

# 3次元デジタルマイクロファブリケーション

丸尾昭二<sup>†1</sup>

本論文では、レーザー光を用いて任意の3次元マイクロ構造体を作製可能なマイクロ光造形法の原理と応用研究に関して、世界の最新動向を紹介する。さらに、我々が研究しているセラミックスモールディングや複製技術に関しても紹介し、今後の研究展開について述べる。

## Three-dimensional Digital Microfabrication

SHOJI MARUO<sup>†1</sup>

Microstereolithography is a laser direct writing technique to produce complex three-dimensional microstructures. In this paper, recent progress of microstereolithography is reported. In particular, we present the latest results and future prospects of our ceramics molding process and replication technique.

### 1. はじめに

最近、誰でも簡単に立体モデルを作製できる3Dプリンティング技術が注目を集めている。これまでラピッドプロトタイピングと呼ばれていた工業用の試作技術が発展し、一般ユーザーが自分でデザインした立体を自由に自作できるようになった。今後、「自宅が製造工場になる」というものの作りの産業革命を起こす原動力になるには、3Dプリンティング技術のさらなる発展が不可欠である。今後の展開として、一般ユーザー向けの廉価な3Dプリンターの普及と、プロフェッショナル向け3Dプリンターの大型化、高精度化、高速化などが期待される。本稿では、研究者の視点から3Dプリンティング技術に関する動向を概説し、3Dプリンティング技術のなかでも最も加工精度が高い光造形法に注目して、最近の造形技術と材料の進展、さらには3次元モールディング技術への展開について紹介する。

### 2. 3Dプリンティングの研究動向

3Dプリンターの造形法には、熱溶解樹脂を押し出して積層する方式 (Fused Deposition Modeling: FDM)、光硬化性樹脂をレーザー光で固める光造形法 (Stereolithography: SLA)、粉体をレーザー光で固める方法 (Selective Laser Sintering: SLS) や接着剤で固めるインクジェット方式などさまざまな方法が開発されている。使用材料も、ABS ライクからゴム状まで多種多様な機械的特性を持った樹脂材料が開発されている。さらに最近では、金属や砂型、セラミックス構造などを直接造形することも可能となっている。

図1に、Web of Scienceで学術論文の年間発表件数を調べた結果を示す(2013年7月現在)。この結果から、光造形法が最も古くから研究されている3Dプリンティング技術であり、研究論文数も最も多いことがわかる。

### 3. 光造形法の発明からマイクロ光造形法へ

光造形法は、レーザー光を用いて光硬化性樹脂を硬化させて積層することにより、所望の立体を作製する技術である。この技術は、1981年に小玉秀男氏によって発明され、米国の3Dシステムズ社や日本のシーメット株式会社、株式会社ディーメックなどが実用化し、自動車、精密機器、医療など幅広い分野で試作技術として活用されている。

光造形法の特長は、他の技術に比べて、加工分解能が極めて高く、透明な物体を造形できる点である。特に、「2光子マイクロ光造形法」[1-3]を用いれば、100nmの加工線幅でマイクロ立体構造を自在に作製できる。図2に、2光子マイクロ光造形法の原理を示す。この方法では、従来の紫外光による1光子吸収ではなく、紫外光の2倍の波長を持つ近赤外フェムト秒パルスレーザー光による2光子吸収によって樹脂を硬化させる。硬化する樹脂の形状は光軸方向に長軸を持つ楕円体(ボクセルと呼ぶ)となる。このボクセルの大きさは、2光子吸収の発生確率が光強度の2乗に比例するという特性から、集光スポットよりも小さくなる。したがって、レーザー光を樹脂の内部で3次元的に走査することにより、光の回折限界を超える加工分解能で複雑な3次元マイクロ構造を作製できる(図3)。

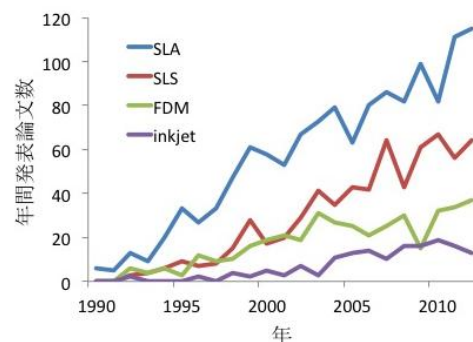


図1 3Dプリンティング研究の技術別研究動向

Figure 1 Research activities of 3D printing technologies.

