

## 論文

粉末焼結型造形による造形物の  
機械的性質に対する造形方向の影響木暮 尊志<sup>\*1)</sup> 横山 幸雄<sup>\*2)</sup> 山内 友貴<sup>\*2)</sup> 山中 寿行<sup>\*3)</sup>

## Influence of part-build orientation on mechanical properties of resin plates built by SLS

Takashi Kigure<sup>\*1)</sup>, Yukio Yokoyama<sup>\*2)</sup>, Yuki Yamauchi<sup>\*2)</sup>, Toshiyuki Yamanaka<sup>\*3)</sup>

The mechanical properties of a resin plates built by selective laser sintering (SLS) were investigated. SLS is one of process to build a model directly from 3D digital data and is a very promising technology. However it is known that models built using this process show different characteristic in different orientation.

In this study, Tensile strength, fracture strain and Young's modulus on the resin plates built in various orientations by SLS were measured via a tensile test. Specimens were built in the direction between 0° and 90°. 0° was defined as parallel to the lamination plane and 90° was defined as layer direction. The material used in this study was Nylon-12 which is a popular material in SLS. As a result of tensile tests, tensile strength and fracture strain was found to depend on part-build orientation (anisotropy); however Young's modulus was not depended on it.

In order to describe the difference in tensile strength, the Tsai-Hill failure criterion which is a popular theory for anisotropic material was applied for the test result. It is considered that this theory is able to estimate the tensile strength of the parts built by SLS. And this criterion showed good coincidence with the test results.

キーワード：粉末焼結型積層造形，異方性，機械的性質，造形方向

Keywords : Selective laser sintering (SLS), Anisotropy, Mechanical property, Part-built orientation

## 1. はじめに

積層造形法はAdditive Manufacturing (AM) とも3Dプリンタとも呼ばれ，現在非常に注目を集めている技術である。その最大の特徴は三次元のデジタルデータから直接的に造形ができる事にある。造形において型を必要としないため，製品開発段階における設計から試作，評価のサイクルを短くし，大幅な効率化を行う事が可能である。更には，工具による制約が非常に少ないため，今まで不可能であった複雑な形状も造形する事ができる。これは，今までは理論上でのみ可能であった形状をもつ高性能，高付加価値製品の生産が実現できる事を意味し，更なる発展が期待されている。

積層造形法にはインクジェット，光造形，粉末石膏など数種類あるが，その中で粉末焼結型積層造形法は，ワークエリアに薄く敷いた粉をレーザービームで溶かし固めて造形を行う手法である。その特徴として，熱により材料を溶かして固めるため，経時的な変化が少なく，比較的丈夫な品

物を造形できるという点がある。このような特徴を有しているため，形状確認用のモデルにとどまらず，機能確認や機構確認を目的とした性能評価用の試作品の作製にも利用されている。最近では小ロットのオーダーメイド品などで実際に製品に組み込まれ，使用されている例も存在する<sup>(1)</sup>。

実用にあたっては，作製される造形品の力学的性質を把握しておく事は非常に重要な要素となっている。

積層造形法による造形品はその工法の特性上，製品に積層による段差が生じる。この積層による段差が造形品に対しどのような方向に生じるかにより機械的性質が異なる事が知られており，造形品の評価を行う際に十分に留意する必要がある。この造形方向による機械的性質が異なる事の研究はCulfield<sup>(2)</sup>やMajewski<sup>(3)</sup>など，海外を中心に活発に研究が行われている。都産技研でも阿保らが弾性率に関して研究を行っている<sup>(4)</sup>。しかしながら，これらの研究は全て段差方向と積層方向の直交する2方向の機械的性質を求めるとのみであり，段差が斜めになる方向の特性まで着目して行われていないのが現状である。

そこで本研究では，粉末焼結型積層造形装置による造形品に関して段差方向，積層方向にとどまらず，斜め方向も含めて造形した試験片の引張試験を行い，全方向の機械的性質を明らかにする事を目的とした。また，試験結果で得

