

3Dプリンタの高度活用に関する調査（第2報）

強度向上を目的とした品質工学による造形条件の検討

竹保義博, 佐々木秀和, 和田雅行

Research on advanced application of 3D-Printer II

Study of print settings by quality engineering to improve object strength

TAKEYASU Yoshihiro, SASAKI Hidekazu and WADA Masayuki

FDM（熱溶融積層）方式の3Dプリンタにより出力した造形物の造形方向による引張強さの差について調査したところ、造形テーブルに平行な面内ではほぼ一様であるのに対し、積層方向はそれらの約7割しかないことが判明した。そこで、積層方向の引張強さに及ぼす造形条件の影響について、品質工学のパラメータ設計を活用することで、最適化した造形条件によって積層方向の引張強さを約2割向上させることができた。ただし、造形テーブルに平行な面内の引張強さも約2割向上したため、積層方向による引張強さの差は縮まらなかった。

キーワード：3Dプリンタ, FDM, 引張強さ, パラメータ設計

1. 緒言

当センターでは、2015年より材料押出法に分類されるFDM方式の3Dプリンタと材料噴射法に分類されるインクジェット方式の3Dプリンタを導入し、研究開発や企業支援業務での活用を開始した。中でもFDM方式の3Dプリンタは、10万円以下で入手可能な組み立てキットであり、インクジェット方式に比べ造形精度は低いながらも造形材料が1kgあたり3000円程度と安価であることから気軽に実験や試験用のジグ製作に活用している。しかし、造形にユーザーの経験が必要とすることから、導入当初は造形に失敗したり寸法が設計値と異なることから再造形したりすることが度々あった。そこで前報においては、3Dプリンタで出力した造形精度評価用ゲージを三次元測定機により測定し、得られた誤差傾向をもとに設計モデルに

補正を加えて造形することで造形精度を改善できることを示した。

本報告では、前報¹⁾に続き3Dプリンタの高度活用を目的として、FDM方式の3Dプリンタによる造形物の機械的性質の向上に取り組んだ。品質工学のパラメータ設計を活用して造形物強度に造形条件が与える影響を評価したので、その結果について報告する。

2. 造形方向による引張強さの比較

2.1 実験方法

2.1.1 使用した3Dプリンタ

実験では前報と同様に10万円以下の組み立てキットとして販売されているFDM方式の3Dプリンタ（マイクロファクトリー PRN3D）を使用した。外観写真を図1に示す。スライサーソフトはUltimaker Curaを使用した。

2.1.2 引張強さの比較方法

FDM方式の3Dプリンタによる造形物の強度について、造形方向による機械的性質の違いを評価するため、引張試験片を造形スペースに異なる方向で配置して造形し、引張試験を行った。試験片形状はJIS K 7139（プラスチック

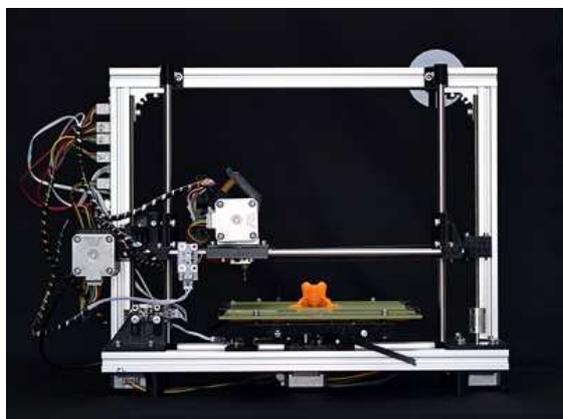


図1 実験で使用した3Dプリンタ

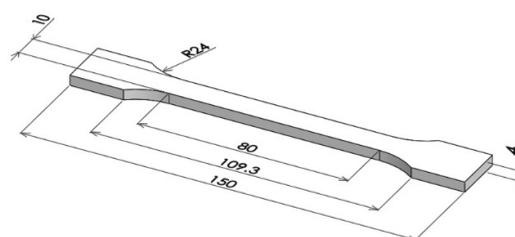


図2 試験片の寸法（単位：mm）

ックー試験片)に規定するダンベル形引張試験片(タイプ A1)を参考にした。寸法を図2に示す。FDM方式の3Dプリンタは内部を空洞にすることが可能であるが、試験片は内部を造形材料で埋める充填率100%の条件で造形した。その他の主な造形条件を表1に示す。

