

光造形物表面の加工精度向上に関する研究

萩原 茂・日原 政彦・八代 浩二

A Study of Improvement of Surface Roughness on Laser Lithography Models

Shigeru HAGIHARA, Masahiko HUHARA and Koji YATSUSHIRO

要 約

光造形法は、レーザ光によって硬化した薄膜状の樹脂を積層によって立体を造形する方法である。光造形物の表面は、積層による階段状の段差が形成され、高い表面精度が要求される原型製作に用いるためには段差を無くさなければならない。斜め照射法は、レーザ光を傾斜させて照射することにより生成する傾斜した硬化樹脂を積層し、表面精度を改善する手法である。コンピュータシミュレーションにより樹脂の硬化挙動を検討し、斜め照射を行うための照射条件を明らかにした。また、斜め照射により円筒表面を造形し、円筒の約半分の表面で $10\mu\text{m}$ の平均表面あらしが得られた。

Abstract

Laser lithography is an optical forming method which heaps up thin layers solidified by laser beam. Since plastic models which are made by laser lithography process have ledges on their surfaces, reducing ledges is required to use them as master models for jewelry. A diagonal irradiation method for reducing ledges is presented. The diagonal irradiation method improves surface roughness by means of heap up diagonal shape solidified by diagonal laser irradiation. Diagonal solidifying behavior was clarified by theoretical calculation. As the result of an experiment, average surface roughness of $10\mu\text{m}$ in steep slope area and improvement of out of roundness was obtained by the diagonal irradiation method.

1. 緒 言

光造形法¹⁾²⁾は、レーザビームを光硬化性樹脂に照射することによって薄膜を形成し、その薄膜の積層によって樹脂モデルを造形する方法である。それ故、複雑な形状でも一体型として造形することが可能である。

しかし、(1)積層の際に樹脂モデルの表面に段差が生ずる、(2)樹脂の硬化反応に伴う体積変化によって樹脂モデルの変形が起こる、(3)形状によっては適当な場所に支持を設ける必要がある、(4)造形する立体の体積に比例して造形時間がかかるため、量産品には向かない、という問題もある。

これらの理由によって、光造形法は、デザイン検討用モデルや手術の検討に使用される臓器モデルなど、表面精度に厳しさが要求されず、かつ量産品でない製品に使用される場合が多い。

著者らは、光造形法によって得られる樹脂モデルをダイカストなどの簡易型として利用するために、光硬化樹脂中に粉末混入する方法の検討を行ってきた。光硬化樹脂中に金属粉末を混入することによって剛性や熱伝導性の向上が³⁾得られ、シリカ粉末を混入することによって軟化温度の上昇、表面精度の改善⁴⁾が得られることが既に判ってい

る。しかし、樹脂モデルを型として利用するための十分な精度は、まだ得られていない。

光造形で得られる樹脂モデルの表面には、繰り返しの積層により形成する階段状の細かい段差がある。この段差は、樹脂モデル表面の精度低下を引き起こす主な原因であり、ヤスリ掛けやコーティング処理などの二次的な加工なしでは、滑らかな表面を得ることができない。

本研究は、光造形法によって得られる樹脂モデルを型として利用するために、レーザ光の照射角度を制御する照射法を取り入れた高精度造形法⁵⁾の開発を行った。

はじめに、純粋な樹脂の場合について、光照射の方向と硬化する紫外線硬化樹脂の形状との関係をコンピュータシミュレーションによって調べた。また、ビームの直径や紫外線硬化樹脂の硬化特性が硬化形状に及ぼす影響についても検討した。さらに、光の照射角度をNC制御により自動設定が可能な造形装置を試作し、単純形状の造形を行い、表面精度の評価を行った。

2. コンピュータシミュレーションの方法

光硬化性樹脂にレーザビームを照射したときに、硬化形

状がどのような挙動を示すかについて考察した。

レーザービームは、樹脂表面で反射光と屈折光に分岐する。樹脂表面で反射する光は、樹脂の硬化には影響しないので屈折光のみについて考える。但し、樹脂内部での光の散乱はなく、硬化状態に関わらず樹脂の光学的性質は変化しないものと仮定する。

