

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月3日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06003

研究課題名(和文)長繊維を形状に沿って配向した機能部品の光造形

研究課題名(英文)Laser Stereolithography with Long Fiber Oriented along Shape of Functional Part

研究代表者

中本 剛 (NAKAMOTO, Takeshi)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30198262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：光造形法ではその素材は紫外線硬化樹脂である。部品の機械的な強度を向上させるために、本申請者らはこれまで、紫外線硬化樹脂にウイスキーや短繊維を混合してきた。しかし、この方法によって製作された造形物は短繊維と短繊維の間が樹脂であるため、短繊維が元来、有している強度ほどは造形物の機械的な強度は向上しなかった。造形物の強度を向上させるために造形物の端から端までの長さを有する炭素繊維で、造形物の形状に沿って製作する方法を開発することを目的とした。本研究ではレーザービームパワーやレーザービームの描画速度や樹脂の塗布厚さなどの製作条件を検討した。これらの検討結果をもとにいくつかの構造物を製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナイロンや熱可塑性樹脂などを素材として連続した炭素繊維で強化した製品を3Dプリンタで製作する報告はいくつかあり、その一部は製品化されている。一般に熱可塑性樹脂を用いた造形法に比べて光造形法のほうが微小な部品の造形に適しており造形精度は高い。本論文の方法は熱可塑性樹脂などを素材とする造形法よりも小さい寸法の部品への強化という点ではより効果的であると期待できる。さらに光造形法によって形状に沿って製作した部品は他に例がないため、今後、その機械的な特性を検討することは学術的にも高い意義がある。

研究成果の概要(英文)：The material of parts produced by laser stereolithography is a photopolymer. The photopolymer parts must be reinforced by particles or short fibers in order to increase the mechanical strength of the parts. However, the strength of the reinforced photopolymer parts are not so increased because the photopolymer exists between the reinforcement materials. Therefore, it is necessary to reinforce from one end to another end of the part and to reinforce along the shape of the part by long fibers. The purpose of this research work is to develop the process. Carbon fiber is selected as the long fibers because the carbon fiber has high tensile strength and flexibility. The fabricating conditions for example, the laser beam power, drawing speed of the beam and the thickness of the photopolymer were examined. Several examples were produced using these conditions.

研究分野：生産工学・加工学，特殊加工

キーワード：光造形 炭素繊維 紫外線硬化樹脂 配向 繊維強化材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光造形法ではその素材は紫外線硬化樹脂である。造形物をそのまま実用に供する部品とするためには部品の機械的な強度を向上させなければならない。光造形で製作された機械部品の機械的な強度を向上させるためには樹脂の強度を増加させるかもしくは樹脂に粒子や短繊維を混合する方法が考えられる。本申請者らはこれまで紫外線硬化樹脂にウイスキーや短繊維を混合して電界や磁界を利用して、それらの長手軸方向をそろえた部品を製作する方法について開発してきた。この方法では、造形の段階で特定の方向に強化することが可能である。すなわち、複合材料の創製と形状の製作を一つの工程で同時に行うことができる。しかし、この方法によって製作された造形物は図 1(a)に示すように短繊維と短繊維の間が樹脂であるため、短繊維が元来、有している強度ほどは機械的な強度は向上しなかった。

2. 研究の目的

造形物の強度を向上させるためには図 1(b)に示すように造形物の端から端までの長さを有する繊維で強化するほうが有効である。本研究ではこの製作方法を開発することを目的とした。ところでナイロンや熱可塑性樹脂などを素材として連続した炭素繊維で強化した製品を 3D プリンタで製作する報告はいくつかあり、その一部は製品化されている。一般に熱可塑性樹脂を用いた造形法に比べて光造形法のほうが微小な部品の造形に適しており造形精度は高い。本研究の方法は熱可塑性樹脂などを素材とする造形法よりも小さい寸法の部品への強化という点ではより効果的であると期待できる。

