樹脂粉末床溶融結合法による複合材料造形技術の構築

宮内宏哉*1

忍*2

村松遥子*3

上原

[要 旨]

ファイバーレーザを光源とする樹脂粉末床溶融結合法において、ナイロン 11 粉末にガラスビーズを 複合した材料の造形を試みた。ガラスビーズ複合材料を安定して造形するためには、レーザ出力を高め ることが有効であった。粒径 15µm のガラスビーズを 30wt%複合した造形品の引張弾性率及び曲げ弾性 率は、ナイロン 11 造形品の約2倍となり、造形精度も向上した。

1 はじめに

樹脂粉末床溶融結合法とは、3D プリンターと して知られている付加製造の一方法である。樹脂 粉末材料を敷いた層(厚0.1mm 程度)にレーザ光 を走査してレーザ照射部のみを溶融させ、この層 を繰り返し積層・溶融させた後、溶融部を再凝固 させて三次元構造体を作製する。形状自由度が高 く、強度に優れた造形品が得られる利点があり、 形状確認だけでなく、試作品として機構・機能の 評価にも用いることができる利点がある¹⁾。

樹脂粉末床溶融結合法の課題の一つが、造形可 能な材料が限られている点である²。レーザ光に よる樹脂粉末材料の溶融の際に、材料の融点近く まで予熱するため、造形可能な材料は装置の耐熱 温度以下の融点を持つ熱可塑性樹脂に限られる。 また再結晶温度と凝固点の温度差が大きい材料で あることが求められる。これは、溶融した樹脂粉 末材料が再凝固する際に発生する応力を抑えるた め、溶融した樹脂粉末材料を再結晶温度と凝固点 の間の温度に保ったまま次の層の造形を進め、全

)
-

ての層の造形が終了した後に冷却するために必要 である。これら特性を満たす材料として、樹脂粉 末床溶融結合法ではナイロン11及び12が広く用 いられている。

一方、工業製品として最も広く利用されている ナイロン樹脂は、ナイロン6である。ナイロン6 は、ナイロン11及び12に比べて弾性領域での強 度が高い。そのため、樹脂粉末床溶融結合法によ るナイロン11及び12の造形品は、ナイロン6を 用いた部品の形状確認には使えるが、機構・機能 の評価には利用できないことが課題となっている。

そこで本研究では、樹脂粉末床溶融結合法によ り、ナイロン6を用いた部品の機構・機能を評価 可能な試作品を提供するため、ナイロン11粉末 にガラスビーズを複合した材料の造形を試み、弾 性領域での強度向上を目指した。また、実用性を 確認するため、造形品の引張伸び及び形状精度を 評価した。

2 実験方法

2.1 造形装置

粉末床溶融結合法による造形装置は、アスペクト製 RaFaE1300F を用いた。本装置の熱源は、 ビーム径 0.17mm のファイバーレーザを採用している。造形条件は、レーザ走査速度を 10m/sec、 レーザ走査方向を 30 度方向、積層ピッチを 0.1mm とした。

ガラスビーズを複合したナイロン 11 材料の造 形条件を探索するため、造形条件のうち、レーザ 出力、輪郭描画出力、オフセット Fill、オフ セット Out、走査幅、ベースを表 1 に示す条件に 設定し、L18 直行表に割り付けて造形を行った。

表1 造形条件

No.	因子名	水準1	水準2	水準3
А	レーザ出力	10W	12W	14W
		15W	17W	21W
С	輪郭描画	-5W	-7W	-9w
D	オフセット	0.10mm	0.17mm	0.25mm
	Fill			
Е	オフセット	0.07mm	0.10mm	0.15mm
	Out			
F	走查幅	0. 06mm	0. 08mm	0.10mm
G	ベース	無	下	上下
Н	ダミー	無	無	無

2. 2 造形材料

ナイロン 11 粉末材料には ASPEX-FPA 黒(平均 粒子径 50μm)を用いた。拡大写真を図1に示す。 黒色部がナイロン 11 粉末である。当該ナイロン 11 粉末材料は粉砕法により調製されており、形 状・サイズともに様々であることが確認できた。

ガラスビーズは、表2に示す3種類を用い、ガ ラスビーズが20、40、60wt%になるよう、ナイロ ン11 粉末に添加して混合した。ガラスビーズは いずれも比重2.5のソーダガラスであり、活性化 処理は施していない。粒径は、レーザ回折式粒度 分布測定によりメディアン径を求めた。