樹脂表面では、光線の入射角を θ_i 、屈折光の鉛直方向とのなす角度を θ_r とするとSnellの法則より、

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (1)$$

が成り立つ。ここで、 n_1 、 n_2 は、それぞれ大気屈折率、樹脂の屈折率である。

光線の偏光面が、樹脂液面に対して垂直な成分をp成分、p成分と垂直な成分をs成分とする。樹脂液面におけるp成分についての振幅透過率を t_p とし、s成分についての振幅透過率を t_s とすると、それぞれ、Fresnelの公式より、

$$t_p = \frac{2 \sin(\theta_i) \cos(\theta_r)}{\sin(\theta_i) \cos(\theta_r) + \sin(\theta_r) \cos(\theta_i)} \quad (2)$$

$$t_s = \frac{2 \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_i) \cos(\theta_r) + \sin(\theta_r) \cos(\theta_i)} \quad (3)$$

となる。

光線のp成分とs成分の強度を I_p 、 I_s とすると、屈折光強度 I_r は、

$$I_r = t_p^2 I_p + t_s^2 I_s \quad (4)$$

で表される。

光照射によって樹脂が吸収するエネルギーの分布を求めするために、仮に樹脂が微小な体積の要素の集まりで構成されていると考える。

屈折光は、要素を透過することによって光のエネルギーを要素に放出し、強度が減衰する。ある要素を透過する光の強度は、要素に入る時点での強度を I_{in} 、要素を出る時点での強度を I_{out} 、光が要素を透過する長さを L とすると、Lambert-Beerの法則より、

$$I_{out} = I_{in} \exp(-ZL) \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、 Z は、樹脂固有の光吸収係数である。光吸収係数 Z は、硬化状態にかかわらず一定の値をとると仮定した。

T 時間の照射によって屈折光から要素に吸収されるエネルギー E は、

$$E = \int_0^T (I_{in} - I_{out}) dt \quad (6)$$

となる。

要素は、吸収したエネルギーが、硬化の臨界値 E_0 に達すると液相から固相へと変化すると考えられる。

レーザービームを照射した場合にどのような硬化形状が得られるか調べるために、式(6)で得られる要素のエネルギーを計算し、液相と固相の境界を求めた。

光吸収係数 Z および硬化の臨界値 E_0 は、硬化実験の結果、 $E_0 = 3.5 \times 10^{-3} \text{ mJ/mm}^2$ 、 $Z = 5.52 \text{ (1/mm)}$ を得た。なお、使用した樹脂は、サンノブコ製SN5X1641である。光源は、ブルースター窓を持たない縦多モードレーザー（ウシオ電機製PCH-U20RY）を使用したため、偏光異方性はないものと考えた。以下においては、この実験で使用した樹脂と照射条件を用いることを前提とする。

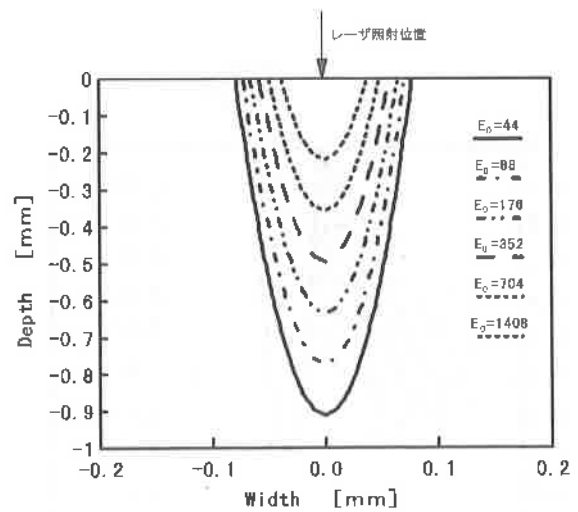


Fig. 1 Effect of exposure E_0 on solidified profiles.

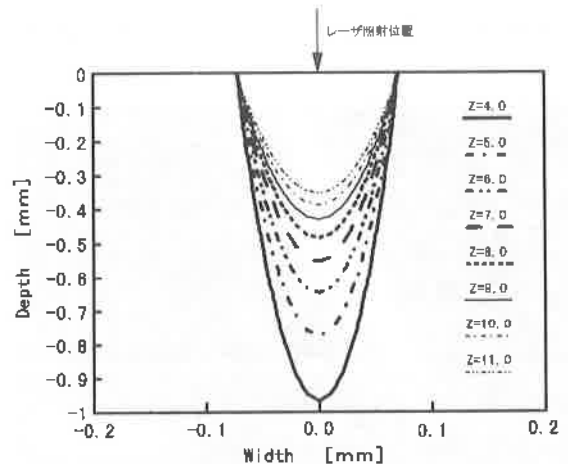


Fig. 2 Effect of absorption on solidified profiles.

