

非接触三次元測定機によるローエンド3次元プリンターの 造形精度についての調査研究

赤井 亮太^{*1)}

Research of Dimensional Accuracy of the Model shaped by Inexpensive 3D printer using Optical Light 3D-Scanning System

AKAI Ryota ^{*1)}

近年、試作品開発を行うための造形装置として3次元プリンターが注目されている。3次元プリンターは数百万円から数千万円で販売されていたが、2010年頃から大幅に低価格（10万円から50万円）な3次元プリンターが市場に登場し始めた。それらの導入は容易であり、有効活用できれば試作費用の削減や治具作製の迅速化が期待できる。しかし、そのような低価格3次元プリンターの造形精度に関する情報は少なく、その効果に期待できるのかは定かではない。そこで、本研究では、低価格3次元プリンターの造形精度について平成24年度機械工業振興補助事業により導入した非接触三次元測定機 COMET 5 11M を用いて調査した。

1. 緒言

2010年頃、3次元プリンターの造形原理である熱溶解積層法に関する特許が失効したことをきっかけに、10万円から50万円台の低価格な3次元プリンターが市場に登場し始め、それらが試作開発や治具の作成を短期間で行うための効果的な装置¹⁾として注目されている。その一方、低価格な3次元プリンターが持つ造形精度に関する情報は少なく、その効果に期待できるのか定かではない。そこで、本資料では10万円から50万円台の低価格な3次元プリンターをローエンド3次元プリンターと称し、ローエンド3次元プリンターが持つ造形精度について調査した結果を報告する。

2. 3次元プリンターの動向

2.1 造形方法による分類

3次元プリンターは積層造形法と呼ばれる方法であり、立体物を造形する装置である。積層造形法とは、造形したい形状は高さ方向にあるピッチでスライスした層が積み重なって構成されているとの考えのもとで、その層を造形したい材料で作成し、それを高さ方向に積み重ねることによって造形する方法である。積層する材料や材料の層を作る方法によって方法に違いがある。代表的な方法を以下に列挙し、それらについて説明する¹⁾。

熱溶解積層法：材料をノズルなどの開口部を通して選択的に押し出しながら材料の層を作り、それを積み重ねていく方法。FDMとも呼ばれる。原理的には、ノズルを通ること

ができる粘度を持つ材料であれば造形することが可能である。材料として熱可塑性樹脂が主に用いられる。

インクジェット法バインダ噴射式：粉末材料が敷き詰められた層に、液状のバインダ(結合剤)をインクジェットノズルから吹き付け、粉末層を積層したい形状に固めていく方式である。粉末材料として樹脂や石膏が主に用いられる。

インクジェット法材料噴射式：プリンタヘッドにあるインクジェットノズルから液状の光硬化性樹脂を吹き付け、それと同時に近傍に設置したランプから紫外線光を照射することによって光硬化性樹脂を固めて層を作る方式である。異なる光硬化性樹脂を混ぜ合わせて様々な材料特性を有した材料で造形することが可能である。

光造形法：光硬化性の液体材料を溜めた樹脂槽に対して、1層分だけ光エネルギーによる硬化反応を起こさせて積み重ねる層を作る方法である。液体を用いて固めていくため、表面の滑らかさやエッジの再現性が高い。

粉末焼結法：粉末材料が敷き詰められた層にレーザーを照射し、材料を焼結させて積層したい形状に層を作る方法である。粉末材料に熱エネルギーを直接投入して粉末を固めるため、他の方法と比較して造形後の材料物性が元来有する物性に近い。

これらの方法の他にも、紙のような材料でできたシートを積み重ねて造形するシート造形法や、金属材料を溶射し、

^{*1)} 基盤技術・ソリューショングループ

溶射した部分を切削工具で削って造形する方法などが考案されている。

3次元プリンターで何らかの3次元形状を造形するには、その3次元形状のデータが必要になる。一般的に3次元プリンターでは STL と呼ばれる形状データが用いられている。STL データは3次元 CAD ソフトウェアやコンピュータ・グラフィクスを作成するソフトウェアで作成する。

2.2 ローエンド3次元プリンターの動向

緒言でも述べたように、3次元プリンターは熱溶解積層法に関する特許が失効したことがきっかけになり、低価格化が進んだ。そのため、市場で販売されているローエンド3次元プリンターは熱溶解積層法によるものが多い。熱溶解積層法によるローエンド3次元プリンターには、組立キットとして販売されているものや完成品として販売されているものがある。また、熱溶解積層法による3次元プリンターを作るための材料や部品、組立手順、装置の制御プログラムなどをオープンソースとして公開している RepRap²⁾と呼ばれるプロジェクトがある。販売されているローエンド3次元プリンター中には RepRap プロジェクトで開発されたものに改良を加えたものがある。

