

3D プリンタによる立体器物の寸法補正に関する考察*

和合 健**、長嶋 宏之***、菊池 貴****、黒須 信吾**

樹脂 3D プリンタの光造形法と熱溶解積層法及び電子ビーム式金属粉末積層造形法による 3 種類の 3D プリンタを使用し、造形器物が立体形状の場合についてクローズドループエンジニアリングによる寸法補正の適用性を検証した。寸法測定はマイクロメータとカメラ撮影型デジタイザを使用し、寸法補正方法は設計値と造形後の測定値の比率による変形率から逆算して補正量を求めた。いずれの造形方式においてもクローズドループエンジニアリングによる寸法補正は有効であった。各造形法の絶対値平均誤差は初回時と補正後再造形時とで、光造形法では 0.210 mm が 0.128 mm に、熱溶解積層法で 0.101 mm が 0.084 mm に、電子ビーム式金属粉末積層造形法で 0.263 mm が 0.217 mm に、それぞれ改善された。

キーワード：樹脂 3D プリンタ、金属 3D プリンタ、3D 器物、寸法補正、寸法誤差

Dimension Corrections of Three-Dimensional Moldings Made with 3D Printers

WAGO Takeshi, NAGASHIMA Hiroyuki, KIKUCHI Takashi and KUROSU Shingo

Key words : Resin 3D printer, Metal 3D printer, 3D work-piece, Size compensation, Size deviation

1 緒 言

クローズドループエンジニアリングは、3D スキャナと 3D プリンタを相互連携させることで製造物の形状誤差を収束低減化させる製造手段である。この手段を用いることで製品製造の高精度かつ高能率化が達成できる。つまりクローズドループエンジニアリングは、造形→測定→補正→造形を繰り返すことで、補正効果により寸法値を目標値に収束させる技術である。

平板状の 2D 器物の補正の場合¹⁾は、X、Y 軸となる横方向のみの制御であったため良好な補正効果が確認できた。本報告では立体形状の 3D 器物を対象にした寸法補正に取り組んだ結果を報告する。とくに 3D 器物では、2D 器物と比較して高さ方向の次元が増えるため、造形に関する誤差要因が増える。このことから、その補正効果を確認した。

2 造形器物の製作

造形に使用した装置は、図 1 に示した光造形法（以下 LBL）（型式：NRM-6000、メーカー：シーメット株式会社）と熱溶解積層法（以下 FDM）（型式：FORTUS 360mc S、メーカー：Stratasys Ltd.）とを用いる樹脂 3D プリンタ、および図 2 に示した電子ビーム式金属粉末積層造形法（以下 EBM）（型式：Arcam EBMA2X、メーカー：Arcam AB）を用いる金属 3D プリンタの 3 種類である。

初回の造形は、産総研地域連携戦略予算プロジェクト（以下、3D3 プロジェクト）運営協議会から配布された

設計値である STL 形式モデルをそのまま各 3D プリンタの CAM に読み込ませ、造形パスを生成して行った。

再造形は、初回造形で製作した器物を、マイクロメータとカメラ撮影型デジタイザを用いて事務局が指示した位置について寸法測定し、変形量を補正した補正モデルを作製し、その補正モデルを利用して行った。材質は、LBL が光硬化樹脂、FDM が ABS 樹脂、EBM が Ti-6Al-4V である。

初回造形モデルを図 3、4 に示す。ここで熱溶解積層法 FDM での造形の際、ガイドライン²⁾に従った方法では



図 1 樹脂 3D プリンタ
(左：光造形法、右：熱溶解積層法)



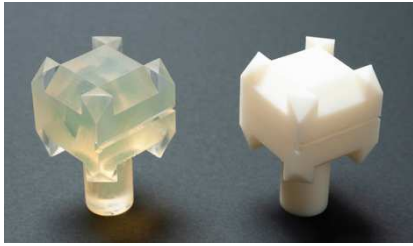
図 2 金属 3D プリンタ

* 平成 28～30 年度 産総研地域連携戦略予算プロジェクト

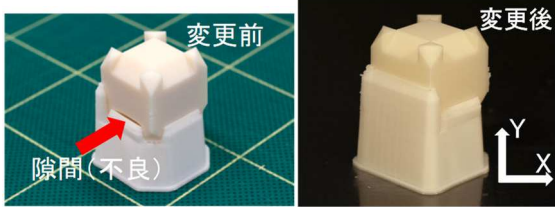
** 素形材技術部（現 素形材プロセス技術部）

*** デザイン部（現 産業デザイン部）

**** 電子情報技術部（現 電子情報システム部）



初回造形器物 (左: LBL、右: FDM)



FDM 装置での形状不良と変更した配置

図3 初回造形で製作した器物



図4 初回造形で製作した器物 (EBM)

造形中の蓄熱が原因と思われる形状不良が生じた。そこで内部構造 (パスパターン「Sparse」) と、造形方向を図3右に示すように Z 軸中心に -45° 回転するように、それぞれ変更して製作した。図3では水平面を X-Y 平面に、Z 軸を X-Y 面に鉛直直交する上向きの軸にとっている。

