

3D プリント造形物の寸法精度と強度

佐藤 一志^{*1}, 角田 圭佑^{*2}, 石川信幸^{*1}

Dimensional Accuracy and Strength of 3D printed objects

Kazushi SATO, Keisuke TSUNODA and Nobuyuki ISHIKAWA

This paper presents dimensional accuracy data and tensile strength data of 3D printed objects. The objects were produced by means of fused deposition modeling technology. As the result of the fused deposition modeling, the object have a layered structure. Taking into account the layered structure, the specimen printed in three direction of the 3D printing space for the measurement of the anisotropic feature of the 3D printed object. Besides examination for the anisotropy of the layered structure, specimen thickness and filling method of the each layer were studied. However, in this study, the specimen thickness and the filling method showed minor variations in contrast to the specimen printing direction. The dimensional accuracy and the tensile strength were less in the layer direction than that for the other direction.

KEYWORDS: 3D printer, Resin, Tensile Strength, Dimensional Accuracy, Anisotropy

1. はじめに

本校機械システム工学科に、平成 25 年度、3D プリントが導入された¹⁾。既に試験的な利用は開始されているが、種々の演習や実習などで 3D プリントを活用し、造形物を利用していくためには、造形物の強度特性を測定しておく必要がある。

本校に導入された 3D プリントは、造形物の所定断面の形状に従って熔融樹脂をノズルから吐出し、これを層状に繰り返すことで立体形状を造形する熱溶解積層法と呼ばれる手法を用いる装置である。そのため造形物には層状の構造が生じ、造形物の特性には異方性があるものと考えられる。

そこで、造形物の異方性を考慮して強度特性並びに寸法精度を調査したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材及び試験片

本実験に用いた 3D プリントは図 1 に示す Stratasys 社製 Dimension BST 1200es である。熱溶解積層法により三次元立体を造形する。用いる材料は ABS plus

と称する熱可塑性樹脂である。カタログデータによれば、この樹脂の引張強さは 33MPa となっている²⁾。本実験ではこの樹脂材料を用いて引張試験片を 3D プリントし寸法と引張り強さを測定した。

用いた試験片形状を図 2 に示す。JIS K 7139 を参考にしたダンベル型試験片である³⁾。ここでは、試験片板厚を 0.75mm、2.25mm、3.75mm の三通りに設定して造形した。試験片形状は 3DCAD (SolidWorks) により作図し、3D プリント用データ変換ソフト (Catalyst EX) を介して 3D プリントへデータを転



図 1 3D プリント外観

*1 機械システム工学科 (Dept. of Mechanical Engineering)

*2 専攻科生産システムデザイン工学専攻 (Advanced Course of Production System and Design Engineering)

送り造形した。なお、造形ピッチは0.254mmとなっている。

試験片の造形は、熱溶融積層法の特徴から異方性を考慮して図3に示す三つの方向について行った。3Dプリンタを正面から見た時、造形空間の左右方向をS方向、奥行方向をT方向、垂直方向すなわち積層方向をH方向と呼ぶこととする。図1に示した試験片形状がTS平面、TH平面、HS平面となるように設定し造形を行った。先に示す方向が試験片長手方向である。各々、TS方向試験片、TH方向試験片、HS方向試験片と呼ぶこととする。なお、3Dプリンタの造形方法からT方向とS方向では造形物の特性に差はないと考え、ST方向等は検討の対象とはしないこととした。

本データ変換ソフトでは、造形物の中埋め方法を図4に示す三通りから選ぶことができる⁴⁾。(a)と(b)は物体内部に中空部分を作るもので順に低密度、高密度と呼ぶ。(c)は物体内部に中空を作らないようにするものでソリッドと呼ぶ。中埋め方法により造形物の強度が変化すると考えられるので、これらの三

