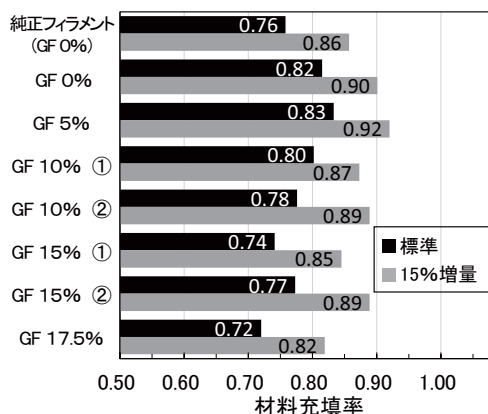


図12 ABS/GF 複合材プリント造形物の材料充填率

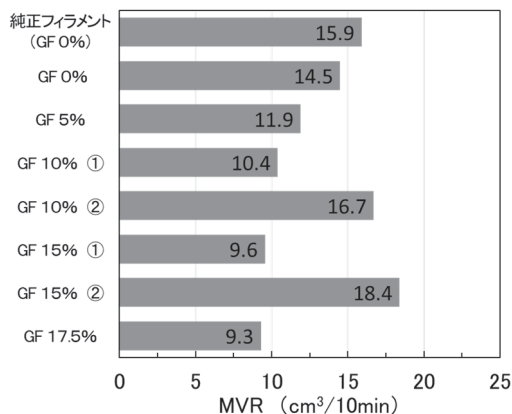


図13 ABS/GF 複合材フィラメント材料の溶融時の流動特性

上記曲げ特性と同様に、ABS/GF複合材を使用したプリント造形物の引張特性についての試験を行った。図14に引張最大応力、図15に引張弾性率を示す。プリント造形物の引張最大応力・引張弾性率は、GFを5～17.5%含有したフィラメント材料を使用することで、GFを含有しない純正フィラ

ントの造形物に比べ高い値を示した。また造形時のフィラメント材料の吐出量を標準条件より15%増量した造形物の方が、引張最大応力・弾性率ともに、より高い値を示した。GF含有材料を使用することで造形物の引張特性は、純正フィラメント材料の圧縮成形体と同等以上の特性値が得られ、中でも材料がGF含有率15%②で樹脂吐出量を15%増量した造形物が、最も高い値を示した。