50µm

図1 ナイロ	ン 11 粉末材料	· 拡大写真
--------	-----------	--------

表 2	ガラ	スド・	ーズ
<u>1X C</u>	// //		



2.3 強度評価

造形品の強度は、インストロン製万能材料試験 機1122型(5kN)を用い、引張弾性率及び曲げ弾 性率を測定した。引張弾性率は、つかみ具間距離 40mm、試験速度 1mm/min.とし、引張ひずみ 0.05% 及び 0.25%における応力から算出した。曲げ弾性 率は、試験間距離 64mm、試験速度 1mm/min.の三 点曲げ試験における、曲げひずみ 0.05%及び 0.25%における応力から算出した。

2. 4 形状精度評価

樹脂粉末床溶融結合法の造形では、余剰熱の影響により、凸は大きく、穴は小さく造形される傾向がある。そのため、同じ寸法で造形した凸と穴の寸法差が小さいほど、精度の高い造形が可能となる。今回、造形品の形状精度を確認するため、図2に示す、同じ寸法の凸と穴を有する試料を作製した。凸及び穴は、5mm、3mm、2mm、1mm角の4種類を設けたが、今回、寸法差が最も大きかった5mm角の凸と穴について、画像測定で求めた寸法の差異を評価した。



図2 形状精度確認試料

3 結果

3.1 造形条件検討結果

ナイロン 11 粉末にガラスビーズを複合した材 料の造形を導出するため、品質工学手法(パラ メータ設計)を用いて実験を行った。信号因子は ガラスビーズ複合量、特性値は引張弾性率とした。 制御因子は表1に示す造形条件を用い、誤差因子 は表2に示すガラスビーズの粒径とした。求めた SN 比の要因効果図を図3に示す。レーザ出力(A) の要因効果が最も大きく、レーザ出力が大きくなるほど SN 比が向上した。



図3 SN 比の要因効果図

3.2 強度評価結果

ナイロン11 粉末単体及びナイロン11 粉末にガ ラスビーズを複合した材料の造形品から求めた引 張弾性率及び曲げ弾性率をそれぞれ図4、5に示 す。造形時のレーザ出力は、ナイロン11 粉末に ガラスビーズを複合した材料についてはいずれも 21W、ナイロン11 材料は過去の研究³⁰で得られた 最適条件である17Wとした。

ガラスビーズ α (粒径 69μ m) 及び β (35μ m) を複合した材料の引張弾性率・曲げ弾性率は、複 合量が 40wt%までは向上したが、複合量が 60wt% になると低下した。一方、ガラスビーズ γ (粒径 15μ m) を複合した材料の引張弾性率・曲げ弾性 率は、複合量が増えるほど向上し、複合量が 60wt%の造形品が最も高い値を示した。





3.3 伸び評価結果

引張弾性率及び曲げ弾性率の向上が著しかった ガラスビーズγ(粒径15µm)複合造形品につい て、破断に至るまで引張試験を継続した。その応 力/ひずみ曲線を図6に示す。20wt%複合した造形 品は、弾性変形後に塑性変形を経て、約18%伸び た後に破断した。一方、40wt%及び60wt%複合し た造形品では、弾性変形領域で破断しており、5% 未満のひずみ量であった。



図6 応力/ひずみ曲線 (ガラスビーズγ複合造 形品)

3.4 形状精度の評価結果

ガラスビーズ γ (粒径 15 μ m)を複合した造形 品について、形状精度を評価した結果を図7に示 す。ガラスビーズγの複合量が増えるほど、凸と 穴の寸法差は小さくなり、形状精度が向上したこ とが確認できた。





引張試験片(80mm 長)の端部における反り量 を図8に示す。ガラスビーズγの複合量が増える ほど反り量は減少した。



4 考察

4.1 強度及び造形精度の向上に係る考察

ガラスビーズの複合によりナイロン 11 造形品 の強度を向上させるためには、粒径が最も小さい ガラスビーズyが最も有効であった。これは、ナ イロン 11 粉末の隙間にガラスビーズyが入り込 んだ状態で造形されることで、緻密な造形品が得 られたことが要因と考えられる。そこで、造形品 の密度を測定した結果を図9に示す。ガラスビー ズγが最も密度が高くなっており、ガラスビーズ γがナイロン 11 粉末の隙間に入って複合するこ とにより、強度向上に寄与したと推測される。



図9 造形品密度評価結果

次に、ガラスビーズ複合による形状精度の向上 について考察する。樹脂粉末積層造形においては、 樹脂粉末がレーザにより溶融された後、冷え固 まって固体となる際に体積が収縮するため、造形 品はレーザ走査に用いる三次元データよりも小さ く出来上がる。ガラスビーズγ(粒径 15 µm)を 複合した引張試験片について、熱収縮率を算出し た結果を図 10 に示す。ガラスビーズγの複合量 が増えるほど熱収縮率は小さくなった。これによ り、熱収縮時の変形量が少なくなったことが、反 りの低減及び造形精度の向上に寄与したと考える。



