

研究課題別評価書

1. 研究課題名

3次元ナノ光造形マルチモーディング

2. 氏名

丸尾昭二

3. 研究のねらい

マイクロ光造形法は、サブ 100nm の加工分解能で任意の 3 次元マイクロ・ナノ構造体を形成できるため、ナノフォトニクスや MEMS、バイオ研究などに幅広く活用されている。本研究のねらいは、マイクロ・ナノ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、ソフトモーディングとハードモーディングの2つの手法を用いて、種々の材料からなる 3 次元マイクロ・ナノ構造体を形成することである。ソフトモーディングでは、ポリジメチルシロキサン(PDMS)を鋳型に用いて、マイクロ可動部品など複雑な3次元立体構造の複製を行う。ハードモーディングでは、セラミックス微粒子からなるスラリーを鋳型材料に用いて樹脂モデルをセラミックス構造に転写・複製する技術を開発する。これらの光造形を基礎とする立体モーディング技術によって、3次元 MEMS デバイスや高機能ラボオンチップのラピッドマニュファクチャリングをめざす。

4. 研究成果

2光子マイクロ光造形は、100nm を凌ぐ 3次元加工分解能をもち、任意の 3次元マイクロ・ナノ構造を形成できる技術であり、ナノフォトニクスやMEMSなどの分野で幅広く応用研究が行われている。しかしながら、2光子マイクロ光造形法は、レーザー描画による単品生産であるため生産性に限界がある。また、適用材料として2光子吸収に感度の高い材料しか用いることができないなど、実用化への課題がある。そこで本研究では、モーディング技術によって、3次元微細構造を複製する技術を開発し、光造形法の加工自由度と加工分解能の高さを活かしつつ、量産性の向上と適用材料の拡大を狙った。

まず、モーディングに用いる母型となる 3次元マイクロ・ナノ構造体を高精度に作製するために、光造形における洗浄過程の改良に取り組んだ。通常、2光子マイクロ光造形では、3次元CADモデルデータに従って、光硬化性樹脂中でフェムト秒パルスレーザー光を集光・走査することで立体を造形する。造形後、未硬化の光硬化性樹脂を取り除く際には、有機溶媒によるウエット洗浄が行われる。造形物が微小・微細になると、この洗浄過程において、表面張力の影響により造形物に歪が生じてしまう。このため、高精度な造形が困難となっていた。そこで、超臨界洗浄・乾燥プロセスを新たに導入し、表面張力の影響なく造形物を取り出す方法を確立した。図1は、マイクロピラーアレイを造形したのち、ウエット洗浄と超臨界乾燥によって取り出した場合の実験結果を示している。この結果から、超臨界洗浄・乾燥を行うことで、表面張力による形状のくずれを大幅に低減し、微細な立体構造を精度よく作製できることが実証できた。

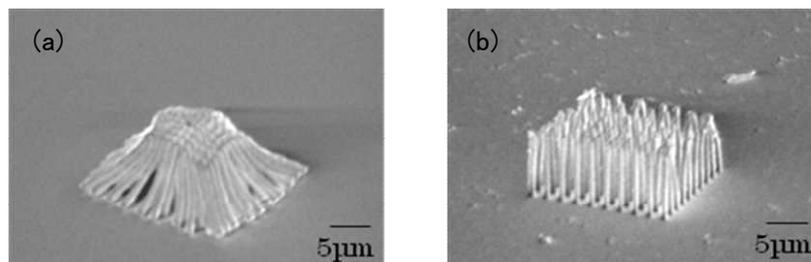


図1 マイクロピラーアレイの造形例(a)ウエット洗浄による結果(b)超臨界乾燥による結果

次に、3次元マイクロ構造体を母型として、シリコン樹脂の1種であるポリジメチルシロキサン(PDMS)を鋳型に用いたソフトモールドング技術(図2)の開発に取り組んだ。PDMSは伸縮性、自己吸着性に優れており、3次元微小構造の鋳型作成に適している。また、透明性が高く、光硬化性樹脂を鋳型に充填した場合でも、外部から紫外線露光により注入した樹脂を容易に硬化できるという利点もある。図3は、PDMSの伸縮性・透明性を活用して複製した3次元マイクロ構造体の例である。密集したマイクロピラーアレイや、複雑形状のウサギモデルなども容易に複製できることがわかる。