3 造形器物の寸法測定

3-1 測定方法

3D3 プロジェクトで指示されている器物の汎用測定にはマイクロメータを使用した。型式は No.102-302、メーカーはミットヨで、U 字フレームに防熱板が付いており、目量は $10\ \mu\text{m}$ 、測定範囲が 25-50 mm のものである。

測定方法は、一度の測定で測定物にアンビルとスピンドルを接触させ、シンプルを回して触圧を僅かにかけ、その後ラチェットストップを3回回して最終的な基点を

決める。この作業を2~3回繰り返し、測定値に変化が無いことを確認して最終的な測定値とする。測定の繰り返しは行っていない。測定中の雰囲気温度は平均値で 21.2°C 、変動幅は 0°C であった。マイクロメータの校正は、2年に1回 JCSS 登録事業者に依頼してブロックゲージを使用して行った。

汎用測定によらない測定では、カメラ撮影型デジタイザ (型式: COMET6_16M、メーカー: Carl Zeiss、以下、CAT) を使用した。取り付けカメラは、初回造形ではカメラ 80 (測定範囲: $\square 80\ \text{mm}$ 、点間ピッチ: $16\ \mu\text{m}$) を、再造形ではカメラ 150 (測定範囲: $\square 150\ \text{mm}$ 、点間ピッチ: $30\ \mu\text{m}$) をそれぞれ使用した。初回造形時の測定中の雰囲気温度は 21.0°C であった。

測定項目は、図5に示した軸方向の面間距離 (軸方向距離)、辺に形成した面間距離 (辺面間距離)、頂点に形成した面間距離 (頂点面間距離) の3項目である。

3-2 設計値照合による検査

撮影型デジタイザ CAT による設計値照合検査で用いる検査ソフトウェアは、初回造形では MSURF-I (ミットヨ)、再造形では spGauge (アルモニコス) である。設計値と測定値の位置合わせ方法は、MSURF-I では、3-2-1 (空間軸-回転軸-ゼロ点) で簡易位置合わせ後にベストフィット機能を使用した。spGauge では、複数点による簡易位置合わせ後にベストフィット機能を使用した。

4 補正方法

補正は、造形時の変形率を利用する方法とし、式(1)、(2)より算出した。

$$def = \frac{L_{mea}}{L_{nom}} \times 100 \quad \dots(1)$$

$$def : 100 = L_{nom} : L_{comp} \quad \dots(2)$$

$$L_{comp} = \frac{100 \times L_{nom}}{def}$$

ここで、def は変形率 (%), L_{mea} , L_{nom} , L_{comp} はそれぞれ各寸法の測定値、設計値及び補正值である。補正值は、軸方向距離では X 軸で4カ所の平均値、Y 軸、Z 軸も同様とした。辺面間距離では4カ所の平均値、頂点面間距離では4カ所の平均値とした。

光造形法 LBL と熱溶解積層法 FDM は、表面が滑らかであり、サポート除去が正確に行え、マイクロメータの寸法測定で各面の起点を正確に取得できたことから、マイクロメータによる測定値を補正に用いた。金属造形法 EBМ は、金属熔融により面に凹凸があり、サポートの残留も確認できたので、デジタイザ CAT での測定値を使用した。

補正モデルのモデリングには三次元 CAD/CAM (型式: CAMMAGIC-AD、メーカー: 三菱電機) を使用した。

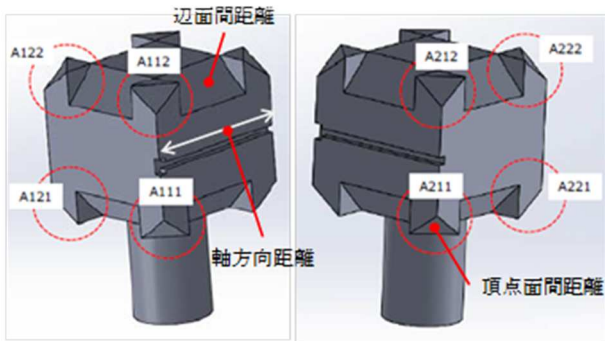


図5 頂角部の呼び番号及び測定項目

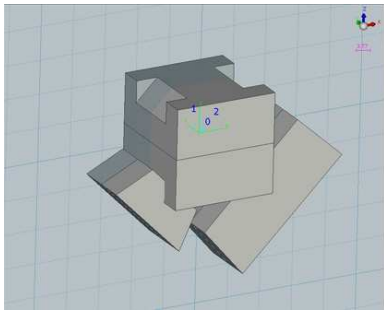


図6 CADによる補正モデルのモデリング
(辺面間を作製、LBL)

