

3D スキャナと 3D プリンタの連携による クローズドループエンジニアリングに関する考察*

和合 健**、長嶋 宏之***、箱崎 義英****

クローズドループエンジニアリングは、3D スキャナと 3D プリンタが相互連携す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り、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。ここでは、熱溶解積層法と光造形法の樹脂 3D プリンタで製作した立体モデルをレーザプローブ式座標測定機で測定しクローズドループエンジニアリングの実用性を検証した。その結果、ばらつきは 0.088mm (σ) となり、良好な結果が得られた。一方、マイクロフォーカス X 線 CT で立体モデルの形状を測定した結果、直径 S ϕ 11mm 球の設計値が、測定では最大値 11.038mm、最小値 10.841mm と誤差が大きく、この原因説明が今後の課題であることが明らかになった。

キーワード：クローズドループエンジニアリング、3D スキャナ、3D プリンタ、レーザプローブ式座標測定機、マイクロフォーカス X 線 CT

Closed-loop engineering combining 3D scanner and 3D printer

TAKESHI Wago, HIROYUKI Nagashima and YOSHIHIDE Hakozaiki

Closed-loop engineering promises precision and high-efficiency product manufacturing. This process combines a 3D scanner and a 3D printer to reduce feature deviation. The present study verifies the practicability of closed-loop engineering. A 3D model manufactured by fused deposition molding and laser beam lithography is measured using a laser probe CMM, which provides a measurement variation of 0.088 mm (σ). The 3D model is measured using microfocus X-ray computed tomography. The maximum and minimum sphere diameters are 11.038 and 10.841 mm, respectively, for a nominal diameter of 11.000 mm. Future work will focus on finding the cause of this large deviation.

key words : closed-loop engineering, 3D scanner, 3D printer, laser probe CMM, micro focus X-ray computed tomography

1 緒 言

3D 走査測定法は点群を利用して製品形状の精密測定を行う方法であり、従来は自由曲面に対する特殊な測定方法として認識されていた。現状ではパソコンや測定機本体を始めとする電子計算機器のハードウェア及びソフトウェアの進化により大量の点群を短時間で計算処理できることから、従来、接触式座標測定機（以下 CMM という）で行っていた高精度な寸法測定や幾何形状測定も可能になりつつある。さらに、3D プリンタと 3D 走査測定装置（3D スキャナ）を組み合わせることでより高能率かつ高精度な製品

製造に対応できる可能性も見えており、製造技術のパラダイムシフト（技術革新）への期待が高まっている。

そこで、国立研究開発法人産業技術総合研究所がプロジェクトリーダーとなり、複数公設試が参加するプロジェクトが実施された。事務局がテストピース製作とその 3D 測定に関する共通課題を策定した。岩手県工技セでは樹脂光造形法と樹脂熱溶解積層法による 3D プリンタ、レーザプローブ式座標測定機とマイクロフォーカス X 線 CT による 3D スキャナを使用して、事務局が示した課題に取り組んだ。本研究

* 平成 27 年度 産総研地域連携戦略予算プロジェクト（共同研究）

** 素形材技術部

*** デザイン部

**** 電子情報技術部

の目的は、保有設備が有する性能の数値化と作業者の技能向上、さらに今後の3Dものづくり技術への方針策定及び展開のための基礎データを得ることである。

2 樹脂3Dプリンタによる造形物の製作

2-1 概要

指定器物データを、保有する3Dプリンタ2種により、レイアウト1、レイアウト2の指定方向に設置し、計4個の造形を行った。レイアウト1とは造形装置のX軸と器物の面を平行にした置き方、レイアウト2とはX、Y、Z軸からそれぞれ45°傾けた置き方である。

また、測定範囲の小さいマイクロフォーカスX線CT装置のために50%に縮小した器物を光造形法によりレイアウト1で1個造形した。

2-2 光造形法

2-2-1 装置仕様

光造形法による造形装置（以下、光造形装置）の主な仕様を表1に、外観を図1に示す。

表1 光造形装置の主な仕様

装置名(形式)	NRM-6000
メーカー	シーメット株式会社
造形方法	光造形法
使用樹脂	光硬化性樹脂 TSR-883 (エポキシベース)
積層ピッチ	0.05 mm/0.1 mm/0.15 mm
最大造形範囲	W 610×D 610×H 500 mm

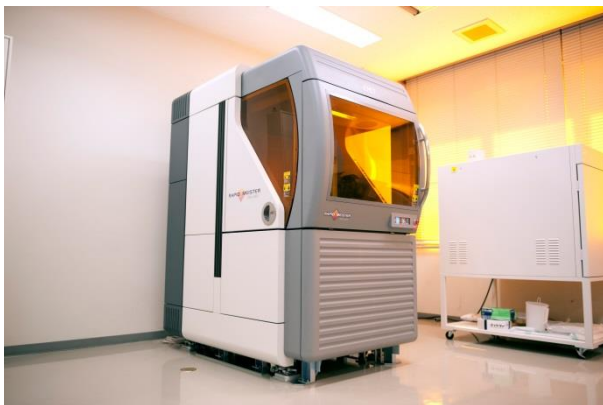


図1 光造形装置の外観

2-2-2 モデル

光造形法による器物について造形条件などを表2に、外観を図2に示す。

表2 光造形法器物の造形条件

レイアウト	レイアウト1	レイアウト2
積層ピッチ	0.1 mm	
造形時間	10時間22分36秒	23時間52分49秒
器物の詳細	特に無し	直方体の一部、 下面方向に欠け
サポート除去方法	手作業による(洗浄時)	