近年では、ベンチャー企業が、クラウド・ファンディングで調達した資金を利用して、光造形法によるローエンド3次元プリンターを開発する動きがある。アメリカ企業の中には、資金調達に成功し、販売を行っている企業もある。そのようなベンチャー企業の動きを受け、ハイエンド3次元プリンターを販売する企業も光造形法によるローエンド3次元プリンターを開発している。なお、光造形法によるローエンド3次元プリンターの販売価格は、熱溶解積層法によるそれよりも高い。

3. 造形精度の調査方法

3.1 調査する造形精度

3次元構造物の造形精度について調査するためには、縦方向、横方向および高さ方向のそれぞれの造形精度に着目する必要がある。3次元プリンターの場合、高さ方向に関する造形精度は積層ピッチで定まる。積層ピッチは、その最小の値について装置の仕様として記載されている場合が多く、最小値以上であれば造形条件として設定できる装置もある。その一方、横方向と縦方向の造形精度は明示されていないことが多い。そこで、今回の調査では、高さ方向の造形精度は明示されているものとし、横方向と縦方向の造形精度について調査した。それらの造形精度を調査するために、高さが同一で断面形状と断面積が異なる形状を造形し、造形物の寸法を計測した。

3次元プリンターである形状を造形するには、その造形物の3次元形状データが必要となる。本調査では、造形精

度を、造形のために作成した3次元形状データにおける寸法と、造形物そのものの寸法との差として考えた。

3.2 非接触三次元測定機による調査

造形のために作成した3次元形状データにおける寸法と、造形物そのものの寸法との差を計測するために、非接触三次元測定機 COMET5 11M³⁾により造形物の形状を測定した。

非接触三次元測定機 COMET5 11M は3次元スキャナと呼ばれており、ある対象を測定するとそれと同じ寸法をもった STL 形式の3次元形状データが得られる。得られた形状データをソフトウェアにより処理することによって、STL 形式の3次元形状データと iges 形式や Parasolid 形式の3次元 CAD データとを比較することができる。それらの寸法を比較した結果は立体的に表示されるため、測定対象が3次元 CAD データに対して膨張しているのか、収縮しているのかが視覚的にわかる。

本調査では、造形精度の計測のために、ローエンド3次元プリンターによる造形物の3次元形状データを、非接触3次元測定機を使って取得した。その後、3次元プリンターに入力する3次元形状データと、取得した造形物の3次元形状データとをソフトウェアを用いて比較し、寸法差を計測して、それを立体的に表示させた。以上の方法により、非接触3次元測定機を用いて造形精度を計測した。

4. 造形装置と造形対象

4.1 造形装置と造形条件

ローエンド3次元プリンターとして図1に示す3Dシステムズ社製 CubeX を用いて造形精度を調査した。CubeX は、熱溶解積層法によるローエンド3次元プリンターの中では高機能な製品であり、試作開発に使用できる造形精度が期待できる。CubeX の仕様を表1に示す。

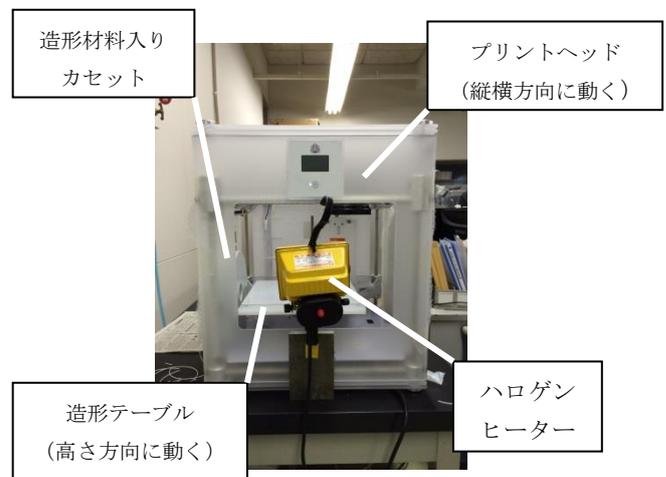


図1 造形に用いた3次元プリンター

表1 CubeXの仕様

最大造形 サイズ	x 方向	275 mm
	y 方向	265 mm
	z 方向	240 mm
z 軸解像度		0.1mm / 0.25mm / 0.5mm (選択可能)
プリント速度		10 mm ³ /s (最大値)
プリントヘッド先端の 最大動作温度		280 °C
造形方法		熱溶解積層法
材料		ABS または PLA

造形にあたり、z 軸解像度を CubeX にとって標準的な値である 0.25mm に設定した。プリント速度とプリントヘッド先端の動作温度は、装置が自動的に制御を行うため設定できない。造形用材料としてローエンド3次元プリンターでは一般的に ABS 樹脂と PLA 樹脂が使用されており、本調査で用いる CubeX もこれらの材料が使用可能となっている。本調査では、熱収縮による変形が少なく、高い造形精度が期待できる PLA 樹脂を用いて造形した。

