

ラピッドプロトタイピング樹脂成形品の試作利用に関する検討

宮内 宏 哉*¹

上原 忍 *²

前田 一 輝*³

後藤 卓 三*⁴

[要 旨]

粉末焼結造形法および熱溶解積層造形法によるラピッドプロトタイピング樹脂成形品を作製し、成形方向に対する引張強度を評価したところ、いずれも平面方向に比べて積層方向の強度及び伸びが低かった。粉末焼結法では、平面方向と積層方向で成形品の X 線回折ピークに違いが見られた。粉末焼結法での造形時のレーザー強度を高めることにより積層方向の伸びが改善され、X 線回折ピークに変化が見られることがわかった。

1 はじめに

ラピッドプロトタイピングとは、3次元CADデータを元にスライスデータを作成し、これを用いて樹脂成形品等を直接、積層造形する方法である。金型等が不要で、3次元CADデータを元に数時間～数日程度で成形品を作製できることから、樹脂成形品の試作に広く利用されるようになってきている^{1,2)}。特に近年、熱溶解積層造形法(FDM)など造形法を採用し、簡便な操作で造形可能としたラピッドプロトタイピング装置は3Dプリンターと呼ばれて注目が高まっており、今後の飛躍的な普及・利用拡大が期待されている^{3,4)}。従来のラピッドプロトタイピングの用途は、携帯電話等の通信機器の意匠モデルや部品の干渉チェックなど、形状・意匠確認が主であった。しかし近年、樹脂製品の利用拡大及び国際競争の激

化に伴い、開発期間の短縮化・低価格のニーズが高まり、ラピッドプロトタイピング樹脂成形品を形状・意匠確認だけでなく、強度・機能も備えた試作品に利用できることが期待されている。これら市場ニーズに伴い、ラピッドプロトタイピング成形技術も向上し、ラピッドプロトタイピング用材料の開発も進んでいるが、成形品の形状精度や材質・材料特性を中心に開発・技術情報提供がなされることが多く、試作品利用時に必要な成形品強度に関する情報はほとんど無いのが現状である。

そこで本研究では、粉末焼結造形法(SLS)および熱溶解積層造形法(FDM)によるラピッドプロトタイピング樹脂成形品を作製し、成形方向に対する引張強度及び伸びを評価すると共に、成形条件による影響を調査した。

2 実験方法

2. 1 ラピッドプロトタイピング成形法

2. 1. 1 成形法と特徴

実用化されている主要なラピッドプロトタイピングによる樹脂成形方法としては、光造形法(SLA)、粉末焼結造形法(SLS)、マルチジェット

* 1 基盤技術課 副主査

* 2 中丹技術支援室 主任研究員

* 3 基盤技術課 主任

* 4 基盤技術課 主任研究員

造形法 (MJM、インクジェット造形法とも呼ばれる)、熱溶解積層造形法 (FDM) が挙げられる。いずれの方法も積層造形法と総称され、3 次元 CAD データを元に、XY 平面上で作製した樹脂成形品を Z 方向に積層させて、3 次元の樹脂成形品を造形する。

これら 4 方法の樹脂成形に関する特徴を表 1 に示す。本研究で用いた SLS 及び FDM は、固体の原材料樹脂を溶解させ積層し、自然冷却で凝固させて造形する点で共通しており、液体の紫外線硬化樹脂を用いる SLA 及び MJM と比較して、樹脂成形品の強度及び耐久性が得られやすい特徴がある。一方、SLS は粉末材料をレーザー加熱、FDM は線状材料を抵抗体加熱で溶解させる点が異なっている。

表 1 ラピッドプロトタイプ造形方式と樹脂成形の特徴

方式	SLA	SLS	MJM	FDM
樹脂形態	液体	粉末	液体	線材
溶融法	—	熱 (レーザー)	—	熱 (抵抗)
硬化法	紫外線 硬化	自然冷却 (凝固)	紫外線 硬化	自然冷却 (凝固)
主な樹脂	アクリル	ナイロン	アクリル	ABS