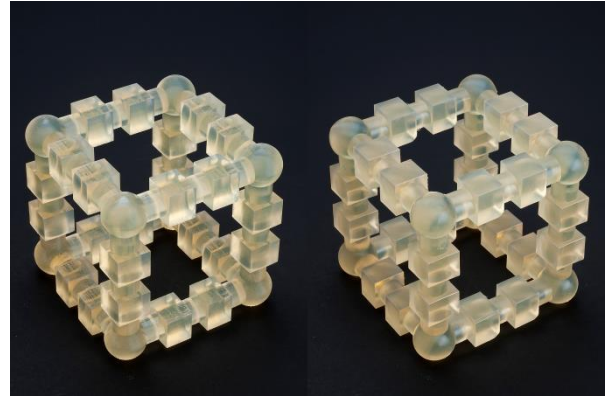


図2 光造形法による器物の外観
(左:レイアウト1、右:レイアウト2)

2-2-3 50%モデル

光造形法による器物の造形条件を表3に、外観を図3に示す。

表3 50%モデルの造形条件

レイアウト	レイアウト1
積層ピッチ	0.1 mm
造形時間	3時間5分5秒
器物の詳細	特に無し
サポート除去方法	手作業による(洗浄時)



図3 50%モデル器物の外観

2-3 熱溶解積層法

2-3-1 装置仕様

熱溶解積層法による造形装置（以下、FDM）の主な仕様を表 4 に、外観を図 4 に示す。

表 4 FDM 式装置の主な仕様

装置名 (形式)	FORTUS 360mc S
メーカー	Stratasys Ltd.
造形方法	熱溶解積層法
使用樹脂	モデル：ABS-M30 (ABS 樹脂)、 サポート：SR30
積層ピッチ	0.127 mm / 0.178 mm / 0.254 mm / 0.330 mm
最大造形範囲	W 355 × D 254 × H 254 mm



図 4 FDM 式装置の外観

2-3-2 モデル

FDM による器物の造形条件を表 5 に、外観を図 5 に示す。

表 5 FDM 法器物の造形条件

レイアウト	レイアウト 1	レイアウト 2
積層ピッチ	0.127 mm	
造形時間	49 時間 4 分	70 時間 34 分
器物の詳細	特に無し	直方体の一部、 下面方向に欠け
サポート除去方法	手作業と強アルカリ 性水溶液による溶解	手作業による

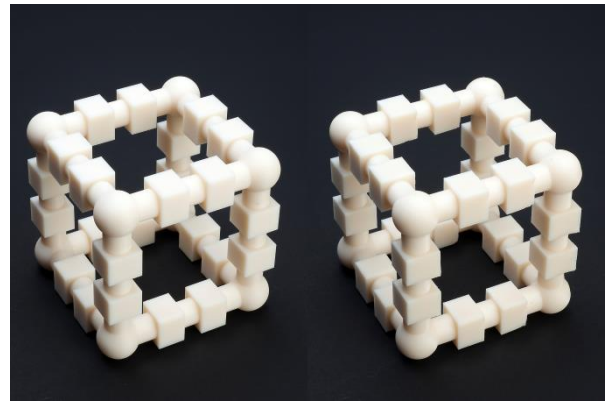


図 5 FDM による器物の外観
(左：レイアウト 1、右：レイアウト 2)

3 レーザプローブ式座標測定機による非接触走査測定

3-1 実験装置

レーザプローブ式座標測定機（以下、レーザプローブ CMM という）の主な仕様を表 6、外観を図 6 に示す。本装置は接触式 CMM のプローブ部を非接触式ラインレーザプローブに付け替えたものでラインレーザの測定幅が 15mm と狭いが球測定での真球度 (σ) 8 μ m の高精度測定に対応できる。本体の指示誤差 MPE_E は接触式プローブ TP200 装着時で $1.9+3L/1000\mu$ m であり、測定誤差はレーザプローブの性能に大きく依存している。測定範囲は 705×705×605mm (X、Y、Z) であり比較的広い測定範囲を有する。しかし、レーザプローブの作動距離が 100mm であり、プローブの向きを横向きにした場合には作動距離が測定範囲を占有するため、実際の測定範囲は狭まる。従って本装置の測定対象は小物測定物の高精度測定となる。

評価ソフトウェアは Focus Inspection Ver8.3 (Nikon Metology、以下 FI8.3 という) を利用した。使用したパソコンの性能は CPU が Pentium4 で物理メモリが 4MB、OS は Windows XP (32bit) である。FI8.3 は点群の異常点除去や間引きのフィルタリング機能、ワーク座標系 (WCS) 設定、ベストフィット機能からの設計値照合計算や誤差表示までのほぼすべての解析機能を有している。

3-2 実験方法

事務局が示した球と立方体及び円筒から構成されたサイコロ型の測定物についてレーザプローブ CMM を使用して、事務局が示した測定方法により測定した。その結果、事務局が示した測定方法のすべての項目が本装置で実現できた。測定テーブルは表 7 のとおり、試験番号 1~8 の組み合わせとして行い、全 8 回の測定ですべての測定値が得られる。測定テーブルの詳細は、製造方法が熱溶解積層法と光造形法の 2 水準、製造での置き方がレイアウト 1 とレイ