項目	条件
造形材料	PLA (ポリ乳酸)
ノズル径	0.4mm
積層ピッチ	0.3mm
ノズル温度	185°C
テーブル温度	55°C

試験片の造形スペースへの配置は、造形テーブルに平行な面内(XY面)においてX軸に平行な配置を0°とし、反時計回りに22.5°おきに90°までの5方向と、積層方向(Z軸方向)とした。配置の模式図を図3に示す。引張強さは、試験片を万能試験機により試験速度1mm/minで引っ張り、破断に至るまでの最大荷重を記録し、これを断面積で割って求めた。

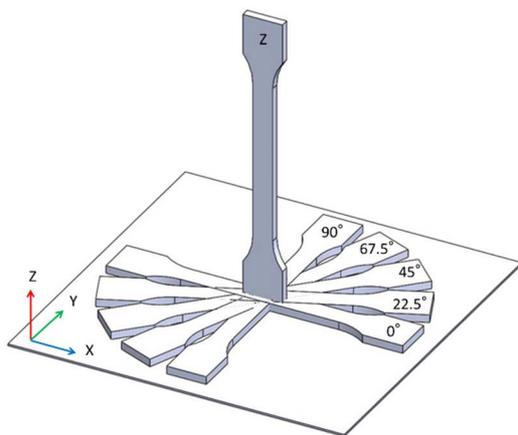


図3 試験片の造形スペースへの配置

2.2 造形方向による引張強さの比較結果

造形スペースに配置方向を変えて造形した試験片を引っ張った結果を図4に示す。造形テーブルに平行な面内に配置した試験片の引張強さの平均が35.5MPaであったのに対し、積層方向に配置した試験片の引張強さは23.9MPaで67.5%と7割以下の強さであった。

FDM方式の3Dプリンタは、造形物の内部を全て樹脂で埋める場合、積層する各層を幅を持った線で塗り潰す。実験で使用した3Dプリンタは、1層目をX軸に対し+45°の斜線で塗り潰した場合、2層目は-45°の斜線で塗り潰すように交互に直交する斜線を積み重ねる。造形テーブルに平行な1層に注目すると、隣り合った樹脂の結合強度が影響する斜線に直交方向の引張強さは、樹脂が連続する斜線方向の引張強さに対し低いと考えられる。しか

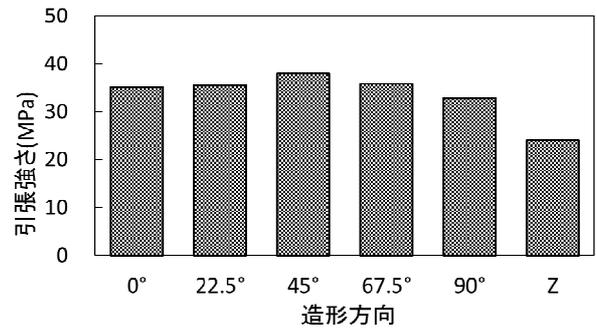


図4 造形方向と引張強さ

し、斜線が交互に積み重ねることにより、造形テーブルに平行な面内ではどの方向の引張強さも平均化されて一様になると考えられる。一方、積層方向は必ず樹脂層が断続的に積み重ねられるため、造形テーブルに平行な面内に比べ引張強さが小さいと考えられる。なお、造形物の積層方向の引張強さはノズルから吐出された樹脂とすでに積層された樹脂の結合強度が影響し、さらにこの結合強度は造形条件に影響されると考えられることから、次章では積層方向の引張強さと造形条件の関係を調べる。

3. 品質工学による評価

3.1 実験方法

3.1.1 実験計画

FDM方式の3Dプリンタにより出力した造形物の積層方向の強度について、造形条件が引張強さに及ぼす影響を品質工学のパラメータ設計を活用して評価した。本実験では、積層方向の引張強さが最大化することが望ましいことから、引張強さを標示因子とした望大特性により評価することとした。

実験はL₁₈直交表を用い、3Dプリンタの造形条件を制御因子として割り付けて実験を行った。制御因子とその水準を表2に示す。制御因子Fの吐出率は、ノズルから押し出す材料が空間を埋めるために必要な容積の理論値に対する実際の吐出量の割合である。制御因子Gの積層ピッチは、ノズル径に対する積層ピッチの寸法割合を水準として割り付けた。制御因子Hの壁の厚さは、モデル

表2 制御因子と水準

制御因子\水準	1	2	3
A フライント色	白	黒	—
B ノズル径(mm)	0.3	0.4	0.5
C ノズル温度(°C)	175	190	205
D テーブル温度(°C)	30	55	80
E プリント速度(mm/s)	30	40	50
F 吐出率(%)	90	95	100
G 積層ピッチ(mm)	B×1/4	B×2/4	B×3/4
H 壁の厚さ(mm)	0.4	1.5	3.1