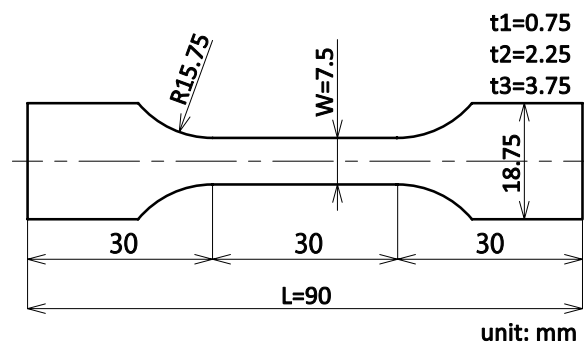


図2 試験片形状

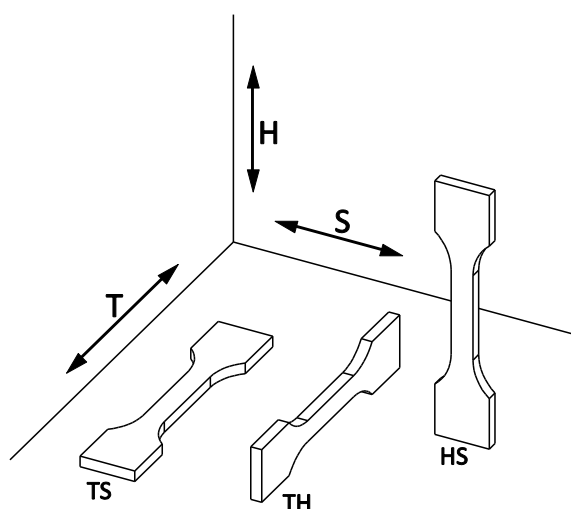


図3 試験片造形方向

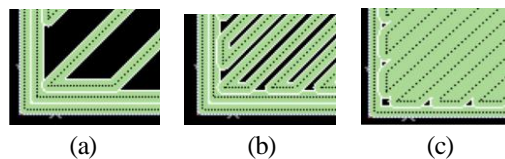


図4 中埋め方法⁴⁾(a)低密度、(b)高密度、(c)ソリッド

通りの中埋め方法についても各々試験片を作成した。

本実験では、板厚三通り、造形方向三通り、中埋め方法三通りの合計27通りの条件について、各々三本ずつの合計81本の試験片を作成した。

2. 2 寸法測定

引張試験に先立ち、試験片の長さL、平行部の幅W、試験片板厚tを測定した。測定はノギスを用いた。

2. 3 重量測定

造形後、各試験片の重量を測定した。測定には、最小目盛0.01gの電子天秤(エー・アンド・デイ製EK-400H)を用いた。

2. 4 引張り試験

作成した試験片を用いて引張り試験を行った。引張り試験は、引張り試験機(AIKOH ENGINEERING製MODEL-1301R)を用いて室温、大気中で行った。クロスヘッドスピードは5mm/minとし、破断まで負荷した。得られた最大荷重を平行部の初期断面積で除すことにより引張り強さを求めた。

3. 結果と考察

3. 1 寸法精度

造形した試験片の写真を図5に示す。最上部の試験片は引張試験前であり、その下の三つは引張試験後のものである。試験片板厚は3.75mmで造形方向はTH方向である。引張試験後の三つについては、下から低密度、高密度、ソリッドとなっている。試験片の外観は中埋め方法が異なっても同様なものとなっていることがわかる。

図6に試験片長さの測定結果から得られた寸法誤差を示す。図中d1、d2、d3は中埋め方法を示し、順に低密度、高密度、ソリッドである。また、t1、t2、

3D プリント造形物の寸法精度と強度

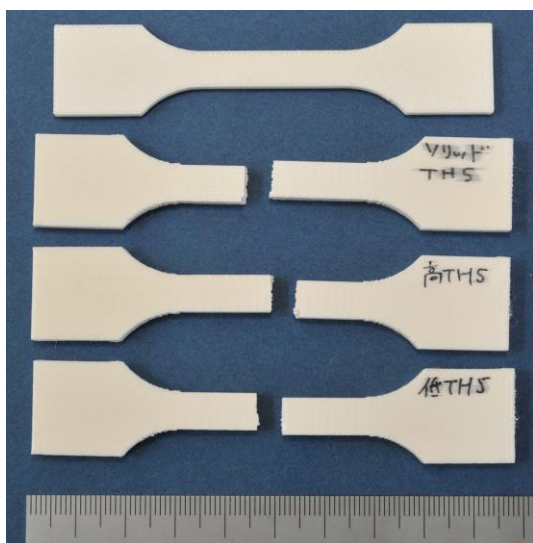


図5 試験片

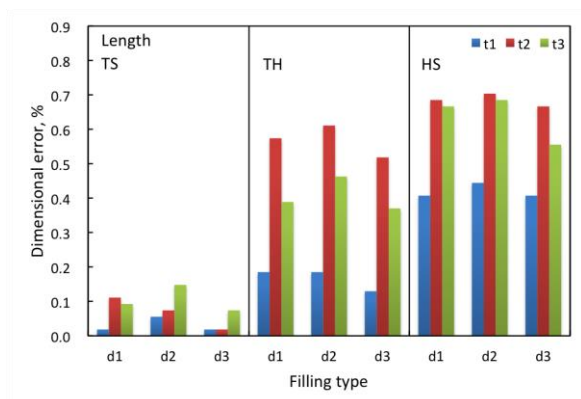


図6 造形寸法誤差 (試験片長さ)

t3 は試験片板厚の設定値で、順に 0.75mm、2.25mm、3.75mm である。寸法誤差は図 1 に示した寸法に対する造形物寸法の誤差であり、

$$\text{寸法誤差} = \frac{\text{造形寸法} - \text{設定寸法}}{\text{設定寸法}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