<sup>†1</sup> 横浜国立大学  
Yokohama National University

現在、2光子マイクロ光造形法は、加工分解能、加工速度、適用材料などあらゆる面で研究開発が活発に進められている。また、ドイツの Nanoscribe 社から市販の造形装置も販売されており、フォトニクス、医療、マイクロマシン (MEMS) など幅広い応用研究が展開されている。以下では、2光子マイクロ光造形法の進展について詳しく述べる。

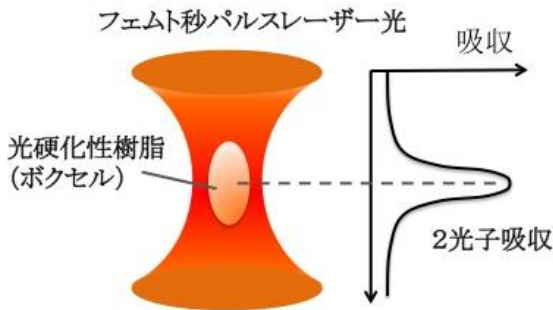


図 2 2光子マイクロ光造形の原理

Figure 2 Fabrication principle of two-photon microfabrication.

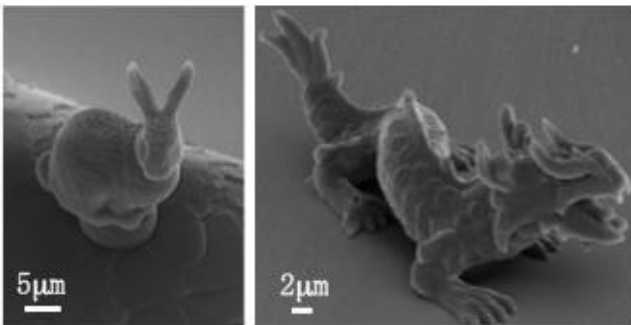


図 3 2光子マイクロ光造形によって作製された  
 3次元マイクロ構造体

Figure 3 Three-dimensional microstructures fabricated by  
 two-photon microfabrication.

#### 4. サブ 100nm の加工線幅を実現する新技術

一般的な2光子マイクロ光造形装置では、光源に Ti: Sapphire レーザーなどのフェムト秒パルスレーザーが用いられている。レーザー光は、対物レンズを用いて樹脂中に集光させ、焦点近傍の樹脂を選択的に硬化させる。硬化するボクセルの形状は、2光子吸収の2乗特性から光強度を2乗した分布に従うと予測される。しかし実際には、閾値以上の領域しか硬化しないため、ボクセルは2乗分布よりもさらに小さくなり、120nm の線幅が実証されている[2].

この加工線幅をさらに細くするには、いくつかの方法がある。例えば、Haske らは、可視光を用いて2光子造形を行い、65nm の加工分解能を達成している[4]. 最近では、樹脂を硬化させるレーザー光に加えて、硬化反応を阻害するレーザー光を同時に照射することで、樹脂が硬化する領

域を制限し、加工分解能を向上させる方法がいくつか提案されている[5]. 図 4 は、代表的な例として、硬化用レーザーと同時に、ドーナツリング状の強度分布を持つ硬化阻害用レーザーを照射する方法の模式図である。このように硬化用レーザーの集光スポットの周囲に、硬化阻害用レーザーを照射することで、ボクセルサイズをより小さくすることができる。例えば、Fourkas らは、フェムト秒パルスレーザーの焦点に、同波長の連続光をドーナツ状に集光させて、奥行き方向に 40nm の加工線幅を実証している[6]. また、Wegener らは、蛍光顕微鏡の3次元分解能を数 10nm まで向上させる STED(Stimulated emission depletion)法を用いた2光子造形法を開発し、65nm の加工線幅を実証している[7, 8]. 今後、さらなる高分解能化が進展すると考えられる。

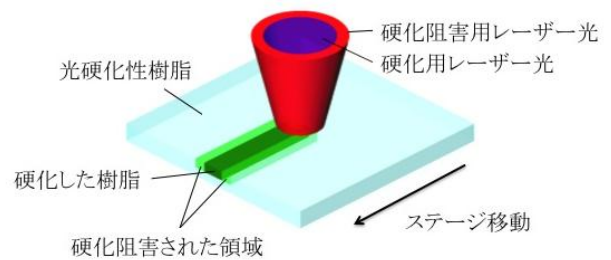


図 4 サブ 100nm の加工分解能を実現する光造形

Figure 4 A novel method of sub-100 nm stereolithography.

#### 5. 単品生産から鋳型技術による量産へ

2光子マイクロ光造形法の実用化に向けては、生産性の向上が不可欠である。なぜなら、光造形法はレーザー走査による単品生産であるため、大型モデルの造形や大量生産する場合には長時間を要するからである。この課題の解決法として、Li らは、高効率な光重合開始剤を開発し、従来法に比べて2桁以上の高速描画を達成している[9].