表6 レーザプローブCMMの主な仕様

品名	非接触レーザープローブ式CMM
型式	CRT-AC776-LC15
メーカー	ミツトヨ, Nikon Metology
非接触レーザープローブ: LC15(Nikon Metology)	
スキャン速度	19200点/秒
測定幅	15mm
測定深さ	15mm
単体精度(1σ 真球度)	8μm
分解能	0.025mm
作動距離	100mm
光源レーザー	Class2
CMM: CRT-AC776(ミツトヨ)	
測定範囲	705 × 705 × 605mm (X,Y,Z)
最小表示量	0.0001mm
案内方式	エアベアリング
最大測定速度	8mm/s
最大測定加速度	0.13G(各軸), 0.23G(合成)
MPE _E (TP200時)	1.9+3L/1000μm (L:測定長さmm)

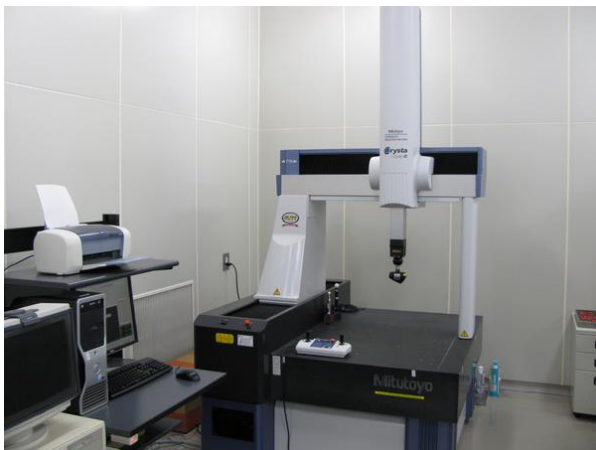


図6 レーザプローブCMMの外観

アウト2の2水準、測定時の測定物の向きが切り欠け部(測定物に刻印した目印)をX軸側またはY軸側に置いた場合の2水準とする計8通りの組み合わせとした。

レーザープローブCMMを利用した測定の要点を説明する。レーザープローブCMMは可動軸が5軸のもので座標測定機のX、Y、Z軸とプローブのA軸、C軸である。造形物の上面は図7、四方側面は図8のプローブ姿勢により行った。A軸はプローブの倒れ方向の軸、C軸はプローブの回転方向の軸である。測定物の底面を含めた全周を測定するためには上側と底側の二つに分けて走査測定し、上下別々のモデルを作成後に重複する任意の4個を使用して、上下を合体させた。

拡散反射光を作り出すための白色粉末塗布は熱溶解積層法では行わず、光造形法のみで使用した。白色粉末は探傷剤を使用し、手動で出来るだけ薄く、均一になるように注意して測定物に吹き付けた。レーザープローブのPoint、Stripe、Overlapの値は熱溶解積層法と光造形法ともにPoint 0.6mm、Stripe

表7 測定テーブル

試験No.	1	2	3	4	5	6	7	8
製造方法	熱溶解積層法				光造形法			
製造での置き方	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
切り欠けの位置	X軸	X軸	Y軸	Y軸	X軸	X軸	Y軸	Y軸

※ L1:レイアウト1, L2:レイアウト2

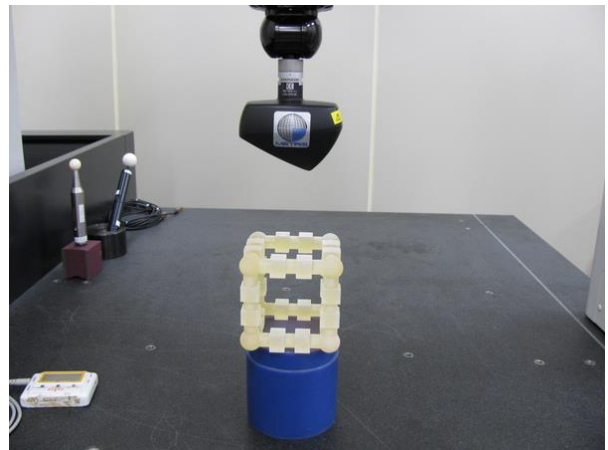


図7 プローブ姿勢 A0deg、C0deg

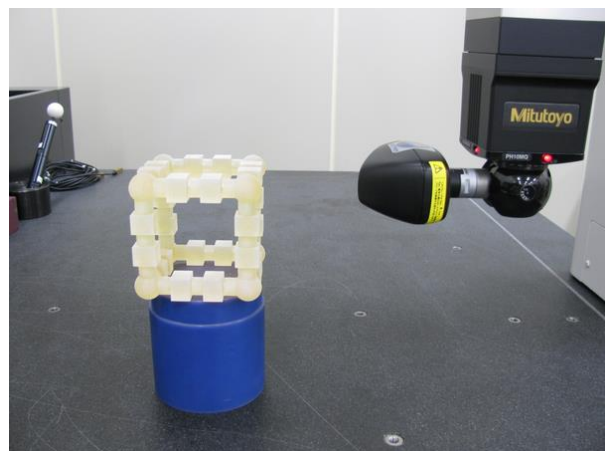


図8 プローブ姿勢 A90deg、C-90deg

0.6mm、Overlap 0.1mmとした。レーザー強度は熱溶解積層法で27/60ノッチとし、光造形法では透明体のため個体や各面及び部位において反射強度が得られ難かったために適宜調整し、およそ32/60程度の値とした。レーザープローブCMMの測定定盤上の温度は平均値19.5℃、変動範囲0.3℃であった。測定期間は2015/11/30から開始し2015/12/2までのほぼ丸々3日間を要した。