3. 研究の方法

(1)素材

本研究では紫外線硬化樹脂として（株）JSR 製の SCR-751 を使用した。造形後に未硬化の樹脂を除去するためにオリンパス製の溶剤 EE-4210 を使用した。

長繊維には東レ（株）製炭素繊維トレカ糸 T700SC-12000 を用いた。この炭素繊維は柔軟性があり、引張強度が 4.9GPa という非常に引張強度の高い長繊維である。この繊維は図 2(a)の写真に示すように数 mm の帯状の束となっている。本研究では炭素繊維を手でより分けた。より分けた 1 本の繊維の写真を図 2(b)に示す。

(2)製作方法

本方法では XY θ ステージ上に液体樹脂を塗布した基板を置き、この基板に紫外線レーザービームを照射する。炭素繊維の配向方向を変更するときには θ ステージを回転させ、レーザービームで描画するときには XY ステージを移動させる。

製作方法を図 3 に示す。図 3 ではレーザービームが移動してビーム描画しているように示しているが実際はレーザービームが静止しておりステージが移動している。図 3(a)のように液体樹脂を塗布した基板上であらかじめ目的とする造形物の輪郭に沿って樹脂のみを硬化させる。この硬化した樹脂の一辺に沿って炭素繊維に張力を作用させて配向する。この状態で図 3(b)のように炭素繊維を含んだまま XY ステージを移動させることによってレーザービーム描画して既に硬化させている樹脂の一辺に沿って新たに樹脂を硬化させる。角部では図 3(c)のように θ ステージを設定した角度だけ回転させることによって次の辺に沿って炭素繊維の配向を変える。回転させた後でレーザービーム描画して樹脂を硬化させる。この工程を角部の数だけ繰り返す。造形後は溶剤によって未硬化の樹脂を除去することによって目的とする形状の輪郭に沿って炭素繊維を配向した構造物を得ることができる。

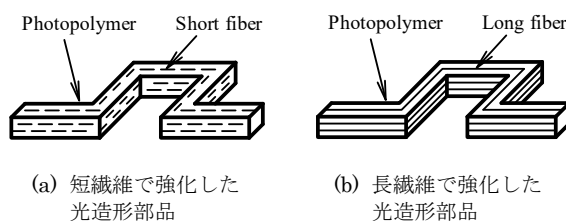
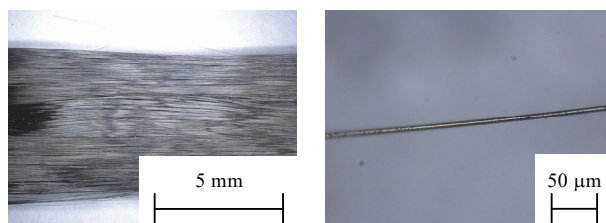


