

論文

インクジェット式三次元造形機を用いた二色成形による材料・製品設計

西川 康博*¹⁾ 阿保 友二郎*¹⁾Design and fabrication of materials and products by two-color molding
with ink-jet type rapid prototypingYasuhiro Nishikawa*¹⁾, Yujiro Abo*¹⁾

The design and fabrication of materials and products with ink-jet type 3D rapid prototyping was discussed in this paper. At first, the tensile properties of two kinds of UV light-curing resins, which were used as a reinforcement and matrix of composite materials, were evaluated. Secondly, the unidirectional reinforcement composite materials were fabricated. The tensile modulus and tensile strength of the composite material with the 40% reinforcement volume fraction were about 67% and 62% higher than those of the matrix resin, respectively. Based on all experimental results, the nonlinear spring was fabricated using the two-color molding technique.

キーワード：インクジェット, 造形機, 引張特性, 複合材料, 製品設計

Keywords : ink-jet, rapid prototyping, tensile property, composite material, product design

1. まえがき

近年, 三次元 CAD データを一定間隔でスライスした断面形状を作成し, その断面形状を積み上げることにより立体構造物を造形する三次元積層造形法あるいはラピッドプロトタイピングと呼ばれる方法によって試作品や工業製品の開発が行われている。この三次元積層造形法には, 光造形法, 粉末焼結法, インクジェット法など様々な手法がある。中でもインクジェット法では, ノズルから接着剤を滴下させて粉末同士を接合させる, あるいは光硬化樹脂を滴下させて, 即座に紫外線光を照射させ硬化させるなどの方法により, 高精度かつ高速に対象物を積層造形することができる。この手法を用いて, 例えば人工骨の開発などへの応用が進みつつある^[1]。

上述の造形法では試作品のみならず, 多品種少量の製品あるいは部品であれば, 直接, 製造も可能であると考えられる。新しい機能を有する光硬化樹脂の開発, 優れた造形能力を有する装置の開発が進む中, インクジェット式三次元造形機を製造・開発ツールとして活用し, それを用いて製品を設計・製作する事例が, 今後ますます増加するといえる。

そこで本研究では, 二色成形が可能なインクジェット式三次元造形機を用いて, (1) 原材料である 2 種類の光硬化樹脂の引張特性の評価, (2) 特徴的な成形手法である積層成形を活かした一方向強化複合材料の製作と評価, および,

(3) 非線形ばねの製作とそのばね特性の評価, を行い, 造形機を用いた材料および製品の設計・製作に関する基礎技

術について検討した。

2. 試験方法

2.1 成形方法 試験片の成形にはインクジェット式三次元造形機 (CONNEX500 : Objet 製) を用いた。本装置の特徴は, 同時に 2 種類の光硬化樹脂を使用することができる点である。本研究では, 硬化後に柔軟な材料特性を示す樹脂 (FULLCURE 430 DURUSWHITE : Objet 製, 以後, 樹脂 M と呼ぶ) と, 剛性のある樹脂 (FULLCURE 840 VEROBLUE : Objet 製, 以後, 樹脂 R と呼ぶ) の 2 種類の光硬化樹脂を用いた。

図 1 に成形中の様子を示す。ここで, プリンターヘッドの移動方向を X 軸, それと直角方向を Y 軸, また, 積層方向 (高さ方向) を Z 軸とした。各方向における解像度は 600 × 600 × 800 dpi である。

2.2 試験片 試験片は JIS K 7139 (多目的試験片 A 形) に準拠した。成形方向の違いによる樹脂の引張特性の違いも評価するために, 試験片の長手方向が X 軸, Y 軸, Z 軸および X 軸と Y 軸に対して 45° 方向 (XY₄₅ 軸), Z 軸と X 軸に対して 45° 方向 (ZX₄₅ 軸) となるような樹脂 M および樹脂 R のみから成る試験片を成形した。以後, これらの試験片を M-X, M-Y, M-Z, M-XY₄₅, M-ZX₄₅ 試験片および R-X, R-Y, R-Z, R-XY₄₅, R-ZX₄₅ 試験片と呼ぶ。

図 2 に一方向強化複合材料試験片の模式図および各試験片の断面図を示す。ここで, 樹脂 M を母材の原材料とし樹脂 R を強化材の原材料とした。図に示すように, 強化材の形状および寸法は, 幅 2mm, 厚さ 0.4mm の梁形状とした。強化材は断面に対して均等に配置した。また, 強化材の体