3. シミュレーションの結果

光照射の方向と硬化する紫外線硬化樹脂の形状との関係および紫外線硬化樹脂の硬化特性が硬化形状に及ぼす影響を調べた。

紫外線硬化樹脂の硬化臨界値 E_0 をいろいろな値にした場合 (Fig. 1), 硬化臨界値 E_0 が、大きい値では、樹脂の硬化感度が悪く、小さい範囲の樹脂が硬化する。硬化臨界値 E_0 は、造形の分解能を決める上で重要な要素の一つであることが判る。

紫外線硬化樹脂の光吸収係数 Z をいろいろな値にした場合 (Fig. 2), 光吸収係数 Z が、大きい値では、樹脂の硬化深さが浅くなる。硬化臨界値 E_0 と光吸収係数 Z は、適当な値に決めることによって、レーザー照射によって得られる硬化形状をコントロールすることができる。

レーザービームの照射方向を変えた場合 (Fig. 3), レーザービームの照射角度に従った硬化樹脂の形状が得られた。実際に紫外線硬化樹脂にレーザービームを照射して得られた硬化樹脂を Fig. 4 に示す。シミュレーションで得られた結果と同じ勾配の樹脂形状となった。

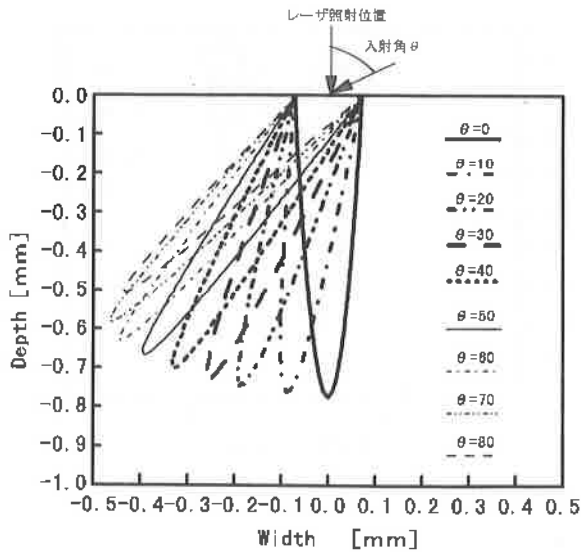


Fig. 3 Solidified profiles generated by different incident angle.

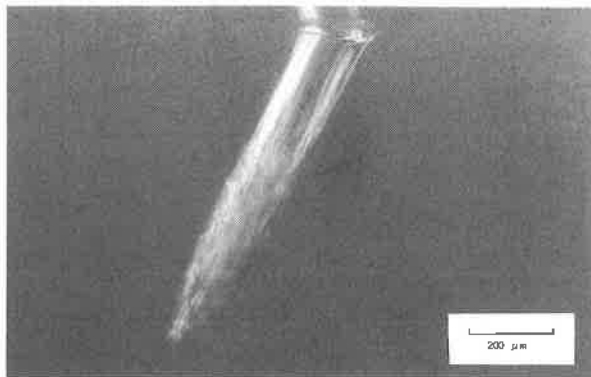
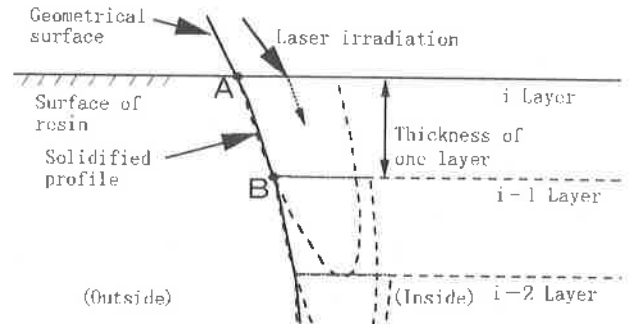
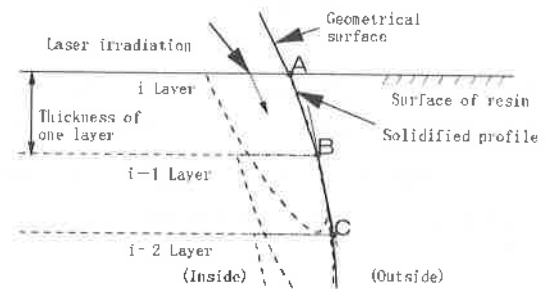


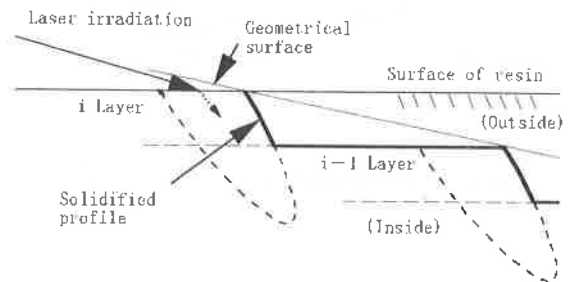
Fig. 4 Solidified profile.