図 1 短繊維および長繊維で強化した光造形部品



(a) 炭素繊維の束 (b) 1本の炭素繊維

図 2 炭素繊維の写真

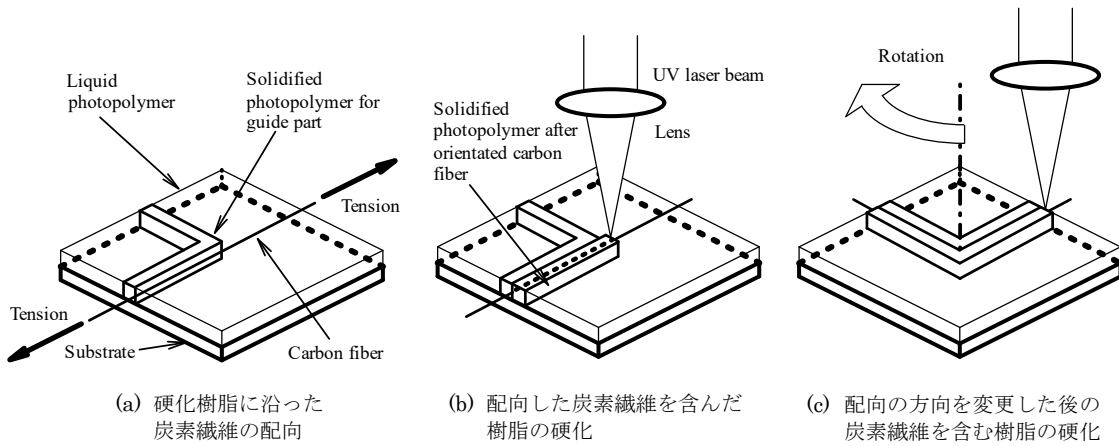


図3 配向した炭素繊維で強化した光造形部品の製作方法の概略

図4に実験装置の写真を示す。光源は波長 $0.325\mu\text{m}$ のHe-Cdレーザを使用した。発振器から出力されるビームは連続発振のシングルモードのガウスビームであり、その公称出力は 10mW である。発振器から出力されたビームはフィルターでその出力を減少させたのちにミラーで向きを変えて焦点距離 50mm の凸レンズで集光した。計算上のスポット直径は $15\mu\text{m}$ であるが硬化させた樹脂の横幅はそれよりも大きくなる。

樹脂はガラス基板上に塗布した。モータ軸端面に樹脂を塗布した基板を載せて回転させることによって $20\mu\text{m}$ 程度の厚さにする。すなわちスピコートと同じ方法で薄い樹脂を塗布した。この基板の上にさらに樹脂を塗布する。そのために厚さゲージを基板の両端に置いてすり切ることによって設定した厚さに樹脂を塗布する。基板に直接、厚い樹脂を塗布すると剥がれやすかったためにこの方法を用いた。この樹脂を塗布したガラス基板をステージの上に乗せた。ステージ上では炭素繊維の一端を固定し、他端は滑車を介しておもりによって張力を作用させた。

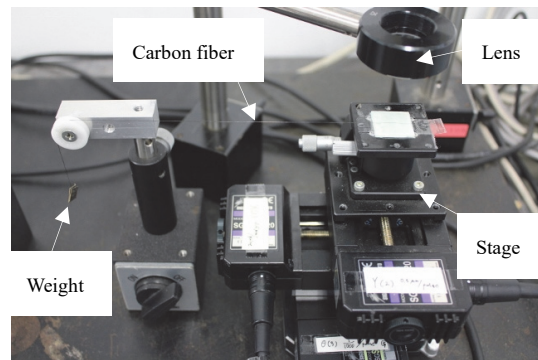


図4 実験装置の写真

4. 研究成果

(1) ビーム照射条件と造形物形状

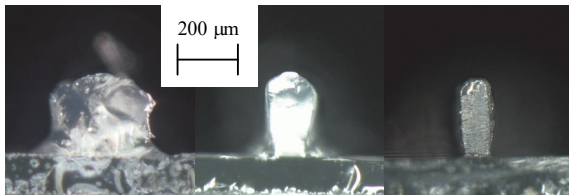
造形するために樹脂を硬化させるための適切な照射条件は使用する紫外線硬化樹脂によって異なる。ここで述べるのは1つの種類の紫外線硬化樹脂についての検討である。しかし、この検討過程は他の紫外線硬化樹脂を使用する場合にも適用できる。

本研究の製作方法は図3で示したように樹脂のみで輪郭を造形した後でその輪郭に沿って炭素繊維を配向する。このため最初に樹脂のみで造形した部分の硬化断面形状を検討した。炭素繊維を配向するときには樹脂のみで造形した部分が壊れないことが必要となる。そのためには造形した輪郭部分の横幅を大きくすれば良い。しかし横幅を大きくすると微細な形状の造形ができなくなる。そこで硬化した部分の横幅を著しく大きくすることなく造形するという点から条件を検討した。検討した条件は描画速度、ビームパワー、樹脂の塗布厚さなどである。