*¹⁾ 電子・機械グループ

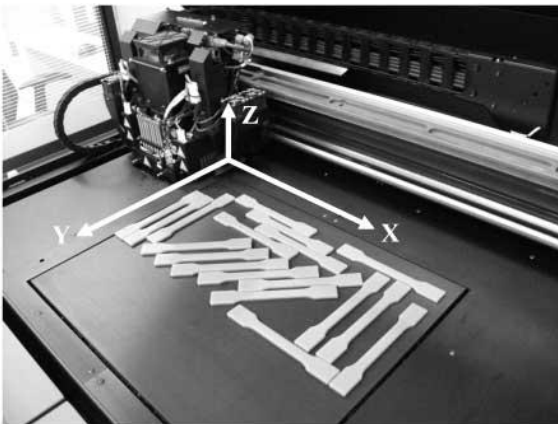


図1. 成形中の様子

積含有率を 10%, 20%および 40%と変化させた。成形方向は X 軸のみとした。以後、これらの試験片を COMP-10, COMP-20 および COMP-40 試験片と呼ぶ。

各試験片ともに試験室環境下（温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ ）において 48 時間以上放置した後、引張試験を実施した。

2.3 非線形ばねの製作 変形の途中でばね定数が変化する非線形ばねの設計・製作を行った。図 3 に製作した非線形ばねの様子を示す。比較のために樹脂 M および樹脂 R のみからなるばね（以後、M-Spring および R-Spring と呼ぶ）も製作した。全てのばねにおいて、外径を 35mm、線径を 5mm、ピッチ角を 7.5° 、また、有効巻き数を 6 とした。

各試験片ともに試験室環境下（温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ ）において 48 時間以上放置した後、圧縮試験を実施した。

2.4 試験方法 引張試験方法は JIS K 7161 に準拠した。試験には万能材料試験機（オートグラフ AG-100kNX：島津製作所製）を用いた。変位制御とし、変位速度を 1mm/min とした。全ての試験ともに試験室環境下（温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ ）で実施した。

非線形ばねの圧縮試験には万能材料試験機（マイクロオートグラフ MST-I type HR：島津製作所製）を用いた。変位制御とし、変位速度を 10mm/min とした。試験は温度 $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $38 \pm 5\%$ の環境で実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 光硬化樹脂の引張特性 表 1 に各試験片の引張弾性率および引張強度を示す。表より各樹脂において、成形方向が X 軸、Y 軸および XY_{45} 軸である試験片は、引張弾性率および引張強度は、ほぼ同じであった。このことから、樹脂 M および樹脂 R の材料特性はともに XY 平面においては等方性を示すといえる。一方、成形方向が Z 軸および ZX_{45} 軸である試験片は、他の試験片と比べ、引張弾性率が高く、一方、引張強さは低いという結果を示した。このことから、樹脂 M および樹脂 R における Z 軸方向の材料特性は、X 軸および Y 軸方向のそれとは異なることがわかった。

