紫外線感光性樹脂を使ったマイクロストラクチャの製造* (第4報, 集束ビーム描画法による三次元部品の製作)

中本 剛^{*1}, 山口 勝美^{*1}, Petros ABRAHA^{*2}
伊藤 昭^{*3}, 三島 邦裕^{*3}

Manufacturing of Microstructures Using UV-Sensitive Photopolymer (4th Report, Manufacturing of 3-Dimensional Microstructures by Writing with a Focused Beam)

Takeshi NAKAMOTO, Katsumi YAMAGUCHI, Petros ABRAHA,
Akira ITO and Kunihiro MISHIMA

This work concerns the development of a manufacturing technique for three dimensional micromechanical parts. The micromechanical parts or micromolds are made by writing with a focused UV laser beam on the surface of a liquid photopolymer. At this time the irradiated portion of the liquid photopolymer becomes solid. Three dimensional solidified polymer structures are then obtained by stacking the two dimensional polymer structures. In this paper we theoretically examine the effect of absorption of light in a photopolymer and exposure factors such as beam power and writing speed on the shape of the solidified polymer. The optimum conditions for three-dimensional micromechanical parts are also determined. Using these conditions, three dimensional micropolymer structures are formed. The shapes obtained by stacking two dimensional polymer structures are also examined.

Key Words: Nontraditional Machining, Machine Element, Optical Engineering, Micromechanical Part, Micromachining, Photopolymer, Laser Beam, Absorption of Light

1. 緒 言

最近, 寸法がミクロンオーダの機械部品や構造物, いわゆるマイクロストラクチャの製作に関する研究がいろいろと行われている。これらの研究の中にはカリフォルニア大学バークレイ校⁽¹⁾やベル研究所⁽²⁾で行われたシリコンを素材として半導体リソグラフィプロセスを応用した方法, SOR光を利用したLIGAプロセス⁽³⁾⁽⁴⁾などがある。

著者らはこれまで, 光が照射されると硬化する紫外線感光性樹脂を利用して, マスクパターン転写法⁽⁵⁾, ビーム描画法⁽⁶⁾⁽⁷⁾によって高いアスペクト比(高さ/幅)をもつマイクロ部品を製作してきた。これらの研究においてはマイクロ部品製作時の樹脂の硬化形状を理論, 実験の両面から明らかにし, 高アスペクト比をもつマイクロ部品製作に最適な条件を検討した。

本研究では紫外線感光性樹脂上で集束したレーザビームを所望の形状の輪郭に沿って描画することによって三次元のマイクロ部品を製作することを目的として

いる。レンズによって集束したビームの描画・走査による部品製作は光造形法などにおいていくつか報告がある^{(8)~(20)}。しかしこれらの研究は, おもに数十mm程度のCADモデルを製作することを目的としており, その研究内容も製作装置や, 製作時の描画・走査方法に関する報告がほとんどであり, 製作時における樹脂の硬化形状に関する報告⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾は少ない。さらにマイクロ部品製作の研究⁽²⁰⁾の中にも描画の際の樹脂の硬化形状を理論的に計算し, その結果から最適な製作条件を検討した報告はない。本研究では, マイクロ部品製作の際の樹脂の硬化形状を理論的に計算し, 実験によってその形状を確かめた。次に樹脂中における光に対する吸収係数に関する検討を中心にマイクロ部品製作に最適な条件を検討し, その結果を利用して実際にマイクロ部品を製作した。

2. 本手法の概要

本手法の概略をマイクロパイプの製作を例に図1に示す。基盤上に樹脂を薄く塗布し, 所望の製品形状の輪郭に沿ってレーザビーム描画を行う。樹脂ははじめは液状で, 光が照射された部分だけが固体へと硬化する。次にその上にさらに樹脂を塗布してビーム描画を行い, これを積層していく。このようにして所望の形

* 原稿受付 1995年6月12日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町)。

^{*2} 正員, 名古屋大学大学院。

^{*3} 名古屋大学大学院。

Fig. 1 Manufacturing method

状に硬化させた後、未硬化の樹脂を取り除くことによって製品を得る。図は樹脂製品を製作する概略図であるが、この方法によって樹脂製の鋳型を製作し、この鋳型を基にして金属やセラミックスなどの材料で、マイクロ部品を製作することも可能である。

この硬化した樹脂の寸法や形状は、描画に使用するビーム断面内の光強度分布、光の回折、散乱、樹脂中での光の吸収、反射などの影響を受ける。これらの因子のうち、第3報まで⁽⁶⁾⁽⁷⁾で述べたように、ビーム断面内の強度分布、回折、吸収が樹脂硬化形状に特に大きな影響を与える。