一例として図5に描画速度を変えたときの造形物の断面写真を示す。描画速度を大きくすると硬化横幅は大きくなる。図5(c)の $50\mu\text{m/s}$ のときには硬化した横幅が小さく微細な形状を製作するためには適している。しかしこの造形物は炭素繊維を配向したときには硬化した部分が倒れてしまう。このため図5(b)の $25\mu\text{m/s}$ 程度が適切であると判断した。ビームパワーについても同様にして検討した。

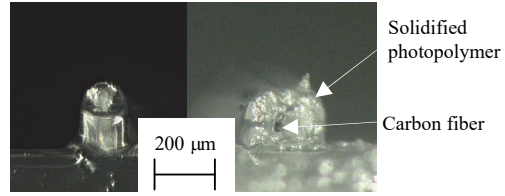
図5は液体樹脂の塗布厚さが $300\mu\text{m}$ で得られた断面形状であった。この条件では図5(b)や(c)のように硬化した横幅の割には硬化物の高さが大きい。このため先ほど述べたように炭素繊維を配向するときには樹脂が倒れてしまうことがあった。そこで樹脂の塗布厚さを減らして $200\mu\text{m}$ にした。このときの造形物を図6(a)に示す。以降の実験では塗布厚さを $200\mu\text{m}$ とした。

本製作方法では図3に示したように樹脂のみの造形物で製品形状の輪郭を製作して、その造形物に沿って炭素繊維を配向する。その後で輪郭線から少しずらして輪郭線と平行にレーザービームを描画する。硬化物の高さが $200\mu\text{m}$ なので2回目の描画を終えた後の硬化した横幅も $200\mu\text{m}$ 程度だと縦横比が1程度となって製作しやすいと考えた。1回目と2回目の描画間隔を $100\mu\text{m}$ にしたときの硬化断面形状を図6(b)に示す。図6(b)の硬化断面には5本の炭素繊維が含



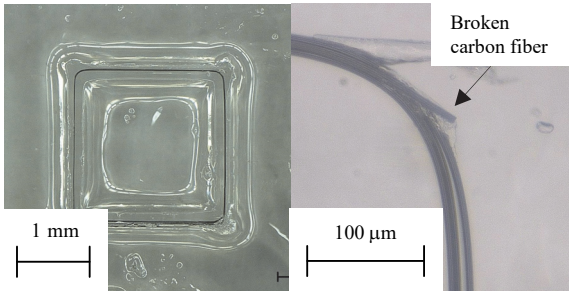
(a) 12.5 $\mu\text{m/s}$ (b) 25 $\mu\text{m/s}$ (c) 50 $\mu\text{m/s}$

図5 描画速度と樹脂硬化断面の写真
(ビームパワー：34 μW ，樹脂の塗布厚さ：300 μm)



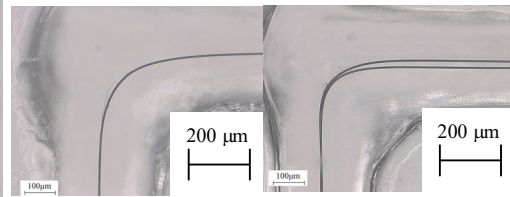
(a) 樹脂のみの硬化断面 (b) 5本の炭素繊維を含む樹脂の硬化断面

図6 樹脂のみと炭素繊維を含んだ樹脂の硬化断面写真
(ビームパワー：34 μW ，描画速度：25 $\mu\text{m/s}$ ，樹脂の塗布厚さ：200 μm)



