

動的光渦を用いたマイクロチューブの自在形成

Flexible fabrication of microtubes using a dynamic optical vortex

○正 丸尾 昭二 (横国大) 学 小澤 諒太 (横国大)

Shoji MARUO, Yokohama National University, maruo@ynu.ac.jp
Ryota OZAWA, Yokohama National University

Recently microstereolithography techniques have been actively developed as a tool to produce 3-D microdevices. As one of the promising applications, microtubes used for micro fluidic devices and artificial blood vessels have attracted much attention. However, microtubes fabricated by conventional microstereolithography systems have rough surface due to direct laser writing. Here we propose and experimentally demonstrate a novel method using an optical vortex. In our method, since microtubes are fabricated by scanning optical ring of optical vortex, the resultant microtubes have smooth surface. Such smooth microtubes will be useful for highly efficient micro fluidic devices and high-quality artificial blood vessels.

Key Words: Microstereolithography, Microtube, Optical vortex, Laguerre-Gaussian beam

1. 緒言

近年、医療や生物化学分野で、 μ TAS や DNA 分析装置などのマイクロ/ナノ流体デバイスが盛んに開発されてきた[1-3]。しかしながら、これらの流路の大半は、基板に内蔵されているため、血管再生の足場となる人工血管モデル[4]のようなチューブ状の3次元マイクロ流路の作製は困難である。そこで本研究では、3次元マイクロチューブの作製手法として、光渦と呼ばれるラゲールガウシアンビーム (LG ビーム) を用いたマイクロ光造形法を開発した。本手法では、従来の集光ビームによる点描画ではなく、リング状の LG ビームを用いた線描画となるので、滑らかなマイクロチューブを短時間で作製できる。さらに、チューブの直径を自在に制御することもできる。また、LG ビームを焦点面で動的に変化させながら積層造形すれば、複雑形状のマイクロチューブも作製できる。また、アレイ状の LG ビームを用いることで、複数のマイクロチューブを同時に一括造形することも可能である。

2. LG ビームを用いたマイクロ光造形システム

LG ビームは、ガウシアンビームの位相を、方位角方向に $l\theta$ 変調することで形成される光の渦のことである[5-7]。ここで、位相変調のパラメータ l は、波面のヘリシティを表す整数値であり、トポジカルチャージ (TC) と呼ばれる。また、 θ は $0 \sim 2\pi$ の位相変調を表す。この位相変調により、平行な波面はらせん状になり、中心は位相特異点となる。位相特異点では、光波は打ち消し合うので、光強度はゼロとなる。そのため、光強度分布はリング状に変形し、その直径は l に比例し、反対に、その光強度は l に反比例する。

本研究で、LG ビームを形成するにあたって構築した光学システムを Fig. 1 に示す。本システムでは、レーザーから発振されたレーザー光 (連続光、波長: 532 nm) が、可変 ND フィルターで所望のパワーに減衰され、その後、ビームエキスパンダーによって拡大される。拡大されたレーザー光は、コンピュータから入力された位相分布情報にしたがって、空間光変調器 (SLM) によって位相変調される。そして、レーザー光は、対物レンズの瞳径に合わせてリレー系レンズで縮小されたのち、対物レンズによって集光されることで、リング状の LG ビームを得る。LG ビームは3軸自動ステージ上の光硬化性樹脂に照射され、光のリングを光軸方向に走査することで、マイクロチューブを造形する。また、その様子は照明光によって CCD カメラで観察される。