2. 1. 2 成形装置、成形条件

SLS での成形は、本所 (京都市) に整備されている高速三次元成形機 Sinterstation 2000 (DTM 社製) 装置を用いて行った。材料はナイロン粉末 (製品名: ASPEX-PA2、アスペクト社製、平均粒子径 45 μm 、融点 184 $^{\circ}\text{C}$) を用いた。成形条件は、レーザー出力 5 W、成形部周囲温度 170 $^{\circ}\text{C}$ 、材料供給部温度 70 $^{\circ}\text{C}$ 、積層ピッチ 0.1 mm とした。レーザーの走査は X スキャン方式であり、X 方向に 1 ライン走査した後、Y 方向に 0.152 mm

移動して再び X 方向の走査する動作を繰り返して成形する。

FDM での成形は、中丹技術支援室 (綾部市) に整備されている 3D プリンター Dimension Elite (Stratasys 社) 装置を用いて行った。材料は ABS (アクリロニトリルブタジエンスチレン) 樹脂 (製品名: ABS plus) を用いた。本材料は、明確な融点は示さず広い温度範囲にて徐々に軟化・溶融する特性を持ち、射出ヘッド温度 280 $^{\circ}\text{C}$ で溶融させて積層造形した。周辺温度 70 $^{\circ}\text{C}$ 、積層ピッチ 0.178 mm とした。射出ヘッドの走査方向は X 及び Y 方向から 45 $^{\circ}$ 傾いた方向 (XY 方向) である。

2. 2 強度試験

2. 2. 1 強度試験片

強度試験片は、JIS K 7162 試験片 1A 形とし、成形条件・方向を変えて、SLS 及び FDM により作製した。厚さは標準である 4.0 mm とし、全長は 180 mm とした。

SLS では、試験片の全長方向を成形ステージの X (左右)、Y (奥行)、Z (積層) の 3 方向に設定した試料をそれぞれ作製した。X, Y 方向では全長 180 mm、幅 20 mm の試験片が積層方向に 4.0 mm 成形されるのに対し、Z 方向では 4.0 mm、幅 20 mm の試験片が積層方向に 180 mm 成形されることとなる。

FDM では、X (左右) 方向から 45 $^{\circ}$ 傾いた XY 方向に射出ヘッドが走査するため、試験片の全長方向を成形ステージの X (左右)、XY (X 方向に対し 45 $^{\circ}$ 傾いた方向であり、射出ヘッドの走査方向と平行)、Z (積層) の 3 方向に設定した試料をそれぞれ作製した。

2. 2. 2 強度試験方法

強度試験は、万能材料試験機 1122 型 (インス

トロンジャパン社、5 kN) を用い、引張試験を行った。試験速度は 10 mm/min. とした。強度はピーク強度を用い、伸びは掴み間距離に対する全伸び (%) により評価した。

3 結果及び考察

3. 1 強度評価結果

3. 1. 1 SLS 成形品強度

SLS による成形品の強度試験結果を図 1 に示す。X、Y 方向では約 48 MPa の強度が得られたが、Z 方向は約 26 MPa と、X、Y 方向に対し 53 %であった。伸びは、X、Y 方向に対し 15 %であった。

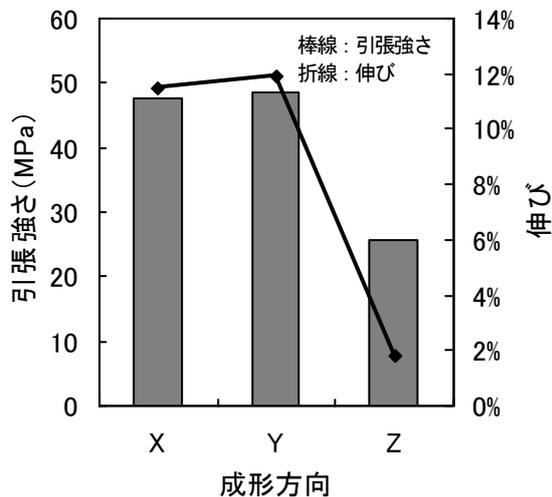


図 1 SLS 成形品 強度試験結果

3. 1. 2 FDM 成形品強度

FDM による成形品の強度試験結果を図 2 に示す。X、XY 方向では約 38 MPa の強度に対し、Z 方向は約 11 MPa と、X、XY 方向に対し 29 %の強度であった。伸びは、全ての方向で SLS に比べて低かった。これは SLS が伸びの大きいナイロン材であるのに対し、FDM では ABS 材であり、材料自体の持つ物理特性として伸びが小さいことが理由と考えられる。Z 方向の伸びは、FDM の場合でも、X、XY 方向に対し 50 %と、積層方向である Z 方向の方が面内方向 (X、XY) よりも小さい値となった。

