

経常研究

樹脂 3D プリント造形物の機械的性質と造形限度に関する調査

高岩 徳寿* 石川 信幸*

Investigation on Mechanical Properties and Modeling Limits of Resin 3Dprinter Models

TAKAIWA Norihisa and ISHIKAWA Nobuyuki

本研究では、栃木県産業技術センターに導入した熱溶解積層と光造形の2種類の樹脂 3D プリントについて、造形物の機械的性質や造形限度、品位について調査した。その結果、熱溶解積層の材料4種、光造形の材料4種について、機械的性質は熱溶解積層では積層方向による異方性が大きく影響し、光造形については異方性が比較的小さいことがわかった。また樹脂 3D プリントが一般的に苦手とする形状を造形し、それぞれの形状での造形限度、品位について知見を得ることができた。

Key words: 3D プリント, 積層造形, 機械的性質, 造形限度, 品位

1 はじめに

近年、樹脂 3D プリントは、幅広い産業分野において試作開発サイクルの短縮やコスト削減のために盛んに活用されている。樹脂 3D プリント造形物は、積層方向によって機械的性質に異方性があることが知られている¹⁾²⁾。また、複雑形状の造形を得意としているが、形状によってはそのままでは造形できず、サポートの付与や設計変更が必要となる³⁾。樹脂 3D プリントを効果的に活用するためには、造形物の機械的性質や造形限度、品位を的確に把握することが必要となる。そこで本研究は、栃木県産業技術センターに導入した樹脂 3D プリント (図1) について、造形物の機械的性質や造形限度等を調査し、それぞれの装置で使用可能な樹脂毎の特性を評価した。

表1に使用する材料を示す。熱溶解積層の材料は、PLAはPolymaker社のPolyLitePLA、ABSはPolymaker社のPolyLite ABS、PCはPolymaker社のPolyLite PC、PEEKはINTAMSYS社のPEEKを使用した。光造形の材料は、全てFormlabs社の材料を使用した。造形条件はそれぞれの材料に対応した、3Dプリンターメーカーの標準条件を使用した。

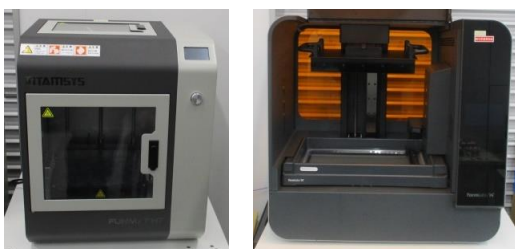
表1 造形方式毎の調査対象材料

熱溶解積層	PLA, ABS, PC, PEEK
光造形	Clear, Tough2000, Rigid10k, Flexible80A

2 研究の方法

2.1 機械的性質等の調査

図1に研究に用いた熱溶解積層 (INTAMSYS FUNMAT HT Enhanced) と光造形 (Formlabs Form 3L) の樹脂 3D プリントを示す。



(a) 熱溶解積層 (b) 光造形

図1 樹脂 3D プリント

表2に実施項目及び準拠したJIS番号と試験片形状、試験回数を示す。Flexible80Aは軟質材料であるので、曲げ試験及びシャルピー衝撃試験は実施しなかった。引張試験と曲げ試験は、万能材料試験機 (島津製作所 AG-50kN-XV) を用いて実施した。引張試験の試験速度は20mm/min、曲げ試験の試験速度は2mm/minとした。シャルピー衝撃試験は、ノッチ加工機 (安田精機製作所 No.189-PNCA) でノッチ先端半径が0.25mm、ノッチ後残り幅が8mmとなるように加工し、ハンマー容量は2.0Jとして衝撃試験機 (東洋精機製作所 IT) を用いて実施した。硬さ試験は、Flexible80A以外はロックウェル硬さ試験機 (フューチャアテック LC-200R) を用いてRスケールで、Flexible80Aはデュロメータ硬さ計 (テクロック GS-719G) を用いて実施した。粗さ試験は、表面粗さ測定機 (テーラーホブソン PGI840) を用

*栃木県産業技術センター 機械電子技術部

いて、引張試験片の平行部を評価した。寸法測定は、マイクロメータ (Mitutoyo MDE-25MX) を用いて、引張試験片の平行部を 1 材料につき 5 本、1 本につき 5 回ずつ実施した。