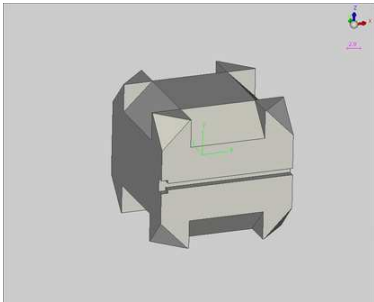


図7 CADによる補正モデルのモデリング
(完成モデル、LBL)

補正値を使用したモデリングは、まず X、Y、Z 軸の補正値を利用して立方体を形成する。次に、図6、7のとおり X、Y、Z 軸のゼロ点（立方体の中心）から辺面方向に等分距離に補正値を振り分けて平行面を作製し、ブーリアン演算の差で切り取った。頂点面の作製においても同様な等分振り分け方法で平行面を作製した。つまり、軸方向距離、辺面間距離、頂点面間距離の3種類の補正値をすべて使用して補正モデルを作製した。

5 結果及び考察

5-1 初回造形の寸法

初回造形で作製した器物の軸方向距離を図8に示す。光硬化樹脂 LBL と ABS 樹脂 FDM の両者はほぼ同等な値となっているが、金属粉末積層造形 EBM ではマイクロメータで測定したものよりも撮影型デジタイザ CAT の値の方が小さい。

EBM では金属溶融面であるため表面粗さが大きく、かつサポートが除去しきれずに残っている。そのため、アンビルとスピンドルの面対面で測定するマイクロメータでは、凸対凸の最大値で測定される。一方、CAT では面の平均値対点で測定するため、凸凹が大きい表面粗さやサポート残留の影響が排除される。その結果、補正に使用する値は、LBL と FDM ではマイクロメータの、また EBM で CAT の値を、それぞれ採用した。

表1に設計値と測定値を比較している。軸方向距離では、LBLの方がX、Y方向で測定値が小さく、平均値で-0.122 mm、またZ方向では測定値が大きく、平均値で0.385 mmであった。FDMでも、LBLと同様の傾向が見

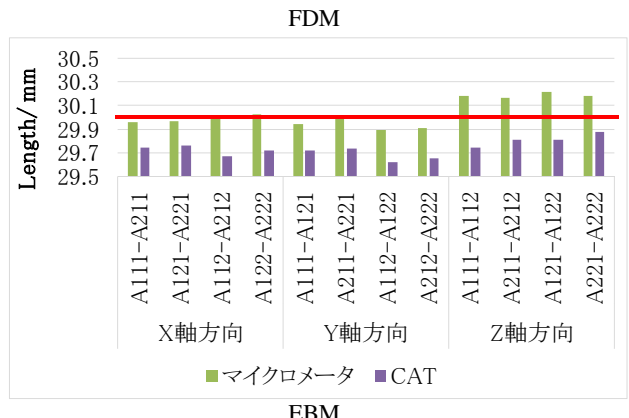
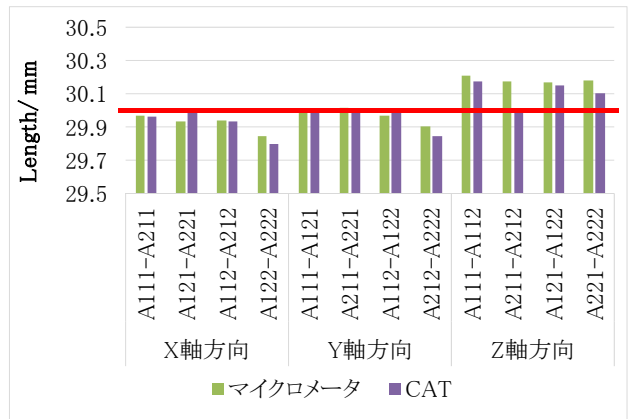
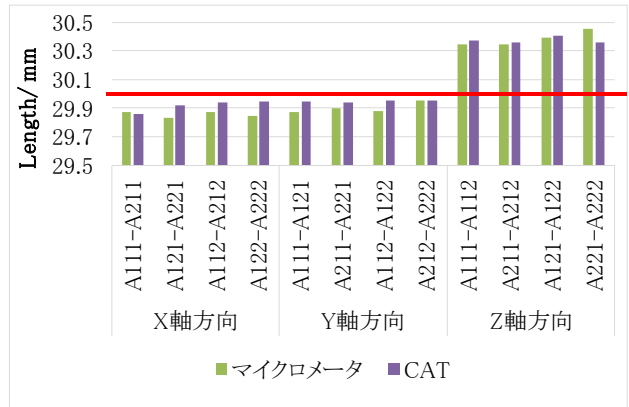


図8 各造形法による器物の軸方向距離（初回造形）

表1 設計値と測定値の差

		平均値, mm		
		LBL	FDM	EBM
軸方向	X,Y方向	-0.122	-0.055	-0.299
	Z方向	0.385	0.183	-0.191
辺対面		0.018	-0.003	-0.521
頂点对面		-0.104	-0.061	-0.592