として算出した。図では造形方向毎にまとめ、寸法誤差を棒グラフにして示した。図からわかるように、長さについては TS 方向が最も精度が高く、HS 方向の精度が低くなった。本 3D プリントの造形ピッチを 0.254mm とすると長さ L90mm の 0.28% 程度となることから、寸法誤差としてはこの程度が期待できると考えられる。TH 方向、HS 方向については、寸法誤差が 0.28% を上回っており、寸法誤差が大きいことがわかる。造形方向による差に比べ、板厚、中埋め方法による寸法誤差の差は小さい。HS 方向で

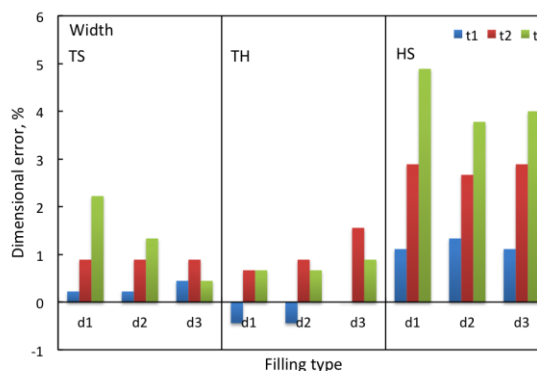


図7 造形寸法誤差 (平行部幅)

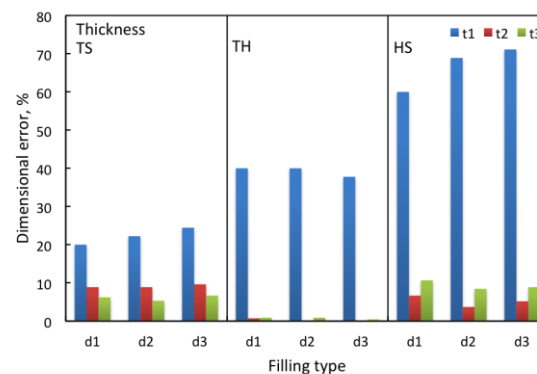


図8 造形寸法誤差 (試験片厚さ)

は長さ L が積層方向となるため、造形精度が低下したものと考えられる。TH 方向については、長さ方向は TS 方向試験片と同一となることから TS 方向と同程度の寸法精度を期待したが、HS 方向に近い寸法精度に留まる結果となった。これは、積層により長手方向にズレが生じたためと推測している。いずれにしても誤差は 1% 以下に収まることわかる。

図 7 は、試験片平行部の幅 W についての寸法誤差を示したものである。表示方法は長さについてと同様である。造形ピッチ 0.254mm は 7.5mm に対して 3.4% 程度である。この値を参考に図 7 を見ると、TS、TH 方向については、概ね 2% 以下となっており期待通りの寸法精度となっているものと見ることができよう。HS 方向については、寸法誤差が大きくなっている。やはり積層の影響が現れたものと見ることができよう。しかしながら、造形ピッチ程度の誤差であり、予測の範囲内と考えられる。なお、板厚が厚くなるにしたがって寸法誤差が大きくなる理由については、さらなる検討が必要である。また、中埋め