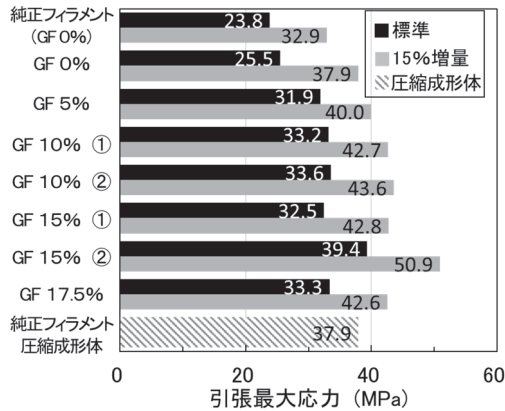


図 14 ABS/GF 複合材プリンタ造形物の引張最大応力

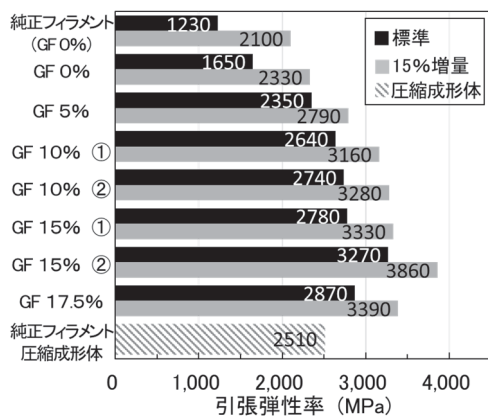


図 15 ABS/GF 複合材プリンタ造形物の引張弾性率

### 3.2 PLA/GF複合材を使った3Dプリンタ造形物の機械特性

PLA樹脂にガラス繊維を複合化した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を評価した。ここではプリンタ造形物製作時のフィラメント材料の吐出量は、装置設定の標準値と15%増量、30%増量の3条件とした。図16に曲げ最大応力、図17に曲げ弾性率を示す。プリンタ造形物の曲げ最大応力や曲げ弾性率は、GFを7.5~15%含有したフィラメント材料を使用することで、GFを含有しない純正フィラメントの造形物に比べ、高い値を示した。また造形時のフィラメント材料の吐出量を15%若しくは30%増量した造形物の方が、標準吐出量の造形物より曲げ最大応力・弾性率ともに高い値を示した。GF含有材料を使用することで造形物の曲げ特性は、純正フィラメント材料の圧縮成形体と同等以上の特性値が得られ、中でも材料が

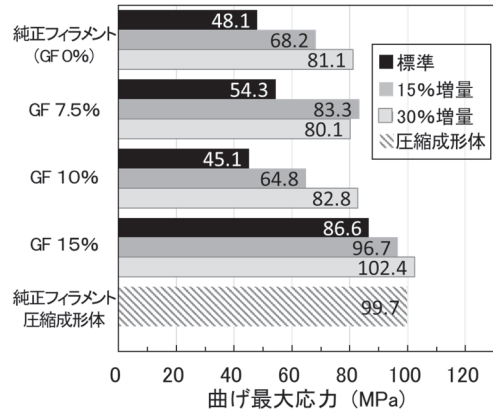


図 16 PLA/GF 複合材プリンタ造形物の曲げ最大応力

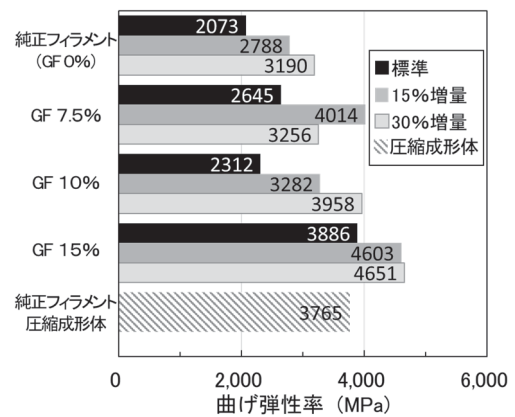


図 17 PLA/GF 複合材プリンタ造形物の曲げ弾性率

GF含有率15%で樹脂吐出量を15%増量や30%増量した造形物が、最も高い値を示した。GF含有率10%の造形物は、曲げ最大応力・曲げ弾性率ともにGF含有率7.5%の造形物に比べGF含有率が多いにもかかわらず低い結果となった。そこで造形物の材料充填率(図18)やフィラメント材料の直径(表3)を調べた。GF含有率10%のフィラメント材料は、直径が他フィラメント材料に比べて細いため、プリンタで造形物を製作する際のフィラメント材料の供給される体積量が少なくなり、結果として造形物の材料充填率が他造形物に比べ

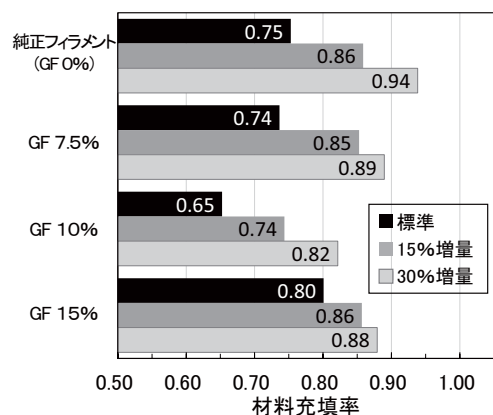


図 18 PLA/GF 複合材プリンタ造形物の材料充填率

低くなったものと推察する。フィラメント材料の直径は、造形物の機械特性に大きく影響すると考える。

表3 PLA/GF 複合材フィラメント材料の直径

フィラメント材料	直径 (mm)
純正フィラメント (GF 0%)	1.68~1.82
GF 7.5%	1.66~1.82
GF 10%	1.44~1.63
GF 15%	1.64~1.78