外周を一筆書きで埋める幅の設定値である。水準の背景がグレーの造形条件が、日常的によく利用している現行条件である。誤差因子は引張試験片を同じ条件で3本造形し、それらの引張強さのばらつきとした。

3.1.2 因子の割り付けと実験方法

実験に用いた試験片は、造形中に倒れにくく造形時間が短くなるよう背の低い四角柱とし、中央部で破断するよう円弧状のくびれを設けた(図5)。引張強さは、1章と同様に試験片を万能試験機により試験速度1mm/minで引っ張り、破断に至るまでの最大荷重を断面積で割って求めた。

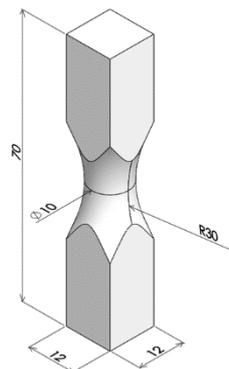


図5 引張試験片形状(単位:mm)

表3 L₁₈直交表の割り付けと実験結果とSN比

実験No.	制御因子									引張強さ(MPa)			SN比(db)
	A フィラメント色	B ノズル径	C ノズル温度	D テーブル温度	E プリント速度	F 吐出率	G 積層ピッチ	H 壁の厚さ	y ₁	y ₂	y ₃		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.0	6.4	8.8	17.19	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	11.0	13.0	13.6	21.85	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	14.1	21.8	15.8	24.30	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	10.8	13.1	14.0	21.88	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	32.4	42.7	30.9	30.71	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	20.6	20.0	20.6	26.21	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	14.1	11.1	11.3	21.56	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	11.8	12.5	13.2	21.91	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	48.6	36.1	32.9	31.52	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	7.2	6.1	5.5	15.78	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	9.3	11.0	13.4	20.70	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	7.0	16.2	13.5	20.04	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	8.0	7.0	6.6	17.05	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	19.5	16.1	26.1	25.77	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	41.1	43.4	36.5	32.05	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	35.8	26.0	29.7	29.46	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	23.9	20.3	22.6	26.89	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	28.3	28.5	24.9	28.64	

実験に用いる試験片の造形条件について、L₁₈直交表へ割り付けた制御因子と水準値を表3に示す。

3.2 品質工学による評価結果

3.2.1 実験結果及び考察

各実験No.に割り付けた条件で造形した試験片を引っ張って求めた引張強さをy₁, y₂, y₃とすると、望大特性のSN比は次式によって求まる。

$$\eta = -10 \log \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3^2} \right) \right\} \quad (db) \quad (1)$$

実験結果を表3に示し、SN比の要因効果図を図6に示す。要因効果図は、各実験No.ごとに求めたSN比の値を制御因子の水準ごとに平均したもので、制御因子の効果の大きさを表す。この図より、積層方向の引張強さのSN比に対する影響は、ノズル径、ノズル温度、吐出率、積層ピッチの造形条件が大きいことが分かった。ノズル径については、実験の際0.3mmのノズルから吐出される樹脂の量が安定しないことが見た目でも明らかであったことから、納得できる結果である。ノズル温度については、吐出する樹脂温度を決定する要因であり、温度が高いほど直前の樹脂層や隣接する樹脂との結合が強くなることが分かった。吐出率については、樹脂が十分に供給されることで造形物が密になり強度が増すことが分かった。