3-3 測定結果

設計値照合検査により8件の誤差カラーマップが得られ、その中からfdm_12_xのベストフィット有り無しを図9と図10に示す。カラーマップにより誤

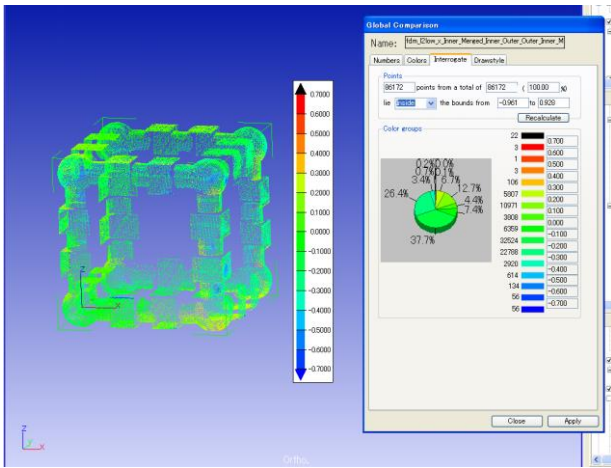


図9 fdm_12_x (ベストフィット有り)

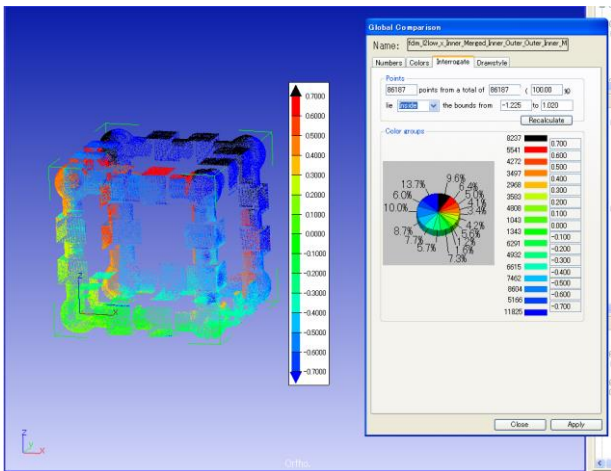


図10 fdm_12_x (ベストフィット無し)

差の大きさを示し、カラーマップの公差は±0.7mmとしカラーバーの中心で誤差が小さいことを示す。試験番号の名称は以下の法則で設定した。例えばfdm_11_xとは、製造方法が熱溶解積層法(Fused deposition modeling:FDM)で製造時の配置がレイアウト1でレーザープローブCMMによる測定時の切り欠け位置がX軸上であることをいう。例えばlbl_12_yとは、製造方法が光造形法(Laser beam lithography:LBL)で製造時の配置がレイアウト2でレーザーCMMによる測定時の切り欠け位置がY軸上であることをいう。走査測定による点群データ(x、y、z)の解析はFI8.3により行い、FI8.3を使用してすべての項目の解析に対応できた。真球度、平面度、円筒度は自由記載であるため試験番号No.1:fdm_11_xのS111、ZX面、Axのみ算出した。カラーマップ評価結果はベストフィット有り、3-2-1のみの2種類とした。

3-4 考察

3-4-1 球測定結果

(1) 分散分析

独自の取組みとして分散分析¹⁾により因子の効果を

を算出した。因子と水準は表8のとおりとした。因子Aは3Dプリンタの造形方式で熱溶解積層法、光造形法で2水準、因子Bは3Dプリンタ造形時のレイアウトでL1が軸に平行、L2が軸に斜めに設置した場合である。因子Cは測定時のワーク向きで事務局が取り付けた切り欠け部がX軸上とY軸上の2水準であり、この因子はレーザープローブCMMの測定誤差の評価に用いる。因子Dは測定者として2水準であり、レーザープローブCMMによるプローブ走査は自動運転で行うため比較的作業者の測定技能が排除された測定である。このため、この因子は測定の反復と見なせると考えた。因子Eは測定評価時の2球の

表8 因子と水準

因子		水準		
		1	2	3
A	造形方式	熱溶解積層法	光造形法	—
B	造形時のレイアウト	L1	L2	—
C	測定時のワーク向き	印がX軸上	印がY軸上	—
D	測定者	測定者A	測定者B	—
E	2球の方向軸	X軸	Y軸	Z軸

表9 特性値

因子		水準											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y	球間距離(mm)	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9	y10	y11	y12

表10 分散分

Factor	f	S	V	F	ρ %
A	1	0.08424	0.08424	2.90	0.65
B	1	1.30877	1.30877	45.11	14.75
C	1	0.00769 ○	0.00769	0.27	—
D	1	0.00204 ○	0.00204	0.07	—
E	2	1.07059	0.53530	18.45	11.69
A*B	1	0.20506	0.20506	7.07	2.04
A*C	1	0.01046 ○	0.01046	0.36	—
A*D	1	0.00732 ○	0.00732	0.25	—
A*E	2	0.01370 ○	0.00685	0.24	—
B*C	1	0.02997 ○	0.02997	1.03	—
B*D	1	0.05950	0.05950	2.05	0.37
B*E	2	0.88713	0.44357	15.29	9.57
C*D	1	0.00965 ○	0.00965	0.33	—
C*E	2	0.01215 ○	0.00608	0.21	—
D*E	2	0.01755 ○	0.00878	0.30	—
e	171	4.96066 ○	0.02901	—	—
e'	183	5.07119	0.02771	—	60.93
T	119	8.68647	—	—	100.00