図10 熱収縮率(ガラスビーズγ複合造形品)

4. 2 ガラスビーズγの最適複合量の検証

ガラスビーズッを40wt%以上複合させた造形品 は、図6に示すとおり、弾性変形領域で破断して おり、靱性が低く実用には向かないことが示唆さ れた。そこで、強度と伸びを両立するガラスビー ズッの複合量を検討するため、ガラスビーズッを 30wt%複合した材料の造形を行い、その引張弾性 率、曲げ弾性率及び伸びを評価した。その結果を 図11~13に示す。ガラスビーズッを 30wt%複合 した造形品は、20wt%と40wt%複合した造形品の 中間の強度と伸びを示しており、強度と伸びを両 立する意図通りの造形品となっていることが確認 できた。



図11引張弾性率(ガラスビーズγ複合造形品)





図 13 応力/ひずみ曲線(ガラスビーズγ複合造 形品)

4.3 着色による影響の検証

熱源に炭酸レーザを用いる樹脂粉末積層造形で は、レーザ光はナイロン11樹脂に直接吸収され て発熱するため、粉末材料の色彩についての制限 は無い。一方、ファイバーレーザを採用した樹脂 粉末積層造形では、レーザ光はナイロン11樹脂 に吸収されないため、粉末材料を黒く着色し、黒 色の着色剤にレーザ光を吸収させて発熱させる。 今回、ガラスビーズを複合することで粉末材料の 黒色が薄くなっているため、レーザ光の吸収が低 下し、特にガラスビーズα及びβを60wt%複合し た造形品では造形品密度及び強度が低下したこと が想定される。

既存文献⁴では、白色の粉末材料は、カーボン 等で黒色に着色することで、ファイバーレーザを 採用した樹脂粉末積層造形で造形できることが報 告されている。そこで今回、ガラスビーズβを 60wt%複合した材料に、更にカーボンブラックを 0.2wt%添加して混合し、粉末材料全体を黒色に着 色した。この材料を用いて造形した結果を図 14 に示す。



図 14 ガラスビーズβ 60wt%複合 造形品写真 (a) カーボンブラック無し (b) カーボンブラック 0. 2wt%添加

カーボンブラックを添加した造形品(図 14(b)) は、造形不具合が発生した。当該不具合は、造形 時に材料へ加える熱エネルギーが不足し、層間の 結合が弱い場合に発生する不具合とよく似ていた。 既存文献では、カーボンブラックの添加により造 形材料を着色することで、良好に造形できた旨が 報告されている。本研究では、カーボンブラック の添加により、レーザ光では溶融しないガラス ビーズも着色された点が、既存文献とは異なって いる。レーザ光がガラスビーズ側にも吸収され、 溶融したい樹脂に吸収されるレーザ光が減ったこ とが造形不具合の原因と推定される。

5 まとめ

ファイバーレーザを光源とする樹脂粉末床溶融 結合法において、ナイロン 11 粉末にガラスビー ズを複合した材料の造形を試みた。ガラスビーズ 複合材料を安定して造形するためには、レーザ出 力を高めることが有効であった。今回評価した粒 径 15~69 μ mのガラスビーズでは、粒径が最も小 さい粒径 15 μ mのガラスビーズを 30wt%複合した 場合に、造形品の弾性変形領域での強度が最も向 上した。粒径 15 μ mのガラスビーズを 30wt%複合 した造形品の引張弾性率及び曲げ弾性率は、ナイ ロン 11 造形品の約 2 倍であった。伸びは低下し たが、当該ガラスビーズを 40wt%以上複合した造 形品は弾性変形領域で破断したが、30wt%複合し た造形品は塑性変形領域で破断しており、使用し やすい材料と考えられる。ガラスビーズを複合し た造形品はいずれも、造形精度が向上した。これ はガラスビーズ複合による熱収縮率の低下が寄与 していると考えられる。

(参考文献)

1)新野俊樹:日本機械学会誌,118,1154,p.12 (2015)

2) 丸谷洋二, 早野誠治: 解説 3D プリンター, オ プトロニクス社, p. 60 (2014)

3) 宮内宏哉,後藤卓三,前田一輝:京都府中小企業技術センター技報,43, p.1(2015)

4)伊藤史朗,新野俊樹:2016年度精密工学会秋

季大会学術講演会講演論文集, p. 309 (2016)