表 2 実施項目及び試験方法

項目	JIS	試験片	回数
引張試験	K7161-1	1A形	5
	K6251 (Flexible80A)	3号形	
曲げ試験	K7171	短冊形	5
シャルピー 衝撃試験	K7111	短冊形	10
硬さ試験	K7202-2	50×50 ×10mm	10
	K6253-3 (Flexible80A)		
粗さ測定	B0601	引張試験片	3
寸法測定		引張試験片	5

各試験片の造形方向について図 2 に示す。また熱溶解積層の斜め方向の造形物の写真を図 3 に示す。図 2 のとおり、水平方向、斜め方向、垂直方向の 3 方向で造形し、それぞれの方向で各試験結果の異方性を評価した。また、斜め方向については各装置のスライスソフトにおいて自動でサポートを生成し、造形後にニッパー等で除去した状態で試験を実施した。図 3 に示すとおり、熱溶解積層では造形物の反りによる剥がれを抑制するためにラフトを作製し、造形後にニッパー等で除去した。

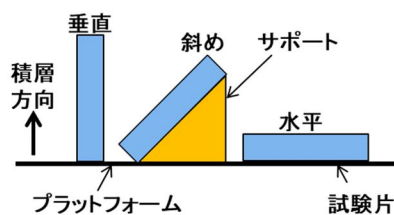


図 2 造形姿勢の模式図

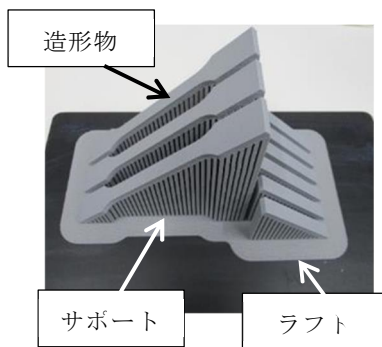


図 3 熱溶解積層における斜め方向の造形物

2. 2 造形限度、品位の調査

それぞれの造形方式における造形限度や造形物の品位を確認するために、表 3 に示す形状を造形した。熱溶解積層の材料は、Polymaker 社の PolyLiteABS を使用した。光造形の材料は、Formlabs 社の Tough2000 を使用した。穴については垂直方向と水平方向で調査した。熱溶解積層では使用する材料の消費を抑える目的で、造形物の内部の充填率をスライスソフトで設定できるのが一般的である。設定した充填率で造形した後、造形物の 3D 形状を X 線 CT 三次元測定機 (ニコン MCT225) で取得し、内部の体積から設定値に対する実際の充填率を調査した。

表 3 造形限度、品位の調査項目

項目	内容
傾斜	水平から 15, 30, 45, 75, 90°
球	直径 0.5, 1, 3, 5, 10mm
ピン	直径 0.1~1(0.1 毎), 3, 5, 10mm
穴	直径 0.1~1(0.1 毎), 3, 5, 10mm
ブリッジ	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50mm
充填率	20, 40, 60, 80, 100% (熱溶解積層のみ)

3 結果及び考察

3. 1 機械的性質等の調査

表 4 に各材料の引張強さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、斜め、垂直の順に引張強さが小さくなる傾向があり、造形方向による影響を受けることが分かった。熱溶解積層は材料によって異方性の強さが異なるが、これは材料毎の層と層の密着性の違いが現れており、層間の密着性が高い材料は異方性が小さく、密着性が低い物は異方性が強く表れていると考えられる。一方、光造形の造形物は造形方向による引張強さの低下はあまり見られなかった。光造形の一部の材料で引張強さが低下しているものがあるが、薄板形状では洗浄、二次硬化によって試験片が反ってしまう場合があり、造形方向の影響よりも形状変化の影響で強度が低下していると思われる。

表4 引張強さの平均値

材料	方向	引張強さ (MPa)	材料	方向	引張強さ (MPa)
PLA	水平	37.59	Clear	水平	61.48
	斜め	34.00		斜め	62.67
	垂直	32.06		垂直	65.58
ABS	水平	27.75	Tough 2000	水平	42.81
	斜め	20.56		斜め	42.07
	垂直	17.86		垂直	44.15
PC	水平	64.62	Rigid 10K	水平	48.71
	斜め	39.24		斜め	62.49
	垂直	25.04		垂直	66.63
PEEK	水平	79.49	Flexible 80A	水平	4.587
	斜め	12.05		斜め	4.392
	垂直	7.163		垂直	4.350