※ e': ○印をプール

析表

倅う軸方向である。特性値 y は表 9 のとおり球間距離(mm)とし、球測定結果での 12 水準の球間距離測定値を利用した。

表 10 に分散分析表を示す。 V が分散で F が分散比、 ρ が寄与率²⁾である。 e' は誤差分散 e よりも小さい各因子の分散を足し合わせたものである。その結果寄与率から因子 B : 造形時のレイアウトが 14.75%、因子 E : 2 球の方向軸が 11.69% となりこの二つの因子がばらつきに大きく影響していた。因子 B は造形時の姿勢であり、軸に平行に置く場合と軸に斜めに置く場合で造形物の寸法が大きく異なる。因子 E は球間距離測定時の 2 球が倅う軸であり、ばらつきの大きい原因は重力の影響が考えられる。因子 C 測定時のワーク向きで寄与率の効果が小さいことから、造形時の造形物寸法のばらつきに対してレーザプローブ CMM の測定誤差は非常に小さく、因子 C の標準偏差 σ を測定機のばらつき誤差と見なすと $V=0.00769 \text{ mm}^2$ より 0.088mm (σ) となる。因子 D 測定者では、レーザプローブ CMM の走査測定は自動測定で行われるため測定者の測定技能が測定誤差に影響を与えていない。因子 D を測定の反復のばらつき誤差と見なすと $V=0.00204 \text{ mm}^2$ より 0.045mm (σ) となる。

(2) ばらつきの評価

表 11 に特性値が球間距離での因子水準毎の標準偏差 (σ) を示す。データ数は 192 個である。分散分析で寄与率が大きかった因子 B のレイアウト 1 が 0.255mm 、レイアウト 2 が 0.113mm であり、造形時に軸に斜めの姿勢で球間距離のばらつきが小さい。因子 E では X 軸が 0.258mm 、Y 軸が 0.214mm 、Z 軸が 0.092mm であり、Z 軸方向の球間距離でばらつきが小さい。

表 11 因子水準毎の標準偏差 (球間距離)

因子		水準 (mm)		
		1	2	3
A	造形方式	熱溶解積層法	光造形法	—
		0.174	0.245	
B	造形時のレイアウト	L1	L2	—
		0.255	0.113	
C	測定時のワーク向き	印がX軸上	印がY軸上	—
		0.192	0.234	
D	測定者	測定者A	測定者B	—
		0.246	0.175	
E	2球の方向軸	X軸	Y軸	Z軸
		0.258	0.214	0.092

(3) 真球度の評価

試験番号 No.1 : fdm_l1_x の S111 球について、最小

二乗球の中心を起点とした球の半径のヒストグラムを図 11 に示す。真球度は 95% 範囲における球の半径

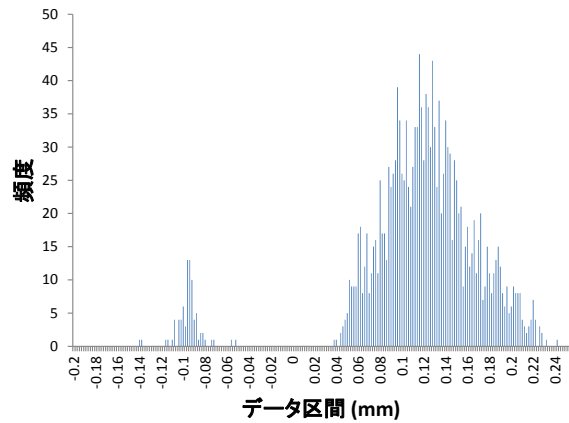


図 11 真球度のヒストグラム

の最大値と最小値の差として算出した。5%を除く方法は最小値側 2.5%及び最大値側 2.5%として行った。その結果、試験番号 No.1 : fdm_l1_x の真球度は 0.300mm となった。

3-4-2 平面測定結果

(1) 直角度の評価

表 12 に直角度の評価を示す。直角度算出の検査長さは 78mm である。レーザプローブ CMM の測定誤差に対して造形物の形状誤差が十分に大きいことが球測定結果で分かっているので直角度の誤差は主に造形物の形状誤差と推測された。造形方式では熱溶解積層法の平均値が 0.111mm 、光造形法の平均値が 0.054mm であり、光造形法の場合で直角度が小さい。平面对平面の場合では平均値で XY-YZ が 0.095mm 、YZ-ZX が 0.028mm 、ZX-XY が 0.124mm であり、XY 平面对する直角度で誤差が大きい。

表 12 直角度の評価

実験番号					(mm)	
		XY-YZ	YZ-ZX	ZX-XY	平均値	標準偏差
1	fdm_l1_x	0.086	0.031	0.062	0.111	0.082
2	fdm_l1_y	0.086	0.047	0.117		
3	fdm_l2_x	0.194	0.031	0.241		
4	fdm_l2_y	0.249	0.023	0.163		
5	lbl_l1_x	0.055	0.008	0.109	0.054	0.041
6	lbl_l1_y	0.023	0.008	0.109		
7	lbl_l2_x	0.039	0.039	0.062		
8	lbl_l2_y	0.031	0.039	0.132		
平均値		0.095	0.028	0.124		
標準偏差		0.083	0.014	0.058		