上記曲げ特性と同様に、PLA/GF 複合材を使用したプリンタ造形物の引張特性についての試験を行った。図19に引張最大応力、図20に引張弾性率を示す。プリンタ造形物の引張最大応力・引張弾性率は、GFを7.5~15%含有したフィラメント材料を使用することで、曲げ特性と同様にGFを含有しない純正フィラメントの造形物に比べ高い値を示した。またGF含有率7.5%や15%の造形物では、造形時のフィラメント材料の吐出量を標準条件より15%増量若しくは30%増量した造形物の方が、引張最大応力・弾性率ともに、より高い値を示した。GF含有率10%の造形物の引張特性は、曲げ特性と同様にフィラメント材料の直径が細かったため造形物の材料

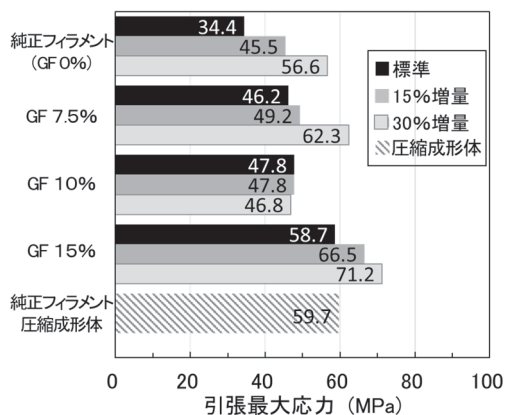


図19 PLA/GF 複合材プリンタ造形物の引張最大応力

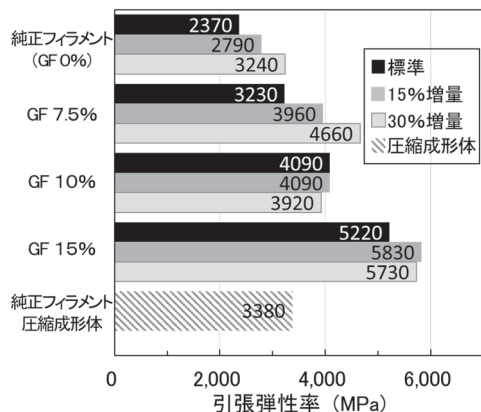


図20 PLA/GF 複合材プリンタ造形物の引張弾性率

充填率が低くなり、特性値が低かったものと推察する。GFを含有するフィラメント材料を使うことで、造形物の引張特性は純正フィラメント材料の圧縮成形体と同等以上の特性値が得られ、中でも材料がGF含有率15%で材料吐出量を15%若しくは30%増量した造形物が、より高い値を示した。

#### 4. まとめ

FDM式3Dプリンタで、ガラス繊維を複合化したフィラメント材料を使用したときのプリンタ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樹脂やPLA樹脂にガラス繊維を複合化したフィラメント材料を使うことで、プリンタ造形物の曲げ・引張の最大応力や弾性率は、純正フィラメントの造形物に比べ高くなることがわかった。
- (2) 造形物製作時にフィラメント材料の吐出量を調整し、プリンタ造形物の材料充填率を高めることで、曲げ・引張の最大応力や弾性率が、さらに高くなることがわかった。
- (3) ABS/GF複合材について、同じガラス繊維含有率でもフィラメント材料の溶融時の流動特性を調整することで、得られるプリンタ造形物の材料充填率が変わり、機械特性に大きく影響することがわかった。

今後は、プリンタ機種や装置のノズル直径、造形物の形状などを変えて製作した3Dプリンタ造形物の特性評価などを行い、さらに技術蓄積を進める予定である。

#### 謝辞

本研究で使用した万能材料試験機及び試験片製作機は、競輪の補助を受けて整備されました。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)
- 3) 吉田昌充・可児浩・瀬野修一郎 他：熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の機械特性, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.317, pp77-81, (2018)