※LBL,FDMはマイクロメータ, EBMはCAT

られ、X、Y方向の平均値が-0.055 mm、Z方向の平均値が0.183 mmであった。EBMではX、Y、Z軸で測定値が設計値より小さく、X、Y方向の平均値は-0.299 mm、Z方向の平均値は-0.191 mmである。3種類の造形法ともX、YとZで傾向が分かれており、異なる変形率となっている。辺面間距離と頂点面間距離では、LBLとFDMの設計値と測定値の差はほぼ1/100 mm台の良好な値と

なり、EBM では軸方向距離よりも差が大きかった。

5-2 補正値の算出

式(2)で算出した補正値を表2に示す。この値は各方向の平均値であり、この値に設計値を足した数値で補正モデルをモデリングした。補正の仕組みは、変形率を利用し、収縮傾向であればその分を大きめに、膨張傾向であればその分を小さめに造形するとする考え方である。

図9~11に各平均値での補正値、図12に軸方向距離の補正値を示す。図12ではLBLとFDMで補正値に正負方向が混在しており、その値は1/100 mm台が多く見られる。一方、EBMではすべて正方向であり、かつ補正値が1/10 mm台になっている。

5-3 補正再造形の結果

5-3-1 面間寸法

表3~5に各距離の誤差値を示す。誤差の平均値と比較すると、軸方向距離では、光硬化樹脂LBLで初回造形の絶対値平均誤差0.210 mmが、補正後の再造形で0.128 mmに改善された。同様にABS樹脂FDMでは、初回造

表2 各造形法における補正値

		mm		
		LBL	FDM	EBM
軸方向	X方向	0.146	0.081	0.281
	Y方向	0.099	0.028	0.322
	Z方向	-0.380	-0.182	0.192
辺対面		-0.018	0.003	0.529
頂点对面		0.104	0.061	0.600

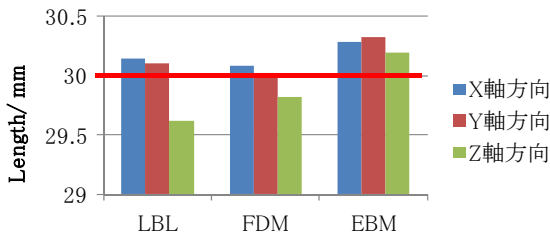


図9 軸方向距離の補正値 (平均値)

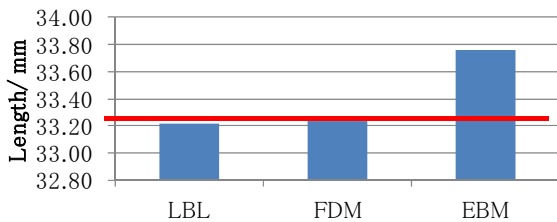


図10 辺面間距離の補正値 (平均値)

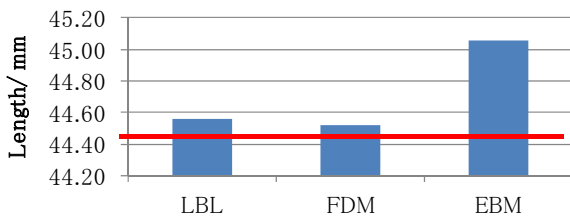


図11 頂点面間距離の補正値 (平均値)

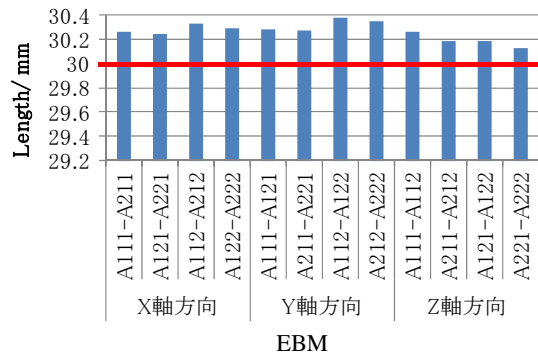
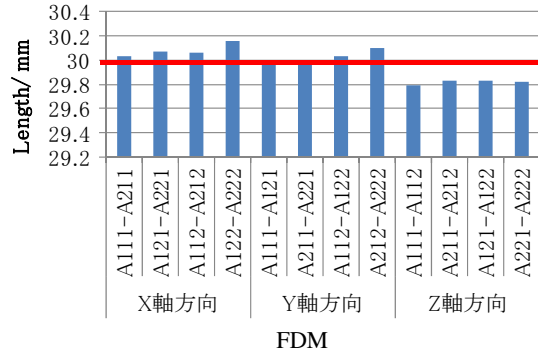
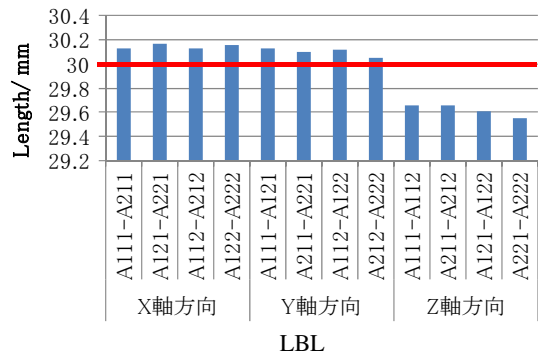