(a) An example which makes outside of arc



(b) An example which makes inside of arc



(c) An example which makes steep slope area

Fig. 5 Heap up diagonal shape solidified by diagonal irradiation.

4. レーザービームの照射条件

硬化樹脂を積層する照射条件について考察する。Fig. 5 (a)に示されるように円弧の外側を積層する場合は、硬化形状の計算結果を利用して、硬化形状が点Aおよび点Bを通るようなレーザー光の入射角と照射位置を一意に決めることができる。Fig. 5 (a)は、この方法で第 i 層まで繰り返して積層したものである。

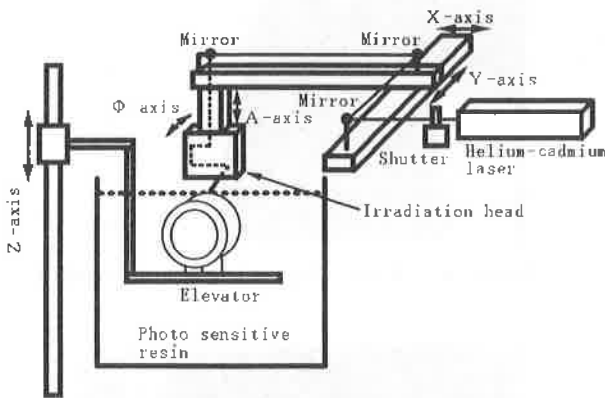
Fig. 5 (b)に示されるように円弧の内側を積層する場合、Fig. 5 (a)の方法では第 $i-1$ 層の形状に影響を与えてしまう場合がある。この場合には単位面積あたりの光強度を弱くして硬化形状の点Bでの傾きを線分BCの傾きと同じになるような入射角と照射位置を求めて、積層を行う。

一般に樹脂の屈折率 n_2 は、大気屈折率 n_1 よりも大きい。この条件下では、緩やかな勾配の硬化形状が生成できない

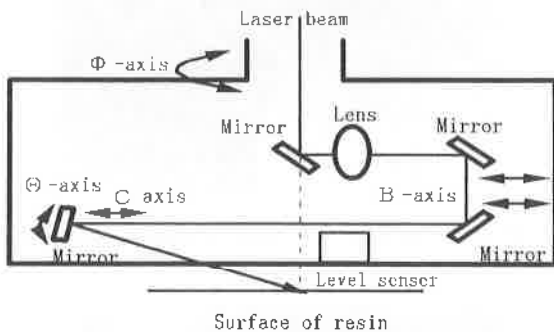
ために、滑らかな表面を得ることはできない。そのため、Fig. 5 (c)に示されるように硬化形状の勾配が非常に小さいところでは、生成し得る硬化形状の最も勾配の緩やかな硬化形状によって積層を行うことにする。

5. 積層実験

前節に述べた方法を検証するために装置を試作した。装置の構成をFig. 6 に示す。レーザーにより発生する光は、XY移動装置先端の照射ヘッドにミラーによって導かれる。照射角度は、照射ヘッドの Θ 軸で制御される。樹脂液面の照射位置は、照射ヘッドの中心軸上になるように Θ 軸とC軸は常に連動して動作する。レンズから樹脂液面までの光路長は、B軸によって調整した。実験の主な条件をTable 1 に示す。



(a) Construction of experimental system



(b) Scheme of irradiation head

Fig. 6 Schematic diagram of experimental system.

Table 1 Experimental condition

Light source	PCH-U20RY (Ushio Inc.)
Scanning velocity	5.0 mm/s
Light intensity	8.7 mW
Wave length	325 nm
Focal length of lens	220 mm
Resin	SN5X1641 (San Nopco Ltd.)