3. 樹脂の硬化形状の基礎式

本章では、ビーム描画による樹脂の硬化形状を、ビーム断面内の光強度分布と樹脂中での、光の吸収に基づいて計算を行い、次に三次元形状のマイクロ部品に適した製作条件を検討する。

3・1 硬化形状の基礎式 図2にパワー P 、波長 λ 、半径(開口径) R のシングルモードのガウスビームが焦点距離 f のレンズで集束されて樹脂表面を描画するようすを示す。このとき、樹脂表面上のビーム中心軸との交点を原点とし、深さ方向に z 軸をとるとビームの光強度 I_g は次式で表される⁽⁷⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾。

$$I_g(x, y, z) = \frac{2P}{\pi \cdot r_0^2} \cdot \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$r_0(z) = r_{0\min} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot r_{0\min}^2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$r_{0\min} = \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot R} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ビーム半径 r_0 は z によって式(2)のように変化し、その最小値 $r_{0\min}$ は式(3)で与えられる。

このビームが樹脂中で吸収され、その強度はしだいに減衰する。この減衰は Lambert-Beer の法則が成り

Fig. 2 Theoretical model

立つので、樹脂中での吸収係数を α とすると、樹脂中での光の強度 I は I_g を用いて次の式で表される。

$$I(x, y, z) = I_g(x, y, z) \cdot \exp(-\alpha z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここでビームが一定速度 v で直線上(x 軸上)を描画するとき、樹脂中の点 (x, y, z) に照射されるエネルギー E は描画時間 t についての次式の積分で表される⁽⁷⁾。

$$E(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x - v \cdot t, y, z) dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

このエネルギーがあるしきい値 E_0 に達すると樹脂が硬化すると仮定する。式(5)の積分を計算して、樹脂の硬化断面形状は次式を満たす (y, z) で表される。

$$y = \frac{r_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\log_e \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{E_0 \cdot r_0 \cdot v} \right) - \alpha \cdot z} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中の E_0 と α は実験的に決定することができる⁽⁵⁾。

本手法では樹脂の塗布と描画を繰り返すことによって三次元構造をもつマイクロ部品を製作する。この製作において、1回の描画で深くまで硬化させると硬化させたくない下層の樹脂まで硬化させてしまうことになる。このため、積層厚さ1層程度の硬化深さが望ましい。そしてマイクロ部品の水平方向と垂直(深さ)方向の精度を同程度にするためには、硬化深さは硬化した横幅と同じ程度であると製作しやすいことになる。このような条件では、図2のビームウェスト付近の平行ビームとみなすことができる部分で樹脂を硬化させることになるので、ビームを半径が $r_{0\min}$ の平行ビームで近似できる。このとき、硬化部の最大深さ L は式(6)において $y=0$ のときの z の値であることから次式で表される。

$$L = \frac{1}{\alpha} \log_e \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} p_n \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで p_n は照射量を表す無次元量で、次式で表される。

$$p_n = \frac{P}{E_o \cdot r_{0\min} \cdot v} \dots\dots\dots (8)$$

一方、樹脂表面における硬化横幅 w は $z=0$ のときの $2y$ の値であることから次式で表される。

$$w = \sqrt{2} r_{0\min} \sqrt{\log_e \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} p_n \right)} \dots\dots\dots (9)$$

3.2 製作条件の検討 式(7)より、最大硬化深さ L は吸収係数 α と 照射量 p_n によって決定されることがわかる。図3(a)に吸収係数を変化させたときの硬化断面形状を示す。吸収係数が小さいと、硬化深さは $100 \mu\text{m}$ を超えてしまい、三次元形状を製作するためには適さない。吸収係数を大きくすることにより硬化深さを小さくすることができ、図の $\alpha = 4.9 \times 10^{-2} (1/\mu\text{m})$ のように硬化深さを硬化横幅と同程度にすることも可能である。

図3(b)は照射量を変化させたときの硬化断面形状である。図より照射量を変化させることによって、硬化深さを変えることができることがわかる。吸収係

数を変化させた場合と異なるのは、照射量によって樹脂表面における硬化した横幅も変化するることである。

以上の図3で検討したように、吸収係数を変化させても照射量を変化させても硬化深さを変えることができるので、所望の硬化深さを得るための吸収係数と照射量の組合せは無数に存在する。次に、これらの組合せの中でどのような値の吸収係数と照射量がマイクロ部品の製作に適しているかについて検討する。特に描画法では照射量はビームを移動させる速度と関係し、描画経路のコーナ部、折り返し部などでは樹脂の受ける照射量は変動するので、照射量の変動の影響を考慮する必要がある。