図12 各造形法における軸方向距離の補正値

形の0.101 mmが再造形では0.084 mmとなり、金属粉末積層EBMでは、初回造形で0.263 mmが再造形で0.217 mmになった。

図13に、軸方向距離の初回造形と再造形の比較を示す。LBLでは補正が適切に働き、再造形で設計値に近づいている。FDMでは、初回造形時に誤差が1/100 mm台の良好な値になっていたが、さらに設計値に近づけようとして僅かな補正量を付与し補正を行ったが逆効果となり、設計値を超えて誤差が増大した。EBMでも、初回造形時の収縮変形量が大きく、それに見合った分の補正量を加えた結果、FDMと同様に設計値を超える誤差となった。この傾向は各造形法とも、辺面間と頂点面間で同様な結果となった。

平板状の2D器物の場合では、補正が的確に効き、誤差が小さくなったが、3D器物では、2D器物と比較して補正効果が低下した。

表6に各造形装置の駆動方法を示す。LBLは光硬化樹脂に紫外レーザー光を照射して積層造形するものである。

表3 軸方向距離の誤差（絶対値）

	LBL		FDM		EBM	
	1st	Re	1st	Re	1st	Re
Maximum	0.456	0.323	0.211	0.151	0.378	0.410
Minimum	0.049	0.061	0.005	0.014	0.128	0.102
Range	0.407	0.262	0.206	0.137	0.250	0.308
Average	0.210	0.128	0.101	0.084	0.263	0.217
σ	0.135	0.089	0.073	0.046	0.070	0.096

表4 辺面間距離の誤差（絶対値）

	LBL		FDM		EBM	
	1st	Re	1st	Re	1st	Re
Maximum	0.064	0.034	0.065	0.095	0.531	0.589
Minimum	0.026	0.001	0.001	0.012	0.501	0.285
Range	0.038	0.033	0.064	0.083	0.030	0.304
Average	0.045	0.015	0.029	0.061	0.521	0.391
σ	0.017	0.014	0.032	0.040	0.014	0.140

表5 頂点面間距離の誤差（絶対値）

	LBL		FDM		EBM	
	1st	Re	1st	Re	1st	Re
Maximum	0.116	0.114	0.161	0.296	0.609	0.266
Minimum	0.098	0.026	0.003	0.002	0.574	0.114
Range	0.018	0.088	0.158	0.294	0.034	0.152
Average	0.104	0.074	0.061	0.203	0.592	0.191
σ	0.008	0.036	0.074	0.139	0.014	0.072

ガルバノミラー駆動方式で紫外レーザ光の照射位置を制御しており、ミラーをモータ軸に直付けした2個のミラーとモータの組み合わせで反射位置を制御する。一方FDMは、熱可塑性樹脂をノズルから吐出して積層造形するものである。

ノズルを位置制御するための駆動方法は、図14のとおり、X、Y軸ではゴムベルト駆動によるラック・ピニオン方式、テーブルの昇降を行うZ軸はボールネジ駆動である。またEBMは、電子ビームを磁界による偏向で位置制御している。

LBLで的確に補正された理由は、機械構造が持つ紫外レーザ光の照射位置の位置決め精度が高分解能かつ高精度であるためである。それにより補正量が再現できたと考えられる。一方FDMでは、初回造形時の設計値との差が十分に小さかったことが逆に災いして、再造形時に設計値に一致しない造形となったものと考えられる。つまり、微小駆動で補正量を与える再造形時に、機械性能としてX、Y軸方向の位置決め分解能と正確さを十分に持ち合わせていなかったことが原因であると思われる。すなわち軸駆動方式がゴムベルトによるラック・ピニオン方式であり、熱によるゴムベルトの膨張や歯車のバックラッシュが誤差要因となって、補正量に見合った精密位置決めが行われなかったため、設計値から外れたと思われる。

EBMは、電子ビームの位置決め制御を磁界による偏向で行っており、精度は高い。しかし、造形原理が金属を溶融させて再凝固させる仕組みであるため、再凝固時の表面粗さと再凝固時の膨張収縮により、造形後の形状再現性が低いことが、再造形で補正の効果が表れなかった