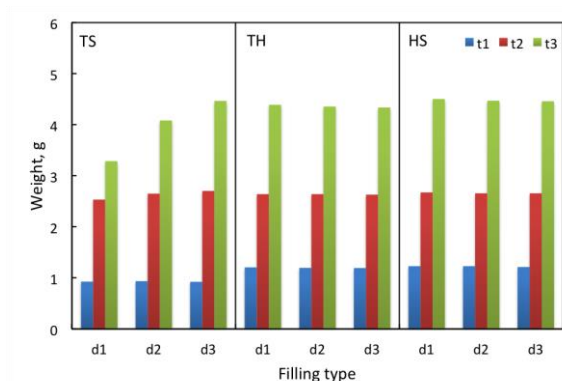


図9 試験片重量

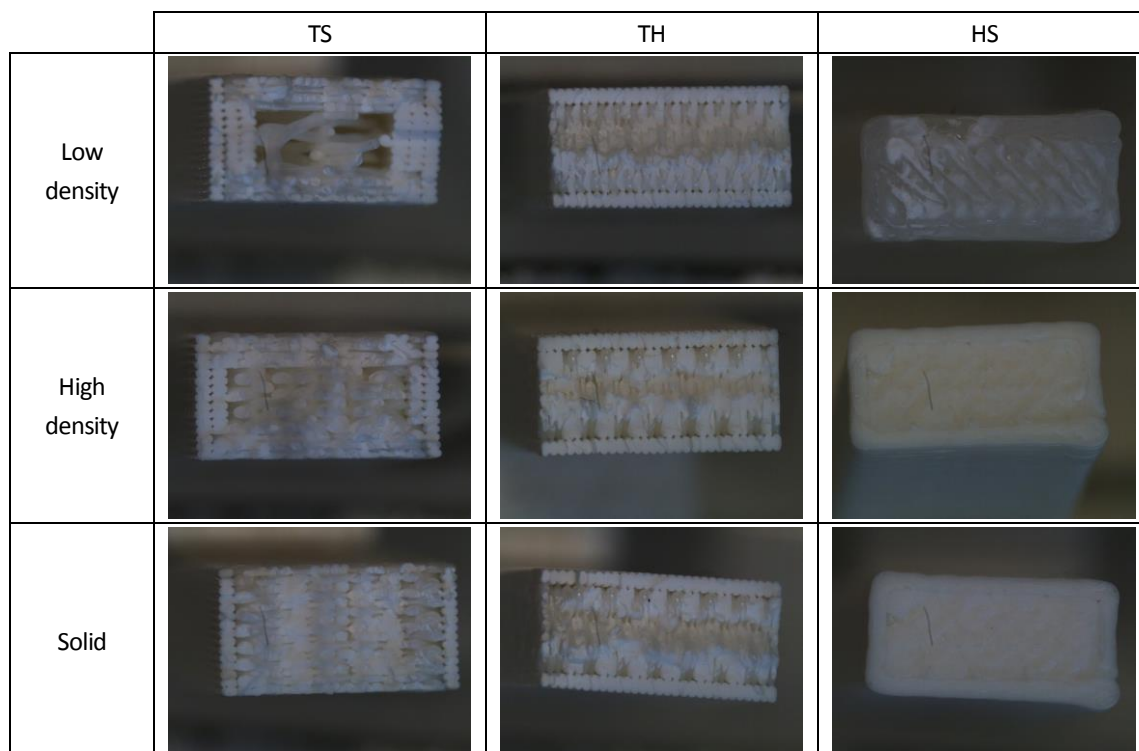
方法による影響は小さいことがわかる。

図8は試験片板厚 t についての寸法誤差を示したものである。造形ピッチ 0.254mm は、 $t1=0.75\text{mm}$ に対して34%程度、 $t2=2.25\text{mm}$ に対して11%程度、 $t3=3.75\text{mm}$ に対しては6.8%程度である。これらの値を参考に図をみると、TS方向については、ほぼ期待通りの寸法精度になっているものと言えよう。TH方向では、板厚が $t1=0.75\text{mm}$ の場合については造形ピッチ程度の誤差があるが、それ以上の板厚の場合には、誤差がほぼ0となった。これに対して、HS方向では、中埋め方法によらず板厚 $t1=0.75\text{mm}$ の場

合について寸法誤差が極めて大きくなっていることがわかる。この程度の板厚の物を積層方向に長手方向をとって造形したことが原因と考えられる。厚さ 1mm 以下の物体の造形には、HS方向のような造形方向は選択しないようにすべきであることがわかる。なお、板厚が 2mm 程度になれば、期待通りの寸法精度で造形できることが図よりわかる。

3. 2 重量測定結果

造形後の重量測定結果を図9に示す。表示方法は寸法誤差の場合と同様である。試験片板厚が変化すれば体積が変わるため重量は変化する。図をみると、板厚が $t1=0.75\text{mm}$ 、 $t2=2.25\text{mm}$ の場合には、造形方向、中埋め方法によらず板厚毎にほぼ一定の重量となった。板厚 $t3=3.75\text{mm}$ の場合には、TS方向の場合に中埋め方法によって重量変化が見られるが、他の造形方向ではほぼ一定値となった。これは造形方法の特性と考えられる。図10は試験片板厚が $t3=3.75\text{mm}$ の場合についての引張り試験後の破断面の写真を示したものである。上から順に低密度、高密度、ソリッド、左から右へTS方向、TH方向、HS方向となっている。破断面をみると、造形時の樹脂の積層方法がわかる。TS方向について見ると、中埋め方法によって破断面中央付近の造形の様子が