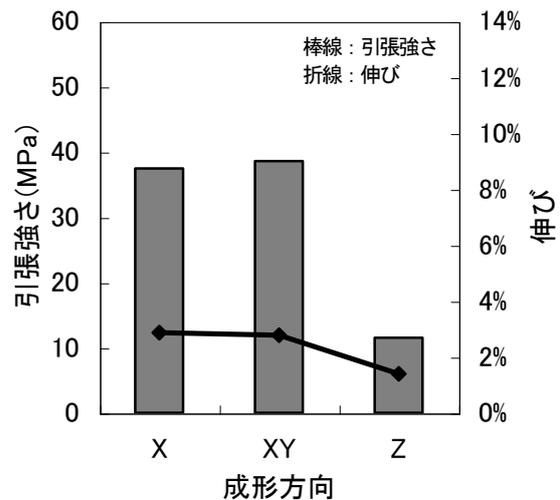


図 2 FDM 成形品 強度試験結果

3. 1. 3 成形品評価

SLS、FDM とともに、成形面である X、Y 及び XY 方向と積層方向である Z 方向で強度、伸びが異なる結果が得られた。そこで、各方向を長軸方向とした成形品について、顕微鏡観察、表面粗さ測定及び X 線回折測定を行い、成形方向の違いによる成形品への影響を調査した。

SLS による成形品の X、Y、Z 各方向の拡大写真を図 3 に示す。ナイロン粉末 (平均粒子径 45 μ m) が結合して存在していることが観察できるが、Y 方向への走査 (0.152 mm) 及び積層ピッチ (0.1 mm) に対応した形状は観察できず、また X、Y、Z 各方向間での違いは見られなかった。



図 3 SLS 成形品 光学写真

SLS による成形品の表面粗さ測定結果を表 2 に示す。X、Y、Z 各方向ともに、Rz が 90 μ m 前後と、ナイロン粉末 2 粒子分の直径に近い値が得ら

れており、成形方向の違いによる影響は見られなかった。

表2 SLS 成形品 表面粗さ測定結果

成形方向	X	Y	Z
Ra (μm)	13.8	14.5	14.8
Rz (μm)	91	86	93

SLS による成形品及び成形前のナイロン粉末の X 線回折測定結果を図 4 に示す。成形前のナイロン粉末(a)では、 $2\theta=21.1^\circ$ ($d=4.2 \text{ \AA}$) と $2\theta=22.2^\circ$ ($d=4.0 \text{ \AA}$) をピークとする回折線が、ほぼ同じ強度で重なって観察された。一方、X 方向(b)及び Y 方向(c)の成形品では、 $2\theta=21.1^\circ$ の回折ピークのみが観察された。Z 方向(c)の成形品では、 $2\theta=21.1^\circ$ の回折ピークの高角度側が膨らむ形で、 $2\theta=22.2^\circ$ の低い回折ピークが重なって観察された。

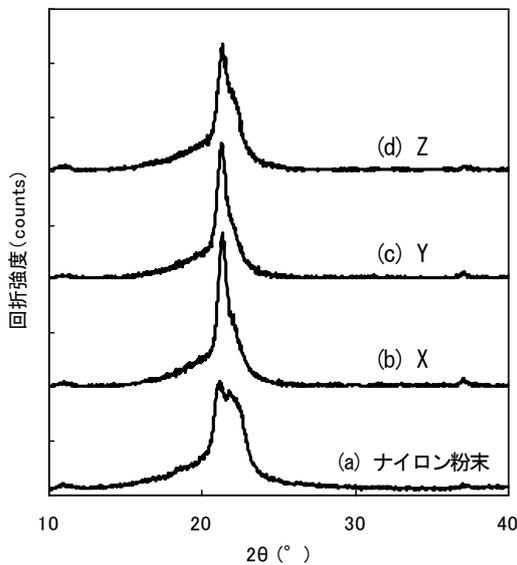


図4 SLS 成形品 X線回折測定結果

次に、FDM による成形品の X、XY、Z 各方向の拡大写真を図 5 に示す。X、XY 方向では、各成形方向に応じた方向に線状材料が積層されている様子が観察された。Z 方向では、積層ピッチ