式(7)より照射量 p_n が Δp_n だけ変化したときの、最大硬化深さ L の変動 ΔL は次式で表される。

$$\Delta L = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta p_n}{p_n} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)より、吸収係数が大きいと照射量の変動しても硬化深さに及ぼす影響が小さくなることがわかる。そ

Fig. 3 Cross sectional outlines of the solidified polymer
($\lambda=0.325 \mu\text{m}$, $R=0.26 \text{ mm}$, $f=50 \text{ mm}$, $v=10 \mu\text{m/s}$, $E_o=0.34 \text{ mJ/mm}^2$)

Fig. 4 Fluctuations of the cross sectional outlines of the solidified polymer for different α values
[$\Delta p_n/p_n = \pm 10\%$, $\lambda=0.325 \mu\text{m}$, $R=0.26 \text{ mm}$, $f=50 \text{ mm}$, $v=10 \mu\text{m/s}$, $E_o=0.34 \text{ mJ/mm}^2$]

それぞれの吸収係数において、同じ硬化深さまで樹脂を硬化させるために必要な照射量から $\pm 10\%$ 変動したとき ($\Delta p_n/p_n = \pm 10\%$) の硬化断面形状の変化を図4に示す。図より吸収係数が小さいと、照射量の変動により硬化深さが大きく変化することがわかる。これに対して吸収係数が大きくすることにより硬化深さの変動を小さくすることができる。しかし、吸収係数が大きい場合には樹脂の深い部分まで硬化させるためにはより大きい値の照射量が必要となり、そのために樹脂表面における硬化幅が増加してしまう。

以上の考察により、照射量がある程度変動しても所望の樹脂硬化形状を得るためには以下の手順で描画条件を決定すればよい。まず最初に所望の製品の寸法から樹脂硬化形状、すなわち最大硬化深さ L と樹脂表面における硬化横幅 w を定める。次に必要とされる精度から吸収係数 α を計算する。その方法は式(10)から照射量の変動 $\Delta p_n/p_n$ に対する要求される硬化深さの変動 ΔL から吸収係数 α を計算する。次に、式(7)、(9)から得られる次式により最小ビーム半径 $r_{0\min}$ を計算する。

$$r_{0\min} = \frac{w}{\sqrt{2\alpha \cdot L}} \quad (11)$$

そしてこの $r_{0\min}$ を得るための、レンズ焦点距離などの光学系に関する値は式(3)から計算する。無次元照射量 p_n は所望の最大硬化深さ L と吸収係数 α から式(7)によって計算できる。この p_n から式(8)によってビームパワー、描画速度を決定できる。

例えば最大硬化深さ $L = 40 \mu\text{m}$ 、樹脂表面における硬化横幅 $w = 40 \mu\text{m}$ の形状を照射量が 10% 変動しても $\Delta L = 2 \mu\text{m}$ の硬化深さの変動で製作したい場合は $\alpha = 5 \times 10^{-2} (1/\mu\text{m})$ 、 $r_{0\min} = 20 \mu\text{m}$ 、 $p_n = 9.3$ が得られる。

実際の製品製作においては直線経路に沿った描画だけでなく、例えば角をもつ形状の描画が必要になる。このとき、角部の内側と外側では実質的な照射量が異なる。さらにどのような描画装置を使用しても角部において描画の停止時間が存在するので、直線部分の硬化形状と角部の硬化形状は異なる。ビームが直線上を一定速度 v で描画し、角の部分で時間 t_s だけ停止した後、直角に方向を変えて再び描画した場合の硬化形

Fig. 5 Simulated shape of the solidified polymer when writing along a rectangular profile [$\lambda = 0.325 \mu\text{m}$, $R = 0.26 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ mm}$, $v = 10 \mu\text{m/s}$, $t_s = 2.17 \text{ s}$, $E_o = 0.34 \text{ mJ/mm}^2$]

Fig. 6 Experimental plots of the cross sectional outlines of the solidified polymer [$\lambda = 0.325 \mu\text{m}$, $R = 0.26 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ mm}$, $v = 10 \mu\text{m/s}$, $\alpha = 4.9 \times 10^{-2} (1/\mu\text{m})$, $E_o = 0.34 \text{ mJ/mm}^2$]