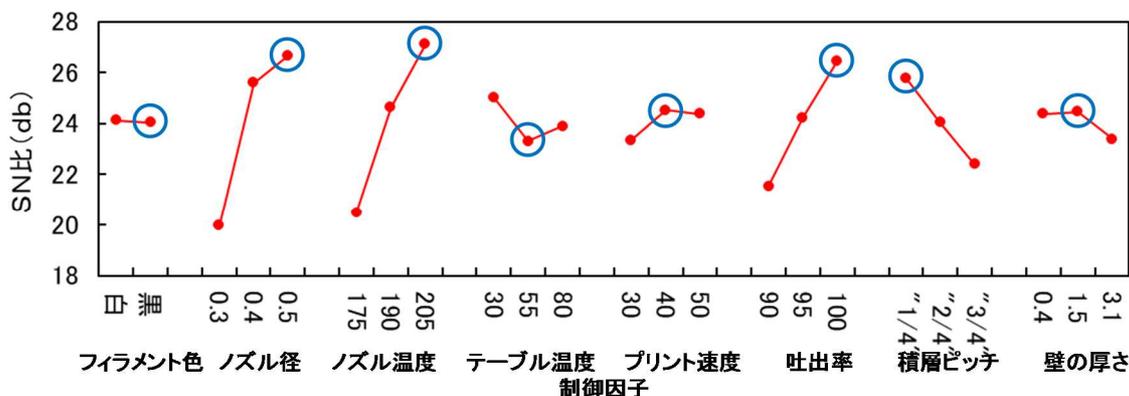


図6 要因効果図

積層ピッチについては、小さいほど強度が増すことが分かった。積層ピッチが小さいと吐出圧力が高まることから、樹脂が隙間なく充填されると考えられる。

3.2.2 最適条件の推定および確認実験

実験の再現性を確認するため、現行条件と最適条件のSN比の差から求めた利得について、推定した効果と実際の効果として比較した。最適条件は図6の要因効果図において○で囲んだ条件の組み合わせとした。利得が過大な推定とならないよう、影響の小さい要因については現行条件のままとしている。現行条件と最適条件で造形した試験片の引張強さを表4に示す。推定と確認実験によって求めた現行条件と最適条件のSN比、利得を比較した結果を表5に示す。利得の推定値が9.1dbであるのに対し、確認実験の利得は4.8dbと再現性は低かった。これは、最適条件は確認実験で引張強さが大きくばらつくことから、望大特性ではSN比にばらつきが十分反映されないことが原因の一つと考えられる。

表4 確認実験の結果

	引張強さ(MPa)			平均 (MPa)
	y ₁	y ₂	y ₃	
最適条件	43.9	39.2	47.2	43.4
現行条件	25.3	23.6	26.2	25.0

表5 利得の比較

	SN比 (db)	
	推定値	確認実験
最適条件	33.8	32.7
現行条件	24.7	27.9
利得	9.1	4.8

3.2.3 造形方向による引張強さの差の確認

FDM方式の3Dプリンタによる造形物の強度について、

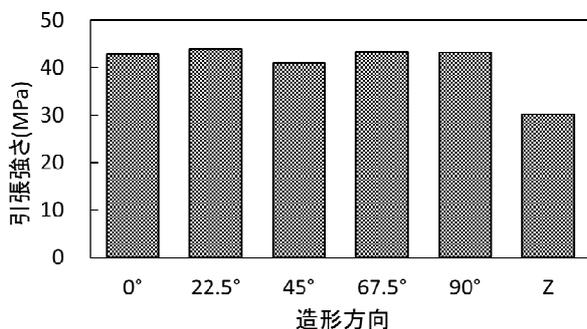


図7 造形方向と引張強さ

最適条件によって造形方向による引張強さの差が縮まるかどうかを確認するため、2章の実験方法で引張試験を行った。結果を図7に示す。最適化した造形条件により積層方向の引張強さは30.2MPaと現行条件に対し26.3%向上した。しかし、造形テーブルに平行方向の引張強さの平均値も42.8MPaで現行条件に対し20.6%向上した。このため、積層方向による引張強さの差は縮まらない結果となった。最適条件によって積層方向だけでなく隣接する樹脂との結合強度も増したことが原因と考えられる。

4. 結 言

FDM方式の3Dプリンタにより出力した造形物の積層方向の引張強さの向上を目的として、品質工学のパラメータ設計を活用して造形物の強度に造形条件が与える影響を評価し、以下の結果を得た。

- (1) 選定した造形条件の中で、ノズル径、ノズル温度、吐出率、積層ピッチの影響が大きいことが分かった。一方で、フィラメントの色、テーブル温度、プリント速度、壁の厚さは影響が小さいことが分かった。
- (2) 現行条件と最適条件から推定した利得は確認実験によって再現しなかったが、最適条件によって積層方向の引張強を向上することはできた。
- (3) 最適条件によって造形テーブルに平行方向の引張強さも向上したため、造形方向による引張強さの差は縮まらなかった。

今回の実験によって、FDM方式の3Dプリンタにより出力した造形物の機械的性質に影響する造形条件を効率的かつ定量的に明らかにすることができた。現行条件は造形物の外観品質を重視して経験的に決めた条件であり、ノズル温度を低めにすることで最表面の樹脂が垂れるのを防ぎ、吐出率を下げることで積層の段差を目立たなくすることを狙っている。今後は用途によって造形条件を使い分けることを考えている。なお、ノズル温度については今回検討した条件の範囲外に最適条件があることも考えられるので、追加で詳細な実験をおこなう予定である。

文 献

- 1) 竹保ほか3名：広島県立総合技術研究所東部工業技術センター研究報告，3Dプリンタの高度活用に関する調査（第1報）設計モデルの補正による高精度造形，30（2017）