(0.178 mm) 周期で積層された ABS 樹脂が観察できた。

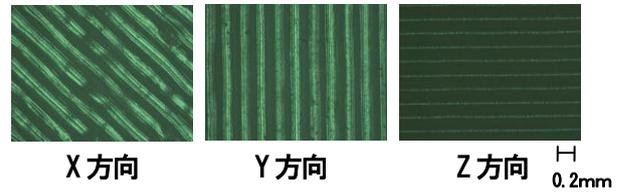


図5 FDM 成形品 光学写真

FDM による成形品の表面粗さ測定結果を表 3 に示す。X、XY、Z 各方向ともに、Rz (最大高さ) は $65 \mu\text{m}$ 前後であり、いずれも成形時の ABS 樹脂材料の径に対応した値が得られている。一方、Ra (算術平均粗さ) は X、XY 方向では近い値となったが、Z 方向は X、XY 方向よりも高い値となった。これは図 5 で観察されたように、Z 方向は積層ピッチ (0.178 mm) の周期的な形状を有しており、X、XY 方向とは異なる表面形状を有していることが影響していると考えられる。

表3 FDM 成形品 表面粗さ測定結果

成形方向	X	XY	Z
Ra (μm)	10.3	10.9	15.0
Rz (μm)	61.0	64.0	67.7

FDM による成形品及び成形前の ABS 材料の X 線回折測定結果を図 6 に示す。成形前の ABS 材料と成形品いずれも明確なピークは得られておらず、結晶性が低いことがわかる。成形方向による回折ピークの違いは見られなかった。

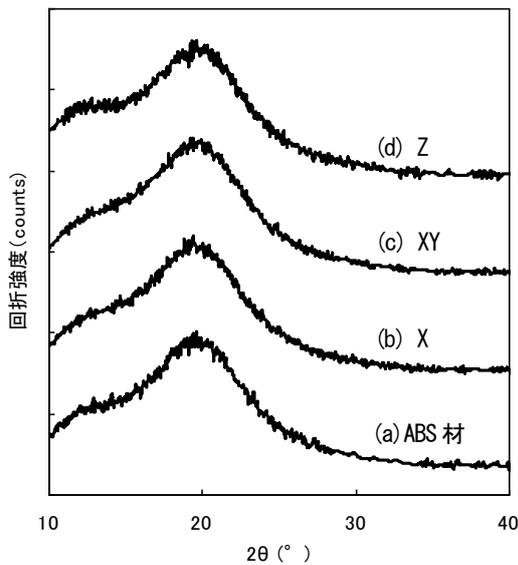


図6 FDM成形品 X線回折測定結果

3. 1. 4 SLS 成形条件の検討

SLS、FDM ともに、平面内である X、Y 及び XY 方向に対する Z 方向の強度、伸びは共に低い結果となった。これは、同一平面内で連続的に造形される X、Y 及び XY 方向では材料が十分に加熱され溶解するため比較的強固に結合しているが、Z 方向は 1 層ずつ積層していくため層間の結合力は弱く、層間で剥離が生じやすいものと考えられる。

SLS では、レーザーで局所的に熱を与えるが、最上層の粉末材料を熱溶解する際に下の層にも幾分か熱が伝わる。そのため、FDM など他の造形法と比べると層間の結合力が強く、Z 方向の強度は X、Y 方向と遜色ない値が期待できると考えていた。しかしながら今回、SLS による成形品でも、Z 方向の強度、伸びは共に、X、Y 方向と比べて低い結果となった。また、X 線回折測定で $2\theta = 22.2^\circ$ の回折ピークを見ると、Z 方向の回折ピークは、ナイロン粉末と X、Y 方向の中間のピーク形状を示した。これは、X、Y 方向に対して Z 方向の熱溶解が不十分であることを示唆していると考えられる。そこで、SLS の成形条件変更により、