円筒の造形例をFig. 7 に示す。Fig. 7 (b), (c), (d)は、液面に対して垂直な照射角によって積層する従来の造形方法で得られた結果である。Fig. 7 (e), (f), (g)は、Fig. 2の方法（以下、斜め照射法という。）で積層した結果である。図の右上には、円筒の拡大位置を太線で囲んだ部分で示した。また、硬化シミュレーションの結果を図中の余白に示した。従来の造形方法では、ほぼ全体に階段状の段差が見られる。斜め照射法では、理論的解析で得られた結果と定性的に一致した表面が得られた。

表面粗さの測定例をFig. 8 に示す。斜め照射法では、硬化表面の勾配が、 50° 以上の場合、平均表面粗さ (Ra) が $10\mu\text{m}$ 以下であった。

表面の勾配が、 40° 以下では、緩やかな勾配の硬化形状が生成できないが、従来の造形方法より段差が小さくなり表面の精度が向上した。

6. 結言

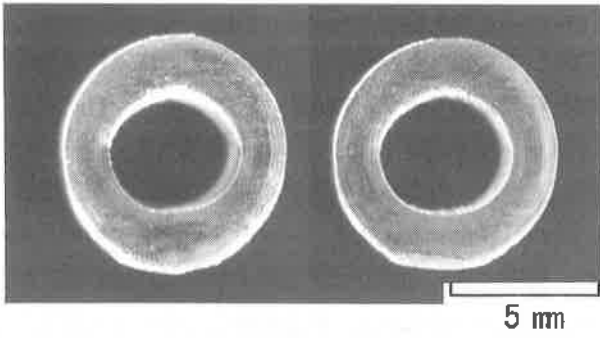
造形物表面の段差は、一層の厚さを無限小にするとなくなるが、造形時間は増大する。それ故、高い表面精度を得るためには効率が著しく低下する欠点があった。その問題点の改善方法として積層間の情報を造形過程で付与する一手法を開発した。

光の照射方向および強度分布が制御可能な造形装置を開発し、硬化シミュレーションで得られた硬化層の積層条件を検討した結果、積層の数値制御方法として斜め照射法の有効性を確認した。

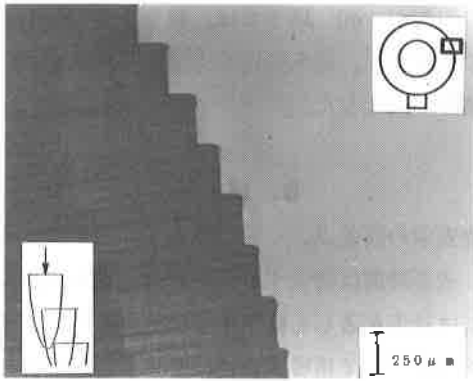
種々の造形実験の結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 勾配が 50° 以上の硬化表面では、 $10\mu\text{m}$ 以下の平均表面粗さ (Ra) が得られた。
- (2) 円筒の造形実験により、従来法に比較して真円度の向上が見られた。
- (3) 実験結果は、硬化シミュレーションの結果と定性的に合致しており硬化状態を理解するだけであれば、硬化シミュレーションのみでも十分であることが分かった。

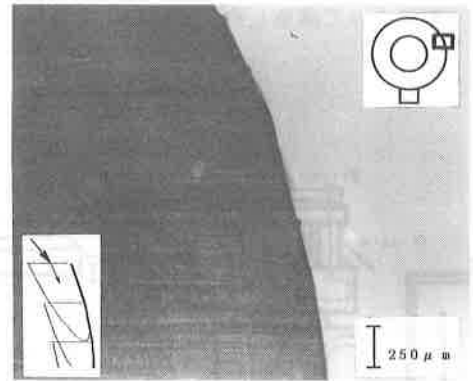
本手法により従来の樹脂モデル表面の精度は改善され、製品品質の向上に大きく貢献できることが明らかとなった。



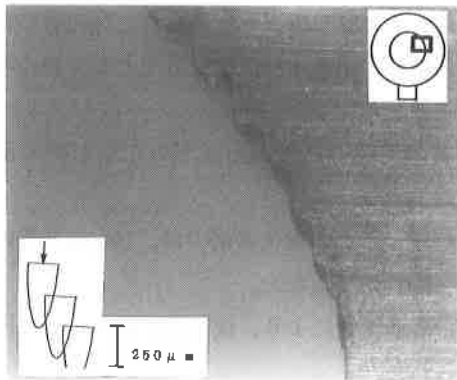
left: conventional method
 right: diagonal irradiation method
 (a) View of cylinders