表5に各材料の曲げ強さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、垂直、斜めの順に曲げ強さが小さくなる傾向があり、造形方向の影響を受けることが分かった。曲げによる変形でせん断方向の応力が強くなり、斜め方向の曲げ強さが低下していることが推測される。材料間の異方性の強度の違いは、引張強さと同様の理由と考えられる。光造形の造形物は造形方向による曲げ強さの差はあまり見られない。

表5 曲げ強さの平均値

材料	方向	曲げ強さ (MPa)	材料	方向	曲げ強さ (MPa)
PLA	水平	53.09	Clear	水平	78.24
	斜め	49.39		斜め	74.85
	垂直	54.74		垂直	79.45
ABS	水平	48.96	Tough 2000	水平	45.22
	斜め	34.38		斜め	44.39
	垂直	41.93		垂直	55.33
PC	水平	94.43	Rigid 10K	水平	106.79
	斜め	55.78		斜め	98.24
	垂直	64.38		垂直	105.34
PEEK	水平	133.67			
	斜め	36.13			
	垂直	30.94			

表6に各材料のシャルピー衝撃値の平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、斜め、垂直の順に衝撃値が小さくなっている。光造形の造形物は引張強さや曲げ強さの傾向とは異なり、水平方向が最も強くなり、斜め、垂直方向は同程度に小さくなっていることが分かった。衝撃試験では、引張試験や曲げ試験のように荷重のかかり方が緩やかではなく、ハンマーによって

瞬間的に力が加えられ積層面が剥がれるように破壊されるため、光造形においても造形方向の影響が表れていると推測される。

表6 シャルピー衝撃値の平均値

材料	方向	衝撃値 (kJ/m ²)	材料	方向	衝撃値 (kJ/m ²)
PLA	水平	3.725	Clear	水平	2.388
	斜め	2.782		斜め	1.577
	垂直	1.157		垂直	1.530
ABS	水平	11.234	Tough 2000	水平	3.306
	斜め	5.425		斜め	2.456
	垂直	2.322		垂直	2.757
PC	水平	2.629	Rigid 10K	水平	1.639
	斜め	1.274		斜め	0.949
	垂直	1.152		垂直	0.968
PEEK	水平	10.524			
	斜め	2.967			
	垂直	1.211			

表7に各材料の硬さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は、垂直方向が一番小さくなるものが多いが材料によって傾向が異なっている。光造形の造形物は造形方向による硬さの大きな変化は見られなかった。

表7 硬さの平均値

材料	方向	硬さ HRR	材料	方向	硬さ HRR
PLA	水平	73.46	Clear	水平	117.57
	斜め	84.87		斜め	114.93
	垂直	66.41		垂直	118.77
ABS	水平	66.63	Tough 2000	水平	100.81
	斜め	46.19		斜め	98.29
	垂直	40.30		垂直	101.66
PC	水平	109.98	Rigid 10K	水平	118.92
	斜め	90.88		斜め	103.33
	垂直	80.34		垂直	118.69
PEEK	水平	109.01			
	斜め	94.86			
	垂直	102.72			

材料	方向	デュロメータ硬さ
Flexible 80A	水平	84.65
	斜め	80.75
	垂直	82.20

表8に各材料の表面粗さの平均値を示す。水平方向と斜め方向はアップスキン（斜め方向の造形時にサポートが付く面と反対の面）を表、ダウンスキン（斜め方向の造形時にサポートが付く面）を裏と定義して評価した。また表8の※はサポートを付与し造形されて

いる面で、造形後にサポートを除去して表面粗さを評価した。熱溶解積層では、水平方向裏面の表面粗さが一番悪く、次に斜め方向の粗さが悪い傾向があった。PEEK では斜め方向裏面の表面粗さが悪く、水平方向裏面の表面粗さがあまり悪くないが、これはサポートが造形物との密着性が良く剥がしにくいのにに対して、ラフトと造形物は密着性が低く、ラフトから造形物を剥がしやすいことが影響していると考えられる。PLA, ABS, PC においてはラフトとサポートのどちらも造形物との密着性が良く、造形物から剥がしにくく水平方向裏面ではラフトは造形物全体についてしまう影響で裏面全体の粗さが悪化し、斜め方向裏面ではサポートが付く箇所と付かない箇所があるため、水平方向裏面よりは粗さが良くなっていると考えられる。また斜め方向表面では、緩斜面となっている影響で垂直方向よりも積層段差が目立ちやすく、粗さも悪くなるのが分かった。光造形では、緩斜面の影響で斜め方向の粗さが若干悪くなる傾向があるが、全体的には良好な表面粗さとなっている。