4.2 調査のための造形対象

調査対象の形状を機械構造物の基本形状である四角柱と円柱に定めた。なお、四角柱の断面を正方形とした。横方向と縦方向の造形精度について調査するため、断面積の異なる四角柱と円柱とを造形した。断面に関する寸法を表 2 に示す。また、それぞれの造形物の高さを 100 mm とした。表 2 に示す寸法を持つ 3次元形状データを 3次元 CAD ソフトウェア SolidWorks で作成した。STL 形式で 3次元形状データを作成し、そのデータを CubeX 付属のソフトウェアに読み込ませた。CubeX 付属のソフトウェアは、入力された STL 形式の 3次元形状データから、最も効率的に造形するためのプリントヘッドの動きを自動で算出する。CubeX はその算出された動きの通りに動き、PLA 樹脂を積層した。

表2 造形物の断面の寸法

四角柱(一辺の長さ)	10 mm	20 mm	30 mm
円柱(直径)	10 mm	20 mm	30 mm

5. 造形精度とその考察

5.1 各造形物の造形精度

CubeX で造形した造形物と 3次元 CAD で作成した形状データとの寸法差を図 2 と図 3 に示す。図 2 と図 3 における色は、造形物と 3次元 CAD との寸法差を示しており、色と寸法差の対応関係を各図右側に示すカラーバーに示した。なお、カラーバーの暖色は 3次元 CAD の面の法線方

向に造形物の形状データがあることを示し、寒色はそれと逆の方向に造形物の形状データがあることを示す。すなわち、暖色部分は造形物が 3次元 CAD よりも膨張していることを示し、寒色部分は造形物が 3次元 CAD よりも収縮していることを示している。

図 2 のそれぞれにおいて、最も左側に見える辺は各層における積層開始地点である。図 2(a)から、寸法差の大きい部分は積層終了直前の角であることがわかる。また、寸法差の大きい部分として、図 2(b)は面の中央に 0.14mm ほどの寸法差があり、図 2(c)では面の中央に 0.05mm ほどの寸法差がある。これらの寸法差は CAD の面の法線方向と逆向きであることから、造形物が形状データよりも収縮していることがわかる。

図 3 のいずれの場合でも、図の中央に誤差が大きくなっている線状の部分がある。この誤差が大きくなっている部分は各層における積層開始地点である。その部分以外に誤差が大きくなっている部分は、図 3(a)、図 3(b)では側面中央部分で、0.14mm 程度の寸法差がある。図 3(c)も同様に側面中央部分であり、寸法差は 0.1mm 程度である。

図 2 と図 3 に示した結果と、測定機が仕様上 0.03mm まで正確に測定できることから、表 2 に示す断面を持つ高さ 100mm の四角柱と円柱を造形した場合、0.1mm から 0.2mm の寸法差があると考えられる。

5.2 測定結果の考察

図 2 と図 3 から、測定した造形物の形状データと 3次元 CAD との寸法差が大きい部分は、積層開始直後と積層終了直前に造形した部分であることがわかった。

4.1 節で示した造形条件のもとでは、PLA 樹脂の層を 0.25mm ごとに積み重ねて造形している。装置の動作を観察したところ、ある段の積層を終えて次の段の積層に移る際、プリントヘッドは PLA の射出を止め、積層終了地点から遠く離れた場所に移動する。その場所で z 軸方向に 0.25mm 移動し、次の段の積層開始地点である積層終了地点の真上 0.25mm に向かう。その移動の間、プリントヘッドに PLA 樹脂は留まり、積層開始地点から改めて PLA 樹脂が射出される。一連の動作を踏まえると、造形精度が悪化している部分は、PLA 樹脂が射出され始める部分および PLA 樹脂の射出を停止していく部分であることがわかる。

図 2 と図 3 から、造形精度の良い部分はある段の積層を開始してからある程度移動した部分であることがわかる。これは PLA 樹脂が安定して射出される部分であると考えられる。また、図 2 と図 3 から、断面の寸法が大きくなると造形精度が良くなっていることがわかる。造形物の断面の寸法が大きくなると、相対的に PLA 樹脂が射出初期の部分と射出の停止部分の長さが短くなり、その部分において角等の形状の変化が小さくなるため、造形精度の悪化が目立たなくなると考えられる。