Z 方向の熱溶解を促進することを試みることにした。

SLS の成形条件変更により Z 方向の溶解を促進する方法としては、雰囲気温度を上げること、積層時の粉量を減らすこと及びレーザー出力を上げることが考えられる。ここで雰囲気温度を上げると樹脂成形品周辺の粉体が溶解・固化し成形不具合が生じた。積層時の粉量は既に最小限に調整済みであり、更に粉量を減らすと粉量不足による成形不具合が生じた。よって、レーザー出力を上げることにより、Z 方向強度の向上を試みることにした。ただし、レーザー出力を上げると発熱量も増えるため無制限に上げることはできず、レーザーの定格出力内でかつ装置の冷却能力範囲内であればならない。そこで、レーザー出力を従来の 5 W から 1 W ずつ上げて X、Y 平面の最大成形サイズである直径 200 mm の円を成形したところ、10 W 以上では装置のレーザー冷却能力が追いつかず、強制的にレーザー出力が停止されることを確認した。よって、レーザー出力は 9 W に上げることとし、強度試験片を作製して Z 方向強度評価を行った。その結果を図 7 に示す。

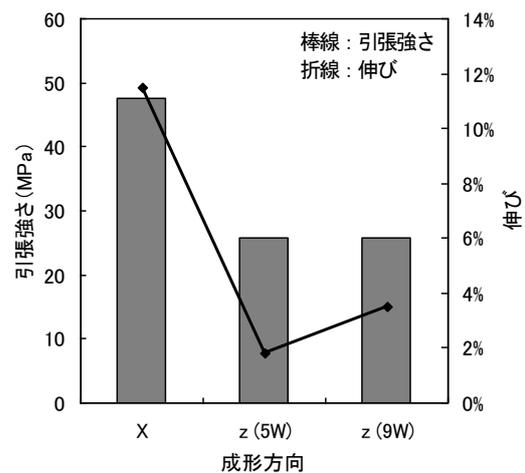


図7 SLS 成形品 強度試験結果 (レーザー出力変更)

参照として、レーザー出力5 WでのX方向成形品の強度試験結果も合わせて示している。レーザー出力が5 Wと9 Wの時で、Z方向強度に違いは見られなかったが、Z方向伸びはほぼ倍増し、X、Y方向に対し30%まで改善した。

次に、レーザー出力を9 Wに上げた成形品のX線回折測定結果を図8に示す。図中の(c)がレーザー出力を9 WとしたZ方向成形品の回折チャートであり、比較のため(a)ナイロン粉末、(b)レーザー出力5 WでのZ方向成形品、(d)レーザー出力5 WでのX方向成形品の回折チャートをそれぞれ示している。

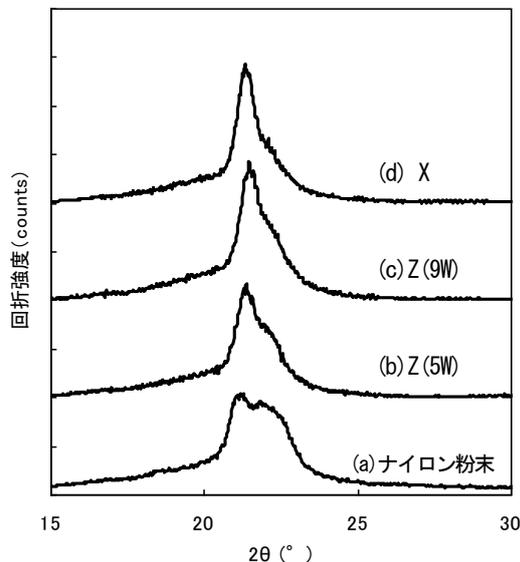


図8 SLS 成形品 X線回折測定結果 (レーザー出力変更)

(a) ナイロン粉末で観察された $2\theta=22.2^\circ$ のピークが(b)Z(5W)、(c)Z(9W)、(d)Xの順で低くなっていることがわかる。そこで、図9の $2\theta=21.1^\circ$ に対する $2\theta=22.2^\circ$ の回折強度の比を算出した結果を図9に示す。(a)ナイロンA粉末の回折強度比は0.92に対し、(d)Xの回折強度比は0.41と減少していた。なお、回折チャートから、(d)Xの回折強度比は $2\theta=21.1^\circ$ の回折ピークの影響がほとんどと考えられる。一方、(b)Z(5W)の