造形装置の解像度から、成形される材料は理想的に一边が数十 μm の組織で構成される。この組織は、X 軸、Y 軸と

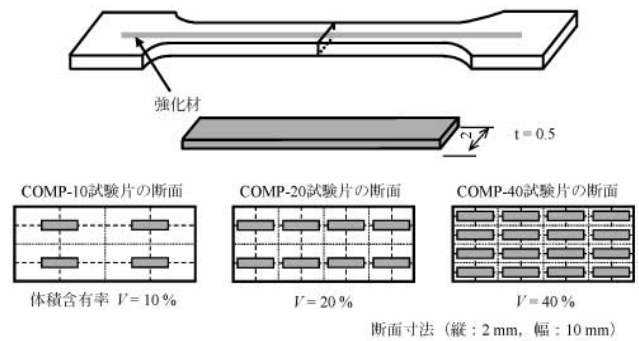


図2. 一方向強化複合材料試験片の模式図



図3. 非線形ばねの様子

比較して Z 軸に扁平であると考えられ、このような内部構造が方向によって異なる材料特性を生じさせた一因と考えられる。

3.2 一方向強化複合材料の引張特性 図 4 に COMP-10, COMP-20 および COMP-40 試験片の荷重-変位線図を示す。図より、各複合材料の荷重-変位線図は強化材の体積含有率が増加するに伴い、母材である M-X 試験片の荷重-変位線図から強化材である R-X 試験片のその傾向に近づくことがわかる。図 5 に強化材の体積含有率と引張弾性率の関係を示す。図には、複合則²⁾から求めた理論引張弾性率も示した。また、図 6 に強化材の体積含有率と引張強度の関係を示す。両図に示すように、強化材の体積含有率が増加するに伴い、引張弾性率および引張強さは向上する。Comp-40 試験片の引張弾性率および引張強さは、母材樹脂である M-X 試験片のそれらと比較すると、それぞれ約 67% および 62% 向上した。

図 5 で示したように、引張弾性率の実測値はその理論値と比べてわずかに高くなった。ここで図 7 に COMP-40 試験片の断面の観察写真を示す。図に示すように、強化材の断面は完全な矩形形状ではなかった。樹脂 M と樹脂 R の接合部では、両樹脂が交互に積層された構造をなす。このため、設計した強化材の体積含有率よりも実際の体積含有率は大きくなった結果、引張弾性率も高くなったといえる。

3.3 非線形ばねのばね特性 図 8 に M-Spring および

R-Spring の荷重-変位線図を示す。図より荷重と変位は線形関係を示すことがわかる。さらに、両ばねにおけるばね定数（線図の傾き）と、ばねの外径，線径，有効巻き数および材料の横弾性定数から求めた理論ばね定数^[3]を表 2 に示す。表に示すように、ばね定数の実測値とその理論値には大きな差が生じた。この差は、樹脂の引張特性以外の要因、例えば自重による寸法の経時変化などもあり、原因の解明は今後の課題である。

図 9 に、非線形ばねの荷重-変位線図を示す。図より、変形途中でばね定数が変化することがわかる。図 10 に非線形ばねの変形の様子を示す。初期においては、主に樹脂 M で形成されたばね部分に変形する。その後、ばね同士が接地し、続いて樹脂 R で形成されたばね部分に変形する。このように、インクジェット式三次元造形装置を用いることで、非線形ばねのような特徴ある製品の製造が可能であることが示された。

表 1. 各試験片の引張弾性率および引張強度

試験片名	引張弾性率 [GPa]	引張強度 [MPa]
M-X	0.995	15.4
M-Y	0.952	14.6
M-XY ₄₅	0.954	15.7
M-Z	1.09	11.8
M-ZX ₄₅	0.985	13.1
R-X	2.15	37.1
R-Y	2.13	37.3
R-XY ₄₅	2.22	37.3
R-Z	2.71	34.7
R-ZX ₄₅	2.68	36.8

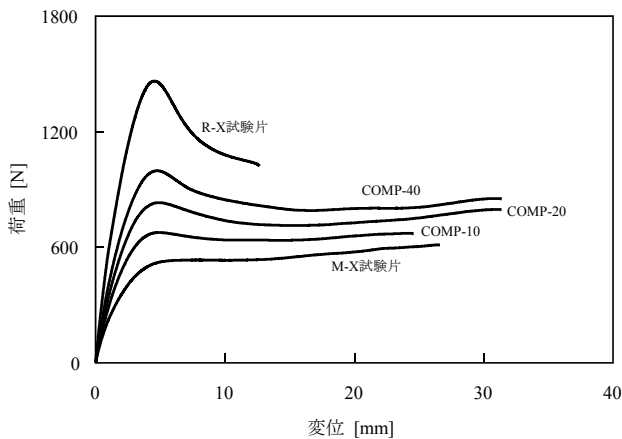


図 4. 一方強化複合材料の荷重-変位線図

4. まとめ

本研究では、造形機を用いた材料および製品の設計・製作に関する基礎技術について検討した。以下に得られた結果を示す。

(1) 原材料である 2 種類の光硬化性樹脂の引張弾性率および引張強さを取得した。また、各樹脂の材料特性は、プリンターヘッド移動方向軸とそれと直角方向軸から成る平面内においては等方性であるが、それと比べて積層方向軸では異なる特性を示した。