図10 破断面写真 (試験片板厚 $t3: t=3.75\text{mm}$)

3D プリント造形物の寸法精度と強度

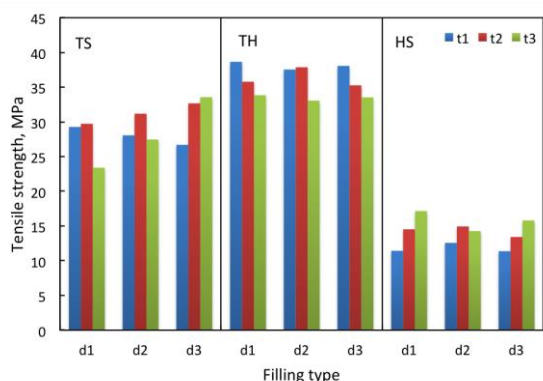


図 11 引張強さ

異なっていることがわかる。表面付近は、図 5 に示したように造形物の外観のために、中埋め方法によらず同じ造形方法となっている。このため、板厚が薄くなると、中央付近の中埋め方法により異なる部分が減少し、結果として中埋め方法による重量変化が現れなかったものと考えられる。また、図 10 において、TH 方向、HS 方向では破断面の様子は中埋め方法によらず同様となっており、本データ変換ソフトによる中埋め方法の差はこれらのような造形では現れにくいことがわかる。すなわち、中埋め方法の効果は、積層方向にある程度の厚さと面積がないと現れにくい。

3. 3 引張り試験結果

引張り試験により得られた造形物の引張り強さを図 11 に示す。表示方法は寸法誤差の場合と同様である。

図からわかるように TS 方向、TH 方向では、ほぼ樹脂の引張強さ 33MPa となっているが、HS 方向では半分程度の引張強さとなった。積層方向には強度が低いことがわかる。この差は造形方法に起因するものであり、積層方向に荷重負担を期待するような造形方向は選択しないよう注意する必要がある。

また、TS 方向の試験片板厚 $t_3=3.75\text{mm}$ について見ると、重量の場合と同様に中埋め方法により引張強さが変化している。当然のことながら低密度の方が強度が低い。図 9、10 からわかるように、本実験に用いた寸法程度では、中埋め方法による樹脂量の差は小さいため、強度の低下もそれほど大きくないことがわかる。とは言え、強度の必要な造形物では中埋め方法としてソリッドを選択すべきである。

図 11 に示した結果より、各造形方向における引張

強さの平均値は TS 方向でおよそ 29MPa、TH 方向でおよそ 36MPa、HS 方向でおよそ 14MPa となった。ただし、TS 方向については、試験片板厚 $t_3=3.75\text{mm}$ の低密度と高密度のデータは含めていない。これらの数値から、造形物の設計における強度の基準値としては、中埋め方法がソリッドの場合、造形時の水平方向については樹脂のカタログデータである 33MPa を用いてよさそうである。積層方向については、14MPa 程度と考えるべきであろう。

4. まとめ

機械システム工学科に導入された 3D プリントについて、造形物の異方性を考慮して強度特性並びに寸法精度を調査した結果、以下の知見を得た。

- 寸法精度は、積層方向で誤差が大きくなる場合がある。それ以外の場合には寸法誤差は造形ピッチ程度となった。
- 中埋め方法は造形物にある程度の体積がないと差異は生じにくい。
- 積層方向の強度は他の方向に比べて低い。積層方向に荷重負担を期待するような造形方向は選択しないよう注意する必要がある。
- 造形物の設計における強度の基準値は、中埋め方法がソリッドの場合、造形の水平方向は 33MPa、積層方向は 14MPa 程度と考えられる。
- 中埋め方法の変化による強度の変化は、より大きなサイズについての検討が必要と考えられる。

なお、中埋めの密度を下げることは、使用材料の減少、造形時間の短縮に貢献し、合わせて、表面積の大きな造形物の場合には、樹脂の熱変形による反りを低減する効果が期待できる。これらについての評価も必要であろう。

参考文献

- 1) 石川信幸、他 5 名: 機械部品造形のための 3 次元プリンターの性能調査, 仙台高等専門学校名取キャンパス研究紀要, No. 50, pp.29-32(2014).
- 2) Stratasys inc.: ABSplus-P430 Spec sheet, (2014).
- 3) 日本工業標準調査会: プラスチック試験片 (JIS K 7139), (2009).
- 4) 丸紅情報システムズ: Dimension & Catalyst EX チュートリアルマニュアル, p. 3, (2013).