DVD光ヘッドによる卓上型光造形装置と高分解硬化特性*

浮田 宏生** 富村 明彦***

High Resolution Micro-photoforming Using a Spinner Laminated Layer and a DVD Optical Head

Hiroo UKITA and Akihiko TOMIMURA

A micro-photoforming whose unit laminated layer is made by a spinner is proposed. A high resolution of $2\mu\text{m}$ was confirmed to solidify a visible light curable resin using a DVD optical head. A $30\mu\text{m}$ diameter shuttlecock optical rotator was fabricated to indicate the possibility of 3D microstructures.

Key words: micro-photoforming, photofabrication, spinner, optical head, visible light curable resin, unit laminated layer, high resolution, 3D CAD, 3D microstructure, optical rotator

1. 緒 言

マイクロ構造の作製には、表面マイクロマシニング、LIGAプロセス、光造形などが目的に応じて使用されている¹⁾。形状が複雑な3次元構造の場合は、現在では光造形²⁾によるしかなく、レーザ光を走査して液状樹脂を硬化・積層してモデルを作製している。マイクロ構造デバイス技術の進展とともに³⁾、最近この光造形法の高分解能化が図られている⁴⁾⁵⁾。

深さ方向の分解能が積層膜の厚さで決まり、横方向の分解能が照射光のスポットサイズと露光量で決まることから、我々は単位積層膜作成方法と光源の改良を検討してきた⁶⁾。

本稿では、スピナによる液面規制方式とDVD用光ヘッドを光源としたマイクロ光造形を提案する⁷⁾。また、試作装置により基本性能を検証するとともに、光圧回転体⁸⁾などのマイクロ構造物作製について述べ、3次元微細加工法としての可能性を示す。

2. 高分解能マイクロ光造形方式の比較検討

表1はこれまでに提案されている高分解能光造形の比較である。2光子吸収方式は、近赤外の極短幅の大出力パルス(Ti:Sapphireレーザ)によりウレタン系樹脂内部に2光子吸収を発生し、光強度の2乗に比例する領域を光硬化して高分解を実現している(深さ方向: $2.2\mu\text{m}$, 横方向: $0.62\mu\text{m}$)⁴⁾。スーパーIHプロセス方式は、しきい値以下では硬化が進行しないという樹脂特性を積極的に利用した成形条件を与え、波長442nmのHe-Cdレーザで樹脂内部を直接硬化して高分解を実現している(深さ方向: $3\mu\text{m}$, 横方向: $0.5\mu\text{m}$)⁵⁾。いずれも特殊な樹脂の材料特性を利用して高分解能を実現していると言える。また、高価な特殊レーザが必要で装置も大型である。

一方、本論文で提案するスピナ方式⁶⁾は、遠心力で広げた厚さ数 μm の市販の可視感光樹脂⁹⁾を光造形することにより、深さ方向の高分解能化を図っている。また、光源に市販のDVD用光ヘッド¹⁰⁾を用いることにより、横方向の高分解能と低

Table 1 Comparison of proposed high resolution photoforming methods

Method	Two-photon ⁴⁾	Super IH ⁵⁾	Spinner ⁶⁾
Laser	Ti : Sapphire	He-Cd	DVD head
Wavelength (nm)	780	442	650
Power (mW)	50 kW (peak)	1.5	0.35
Resin	Urethane	Urethane	Acrylate
3D fabrication	Scanning a focused light spot inside the resin		Layer-by-layer
Depth (μm)	2.2	3.0	2.1
Lateral (μm)	0.62	0.5	1.0

価格・小型を実現している。以下では試作装置の構成と基本的な光造形特性、光圧マイクロ回転体の作製例について報告する。

3. スピナ方式マイクロ光造形装置の試作

3.1 試作装置の構成

図1は試作装置、図2は概略図である。装置は波長650nmの半導体レーザを搭載した用光ヘッド(開口数NA=0.6)、露光ビームの焦点位置を相対的に3次元制御するXYZステージ、極薄の可視感光樹脂膜を作成するスピナとこれらを一括して制御するPCから構成された卓上型(寸法: $450\times 300\times 320\text{mm}$)である。