(2) 一方強化複合材料においては、強化材の体積含有率が増加するに伴い、引張弾性率および引張強さは向上した。強化材の体積含有率が 40%である強化プラスチックの引張弾性率および引張強さは母材樹脂のそれらと比較すると、それぞれ約 67%および 62%向上した。

(3) 二色成形法により非線形ばねを製作した。このことから、インクジェット式三次元造形機を用いて特徴ある製品の製造を行うことができることが示された。

今後、製品の強度設計・製作における課題を克服しつつ、本成果を実際の製品開発に応用する予定である。

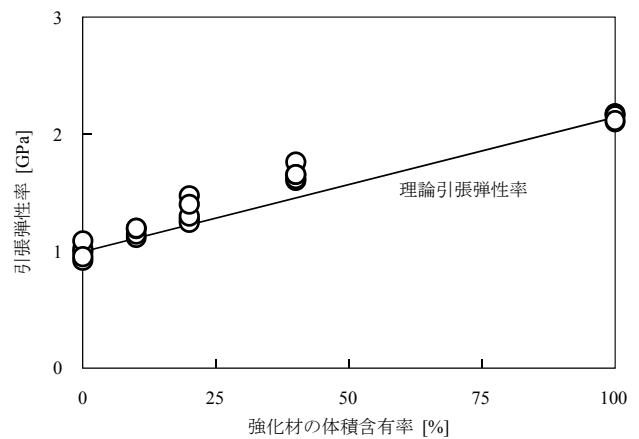


図 5. 強化材の体積含有率と引張弾性率の関係

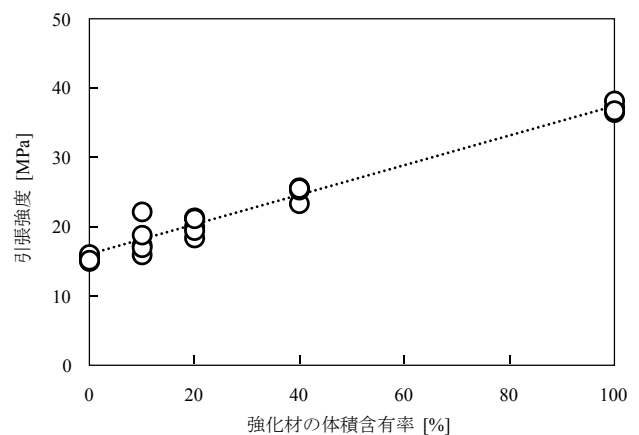


図 6. 強化材の体積含有率と引張強度の関係

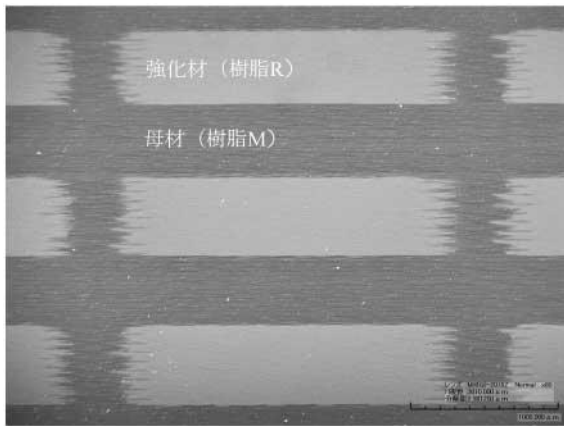


図7. COMP-40 試験片の断面の観察写真

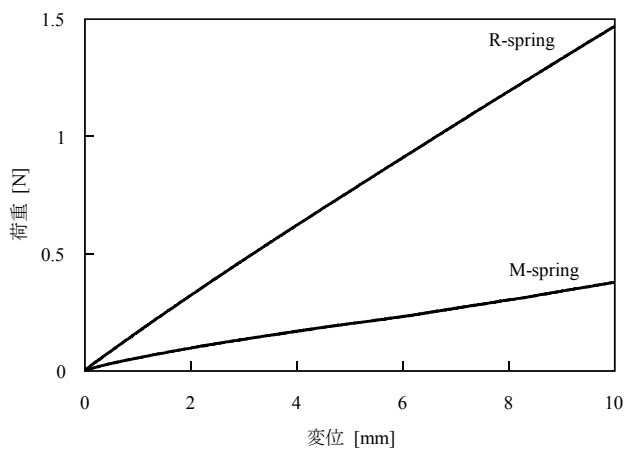


図8. M-Spring および R-Spring の荷重-変位線図