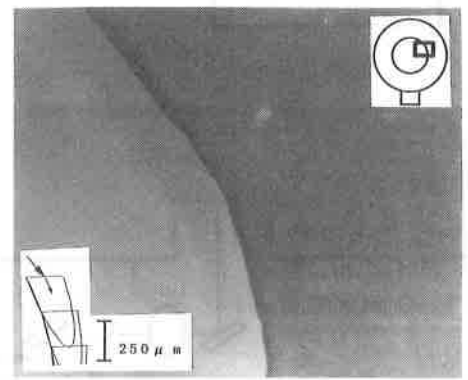
(b) Outside of cylinder (conventional method)



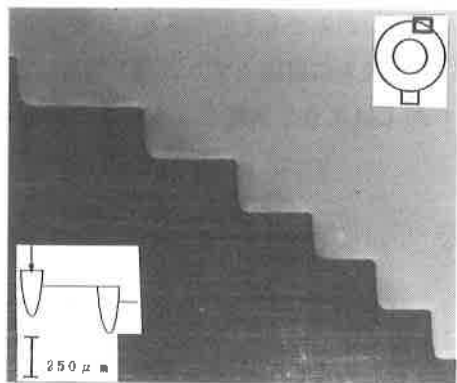
(e) Outside of cylinder (diagonal irradiation method)



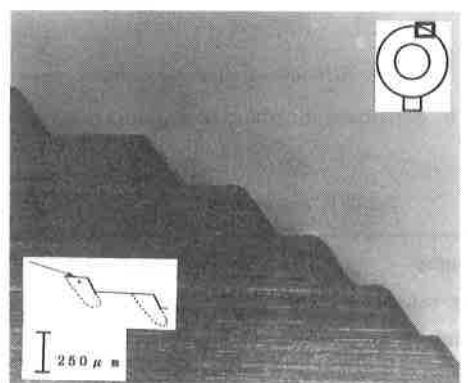
(c) Inside of cylinder (conventional method)



(f) Inside of cylinder (diagonal irradiation method)



(d) Top of cylinder (conventional method)



(g) Top of cylinder (diagonal irradiation method)

Fig. 7 Cylinder models.

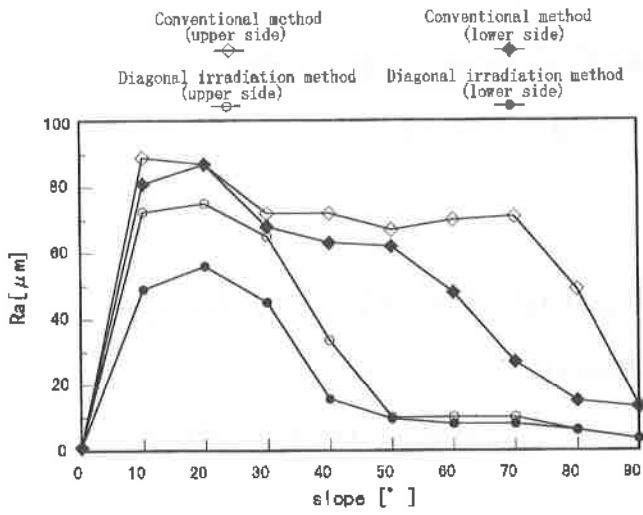


Fig. 8 Average surface roughness of resin models.

参考文献

- 1) 中井孝, 丸谷洋二: レーザリソグラフィによる立体モデル創生, 電子情報通信学会論文誌, J71-D, 2 (1988) 416
- 2) 中川威雄, 丸谷洋二: 積層造形システム, 工業調査会
- 3) 萩原茂, 日原政彦, 八代浩二, 佐野正明: 粉末混入樹脂による光造形に関する研究 (第3報) 金属粉末を混入した創製物の機能性について, 精密工学会秋季講演論文集 (1994) 633
- 4) 萩原茂, 日原政彦, 八代浩二, 佐野正明, 中村好男, 松尾秀逸: 粉末混入樹脂による光造形に関する研究 (第5報) 硬化形状の制御について, 精密工学会秋季講演論文集 (1995) 545
- 5) 萩原茂, 古川進, 清弘智昭, 牧野洋: 宝飾工芸品製作のためのレーザリソグラフィ (第1報) 斜め照射の提案, 精密工学会誌, Vol.62, No.11 (1996) 1587-1591
- 6) 鈴木範人, 小塩高文: 応用光学2, 朝倉書店 (1982) 164