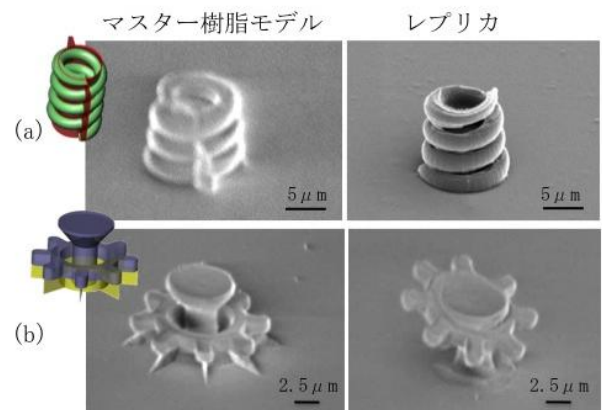


図 5 シリコン樹脂型を用いた

メンブレンアシスト法による3次元微小構造体の複製

Figure 5 Replication of three-dimensional microstructures  
 using membrane-assisted transfer molding with a silicone mold.

一方、生産性を向上する別のアプローチとして、光造形によって作製した3次元樹脂モデルを母型として、ポリジメチルシロキサン (PDMS) を用いて鋳型を作製し、3次元微細構造を複製する技術が開発されている[10,11]. 特に、Fourkasらは、閉ループ構造に薄膜パーティションを付与するメンブレンアシスト転写法を提案し、ブリッジモデルや螺旋形状などの複雑構造の複製も実証している[10]. また、我々は、この方法を発展させて、円筒薄膜パーティションを用いて、バネやマイクロギアを複製することに成功した[11] (図5). この技術を用いればマイクロマシンの量産も可能となる.

## 6. 樹脂モデルから多様な材料への展開

マイクロ光造形法を次世代の製造技術に発展させるには、作製した3次元モデルの材質を光硬化性樹脂だけでなく、より高機能な高分子材料や、金属、セラミックスなど多種多様な材料を拡張することが望ましい. そこで、新しい感光性材料が次々と開発されている.

例えば、金属の3次元マイクロ構造体を作製する方法として、金属イオンや金属塩を含有させたポリマー薄膜や溶液を用いて、光還元反応によって金属構造を造形する手法がある. 特に我々は、導線性を有する3次元的な銀配線の作製を実証している[12]. また、磁気ナノ微粒子を混合した樹脂を用いて外部磁場によって制御可能なマイクロタービンやバネなども試作されている[13]. さらに、造形した樹脂モデルに無電解メッキを施して、金属製マイクロ部品を作製する方法も実証されている[14]. 今後、これらの金属製マイクロ構造体の作製技術を活用すれば、プラズモニクスやメタマテリアルなどの次世代光デバイス、電子デバイスの立体配線、MEMS実装技術など幅広い応用が期待される.

また、コラーゲンやアルブミンなどの生体高分子を用いた造形や、また、生体適合性のある光硬化型PDMSも開発されており、医療、細胞工学、ラボオンチップなどへの応用が検討されている[15, 16].

## 7. 鋳型技術によるセラミックス構造の作製

我々は、感光性材料だけでなく、多種多様なセラミックス材料を用いて3次元マイクロ構造体を作製する鋳型技術の開発に取り組んでいる(図6). 本手法では、光造形で樹脂鋳型を作製し、セラミックス微粒子からなる高濃度スラリーを用いてセラミックス構造体を形成する. 具体的には、樹脂鋳型にスラリーを注入し、これを乾燥する. そして、ポリマーモデルを熱分解によって除去した後、焼結することで、鋳型の反転形状をもつセラミックス構造体を形成する. これまで、シリカ微粒子スラリーを用いて3次元マイ

クロ流体回路を作製した[17]. また、バイオセラミックスを用いて歯や骨を再生するための足場も作製した[18]. 図7は、1光子マイクロ光造形法によって作製した樹脂モデルを鋳型として、バイオセラミックスを用いて作製した耳小骨モデルの例である. 樹脂鋳型によって最終製品の形状を規定できるため、後加工無しで複雑な3次元構造体を一体成形できる. 最近では、圧電セラミックスを用いてスパイラル状の振動発電素子も開発している(図8)[19]. 従来の振動発電素子は、2次元的な片持ち梁構造が主流であり、1方向の振動エネルギーしか利用できないが、スパイラル状発電素子は3次元的な振動エネルギーを電気エネルギーに変換できるため、発電効率の向上が期待できる.

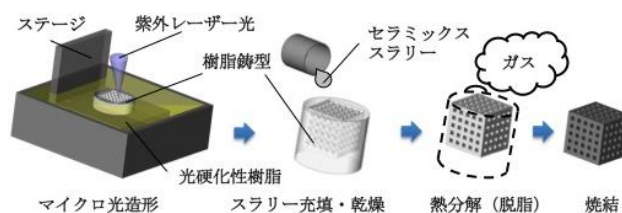


図7 マイクロ光造形セラミックスモールドイング  
 Figure 7 Three-dimensional ceramics molding process using microstereolithography.