回折強度比は0.62に留まり、またレーザー出力を高めた(c)Z(9W)では0.55と幾分か低下したものの、(d)Xの回折強度比には及ばなかった。

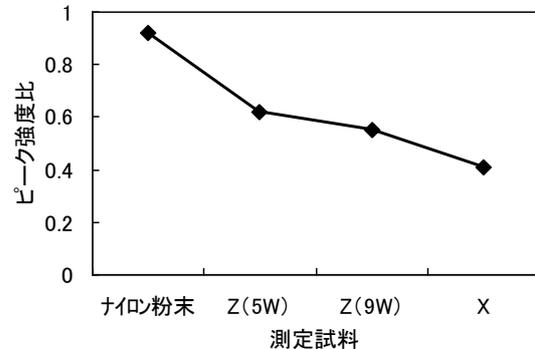


図9 SLS 成形品 X線回折測定結果 $2\theta=21.1^\circ / 22.2^\circ$ ピーク強度比

3. 1. 4 考察

本研究に用いたSLS装置は1997年に設置された装置であり、設置より16年が経過しており、この間にSLS成形技術が向上している。そこで、最新のSLS装置 (RaFaE1 550C、アスペクト社製) を用いて、同じ形状の強度試験片を作製し強度評価を行った。その結果を図10に示す。

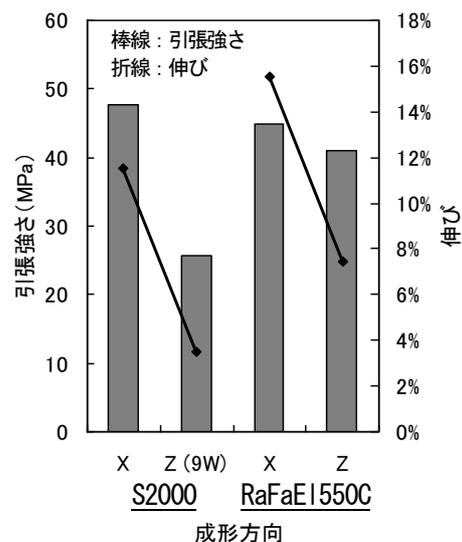


図10 SLS 成形品 強度試験結果

比較のため、本研究で用いた SLS 装置 (Sinterstation2000、S2000 と略す) の X 及び Z 方向 (レーザー出力 9 W) の強度試験結果も掲載している。最新 SLS 装置 (RaFaE1 550C) による成形品の Z 方向強度は、X 方向に対し 91 %と、本研究で用いた SLS 装置での成形品と比べて高い強度が得られた。また伸びは X 方向に対し Z 方向は 48 %と、Z 方向伸びについても、本研究で用いた SLS 装置での成形品と比べると高い値を示した。

この最新 SLS 装置による X、Z 方向成形品の X 線回折測定結果を図 11 に示す。いずれも $2\theta = 21.1^\circ$ のピークのみが観察され、 $2\theta = 22.2^\circ$ のピークは見られなかった。

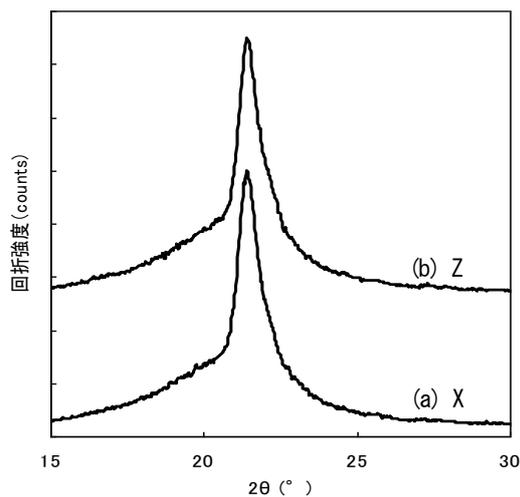


図 11 最新 SLS 装置による成形品 X 線回折測定結果

本研究で用いた SLS 装置と最新 SLS 装置により、Z 方向強度に大きな違いが見られた。また X 線回折測定結果では、本研究で用いた SLS 装置では、Z 方向成形品には $2\theta = 22.2^\circ$ のピークが観察されたが、最新 SLS 装置では Z 方向成形品でも $2\theta = 22.2^\circ$ のピークは見られなかった。本研究で用いた SLS 装置と最新 SLS 装置での成形においては、積層ピッチ等の成形条件は同一としており、Z 方向強度に最も影響すると考えられるのは、ナイロ