事業名 平成23年度 基盤研究

\*1) 城東支所

\*2) システムデザインセクター

\*3) 材料技術グループ

られた引張強さに対して、異方性材料の破壊基準によく用いられている Tsai-Hill 則が適用可能か検討した。

## 2. 実験方法

2.1 粉末焼結型積層造形装置 積層造形法は三次元のデジタルデータを輪切りの断面データに変換し、断面ごとに作製、積層して造形していく手法である。粉末焼結型積層造形法は、材料に粉末を用い、粉面にレーザを照射して材料を溶かす事により各断面形状を描画し作製する。この手法による造形品は比較的長時間耐久性に優れ、丈夫な品物ができるという特徴がある。造形プロセスの概略図を図1に示す。

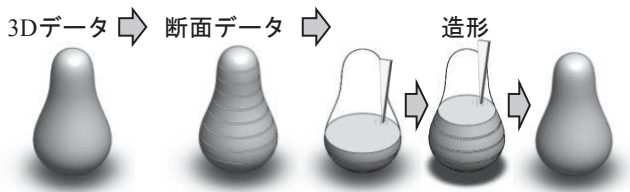


図1. 造形プロセスの概略図

本研究では RaFaEl550C<sup>®</sup> (アスペクト製) を用いて試験片の造形を行った。装置外観を図2に示す。



図2. 粉末焼結型造形装置

2.2 試験片 本研究で使用する試験片の形状は JIS K7162 に記載されているダンベル型試験片とした。図3に試験片の形状と各部寸法を記載したものを示す。材料には粉末焼結型積層造形法で最も一般的に用いられているナイロン12 (ASPEX<sup>®</sup>-PA (アスペクト製)) を用いた。

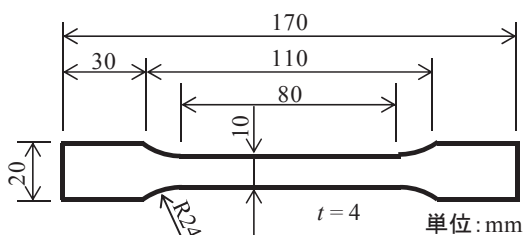


図3. 試験片形状と寸法

試験片の作製において、造形物の機械的性質に対する造形方向の影響を調べるために積層段差が試験片の長手方向に対して5つの方向になる様にデータを配置し、造形を行った。積層段差の方向と試験片の長手方向が一致する方向を0°とし、そこから、30°、45°、60°、90°傾けたものをそれぞれ造形した。その配置を図4に示す。

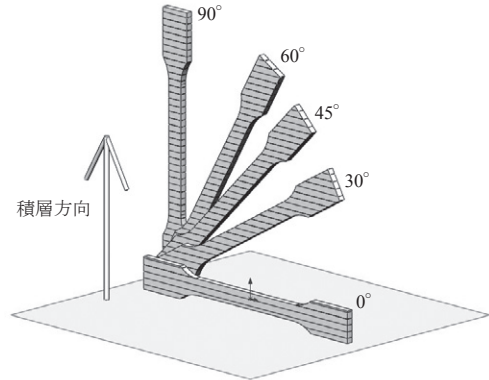


図4. 試験片の造形方向

2.3 引張試験 各機械的性質の測定は JIS K7161 及び JIS K6920-2 に準拠した方法で引張試験を実施した。試験機は図5に示すオートグラフ AG-X plus<sup>®</sup> (島津製作所製) を用いた。試験における荷重の測定は試験機に装着されたロードセルによって行い、破断伸びの測定はクロスヘッド変位を用いた。弾性率の測定におけるひずみの測定は試験片にひずみゲージ (KGF-5-120-C1-11 (共和電業製)) を張り付けて行った。試験速度は引張強さ、破断伸びの測定では 5 mm/min で行い、弾性率の測定では 1 mm/min で行った。