状は次式を満たす (x, y, z) の軌跡になる。

$$z = \frac{1}{\alpha} \log_e \left\{ \frac{\sqrt{2} P}{\pi \cdot r_{0\min} \cdot E_0 \cdot v} \right. \\ \times \left[\left(\int_0^{\sqrt{2} x / r_{0\min}} \exp(-q^2) dq + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \right. \\ \times \exp\left(-\frac{2y^2}{r_{0\min}^2}\right) \\ \left. + \left(\int_0^{\sqrt{2} y / r_{0\min}} \exp(-q^2) dq + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \right. \\ \left. \times \exp\left(-\frac{2x^2}{r_{0\min}^2}\right) \right] \\ \left. + \frac{2P \cdot t_s}{\pi \cdot r_{0\min}^2 \cdot E_0} \cdot \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_{0\min}^2}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

この計算値を図5に示す。図は形状を見やすいように樹脂の深さ方向を上にして示してある。すなわち下方から上向きにビームを照射し、上方に樹脂が硬化したようすを表している。図の(a)は吸収係数が 5×10^{-2} ($1/\mu\text{m}$)、(b)は 6.94×10^{-3} ($1/\mu\text{m}$) の場合で、直線部分における硬化深さが等しくなるようにビームパワーを選定してある。図より吸収係数が大きいと、直線部分

Fig. 7 Piled up profile
[$P=2.0 \mu\text{W}$, $\lambda=0.325 \mu\text{m}$, $R=0.26 \text{ mm}$, $f=50 \text{ mm}$, $v=10 \mu\text{m/s}$, $\alpha=4.9 \times 10^{-2}$ ($1/\mu\text{m}$), $E_0=0.34 \text{ mJ/mm}^2$, $\theta=60 \text{ deg.}$, $h=30 \mu\text{m}$]

と角部における硬化深さの違いは小さい。これに対し吸収係数が小さい場合、硬化深さの違いが大きく、実際に三次元形状の部品を製作する際には都合が悪い。

以上のように、吸収係数を大きくすることの効果を角部をもつ経路の描画を例にして示した。

4. 樹脂硬化実験

ここで実際に樹脂を硬化させて計算値と比較する。レーザビームの光源として He-Cd レーザ(波長 $\lambda=0.325 \mu\text{m}$)を使用する。レーザ発振器から出たビームを、レンズで集束して樹脂表面でビーム半径が最小になる位置で照射する。樹脂は X-Y テーブル上に塗布してあり、X-Y テーブルを移動させることによってビーム描画を行った。

感光性樹脂として不飽和ポリエステルを主成分とした旭化成工業(株)製 APR スタンプ樹脂(型取 20)を使用した。樹脂を硬化した後の現象は、アセトンで未硬化の部分を溶かす方法を用いた。この樹脂の吸収係数は $\alpha=6.94 \times 10^{-3}$ ($1/\mu\text{m}$) であるが、3章までで検討したようにこの値は三次元形状を製作するためには小さい。そこで、樹脂に染料ローダミン B($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$)を添加することによって吸収係数を高め、 $40 \mu\text{m}$ 程度の硬化深さ、硬化横幅が得られやすいように $\alpha=4.9 \times 10^{-2}$ ($1/\mu\text{m}$) とした。

図6に直線描画したときの硬化断面形状の測定値を計算値と比較して示す。図の丸印が測定値であり実線が計算値である。測定値と計算値の違いは $\pm 5 \mu\text{m}$ で、ほぼ一致している。

5. 樹脂積層構造の製作

実際にこの手法によって三次元形状を製作するためには一層描画した後、液状の樹脂を塗布し、さらに描画することを繰り返すことが必要になる。樹脂硬化形

Fig. 8 Examples of microstructures

状を直線で近似して積層させたときの形状については報告⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾がある。本報告では、4章までの検討により、樹脂硬化形状を明らかにすることができたので、式(6)を使って積層したときの硬化形状をより正確に計算することができる。このような積層構造の一例として、角度 θ だけ傾いた形状を段差 h で積層した形状の概略を図7(a)に示す。このとき、図の形状の左側と右側の表面の凹凸の値 WL , WR は次式で与えられる。

$$WL = \frac{h^2 \cdot \cos^2 \theta}{2\alpha \cdot r_{0\min}^2 \cdot \sin^3 \theta} \dots\dots\dots (13)$$

$$WR = \frac{r_{0\min} \cdot \sin \theta}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{\log_e \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{E_0 \cdot r_{0\min} \cdot v} \right)} - \sqrt{\log_e \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{E_0 \cdot r_{0\min} \cdot v} \right) - \alpha \cdot h} \right] + h \cdot \cos \theta \dots\dots\dots (14)$$