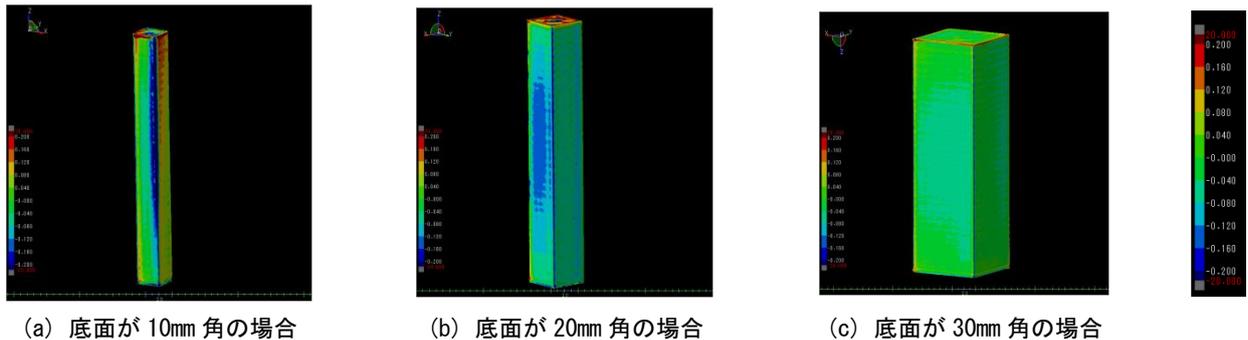


図2 CAD データと造形物（四角柱）の寸法比較

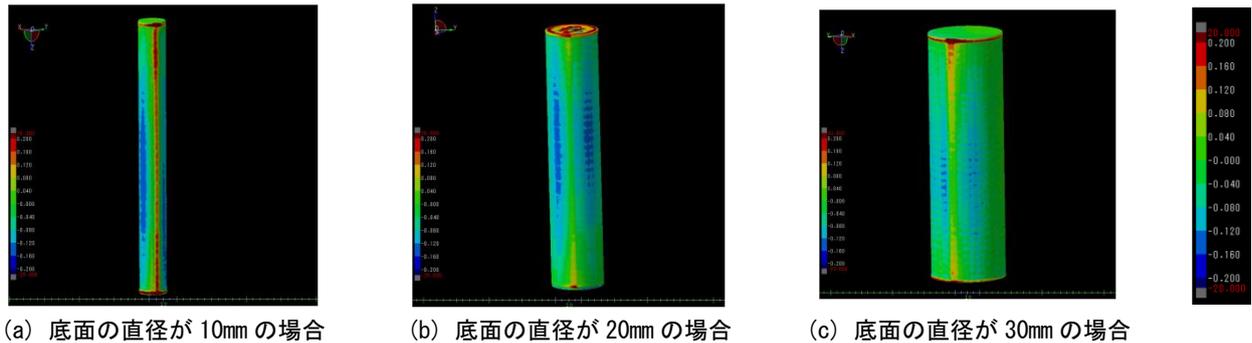


図3 CAD データと造形物（円柱）の寸法比較

造形物の寸法が大きくなると精度良く造形できることがわかったため、底面が 40mm 角の正方形で高さが 100mm の四角柱と、底面が 100mm 角の正方形で高さが 100mm の四角柱を造形した。前者は 30mm 角の場合と同程度の造形精度であったが、後者は造形の途中で熱収縮によって底面が反り、四角柱の造形そのものができなかった。底面が反らず、かつ、精度がよく造形できる四角柱の 1 辺の長さがあると考えられる。

6. 結言

低価格 3 次元プリンター CubeX の造形精度を非接触 3 次元測定機によって調査した。得られた知見について以下に列挙する。

- ・ローエンド 3 次元プリンター CubeX で PLA 樹脂を造形した場合の造形精度は、0.1mm から 0.2mm 程度であった。
- ・造形精度が悪化する部分は、各層の積層開始直後の部分と、積層終了直前の部分であった。
- ・造形物の寸法が大きくなると造形精度は良くなるが、大きすぎると底面部分で反りが発生した。

本調査では、CubeX という単一の機種で四角柱と円柱という単純な形状でしか造形精度について検討していない。しかし、明らかになった積層開始直後と積層終了直前の部分で造形精度が悪くなるという結論は、その部分に何らかの補正を行っていない熱溶解積層法の 3 次元プリンターすべてに共通すると考えられる。ローエンド 3 次元プリンターにそのような補正機能が備わっているとは考えにくく、

明らかにした結論は、熱溶解積層法によるローエンド 3 次元プリンター全てに共通していると推察される。今後、検証していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター[編], 3D プリンタによるプロトタイピング, オーム社, (2014).
- 2) RepRap, <http://reprap.org/wiki/RepRap> (参照日 2015年5月)
- 3) 赤井亮太, 重本憲佑, “非接触 3 次元測定機による寸法測定”, 奈良県産業振興総合センター研究報告, No. 40, pp.20-21, (2014).