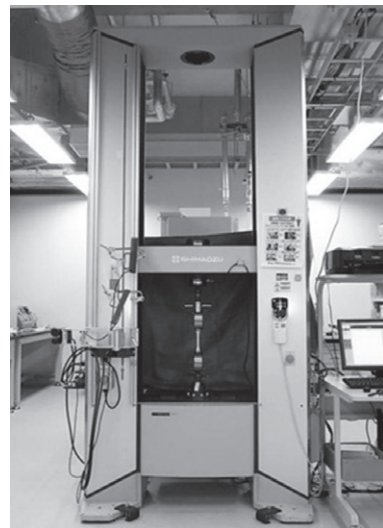


図5. 引張試験機

## 3. 実験結果及び考察

3.1 引張強さ 図6に各角度での引張強さを示す。横軸が角度、縦軸が引張強さを示している。全体の傾向として角度が大きくなるにつれ引張強さが低下している事がわ

かる。代表的な角度として、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ の結果に注目し、それぞれの結果を比較する。まず、 $0^\circ$ と $45^\circ$ の結果を比較するとおよそ6%強度が低下しており、 $0^\circ$ と $90^\circ$ の結果を比較すると約20%強度が低下している。このことから、造形物の引張強さは造形方向に依存しているといえる。

更に、その下げ幅の違いに注目すると、 $0^\circ$ から $45^\circ$ にかけてよりも $45^\circ$ から $90^\circ$ にかけての方が強度の下げ幅が大きい事がわかる。このため、造形物の強度と造形方向の関係は線形ではなく、その挙動は曲線を描く事が予想できる。そこで曲線挙動を描く原因を考えるために、それぞれの中間の角度である $30^\circ$ 、 $60^\circ$ の結果を加えて全体を見てみると、 $30^\circ$ の結果は $45^\circ$ と、 $60^\circ$ の結果は $90^\circ$ とあまり大きな差がない事が確認できる。

これは試験片の破壊に対して $30^\circ$ 、 $45^\circ$ では積層面同士が滑る方向であるせん断方向の荷重が支配的であったのに対し、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ では積層面に対して垂直な方向の力が支配的になったためであると考えられる。

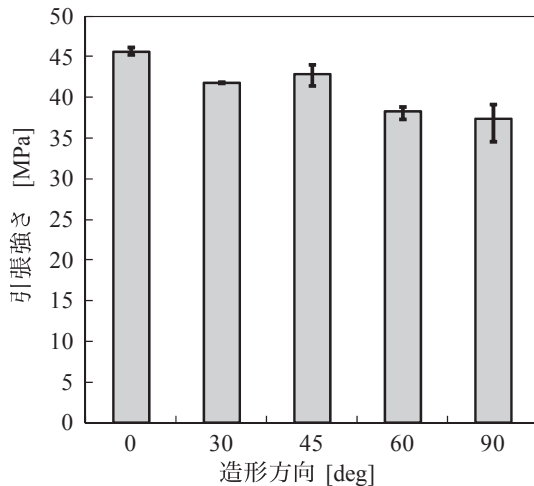


図6. 各造形方向における引張強度

**3.2 破断伸び** 次に、図7に各角度での破断伸びを示す。横軸が角度、縦軸がひずみ量を示している。引張強さと同様、角度が大きくなるにつれて、破断伸びが低下している事がわかる。 $0^\circ$ と $45^\circ$ の結果を比較すると、 $45^\circ$ の伸び量は $0^\circ$ のものよりも約40%低く、最も大きな差である $0^\circ$ と $90^\circ$ では、およそ70%低下している。このことから、破断伸びは造形方向に強く依存し、角度が大きくなるほど造形物は脆性的な挙動を示す事がわかる。このため、一定荷重で変形が進行していくクリープ試験や、それに準じた状況での使用が予想される製品の造形時には造形方向を十分考慮して行わなければならない事を示している。

その造形方向と破断伸びの関係は、引張強度と同じく線形ではなく、曲線になる事が図7よりわかる。その傾向は引張強さとは異なり、 $0^\circ$ から $45^\circ$ までの間で大きく低下し、 $45^\circ$ と $60^\circ$ の間ではやや横ばいで、 $60^\circ$ から $90^\circ$ にかけて再び大きく低下するという複雑な挙動を示している。