(2) 平面度の評価

試験番号 No.1 : fdm_l1_x の ZX 面について、最小二乗平面を起点として法線ベクトル方向の点の距離のヒストグラムを図 12 に示す。平面度は 95% 範囲に

おける点の距離の最大値と最小値の差として算出した。5%を除く方法は最小値側 2.5%及び最大値側 2.5%として行った。その結果、試験番号 No.1 :

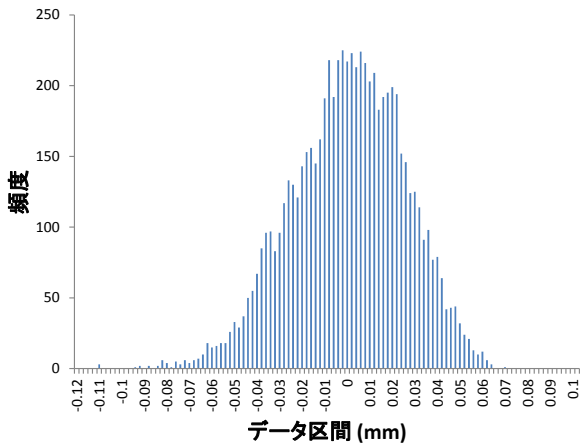


図 12 平面度のヒストグラム

fdm_l1_x の平面度は 0.110mm となった。

3-4-3 円測定結果

(1) 角度の評価

表 13 に角度の評価を示す。プロトコルに従い造形物にワーク座標系を与えた場合の X 軸、Y 軸、Z 軸の成す角度の造形方式毎の平均値と標準偏差、及び軸対軸毎の平均値と標準偏差を求めた。その結果、造形物が安定形状であったためか因子を造形方式及び軸対軸の双方で評価した場合でほぼ 90deg となる良好な結果となり、因子間の差は見られなかった。

表 13 角度の評価

実験番号	Ax-Ay	Ay-Az	Az-Ax	(degree)		
				平均値	標準偏差	
1	fdm_l1_x	89.989	89.971	89.926	89.991	0.098
2	fdm_l1_y	89.920	89.926	89.989		
3	fdm_l2_x	90.178	89.845	90.063		
4	fdm_l2_y	90.103	89.903	90.086		
5	lbl_l1_x	89.960	89.765	89.788	89.916	0.074
6	lbl_l1_y	89.960	89.897	89.862		
7	lbl_l2_x	89.931	89.994	89.971		
8	lbl_l2_y	89.960	89.948	89.954		
平均値		90.000	89.906	89.955		
標準偏差		0.091	0.074	0.098		

(2) 円筒度の評価

試験番号 No.1 : fdm_l1_x の Ax 軸について、最小二乗円筒の中心を起点とした円筒の半径のヒストグラムを図 13 に示す。円筒度は 95%範囲における円筒の半径の最大値と最小値の差として算出した。5%を除く方法は最小値側 2.5%及び最大値側 2.5%として行った。その結果、試験番号 No.1 : fdm_l1_x の円筒度は 0.224mm となった。

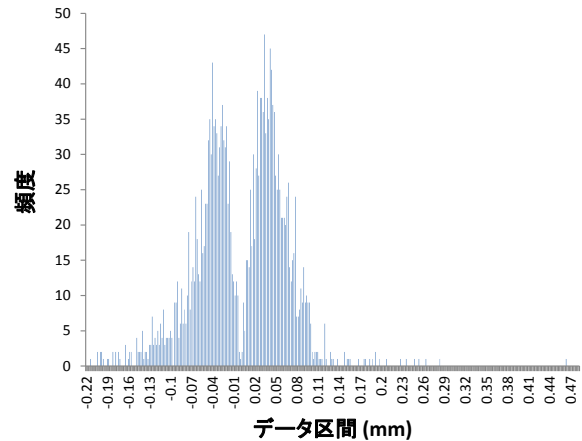


図 13 円筒度のヒストグラム

3-4-4 偏りの評価

CAD モデルを設計値としレーザプローブ CMM の測定点群を測定値として設計値照合を行った。法線ベクトル方向の差 (3D 誤差) を算出し因子毎の最小二乗平均を計算し図 14 に示した。その結果、ベストフィットの場合で 3D 誤差が小さくなっており 3-2-1 のみで 0.498mm、ベストフィットでは 0.203mm となった。

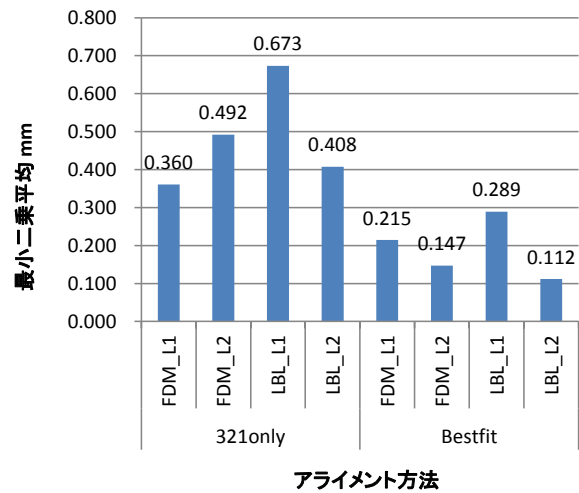


図 14 偏りの評価

4 マイクロフォーカス X 線 CT による座標測定

4-1 測定装置

マイクロフォーカス X 線 CT 装置の主な仕様を表 14、外観を図 15 に示す。また、図 16 に CT 撮影用テーブルを示す。

表 14 マイクロフォーカス X 線 CT 装置の主な仕様

型式	Y.Cheetah uHD
メーカー	エクスロン・インターナショナル
出力管電圧	25-160kV
出力管電流	0.01-1.0mA
最大 X 線管出力	64W
最大ターゲット出力	15W
認識解像度	0.5 μ m
センサー斜角	$\pm 70^\circ$ (140 $^\circ$)
最大サンプルエリア	800 \times 500mm
最大検査エリア	460 \times 410mm
最大幾何学倍率	3000 倍
CT スキャン時間	(最短) 60 秒