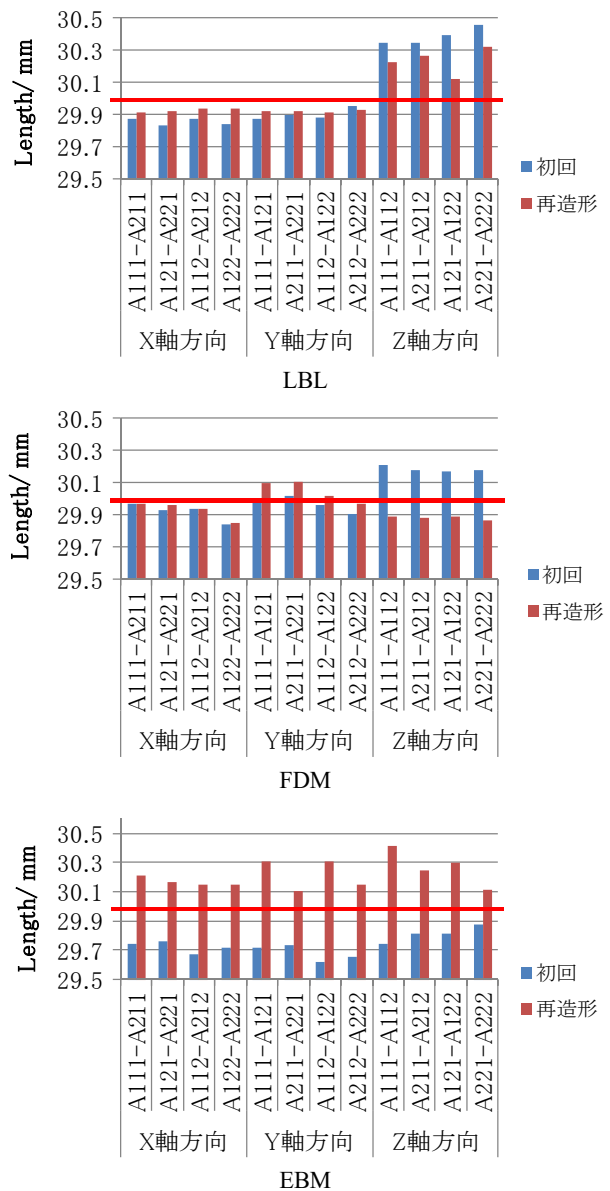


図13 軸方向距離の初回及び再造形の比較結果

表6 各造形装置の駆動方法

	LBL	FDM	EBM
ヘッド移動方式	ガルバノミラー	X,Y軸直動ガイ	磁界による偏向
駆動方式	ミラーとモータを直付け、ミラー2組を使用	X,Y軸:ゴムベルト式ラック&ピニオン	磁界による偏向
X,Y位置決分解能	高	低	高
X,Y位置決精度	高	低	高
積層ピッチ(mm)	0.05	0.127	0.05



図14 FDMの駆動構造（左：Y軸、右：Z軸）

理由と思われる。つまり、補正値を与えた再成形での設計値への収束のためには、位置決め分解能と正確さの精度が高いこと、積層ピッチが細かいことが必要になる。また、三次元CAD/CAMによる補正モデル作製時に軸方向、辺面間、頂点面間となる3要素の補正量を重複して与えたため、補正効果が過大になったことも原因の一つと考えられる。

5-3-2 CATによる検査

検査ソフトウェアを使用して補正後再成形した器物の設計値照合検査を行った結果を表7および図15、16に示す。表7より、標準偏差σはLBLの初回造形で0.125mm、再成形で0.071mmと低減し、補正の効果が表れていることが判る。FDMでは、初回造形でσ0.057mm、再成形でσ0.086mm、EBMでは初回造形でσ0.115mm、再成形でσ0.148mmと、再成形で誤差が増加している。これは、補正により設計値を超えて造形されるなど、補正が的確に反映されなかったためと思われる。

図15の設計値照合検査の誤差マップで、左側に配置した目盛は範囲±0.2mmを等分割したものである。誤差マップでは、頂点角部で膨張傾向であり、平面部では誤差が小さい。これは、頂点角部では軸方向の補正量が余分に付加され、これが頂点角部に与えた補正量に加わっ

表7 補正再成形の結果

	1st			2nd		
	LBL	FDM	EBM	LBL	FDM	EBM
Mean deviation	0.009	0.000	-0.151	0.067	0.076	0.080
Minimum deviation	-1.972	-0.650	-0.640	-0.107	-0.164	-0.312
Maximum deviation	1.670	0.808	0.707	0.271	0.170	0.616
σ	0.125	0.057	0.115	0.071	0.086	0.148

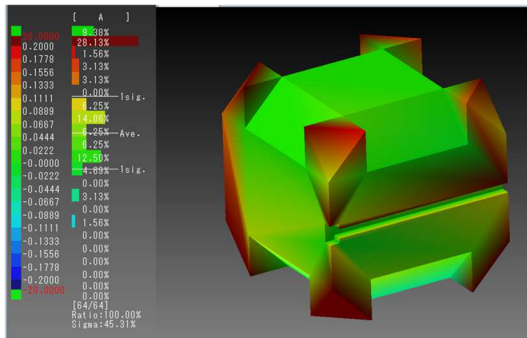


図15 LBLの設計値照合検査の誤差マップ (前方部)