これらの現象の原因として、引張強さと同様に造形方向

が変化するにつれて支配的になった荷重が変化した事に加え、造形物表面に生じる積層段差に荷重が加わる事により応力集中が生じたと考えられる。これらの二つの要素が関係し合ったために、造形方向による結果が大きく変化し、複雑な挙動を示したものと思われる。この原因を検討するためには、表面を研磨して表面の積層段差をなくした試験片で実験を行う必要があると考えられる。

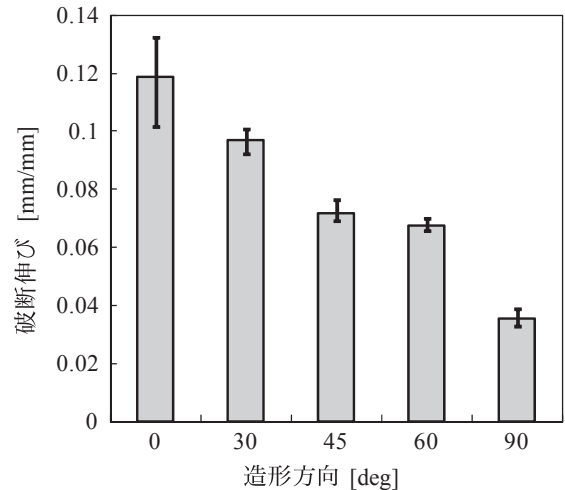


図7. 各造形方向における破断伸び

**3.3 弾性率** 図8に各角度での弾性率を示す。横軸が角度、縦軸が弾性率を示している。全ての結果を見渡すと、造形方向にかかわらずほぼ一定の値を示している事がわかる。このことから、本研究で用いた条件における造形物では、弾性率は造形方向に依存しないと言える。

このため、微小変形のみを考える様な造形品を作製する際には方向によって性質の変わらない等方性材料による造形品と同じ様に扱う事ができると予想される。

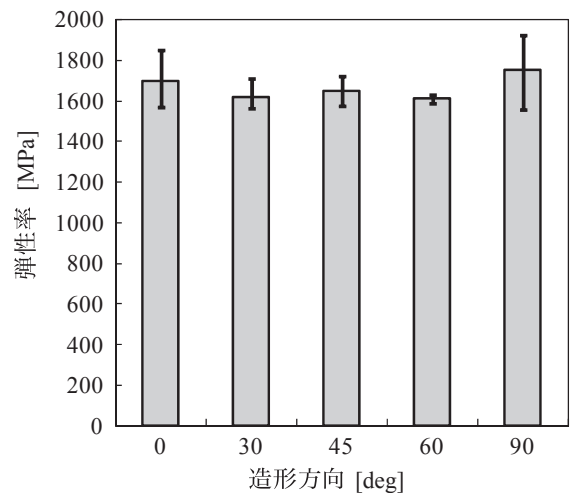


図8. 各造形方向における弾性率

3. 4 Tsai-Hill 則の引張強さへの適用 Tsai-Hill 則とは非常に強い異方性を示す繊維強化複合材料 (FRP) などに良く使用される強度則で、主軸方向の強度から、斜め方向の強度を予測する事ができる<sup>(5)</sup>。主軸方向とは X 軸, Y 軸, Z 軸方向の事である。本研究は、X 軸方向を 0°, Y 軸方向を 90°とした。σ を任意の方向の引張強さとすると Tsai-Hill 則を用いて以下の様に表す事ができる。

$$\frac{1}{\sigma} = \left(\frac{m^2}{\sigma_x^f}\right)^2 + \left(\frac{n^2}{\sigma_y^f}\right)^2 + m^2 n^2 \left\{ \frac{1}{(\tau_{xy}^f)^2} - \frac{1}{(\sigma_x^f)^2} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$m = \cos \theta$$

$$n = \sin \theta$$

σ<sub>x</sub><sup>f</sup>: 0°方向の引張強さ

σ<sub>y</sub><sup>f</sup>: 90°方向の引張強さ

τ<sub>xy</sub><sup>f</sup>: 0°, 90°方向のせん断強さ

ここで XY 方向のせん断強度 τ<sub>xy</sub><sup>f</sup> は 45°の引張試験から、座標変換の式を用いて

$$\tau_{xy}^f = \sigma_{\theta=45^\circ}^f \sin \theta \cos \theta \dots\dots\dots (2)$$