表 8 表面粗さの平均値

材料	方向	Ra(μm)	Rz(μm)	材料	方向	Ra(μm)	Rz(μm)
PLA	水平-表	7.05	43.58	Clear	水平-表	0.82	4.88
	水平-裏	42.21	254.43		水平-裏	2.96	16.18
	斜め-表	25.84	149.97		斜め-表	6.01	27.51
	斜め-裏※	25.72	170.58		斜め-裏※	2.67	17.91
	垂直	16.39	95.16		垂直	1.18	6.04
ABS	水平-表	24.57	171.23	Tough 2000	水平-表	0.96	5.86
	水平-裏	49.34	324.51		水平-裏	4.02	23.32
	斜め-表	25.95	130.33		斜め-表	4.25	21.54
	斜め-裏※	22.76	145.11		斜め-裏※	2.02	11.55
	垂直	16.97	107.38		垂直	2.14	11.62
PC	水平-表	11.46	55.70	Rigid 10k	水平-表	0.56	4.78
	水平-裏	38.15	241.87		水平-裏	3.61	19.53
	斜め-表	21.93	143.74		斜め-表	8.14	45.72
	斜め-裏※	24.38	169.27		斜め-裏※	3.23	21.94
	垂直	15.81	91.49		垂直	2.49	19.73
PEEK	水平-表	3.97	27.13	Flexible 80A	水平-表	0.86	7.39
	水平-裏	6.31	42.80		水平-裏	3.14	17.66
	斜め-表	25.10	126.31		斜め-表	2.54	19.78
	斜め-裏※	29.06	177.12		斜め-裏※	1.84	12.16
	垂直	12.34	65.12		垂直※	2.18	13.63

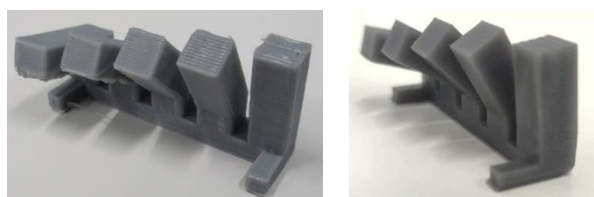
表 9 に各材料の引張試験片の平行部の幅 (Flexible80A は 5mm 狙い。その他は 10mm 狙い) の寸法測定の平均値を示す。溶解積層の造形物は、狙いの寸法より大きめにできる傾向のものが多く、誤差は 0.2mm 程度であった。光造形の造形物はおおむね狙い通りの寸法であり、誤差は 0.1mm 以下であった。

表 9 寸法測定 of 平均値

材料	方向	寸法	材料	方向	寸法
PLA	水平	10.11	Clear	水平	10.04
	斜め	10.20		斜め	10.06
	垂直	10.18		垂直	10.04
ABS	水平	10.05	Tough 2000	水平	9.89
	斜め	10.18		斜め	9.93
	垂直	10.20		垂直	9.95
PC	水平	10.15	Rigid 10K	水平	10.01
	斜め	10.25		斜め	10.05
	垂直	10.27		垂直	10.09
PEEK	水平	10.04	Flexible 80A	水平	4.82
	斜め	10.11		斜め	5.01
	垂直	10.08		垂直	5.03

3. 2 造形限度、品位の調査

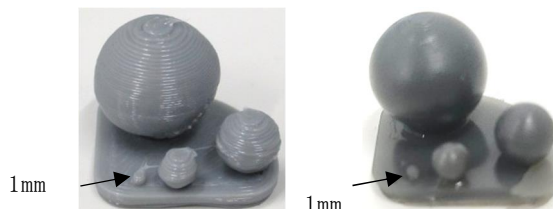
図 4 に傾斜の造形物を示す。すべて造形可能であったが、熱溶解積層ではダウンスキンの品位が大きく低下することが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図 4 傾斜の造形物