図7(b)に、実際に得られた硬化形状の電子顕微鏡写真を示す。実際に得られた形状は計算結果とほぼ一致する。図は凹凸が明確になるように、段差 h を大きくした場合について示しているが、段差 h を $10\mu\text{m}$ にしたときには $WL=1\mu\text{m}$, $WR=7\mu\text{m}$ が得られることになる。

以上のように、4章の実験から1回の描画による硬化樹脂の形状は計算値に対して $5\mu\text{m}$ 程度の寸法精度が得られ、本章の検討から、段差を $10\mu\text{m}$ にして積層していくと表面の凹凸の値は $1\mu\text{m}$ 程度になる。したがって図7の凹凸の小さい精度の良い側を表面にして必要箇所を塗りつぶすように硬化をさせていけば、目標形状に対して、表面粗さの精度は $1\mu\text{m}$ 、寸法精度は $5\mu\text{m}$ で製作することができる。

以上の検討結果を基にして、実際にマイクロ部品を製作した。この電子顕微鏡写真を図8に示す。この場合、積層の段差は $30\mu\text{m}$ 程度で製作した。図8(a)は図1で示したマイクロパイプである。図8(b)の構造をさらに積層することによって図8(c)の構造を製作できる。図8(d)に示すようなリング形状を製作することも可能である。

6. 結 論

(1) 集束したレーザービーム描画によるマイクロ部

品製作において、樹脂の吸収係数や照射量が樹脂硬化形状に及ぼす影響を調べ、三次元形状製作のための最適条件を理論的に検討した。

(2) 検討結果に基づいて、三次元構造のマイクロ樹脂部品を製作した。

最後に、本研究の一部は平成6年度文部省科学研究費補助金、一般研究(B)課題番号No.06452159によって行ったことを付記する。

文 献

- (1) Fan, L. S., Tai, Y. and Muller, R. S., *IEEE Trans. on Electron Devices*, **35** 6(1988), 724.
- (2) Mehregany, M., Gabriel, K. J. and Trimmer, W. S. N., *IEEE Trans. on Electron Devices*, **35** 6(1988), 719.
- (3) Ehrfeld, W., *Proc. of 1st Int. Conf. on Micro Electro Opto. Mechanic Systems and Components (Berlin)*, (1990), 521.
- (4) Guckel, H., Skrobis, K. J., Christenson, T. R., Klein, J., Han, S., Choi, B., Lovell, E. G. and Chapman, T. W., *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **1** 3 (1991), 135.
- (5) 山田勝美・中本剛・Abraha, P., 壬生周, *機論*, **57** 542, C (1991), 3400.
- (6) 中本剛・山田勝美・Abraha, P., 松田義基・KARYAWAN, *機論*, **60** 575, C(1994), 2407.
- (7) 山田勝美・中本剛・Abraha, P., KARYAWAN・伊藤昭, *機論*, **61** 581, C(1995), 304.
- (8) 小玉秀男, *電子通信学会論文誌*, **J64** C 4(1981), 237.
- (9) Yamada, T., Takato, N. and Kurokawa, T., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22** 10(1983), L636.
- (10) 中井孝・丸谷洋二, *レーザ研究*, **16** 1(1988), 14.
- (11) 中井孝・丸谷洋二, *電子情報通信学会論文誌 D*, **J71** D 2(1988), 416.
- (12) 丸谷洋二・中井孝, *レーザ研究*, **17** 6(1989), 410.
- (13) 丸谷洋二, *レーザ研究*, **18** 7(1990), 448.
- (14) Jacobs, P. F., *Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of Stereo Lithography*, Society of Manufacturing Engineering, Dearborn, M. I., (1992), 59.
- (15) 今村正人・孟陽・中川威雄, 第2回光造形システムシンポジウム, (1992), 32.
- (16) 橋原弘之・斉藤勝政, *精密工学会誌*, **59** 9(1993), 1477.
- (17) 橋原弘之・斉藤勝政, *精密工学会誌*, **60** 8(1994), 1117.
- (18) 橋原弘之・小島真一・五十嵐悟・斉藤勝政, *精密工学会誌*, **61** 1(1995), 117.
- (19) 単学伝・高木太郎・柳沢一向・中島尚正, *精密工学会誌*, **61** 3(1995), 420.
- (20) 高木太郎・中島尚正, *機論*, **59** 560, C(1993), 1255.
- (21) 川澄博通, *レーザ加工技術*, (1985), 24, 日刊工業新聞社.
- (22) 応用物理学会日本光学会, *微小光学の物理的基礎*, (1991), 73, 朝倉書店.