3.2 試作装置の特徴

上記による光造形では、可視感光樹脂用の光源として光ヘッドを使用し、比較的安価に小型装置を構成できるほか、極薄膜

* 原稿受付 平成11年4月28日

** 正 会 員 立命館大学理工学部(草津市野路東1-1-1)

*** 学生会員 立命館大学大学院

Fig. 1 A micro-photoforming apparatus for fabricating 3D microstructures

Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus

Fig. 3 A coverslip vacuum-adsorbed on a spinner

の積層により高分解能の造形が可能である。

本スピナ方式では、マイクロポンプで供給された樹脂を遠心力で広げるので、厚さ数 μm 単位の積層膜を再現性よく作成できる。この樹脂膜厚はスピナの回転速度や樹脂の粘度で決まる。スピナ表面には、真空ポンプでカバーガラス(厚さ $170\mu\text{m}$)を吸引・固定し、光造形後はカバーガラスごと取り外すことにより、未硬化樹脂を容易に取り除くことができる(図 3)。

また、波長 650nm の DVD 用光ヘッドを光源としたので、スポットサイズ $1\mu\text{m}$ 以下の高分解能を実現するとともに、レーザに供給する電流より露光量の緻密な制御が可能になっている。

3.3 システムのインタフェース

まず、3次元CADソフトウェア「サイクロン Solid」によりマイクロ構造物を設計する。次にデータコンバートソフト「サイクロン Mover」により、STL形式(多面体データ)ファイルに変換する。そしてSTLスライスソフト「Auto Edit」により、等高線状にスライスしたデータを HPGL形式(ヒューレットパッカードのグラフィックランゲージ)ファイルに変換してコントローラに送る。コントローラは走査速度、走査方式、走査ピッチなどの情報を付加したデータを装置に転送して光造形を開始する。

4. 試作光造形装置の基本性能

4.1 焦点位置検出

光源として使用したDVD用光ヘッドの寸法は $30 \times 60 \times 19\text{mm}$ 、発振しきい値は 65mA で、通常は光出力 0.35mW (駆動電流 80mA)で使用している。光造形用光源として使用する場合の光ヘッドの作動距離(WD: レンズ面から焦点位置までの距離)は、光ディスク(屈折率: 1.5)なしで使用されるので、その集光位置は 1.949mm と計算できる(図 4 の z)。

そこで作動距離を基準にZ軸を上下し、取付け誤差を考慮した実際の焦点位置を検出した。図 5 は走査速度 $75\mu\text{m/s}$ 、樹脂膜厚 $5\mu\text{m}$ とし、焦点位置から Z 軸を $10\mu\text{m}$ ずつ上下に移動させて造形した結果である。同図の線図形造形結果から、高さ方向位置精度の許容値は $\pm 10\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。

Fig. 4 Working distance (focal point) of an optical head used for the micro-photoforming

Fig. 5 Line drawing with different focusing conditions

Table 2 Visible light curable resin specifications

Model	DF-200N(Nippon Kayaku)
Type	Acrylate resin
Appearance	Dark green viscous liquid Dark brown solid (After solidification)
Coefficient of viscosity	200cP/25℃ (0.2Pa・s)
Specific gravity	1.05-1.15
Index of contraction	7-8% (Liquid→Solid)
Index of refraction	1.49

4.2 樹脂膜厚分布

表 2 は本実験に使用した可視感光樹脂の特性である。樹脂はアクリレート系で、収縮率は7~8%である。スピナにより薄膜化した樹脂の、基板上での半径方向厚み分布を図 6 に示す。同図の横軸は基板上の半径位置、縦軸は樹脂膜厚、パラメータは回転速度である。樹脂膜厚はスピナ上に塗布した樹脂を蛍光灯で全面光硬化した後、引っかき傷を付け接触段差計で測定した。①~⑧は樹脂を364 μ l(マイクロリットル) 供給し、スピナを 30 秒回転させたときの各回転速度における樹脂膜厚分布である。回転速度とともに薄くなり、3460 rpm(図6⑧)で膜厚は4.5 μ mである。回転速度はそのまま、回転時間を 30 秒から 120 秒にすると、樹脂膜厚はさらに薄く 2.1 μ mになった(⑨)。なお、樹脂の粘度を下げることで樹脂膜厚をさらに薄くすることが可能である。