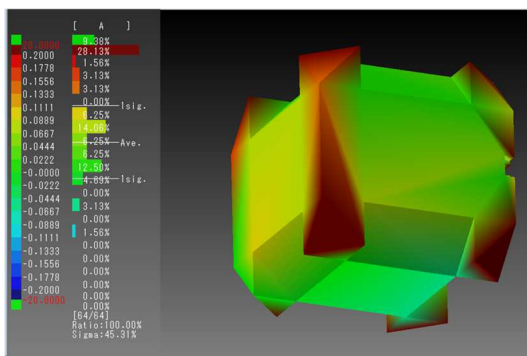


図16 LBLの設計値照合検査の誤差マップ (後方部)

て外側に膨張したためと思われる。重複する位置の補正が今後の課題である。

6 マイクロフォーカスX線CTによる座標測定

6-1 測定方法

マイクロフォーカスX線CTを利用して、LBL、FDM、EBMの3種類の補正造形後の器物でCT撮影を行い、製品設計値と比較した。本装置は、図17のとおり器物の回転をX軸周りに行う方式である。測定条件は以下の通りである。

使用装置：Y.cheetah uHD (エクスロンインターナショナル社製)、

撮影モード：QualityScan、

撮影枚数：720枚、

X線管位置(鉛検知器位置)(鉛直方向、サンプル中心位置を0とした場合)：300mm

LBLとFDMでは、管電圧を75kV、電流を150μAとし、EBMでは、管電圧を150kV、電流を90μAとした。STL形式モデルへの変換にはVGSTUDIO MAXを用いた。

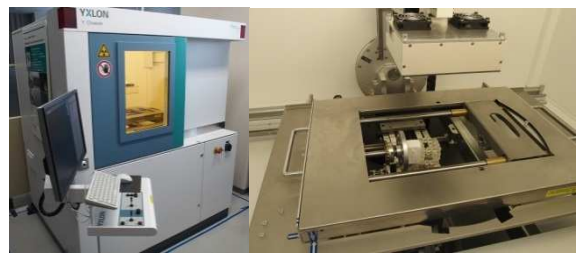


図17 本体(左)とCT用回転部(右)

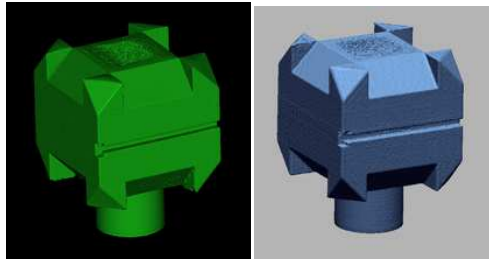
6-2 検査方法

形状誤差は、検査ソフトウェアによる設計値照合で算出した。使用した検査ソフトウェアはspGauge(アルモニコス)である。設計値には製品のSTL形式モデル、測定値にはX線CTで得られた点群をSTL形式に変換したモデルを、それぞれ使用した。位置合わせにはベストフィットを使用した。

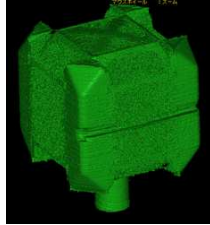
6-3 測定結果

図18にX線CTで測定したSTL形式モデルを示す。金属粉末積層造形EBMでは、エッジの鋭利さが欠落した丸味を持つモデルとなっている。

表8に各造形法の形状誤差、図19~21にそれらの誤差マップを示す。左側に配置した目盛は±0.2mmの範囲を等分割したものである。表8より、LBLのσが0.071mmとなり、形状誤差が最も小さい。一方FDMとEBMでは、σが0.155mmおよび0.136mmとなり、LBLと比較して形状誤差が大きい。EBMで形状誤差が大きい原因は、図18の測定モデルでエッジの鋭利さが失われているとおり、金属系材質のためX線透過の困難さが測定形状として表れるためである。これはビームハードニング



(左: LBL、右: FDM)



EBM

図 18 X線CTで測定した STL 形式モデル

表 8 補正再造型モデルの形状誤差

	mm		
	LBL	FDM	EBM
Mean deviation	0.042	0.123	0.076
Minimum deviation	-0.052	-0.257	-0.244
Maximum deviation	0.333	0.546	0.902
σ	0.071	0.155	0.136

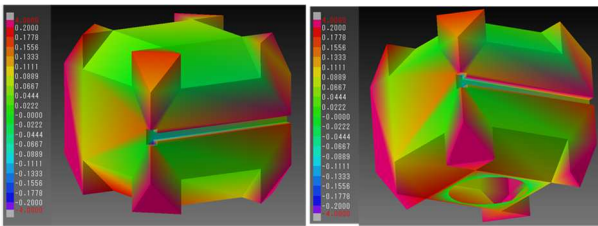


図 19 LBL の誤差マップ (Nom-X 線 CT による測定値、左: Front、右: Back)