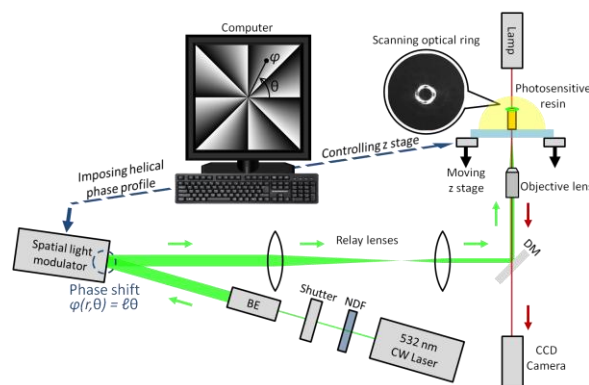


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental system

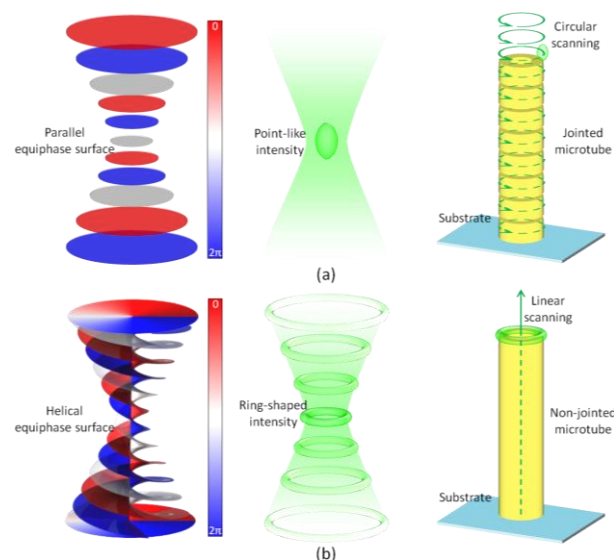


Fig. 2 Schematic of comparison between conventional microstereolithography method and our proposed one to fabricating microtubes (a) Conventional method using a Gaussian beam, (b) Our proposed method using a LG beam

3. LG ビームによるマイクロチューブの造形手法の提案

Fig. 2 に、LG ビームを用いたマイクロチューブの3次元光造形概念図を示す。本手法は、Fig. 2 (a)に示すような従来の集光ビームによる点描画ではなく、Fig. 2 (b)に示すようなLG ビームの線描画である。具体的には、LG ビームを光硬化性樹脂に照射し、ステージを用いて光のリングを光軸方向に走査することで、なめらかなマイクロチューブを造形する。従来法に比べて、走査量が大きく減るので、造形時間は大幅に短縮される。また、得られるチューブの表面に凹凸が生じないので、表面粗さも大幅に向上する。さらに、チューブの直径をTCによって制御することも可能である。そのうえ、LG ビームを面内方向に動的に変化させながら積層造形すれば、複雑形状のマイクロチューブを作製することもできる。また、アレイ状のLG ビームを用いることで、複数個のマイクロチューブを一括に造形することも可能である。

4. LG ビームによるマイクロチューブの積層造形

実際に、LG ビームを用いてマイクロチューブの作製を試みた。その結果、TCを変化させて、様々な直径のマイクロチューブ（高さ：50 μm）を作製できた。Fig. 3 に、TC2、TC4、TC8、TC16 の LG ビームによって造形されたマイクロチューブのSEM画像（軸方向から60°の角度で鳥瞰）を示す。

ここで、マイクロチューブの内径・外径が、TCとレーザーパワーに対してどのように変化するかを調査するために、TC1～10のLGビームを用いて、高さ5 μmの円筒を造形した。造形した円筒のSEM画像をFig. 4に示す。この結果から、リング形状の内径・外径を測定した。Fig. 5にレーザーパワー別の内径のTC依存性を示す。Fig. 5より、最小直径200 nm以下の空洞を持つ円筒の造形に成功した。また、円筒の内径は、レーザーパワーには依存せず、TCに比例して増加した。レーザーパワーに依存しないことから、リング状の光強度分布は鋭いピーク値となっており、さらに中央部の光強度は0であったと考えられる。また、内径がTCに比例したことは、リング径がTCに比例することに起因する。

Fig. 6にTC別の外径のレーザーパワー依存性を示す。円筒の外径は、内径とは逆に、TCに依存せず、レーザーパワーに比例して増加した。この結果に関して、LGビームによる硬化形状について考察した。まず、LGビームは、焦点を中心に光軸上に広がりをもつので（Fig. 7 (a)）、硬化物は広がりに沿った円錐台形状となる（Fig. 7 (b)）。円錐台の断面であるリング形状は、焦点から離れるほど大きくなる。したがって、硬化しきい値を超えたリング形状が最大の硬化サイズとなる。マイクロチューブの場合、リング形状の最大外径がそのままチューブの外径となる（Fig. 7 (c)）。

最後に、TC (ℓ)に対する内径 D_{in} [μm]と、レーザーパワー P [W]に対する外径 D_{out} [μm]の関係式をそれぞれ式(1)と式(2)にまとめる。

$$D_{in} = 0.105 \times \ell \quad (1)$$

$$D_{out} = 0.810 \times (P - 0.0728) \quad (2)$$

ここで、式(2)の0.0728 Wは硬化しきい値を表している。式(1)と式(2)の関係式を用いることで、TC (ℓ)とレーザーパワー P によって、マイクロチューブの内外径を自在に制御できる。