より求めた値を使用した。図9に Tsai-Hill 則で求めた曲線と実験結果を重ねた図を示す。45°の結果で若干曲線と実験結果が離れてしまっているが、30°, 60°においては両者が非常に近い値を取っている事が確認できる。この事から、今回行った条件での造形品の造形方向における引張強さは Tsai-Hill 則を用いて概ね表現できる事を示している。Tsai-Hill 則は汎用の有限要素解析ソフトウェアにも組み込まれている事の多い強度則であり、これを用いて造形前に強度予測を行う事が可能である事がわかった。

表1に本研究で得られた各種物性値と、Tsai-Hill 則で計算した引張強さを併せて示す。

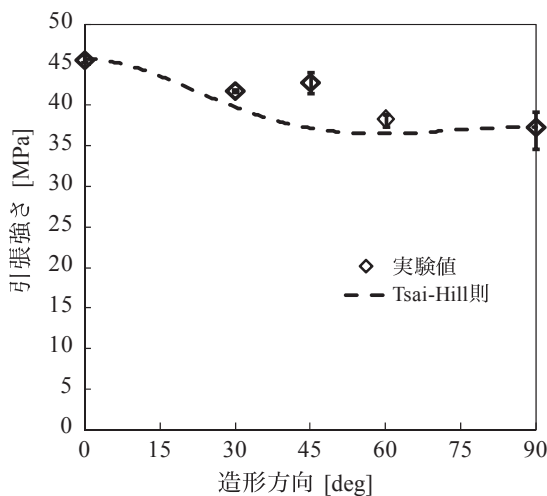


図9. Tsai-Hill 則による引張強度予測曲線と実験結果

表1. 各試験結果と Tsai-Hill 則による引張強度予測結果

造形方向	0°	30°	45°	60°	90°
引張強さ [MPa]	45.7	41.9	42.9	38.3	37.4
Tsai-Hill 則 [MPa]	45.7	39.8	37.2	36.5	37.4
破断伸び [mm/mm]	0.119	0.097	0.072	0.067	0.035
弾性率 [MPa]	1697	1620	1650	1610	1750

#### 4. まとめ

本研究では、粉末焼結型積層造形装置により作製される造形品について造形方向と基本的な機械的性質との関係を明らかにする事を目的として引張試験を実施し、以下の知見を得た。

- ・引張強さは造形方向に依存し、積層面に対する荷重角度が大きくなるにつれ引張強度は低下する。
- ・引張強さと積層方向の関係は角度と線形ではなく、曲線的な関係を描く。
- ・破断伸びは造形方向に強く依存し、その差が最大となる 0°と 90°では 70%近い差を生じる。
- ・破断伸びと造形角度との関係は引張強さと同様に線形ではなく、曲線関係を描く。
- ・弾性率は造形方向に依存せず、どの角度でも概ね同じ値を示す。
- ・Tsai-Hill 則を試験結果に適用した結果、概ね良い一致が見られ、強度予測が可能である事が示唆された。

今後は今回で明らかになった造形品の異方性を緩和する様な造形方法を模索し、品質の向上を図る予定である。

(平成 25 年 7 月 19 日 受付, 平成 25 年 8 月 8 日 再受付)

#### 文 献

- (1) 新野俊樹:「積層造形—第3加工法への挑戦—」, 日本機械学会誌, Vol.115, No.1120, pp.160-161 (2012)
- (2) B. Culfield, P.E. McHugh, S.Lohfeld: “Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.182, pp. 477-488 (2007)
- (3) Cndice Majewski, Neil Hopkinson: “Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of laser sintered nylon-12 parts”, Rapid Prototyping Journal, Vol.17, issue3, pp.176-180 (2010)
- (4) 阿保友二郎, 横山幸雄:「ナイロン RP による造形物の異方性について」, 東京都立産業技術研究所研究報告, No.3, pp.62-63 (2008)
- (5) S. W. Tsai, E. M. Wu: “A General Theory of Strength for Anisotropic Materials”, Journal of Composite Materials, Vol.5, No.1, pp.58-80 (1971)