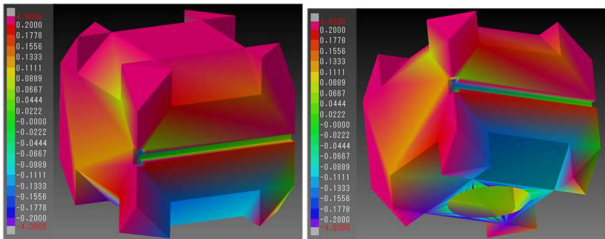


図 20 FDM の誤差マップ (Nom-X 線 CT による測定値、左: Front、右: Back)

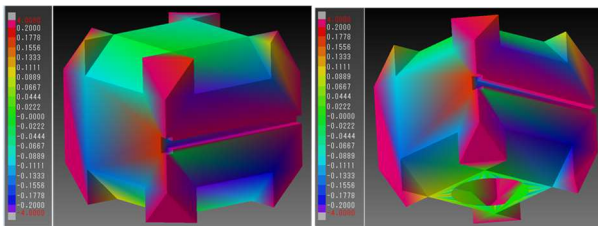


図 21 EBM の誤差マップ (Nom-X 線 CT による測定値、左: Front、右: Back)

アーチファクト現象によるもので、形状厚さが一定厚に成らずに非線形で出力されるためと思われる。X 線 CT

におけるもう一つの主要な誤差と言われるコーンビームアーチファクトは、測定槽内の測定位置に起因する形状誤差であるが、今回の測定では一定位置で各造形法の器物を設置したため相対的にはこの誤差の影響は小さい。一方 FDM で σ が大きくなった原因は、LBL が中実であるのに対し FDM と EBM は中空であるため、モデルは薄壁で構成されている。そのため、空気とモデル材質との閾値の区別が難しい FDM で形状誤差が増大したと思われる、X 線 CT での測定誤差が形状誤差となって表れたと推測される。図 19~21 の誤差マップでは、各造形法とも頂点部で赤色の膨張傾向を示し、この傾向は CAT での設計値照合結果と一致している。

7 結 言

3D3 プロジェクト運営協議会が示す全体課題のプロトコルに従い、立体形状の 3D 器物の補正問題に取り組んだ結果、以下の知見が得られた。

- (1) 器物造形は、樹脂 3D プリンタの光造形法と熱溶解積層法、及び電子ビーム式金属粉末積層造形法の 3 種類の装置を使用して行った。
- (2) 器物の寸法測定は、光造形法と熱溶解積層法によるものはマイクロメータを利用し、金属 3D プリンタによるものは表面凹凸やサポート部の残留が見られたので、カメラ撮影型デジタイザを利用した。その結果、前者は X、Y 方向で設計値に対して収縮傾向、Z 方向で膨張傾向が見られ、後者は X、Y、Z 方向で収縮傾向が見られた。
- (3) 補正方法は、変形率を利用して変形方向とは逆方向に補正量を加えて、造形後に設計値に近寄る考え方として補正値を算出した。補正値は軸方向距離では X、Y、Z 方向の各平均値、辺面間距離と頂点間距離では全平均値とした。
- (4) 補正モデルによる再造型の結果、軸方向距離で、光造形法では初回造形の絶対値平均誤差 0.210 mm が再造型で 0.128 mm に改善された。熱溶解積層法では初回造形の絶対値平均誤差 0.101 mm が再造型では 0.084 mm に、また金属 3D プリンタでは初回造形の絶対値平均誤差 0.263 mm が再造型で 0.217 mm となった。
- (5) 設計値照合検査の誤差マップでは、各造形法とも頂点角部で膨張傾向であり、平面部では誤差が小さい。このことから頂点角部では軸方向の補正量が余分に付加され、これが頂点角部に与えた補正量に加わり、外側に膨張したためと思われる。したがって重複位置の補正が今後の課題である。
- (6) FDM では、辺面間と頂点間で補正後の再造型の誤差が大きかった。この補正不良の原因は、各装置については、①ヘッドの位置決めに関する分解能及び正確さの装置性能、②積層ピッチ、また金属 3D プリンタの場合は、③金属溶融時の表面粗

さ、④再凝固時の形状再現性、が考えられる。FDMでZ方向に関する項目で偏差が大きい理由は、X、Y軸の位置決め精度と積層ピッチが相乗的に働いたためと思われる。

- (7) X線CTによる測定では、中空モデルで形状誤差が大きかった。とくにFDMでは薄壁で構成されたモデルであるため、肉部と空気の透過率の差による閾値が正確に決定できなかったために測定誤差が生じた。

謝 辞

この研究は、産総研地域連携戦略予算プロジェクト

「3D計測エボリューション」(3D3プロジェクト)により実施した。本共同研究に携わったすべての研究者に感謝する。

文 献

- 1) 和合健、長嶋宏之、菊池貴、黒須信吾：樹脂3Dプリンタによる加工物の2D面寸法補正に関する考察、岩手県工業技術センター 研究報告 第21号(2018)、PP. 11-15
- 2) 3D3プロジェクト運営協議会：実施ガイドライン2018年度全体課題 (2018)