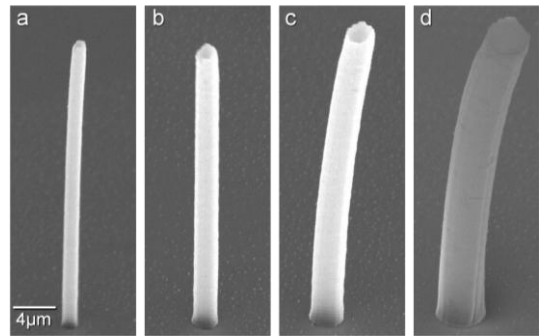


Fig. 3 Bird's-eye-view (60°) SEM image of the microtubes with different TC and laser power. (a) TC: 2, Laser power: 282 mW, (b) TC: 4, Laser power: 376 mW, (c) TC: 8, Laser power: 423 mW, (d) TC: 16, Laser power: 511 mW.

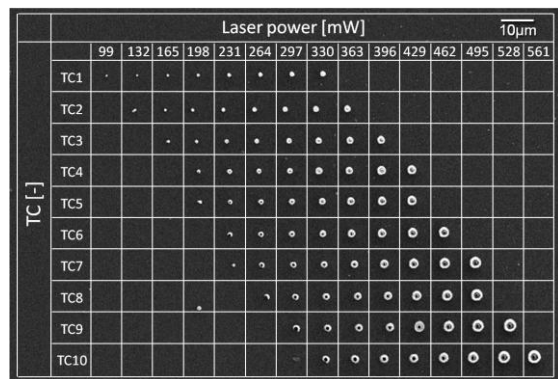


Fig. 4 Top-view SEM image of the microcylinders with different TC and laser power.

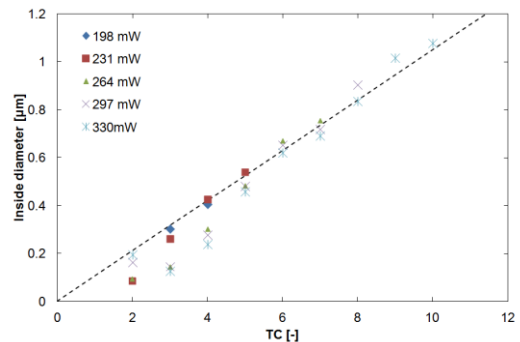


Fig. 5 Dependence of the inside diameters of microcylinders on TC with different laser power.

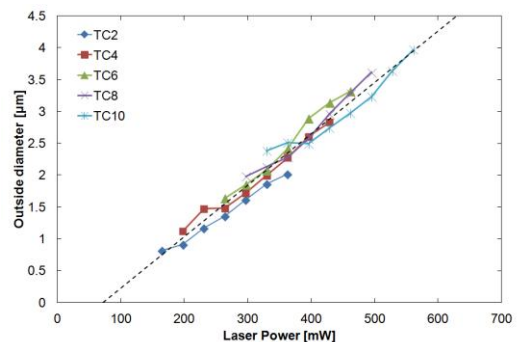


Fig. 6 Dependence of the outside diameters of microcylinders on laser power with different TC.

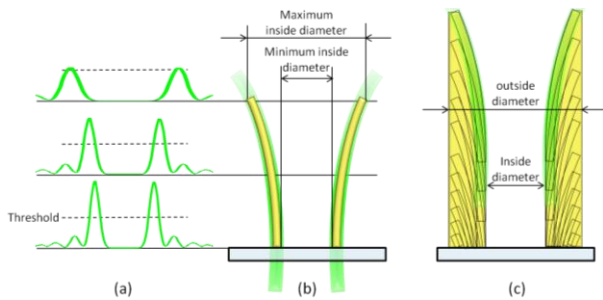


Fig. 7 Relation between polymerized region and inside and outside diameter of the cylinder.