4.3 1次元光硬化特性

図 7 は合焦点位置で造形した場合の、樹脂膜厚 5, 10, 15 μ m に対する走査速度と硬化幅の関係である。膜厚が薄いほど硬化幅の走査速度依存性が小さい。樹脂膜厚 5 μ m では、走査速度 10~30 μ m/s で硬化幅約 3 μ m, 40~70 μ m/s で約 2 μ m, 80~100 μ m/s で約 1 μ m で、横方向に 1 μ m 程度の高分解能を実現している。

4.4 2次元光硬化特性

2次元の光硬化特性を調べるため、正方形(一辺 30 μ m)や円(直径 30 μ m)の基本形状マイクロ部品を作製した。設定条件を表 3 に示す。走査速度 25 μ m/s のとき、樹脂膜厚 10 μ m で硬化幅が約 7 μ m となる(図 7) ので、走査ピッチを約半分の 3.2 μ m に設定した。造形時間は正方形が 43 分/125 個、円が 70 分/125 個であった。なお、外周の走査は行っていない。光造形結果を図 8, 図 9 に示す。

図 8 を見ると、形状がいびつな部分やエッジ部がぼやけた分部(焦点不良部)が認められるので、今後は走査ソフトウェアの改良や自動焦点制御を導入する予定である。また、図 9 を詳細に観測すると右上りの走査になっているが、これはパルスモータの位置決めが完全に完了しないうちに次の動作に入っていたためであり、ソフトウェアの改善で対処可能である。

Fig. 6 Resin thickness distribution in radial direction on a wafer, spinner rotation speed as a parameter

Fig. 7 Relationship between scan speed and solidified width

次に、図 8 の横一列5個の正方形を接触段差計(触針の曲率半径12.5 μ m)で測定した。図 10 からわかるように、高さは平均 7 μ m で樹脂膜厚の 10 μ m より薄い(表面の凹凸は膜厚の数%)。これは、半硬化部が洗浄により溶解したと考えられるので、今後、光出力の増加や低速走査などにより対処する。

Table 3 Experimental conditions

Resin thickness	10 μ m
Laser power	0.35mW
Scan speed	25 μ m/s
Accelerated time	0.027s
Scan method	Single scan
Scan pitch	3.2 μ m

Fig. 8 Fabrication of squares and circles

Fig. 9 Examples of a 30 μm square and a circle

Fig. 10 Measurement results of the square pattern heights using a stylus profiler

5. 羽根型光圧回転体の作製

5.1 CADモデル

直径 30 μm の羽根型光圧回転体⁸⁾を作製するため、3次元 CADソフトにより設計を行い(図 11)、三角形のみで構成される STLデータへの変換を行った(図 12)。

5.2 光造形結果

図 12 の STLデータをスライスデータに変換し、単位積層膜による羽根型光圧回転体を作製した。設定条件は表 3 と同じであるが、回転体の羽根を精密に造形するため、レーザービーム走査ピッチを 3.2 μm から 2 μm に変更した。図 13 が造形結果であり、造形時間は約 9 分/25 個であった。

5.3 光造形構造物の評価

構造物の表面形状を観察するため、スパッタ装置により金を 50 nm 堆積し、SEM観察した(図 14)。構造物の表面は一部に損傷があるものの、全体としては均一である。なお、円の外周は滑らかでないので、走査ピッチの緻密化や外周走査の追加などの改良を行う予定である。

Fig. 11 Design of a shuttlecock optical rotator by 3D CAD

Fig. 12 Conversion to STL data

6. 結 言

単位積層膜の作成にスピナによる液面規制方式を採用したマイクロ光造形を提案した。光源には波長 650 nm の DVD 用光ヘッドを採用し、可視感光樹脂を用いて深さ方向 2 μm 、横方向 1 μm の高分解能を実現した。

また、マイクロ構造物として正方形、円、羽根型光圧回転体を作製し、微細立体加工技術としての可能性を示した。

今後は、形状を緻密化するとともに、積層により 3 次元マイクロ構造物を作製する。また、光ヘッドにより自動焦点制御を行う予定である。

Fig.13 An example of fabricated twenty five shuttlecock optical rotators (diameter: 30 μms). An enlarged view is shown at the center.