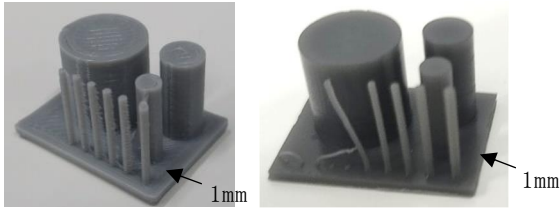
図 5 に球の造形物を示す。熱溶解積層は 1mm 以上で造形可能、光造形はすべて造形可能であった。どちらもダウンスキンの品位や形状は良くないことが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図 5 球の造形物

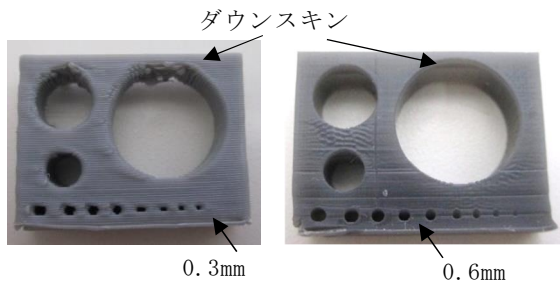
図 6 にピンの造形物を示す。熱溶解積層は 0.5mm、光造形は 0.6mm 以上で造形可能であった。どちらも 1mm 以下では傾きや倒れが発生することが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図6 ピンの造形物

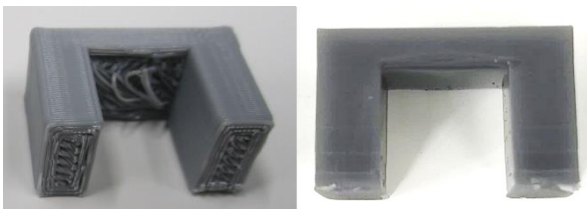
図7に穴の造形物を示す。熱溶解積層の垂直方向は0.3mm以上、水平方向は3mm以上で、光造形の垂直方向は0.6mm以上、水平方向は0.8mm以上で貫通穴が造形可能であった。どちらも垂直方向ではダウンスキンで品位が低下していることが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図7 穴の造形物 (垂直方向)

図8にブリッジの造形物を示す。熱溶解積層は40mmまで、光造形は30mmまで造形可能であることが分かった。どちらも10mm以上からダウンスキンの品位が低下することが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図8 ブリッジ (10mm) の造形物

表10に各充填率での設定値と、造形物のCTデータから実測した充填率を示す。図9に充填率20%の造形物のCT画像を示す。60%までは設定値より実測値の方が小さいが、80%では設定値より実測値の方が大きくなる傾向があった。

表10 各充填率の設定値と実測値

設定値 (%)	実測値 (%)
20	17.80
40	31.58
60	56.56
80	93.47
100	99.87

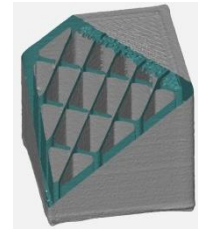


図9 充填率20%の造形物のCT画像

4 おわりに

樹脂3Dプリンタ造形物の機械的性質や造形限度等を調査し、各樹脂材料の特性を把握し、次の結論が得られた。

- (1) 熱溶解積層の造形物は、引張強さ、曲げ強さ、シャルピー衝撃値、表面粗さ等で異方性があることが分かった。
- (2) 光造形の造形物では、異方性はあまりないことが分かった。ただし、試験片のような薄板形状では反りが発生する場合があります、強度に悪影響を及ぼす可能性があることが分かった。
- (3) それぞれの造形方式での、造形限度や品位を把握することができた。造形可能であっても、ダウンスキンの粗さや形状が大きく悪化する場合があります。

参考文献

- 1) 太田崇文, 岡田耕治, 齊藤梓, 吉田一也, 村澤剛, 川上勝, 古川英光: "日本機械学会論文集", vol.83 No.850, 1-11, (2017)
- 2) 佐藤一志, 角田圭佑, 石川信幸: "仙台高等専門学校名取キャンパス研究紀要", 第51号, 7-10, (2015)
- 3) 安齋正博: "日本ゴム協会誌", 第87巻 第9号, 20-25, (2014)