さらに、円筒薄膜を用いてマイクロ可動部品を複製する方法を考案した(図4)。この方法では、可動部品モデルの母型に円筒および平面薄膜を適切に付与することで、PDMS鋳型の内部に可動部が包含されるのを防ぎ、PDMS型を離型して、マイクロ可動部品を複製できる。図5は、本手法を用いて複製したマイクロギアやマイクロピンセットの例である。この複製プロセスの歩留まりは、薄膜の厚み、高さ、位置、さらには充填する光硬化性樹脂の特性などに依存する。実験条件を最適化することで、複製の成功率を75%程度まで向上した。その結果、複数の可動部品を同時に複製することも可能となった。さらに、複製したマイクロ可動部品を光ピンセットによって遠隔駆動させることにも成功した。

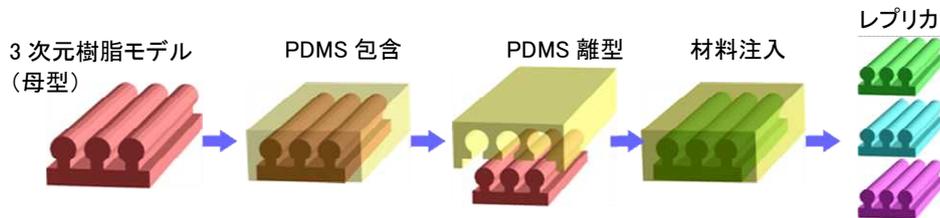


図2 PDMSを用いたソフトモールドング技術

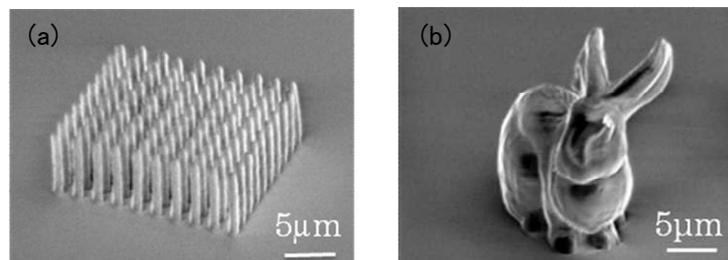


図3 ソフトモールドングによる3次元構造体の複製(a)ピラーアレイ(b)ウサギモデル

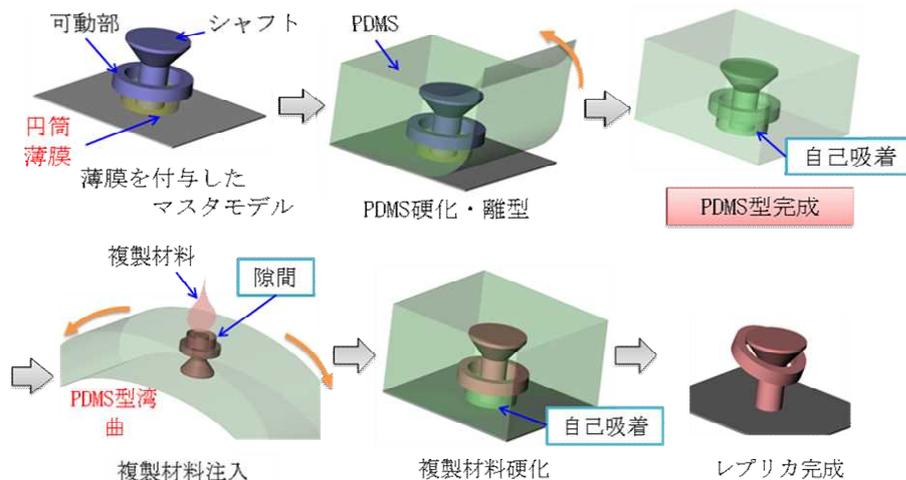


図4 円筒薄膜を用いたマイクロ可動部品の複製プロセス

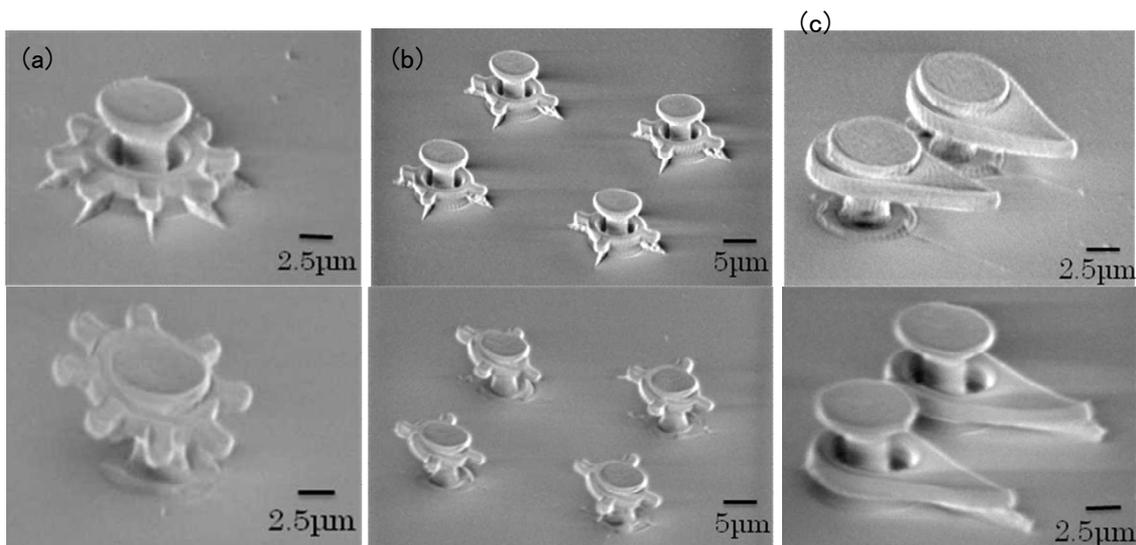


図5 マイクロ可動部品の複製例(上:マスター、下:レプリカ)
 (a) マイクロギア(b)複数マイクロギア(c)マイクロピンセット

また、マイクロ可動部品の応用研究として、光駆動マイクロ流体制御素子の開発にも取り組んだ。図6は、光を照射することによって高速回転するスパイラルロータ(直径: $4\mu\text{m}$)を用いたマイクロ粘性ポンプの例である。右巻きと左巻きの螺旋構造を上下に配置したスパイラルロータによって、数 100rpm の高速回転を実現し、U字型流路に沿った液体輸送を実現した。このような光駆動マイクロポンプは、セルソーターや連続流を利用した化学合成分析など高機能ラボオンチップへの応用が期待できる。