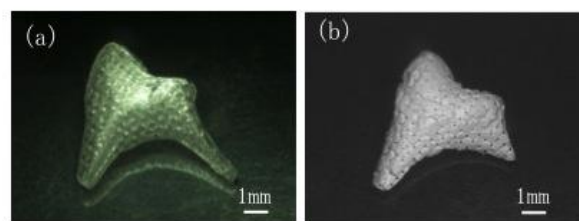


図8 バイオセラミックス足場の作製  
 (a)樹脂型 (b)バイオセラミックス焼結体  
 Figure 8 Fabrication of a bioceramic scaffold  
 (a) Polymer mold (b) Sintered body.

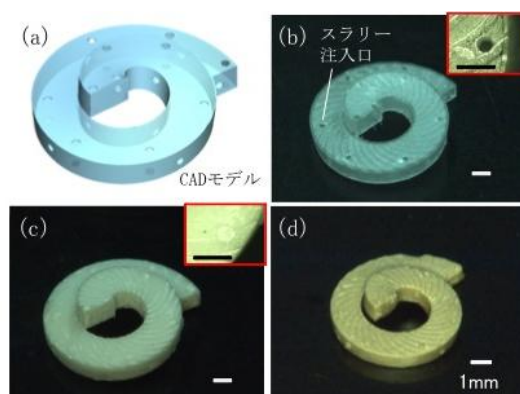


図8 圧電セラミックスを用いた振動発電素子の作製  
 (a)CADモデル (b)樹脂型 (c)乾燥体 (d)焼結体  
 Figure 8 Fabrication of a vibration energy harvester using piezoelectric ceramics (a) CAD model (b) Polymer mold (c) Green body (d) Sintered body.

## 8. おわりに

2光子マイクロ光造形法は、3次元マイクロ・ナノ構造体を自在に形成でき、かつ数10nmの加工分解能を達成できる有望な3次元造形技術である。感光性樹脂だけでなく、鋳型技術と融合することで、適用材料がさらに広がり、幅広い応用展開が期待できる。今後は、大面積化や大量生産技術が実現できれば、ナノフォトリクス、医療、MEMSなど幅広い応用が期待できる。

**謝辞** 本研究は、科学研究費助成事業・基盤研究(B)の助成を受けて行われたものである。

## 参考文献

- 1) Maruo, S. et al.: Opt. Lett. Vol. 22, No. 2, pp. 132–134 (1997).
- 2) Kawata, S. et al.: Nature Vol. 412, Issue 6848, pp. 697–698 (2001).
- 3) 丸尾昭二: 光アライアンス, Vo. 18, No. 11, pp. 31–35 (2007).
- 4) Haske, W. et al.: Opt. Express, Vol. 15, Issue 6, pp. 3426–3436 (2007).
- 5) Fischer, J. et al.: Laser & Photonics Reviews, Vol. 7, Issue 1, pp. 22–44 (2013).
- 6) Li, L. et al.: Science, Vol. 324, No. 5929, pp. 910–913 (2009).
- 7) Fischer, J. et al.: Adv. Mater., Vol. 22, No. 32, pp. 3578–3582 (2010).
- 8) Fischer, J. et al.: Opt. Mater. Express, Vol. 1, Issue 4, pp. 614–624 (2011).
- 9) Li, Z. et al.: Macromolecules, Vol. 46, Issue 2, pp. 352–361 (2013).
- 10) LaFratta, C. N. et al.: Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 103, No. 23, pp. 8589–8594 (2006).
- 11) Maruo, S. et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 6, 06FH05 (2009).
- 12) Maruo, S. et al.: Opt. Express, Vol. 16, Issue 2, pp. 1174–1179 (2008).
- 13) Zhang, Yong-Lai et al.: Nanotoday, Vol. 5, Issue 5, pp. 435–448 (2010).
- 14) Ikegami, T. et al., J. of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 8, No. 1, pp. 6–10 (2013).
- 15) Cunningham, L. P. et al.: Opt. Express, Vol. 14, Issue 19, pp. 8613–8621 (2006).
- 16) Coenjarts, C. A. et al.: Chem. Mater., Vol. 16, Issue 26, pp. 5556–5558 (2004).
- 17) Inada, M. et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 6, 06FK01 (2009).
- 18) Torii, T. et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 6, 06GL15 (2011).
- 19) Monri, K. et al.: Sensors and Actuators A, Vol. 200, pp. 31–36 (2013).