図 15 マイクロフォーカス X 線 CT 装置の外観

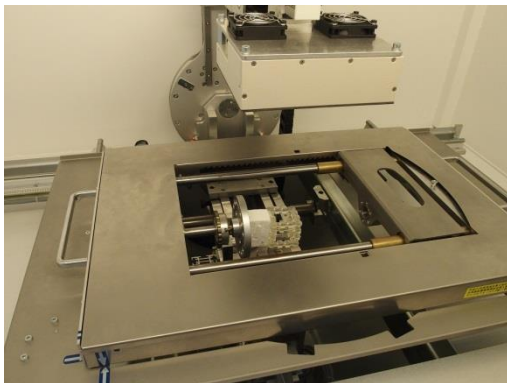


図 16 CT 撮影用テーブル

本装置の CT 撮影では、図 16 に示すように測定物は X 軸（横軸）周りに回転させ撮影するものとなっている。このため、測定物が落下しないように治具に固定する必要がある。

3次元解析ソフトウェアは VG Studio Max を利用した。VG Studio Max では座標計測、繊維複合材料解析、設計値/測定値比較、欠陥/介在物解析、肉厚解析を有している。

4-2 測定方法

事務局が指定した器物(最大寸法: 100 \times 100 \times 100mm)は、本装置の最大視野角において全体像の撮影が不可能であった。そこで、指定器物の 50%サイズの器物を光造形法により製作し参考データとして測定を行った。

金属と樹脂など X 線の減衰が大きく異なる材質の CT 撮影では金属由来のノイズにより境界の判断が困難となる。そこで、X 線の減衰の低い発泡スチロールを治具と測定物の間に挟み込み撮影を行った。測定物の固定は両面テープにより行った。

4-3 結果および考察

ベストフィットによるカラーマップ評価を図 17、ヒストグラムを図 18 に示す。また、面形状位置合わせによるカラーマップ評価を図 19、図 20 に、ヒストグラムを図 21 に示す。