さらに、微弱なレーザー光によって遠隔駆動が可能な「光電駆動マイクロマシン」を新たに提案・開発した(図7)。このマイクロマシンでは、光導電性基板に光を集光して局所電場を形成し、その局所電場によって物体に誘電泳動力を与えて、マイクロマシンを遠隔駆動させる。基礎実験において、1mW 程度の微弱レーザー光でもマイクロギアやマニピュレータの駆動が可能であることを確認した(図7)。従来の光ピンセットによるマイクロマシン駆動には、数 W 程度の高出力レーザーが必要であったが、本システムでは、その千分の一以下の微弱レーザー光でマイクロマシンを遠隔駆動できる。したがって、この光電駆動マイクロシステムは、低コストかつコンパクトな高機能ラボオンチップ・システムの駆動原理として極めて有望であると考えている。

一方、適用材料の拡張を目指して、セラミックススラリーを用いたハードモールドイング技術の開発にも取り組んだ。本手法では、セラミックススラリーで包含した樹脂モデルを熱分解して、3次元構造をセラミックスに転写する。まず、光硬化性樹脂の熱分解特性を解析し、所望の重量減少率を実現する昇温条件を決定した。この最適化した昇温条件によって、 SiO_2 微粒子(平均粒径: $340\mu\text{m}$)を用いた構造転写実験を行った(図8)。その結果、3次元フレームの樹脂モデルから透明なシリカ構造体を形成することができた。このハードモールドイング技術は、多様なセラミックス微粒子を用いることによって、フォトニクス、ラボオンチップ、Power MEMS、医療ツールなど幅広い応用が期待できる。

以上述べたように、本研究では、3次元マイクロ・ナノ光造形技術を用いて作製した3次元微細構造体を母型として、マイクロ可動部品を含む複雑形状を有する立体構造の複製を可能とするソフトモールドイング技術を確立した。また、種々のセラミックス材料を用いて3次元構造を転写・複製するハードモールドイング技術を開発し、従来法では加工が困難なセラミックスの完全立体加工を可能とした。これらの立体モールドイング技術は、3次元 MEMS デバイスや、ラボオンチップ、マイクロ医療ツールなど幅広い分野への応用が期待できる。