5. 複雑形状のマイクロチューブの造形

提案手法の応用として、LG ビームを面内方向に動的に変化させながら積層造形することで、複雑形状のマイクロチューブの作製を試みた。具体的には、TC 8 の LG ビームを円形に走査させながら積層造形することで、らせん形状のマイクロチューブ (高さ: 72 μm) の作製に成功した (Fig. 8 (a))。さらに、TC を 20 から 10 へ減少させ、光のリングを縮小させながら積層造形することで、テーパ形状のマイクロチューブ (高さ: 11 μm) の造形にも成功した (Fig. 8 (b))。また、Fig. 9 (a) に示すような並んだ TC 8 の 2 つの LG ビームを同時に円形走査させながら、積層造形することで、2 つのらせん形状のマイクロチューブ (高さ: 72 μm) を一括で作製することに成功した (Fig. 9 (b), (c))。

6. まとめ

光渦を用いて、微細でなめらかなマイクロチューブを作製する造形法を提案・実証した。提案手法を用いて、LG ビームを光硬化性樹脂に照射しながら、ステージを用いて光のリングを光軸方向に走査することで、微細で高アスペクト比のマイクロチューブを作製することに成功した。また、TC とレーザーパワーを調整することで、様々な内外径のマイクロチューブを造形できることを実証した。さらに、直線状マイクロチューブだけでなく、テーパ状チューブや螺旋チューブ、2重螺旋チューブの造形にも成功した。このような微細でなめらかなのマイクロチューブは、高効率な流体デバイスや人工血管モデルへ応用が期待できる。

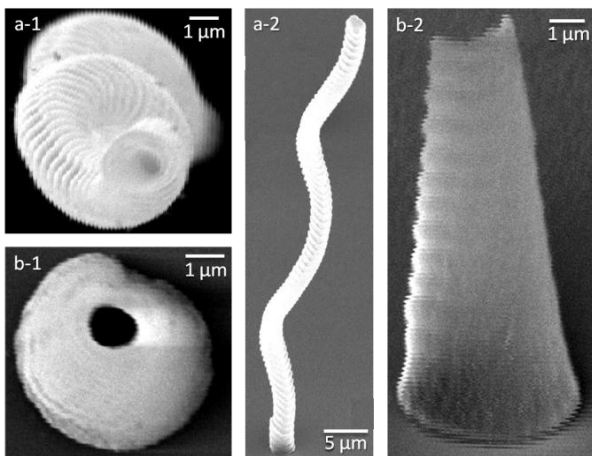


Fig. 8 SEM images of the complex shaped microtubes fabricated by dynamic optical vortex. (a-1) Top-view of a helical microtube, (a-2) Bird's-eye-view (60°) of a helical microtube, (b-1) Top-view of a tapered microtube, (b-2) Bird's-eye-view (60°) of a tapered microtube.

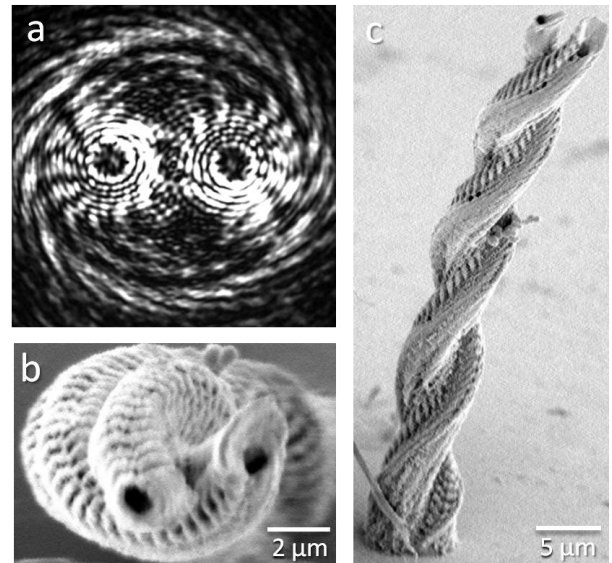


Fig. 9 SEM images of the double spiral microtube fabricated by scanning annularly the two LG beams with TC of 8 symmetric with respect to the optical axis. (a) Light intensity distribution at the focal plane, (b) Top-view of the double spiral microtube, (c) Front-view of the double spiral microtube.

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(A)の支援を受けて行われた。

文献

- [1] J. O. Tegenfeldt, et al., Anal. Bioanal. Chem. 387, 1678 (2004).
- [2] D. R. Reyes, et al., Anal. Chem. 74, 2623 (2002).
- [3] P. A. Auroux, et al., Anal. Chem. 74, 2637 (2002).
- [4] G. J. Wang, et al., Biomedical microdevices 9, 657 (2007).
- [5] J. E. Curtis and D. G. Grier, Phys. Rev. Lett. 90, 133901 (2003).
- [6] H. He, et al., J. Mod. Opt. 42, 217 (1995).
- [7] N. B. Simpson, et al., J. Mod. Opt. 43, 2485 (1996).