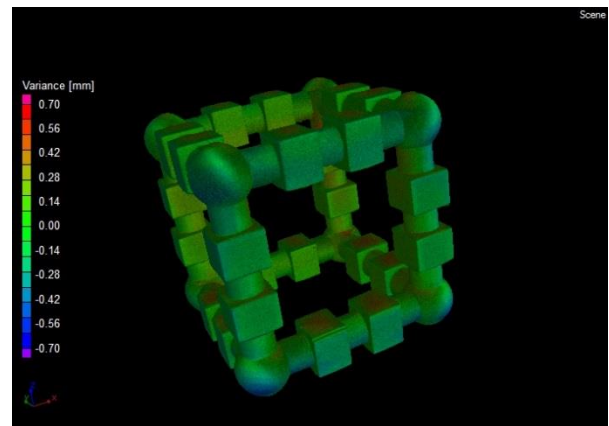


図 17 カラーマップ評価

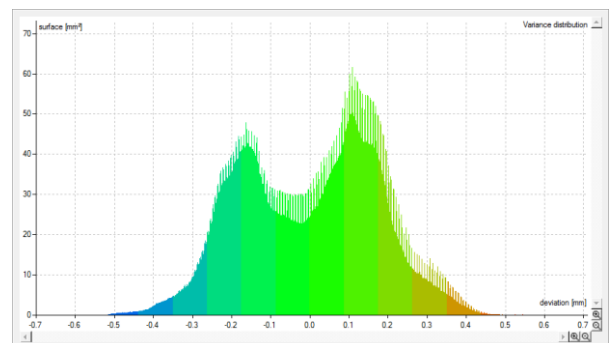


図 18 ヒストグラム

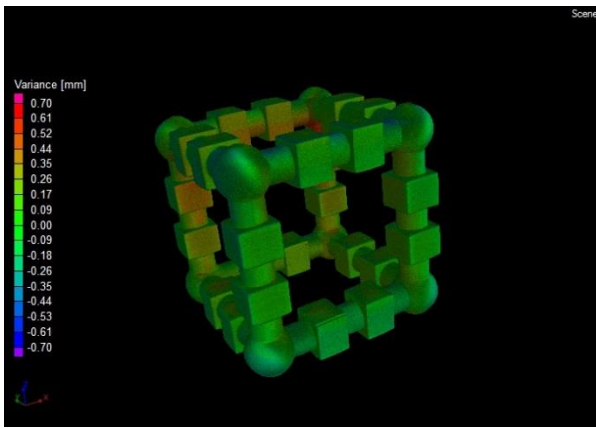


図 19 カラーマップ評価（指定方向の描画）

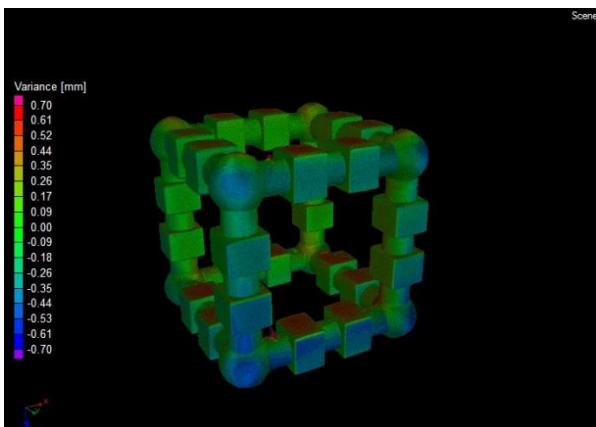


図 20 カラーマップ評価（指定方向の逆の描画）

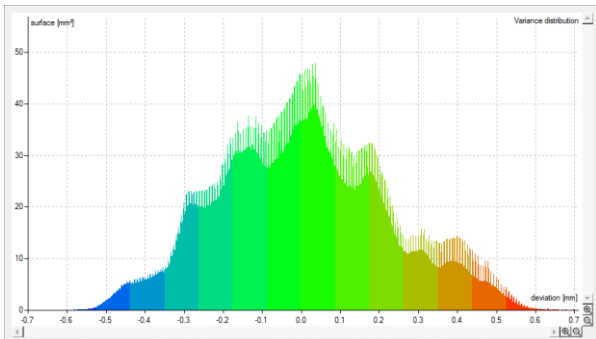


図 21 ヒストグラム

直径 11mm の球の測定結果として、直径の最大値 11.038mm、最小値 10.841mm となった。また、設計値の直径 7mm の円柱測定では最大値 7.04mm、最小値 6.864mm となった。

今回の測定ではカラーマップ評価より $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲内に収まっている。使用したソフトウェアの VG Studio Max は座標計測等の解析を行うためには撮影された画像をもとに物体の面の定義（境界の設定）が必要となっている。面の定義について今回は物体が単一の材質のため自動で行うことが可能であった。しかし、ノイズが著しい場合における CT 画像において特定の表面を指定する場合には手動で行う必要がある。このことより、CT 撮影時における X 線の強さ

や撮影後の面の定義により結果が異なってくることが考えられる。

5 結 言

5-1 モデル造形に関すること

- (1) 光造形法と熱溶解積層法の積層時間を比較した結果、積層ピッチは光造形法が 0.1mm、熱溶解積層法が 0.127mm とした設定値であるため積層ピッチでは光造形法が熱溶解積層法の 0.79 倍と細かいが、積層時間は熱溶解積層法が光造形法のレイアウト 1 で 4.73 倍、レイアウト 2 で 2.95 倍の時間を要した。
- (2) 測定範囲の制限から岩手県工業技術センター保有の X 線 CT で測定するために光造形法により 50%縮小モデルをレイアウト 1 のみ、積層ピッチは 100%モデルと同等の 0.1mm として造形した。その結果、造形時間は 100%モデル時の 10 時間 22 分 36 秒に対し、50%縮小モデルは 3 時間 5 分 5 秒を要し、造形時間は 100%モデルの 0.30 倍であった。

5-2 レーザプローブ式座標測定機による走査測定に関すること

- (1) 球間距離を特性値として分散分析をした結果、寄与率から因子 B：造形時のレイアウトが 14.75%と因子 E：2 球の方向軸が 11.69%となり二つの因子で 26.44%を占めている。
- (2) 球間距離を特性値として、因子 C：測定時のワーク向きで寄与率の効果が小さいことから造形時の造形物寸法のばらつきに対してレーザプローブ CMM の測定誤差は非常に小さく、因子 C の標準偏差 σ を測定機のばらつき誤差と見なすと 0.088mm (σ) となる。
- (3) 球間距離を特性値として各因子の水準毎に標準偏差 σ を求めた結果、因子 B：造形時のレイアウトでは L2:軸に対して斜めの場合で標準偏差 σ が小さい。因子 E：2 球の方向軸では Z 軸の場合で標準偏差 σ が小さい。
- (4) 平面对平面の直角度の評価では、光造形法の場合で直角度が小さく、平面对平面の場合では XY 平面に対する直角度で誤差が大きい。
- (5) 軸対軸の角度を算出した結果、すべてでほぼ 90deg となる良好な結果であり因子間の差は見られなかった。
- (6) 設計値照合の 3D 誤差において因子毎の最小二乗平均を算出した結果、3-2-1 のみで 0.498mm、ベストフィットでは 0.203mm となった。

5-3 マイクロフォーカス X 線 CT による走査測定に関すること

- (1) 設計値が直径 11mm 球の測定値は、直径の最大値 11.038mm、最小値 10.841mm となった。また、設計値が直径 7mm 円柱の測定値は、最大値

7.04mm、最小値 6.864mm となった。今回の測定のカラーマップ評価は、ほぼ $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲内に収まった。

- (2) 評価ソフトウェア VG Studio Max は座標計測を行うためには面の定義(境界設定)が必要であり、今回は物体が単一の材質のため自動で行えたが、ノイズの多い測定モデルの場合は手動で行う必要

があり測定結果に影響が生じる恐れがある。

文 献

- 1) 森口繁一：統計的方法、日本規格協会、p143～152(2003).
- 2) 矢野宏：計測管理の実際、p75～86(1986)