ン粉末材料を溶解する熱源として働くレーザーである。最新 SLS 装置では、レーザー出力 24 W で成形しており、本研究の SLS 装置でのレーザー出力と比べて高くなっている。この点が Z 方向粉末の熱溶解を促進し、強度及び X 線回折測定結果に影響したものと考えられる。

一方、FDM 装置では今回、成形品の強度及び伸びを改善することはできなかった。これには、2 つの理由があると考えられる。1 つ目は、本研究に用いた FDM 装置の構成上、成形条件の変更できる余地が少ない点である。本研究では 3D プリンターと呼ばれる FDM 装置を用いており、3 次元 CAD データを元に簡易な操作で樹脂成形品を造形できる利点がある一方で、ユーザーが変更できるパラメータはごく限られており、成形条件を変更できる余地が少なかった。2 つ目は、FDM の成形方式である。FDM では、溶解して流動性を高めた線材料をノズルから押し出し、一筆書きの要領で造形する。そのため、Z (積層) 方向には、一度冷えて固まった樹脂の上に新たな樹脂を積層することとなり、層間の接合力は小さく、層間での剥離が比較的生じやすいものと考えられる。

なお、FDM では成形条件の変更により Z 方向の層間接合を高めることは困難と考え、作成した樹脂成形品を加熱して層間の接合力を高めることを検討した。しかし今回、FDM で用いた ABS 材料は明確な融点は示さず広い温度範囲にて徐々に軟化・溶解する特性を持つため、 100°C を超えて加熱すると変形し、適切な強度評価を行うことはできなかった。FDM における Z 方向強度の向上については、材料や造形方式の改良など、今後の課題があるものと考えられる。

4 まとめ

今回、当センター所有の SLS 及び FDM 装置を用い、ラピッドプロトタイピング樹脂成形品を作製

して、成形方向毎に強度試験を行った。その結果、積層平面内の X、Y (FDM の場合は X、XY) 方向と積層方向である Z 方向に強度・伸びの違いが見られた。SLS による成形品の Z 方向の強度は、X、Y 方向に対し 53 %、伸びは 15 %であった。材料のナイロン粉末及び各方向の成形品について X 線回折測定を行ったところ、ナイロン粉末では $2\theta = 21.1^\circ$ 及び 22.2° の 2 つのピークが見られたが、X、Y 方向では $2\theta = 21.1^\circ$ のみが観察され、 $2\theta = 22.2^\circ$ のピークは見られなかった。Z 方向については、 $2\theta = 21.1^\circ$ のピークに重なって、低い $2\theta = 22.2^\circ$ のピークが観察された。

SLS による成形時のレーザー出力を 5 W から 9 W に上げることにより、Z 方向の伸びが倍増し、X、Y 方向に対し 30 %まで改善した。また、Z 方向の X 線回折測定では、5 W での成形品と比較し、 $2\theta = 22.2^\circ$ のピークが更に低くなっていた。

最新 SLS 装置では、レーザー出力を更に上げることが可能であり、24 W で成形を行った。この最新 SLS 装置による成形品の Z 方向の強度は、X 方向に対し 91 %と、高い強度を示した。また、X 線回折測定による Z 方向の回折チャートでは $2\theta = 21.1^\circ$ のピークのみが観察され、 $2\theta = 22.2^\circ$ のピークは見られなかった。

FDM では、成形品の Z 方向は、積層平面内の X、XY 方向に対し、強度が 29 %、伸びは 50 %という結果であった。本研究では 3D プリンターと呼ばれる装置を用いており、操作容易に樹脂成形品が得られる一方、ユーザーが変更できる成形条件が限られており、今回は Z 方向強度を改善することはできなかった。

謝 辞

最新 SLS 装置 (RaFaE1 550C) での強度試験片作製に協力いただきました、株式会社アスペクトに感謝いたします。

(参考文献)

- 1) 特許流通チャート ラピッドプロトタイプング, 独立行政法人工業所有権情報・研修館(2002)
- 2) 丸谷洋二: 精密工学会誌, vol.70, 2, p159(2004)
- 3) 長坂保美: 機械設計, vol.53, 14, p10(2009)
- 4) 日経ものづくり 2013年3月号, p43