Fig.14 SEM observation of the photoformed microstructures

謝 辞

装置を作製いただいたデンケンエンジニアリング㈱の日浦昭二氏、山野健治氏、光ヘッドを提供いただいた松下電器産業

㈱の田中伸一氏、スピナステージを設計いただいた本学小西聡助教授、実験を手伝っていただいた牧田満也君に深謝します。なお、本研究の一部は立命館大学学術研究助成(大型装置・機器)、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の最先端分野研究開発提案公募プロジェクト(97S22-002)によった。

参 考 文 献

- 1) 浮田宏生: 光マイクロマシン技術の進展、電気情報通信学会誌, **81**, 12 (1998) 1234.
- 2) 中本 剛, 山口勝美, P.Abraha, 伊藤 昭, 三島邦裕: 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, 日本機械学会論文集C, **62**, 594 (1996) 667.
- 3) 浮田宏生: マイクロ光ピンセット、精密工学会誌, **65**, 5 (1999) 647
- 4) S. Maruo and S. Kawata: Two-photon-absorbed Photopolymerization for Tree-dimensional Microfabrication, Proc. IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS'97), (1997) 169.
- 5) K. Ikuta, S.Maruo and S. Kojima: New Micro Stereo Lithography for Freely Movable 3D Micro Structure - Super IH Process with Submicron Resolution - Proc. IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS'98) (1998) 290.
- 6) 富村明彦, 浮田宏生: スピナ方式マイクロ光造形による光圧回転体の作製、電気学会マイクロマシン研究会, **MM-99-11**, (1999) 27.
- 7) 浮田宏生, 山野健治: マイクロ光造形装置, 特願平09-140494.
- 8) E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi: Optically Induced Rotation of Anisotropic Micro-objects Fabricated by Surface Micromachining, Appl. Phys. Lett., **64**, (1994) 2209.
- 9) 田上英二郎: 光造形装置, レーザー研究, **24**, 4 (1996) 452.
- 10) Y.Komma, Y.Tanaka, K.Urairi, S.Nishino and S.Mizuno: Dual Focus Optical Head with a Hologram-Integrated Lens, Jpn. J. Appl. Phys., **36**, (1997) 474.

編 集 後 記

ノストラダムスが人類滅亡と予言した1999の7の月も幸いに何事もなく無事に過ぎ去ってくれたようです。1900年代も最後の年ですので、いわゆる「世紀末」論争が世界中でにぎやかですが、なぜ世紀末に何かが起きると騒ぐのでしょうか。確率論からすれば、大事件が世紀末に集中するはずはありません。どうも人間というのは、悪いことは早く忘れ去り新たなことを期待する大義名分を何かにつけて求めたがる習性があるようです。「境目」はそんな目的にかなう、最も簡単な大義名分になりやすいということなのでしょう。

技術開発でも「21世紀」や「次世代」という言葉がよく使われ、やはり「境目」にける期待は大きいようです。しかしそうと言っても、グローバルに開発競争が進められる今日では毎日が「境目」のようなもので、技術は急速に進展しています。なかでもFA関連技術の進展は早く、また広範囲な技術分野が含まれるため、さまざまな最新開発動向を常に整理しながら新たな技術開発を展開してい

かなくはなりません。そこで本特集ではFA制御とネットワーク技術に的を絞って、最新の技術動向を紹介することに致しました。

FA技術の大きな流れの一つは「オープン化」です。オープン化に不可欠な技術はネットワークですが、これを介して様々な情報が自由にやりとりできる環境が急速に整いつつあります。特に制御を対象にしたネットワークや、またそれを利用して上位管理系とシステムを情報的に統合し市場動向に迅速に対応できる製造システムを実現する仕組み、さらに工作機械用やロボットを対象としたネットワーク対応型の制御装置などが具体化してきております。特集ではまずこうした制御とネットワークの統合化技術を多角的に取り上げてみました。さらにFA制御装置に関しては、その基本性能である高速・高精度化の極限化もハード、ソフトの両面から着実に進んでおり、それらの現状も紹介してみました。

本特集で紹介した新技術ができるだけ早く実生産システムに取り入れられ、再び活力ある製造業が取り戻せる一助になれば幸いです。最後に、ご多忙中にもかかわらず執筆いただきました著者各位に厚く御礼申し上げます。(機械技術研究所・森 和男)