表2. ばね定数の実測値と理論値

試験片名	ばね定数 [N/mm]	理論ばね定数 [N/mm]
M-spring	0.036	0.11
R-spring	0.14	0.23

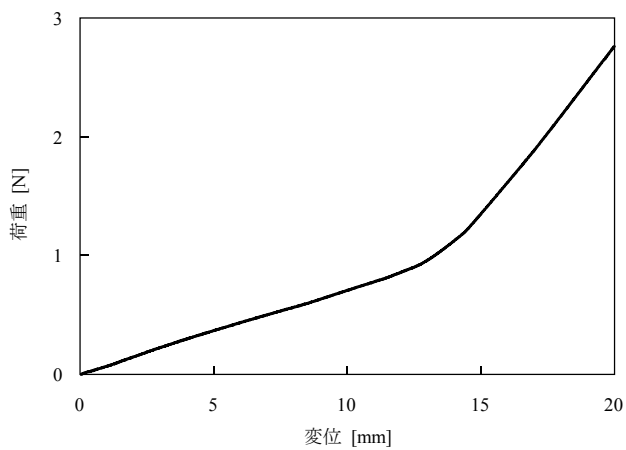


図9. 非線形ばねの荷重-変位線図

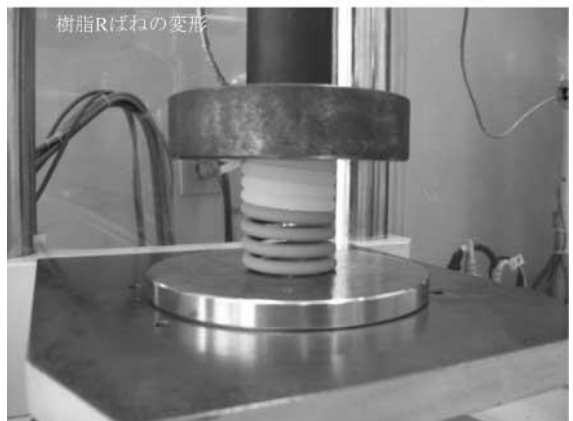
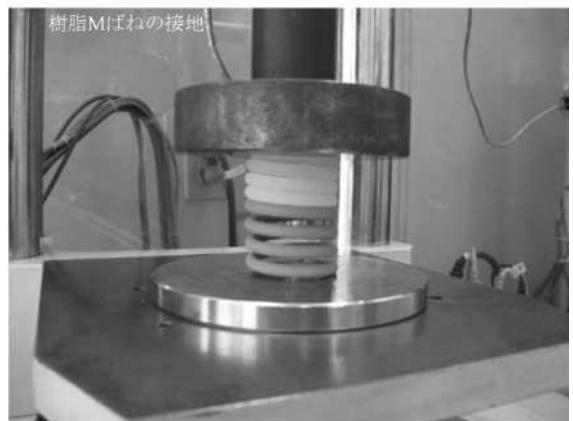
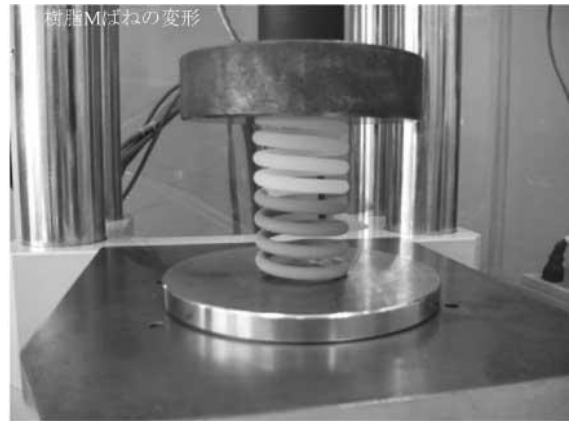


図10. 非線形ばねの変形の様子

(平成23年5月20日受付, 平成23年6月15日再受付)

文 献

- (1) 社団法人 日本セラミックス協会, “環境調和型新材料シリーズ 生体材料”, pp.111-114 (2008)
- (2) 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲, “複合材料入門”, pp.51-53 (2003)
- (3) 社団法人 日本材料学会, “機械設計法”, p.244 (2001)