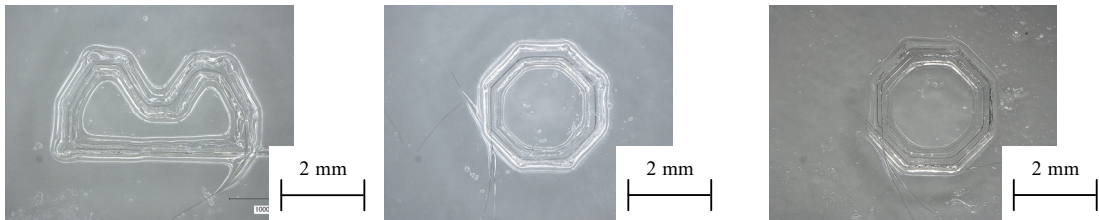
(a) 全体写真 (b) (a)の拡大写真

図7 角部で破断した炭素繊維
(ビームパワー：34 μW ，描画速度：25 $\mu\text{m/s}$ ，樹脂の塗布厚さ：200 μm ，炭素繊維の本数：5本，炭素繊維に作用させた張力：58.8 mN，角部半径：157 μm)



(a) 1本の炭素繊維を含む角部 (b) 2本の炭素繊維を含む角部

図8 角をもつ形状に硬化させた樹脂中の炭素繊維
(ビームパワー：34 μW ，描画速度：25 $\mu\text{m/s}$ ，樹脂の塗布厚さ：200 μm)



(a) 凹凸をもつ形状 (b) 八角形 (c) 二重にした八角形

図9 炭素繊維を形状に沿って配向した構造物の製作例
(ビームパワー：34 μW ，描画速度：25 $\mu\text{m/s}$ ，樹脂の塗布厚さ：200 μm ，炭素繊維の本数：2本)

まれている．硬化した横幅は200 μm 程度であり，以降はこの条件で製作した．

(2) 角部の曲率半径と炭素繊維の本数

角部では小さい曲率半径で炭素繊維を曲げることができるとさまざまな輪郭形状に対応しやすい．材料力学における梁の曲げ応力の計算から，炭素繊維の引張強度以下の値となるためには曲率半径は164 μm 以上と計算される．炭素繊維を配向するとき炭素繊維に作用させる張力を大きくするほど角部の曲率半径は小さくなる．張力が58.8mNのときには曲率半径が157 μm となったが一部の炭素繊維が破断してしまっていた．この写真を図7に示す．このように角部の最小の曲率半径には限界値が存在する．

これまでに示した写真で造形物中の炭素繊維は5本であった．図8は炭素繊維の本数を変えたときの造形物の角部の写真である．図8(a)は造形物中で1本の炭素繊維を配向しており，図8(b)は2本の炭素繊維を配向している．このように1本単位で造形物中に配向することができる．

(3) 製作例

図9(a)は凹部と凸部をもつ形状である．1つの造形物中に凹凸が混在していても炭素繊維を配向して造形することができた．図9(b)は八角形の輪郭に炭素繊維を配向した形状である．図9(c)はこの輪郭の外側にさらに炭素繊維を配向した形状である．このように平面内で2巻を配向できた．

このように研究開始当初の目的を達成することができた．製作した構造物は平面内と垂直な方向，すなわち積層方向には炭素繊維を配向していない．平面内の配向においても曲げること

ができる曲率半径の最小値には限界がある。今後は得られた構造物の機械的な強度を評価してこれらの課題についても検討しなければならない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 中本 剛, 朝倉隆文, 炭素繊維を形状に沿って配向した部品の光造形（配向方法の検討）, 精密工学会誌, 査読有, 85巻2号, 2019年, pp.202~207
DOI: <https://doi.org/10.2493/jjspe.85.202>

〔学会発表〕（計2件）

- ① 朝倉隆文, 中本 剛, 炭素繊維を製品形状に沿って配向した構造物の光造形（造形物中の炭素繊維の本数の検討および積層造形）, 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2018年
- ② 朝倉隆文, 中本 剛, 炭素繊維を製品形状に沿って配向した構造物の光造形, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会, 2018年

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。