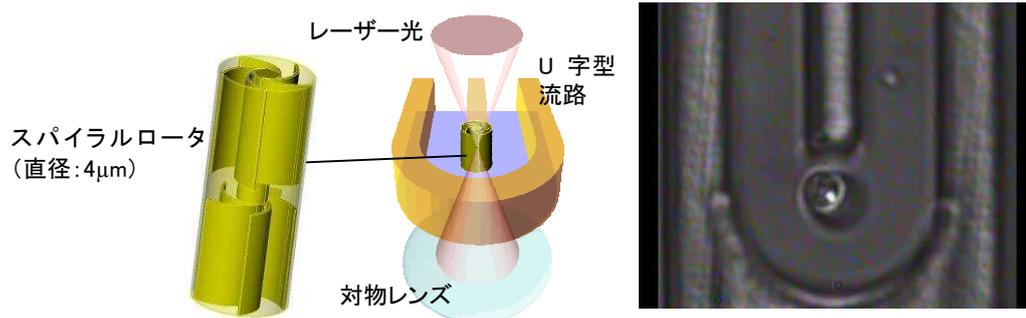


図6 スパイラルモータを用いた光駆動マイクロポンプ

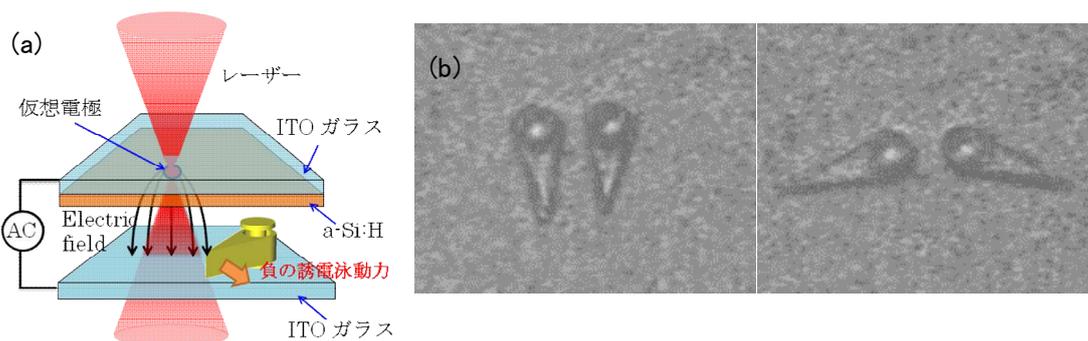


図7 光誘起誘電泳動を利用したマイクロマシンの駆動実験
(a) 駆動原理 (b) ピンセットの開閉動作 (アーム長さ: 30 μm)

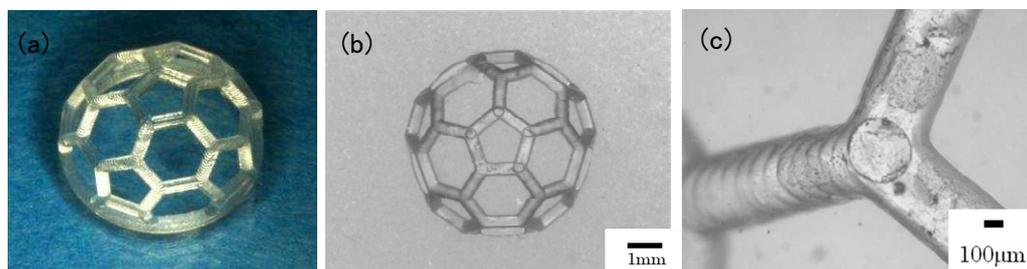


図8 セラミックススラリーを用いたハードモールドイングによる透明シリカ構造体の作製
(a) 樹脂モデル (外形: 6mm) (b) 転写されたシリカ構造体 (c) シリカ構造体のフレーム拡大写真

5. 自己評価

ソフトモールドイングにおいては、当初の目標であったマイクロ可動部品の複製を実証することができた。また、複製した可動部品の駆動にも成功し、我々が目指している光制御ラボオンチップの量産化に向けて大きく前進したと考える。また、光駆動マイクロマシンへの応用研究では、光照射によって高速回転するスパイラルモータを用いた粘性ポンプの開発に成功した。さらには、当初計画にはなかった、微弱レーザー光によって遠隔駆動可能な「光電駆動マイクロマシン」を提案・実証することもできた。今後、ソフトモールドイングによるマイクロ可動部品の複製技術と、光電駆動マイクロマシンを組み合わせ、高機能なラボオンチップを開発したい。一方、ハードモールドイングに関しては、樹脂の熱分解によるクラックの発生や、シリカスラリーに含まれる不純物による焼結体の白濁など課題が多数あり、当初計画よりも研究の進捗が大幅に遅れた。しかしながら、最終的にはクラックのないシリカ構造体の転写に成功し、2光子造形によって作製したマイクロ構造体の複製も実証できた。今後、種々のセラミックス構造体を利用したマイクロデバイスの応用研究を展開したい。

6. 研究総括の見解

3次元ナノ光造形技術を用いてマイクロ・ナノ立体構造を作製し、種々の機能性材料に転写する技術を開発するために、ソフトモールドイングとハードモールドイングの手法を用いて、マイクロ・ナノ構造体を形成することを目標とした。その結果、母型構造体を高精度に作製するために、超臨界洗浄・乾燥プロセスを新たに導入し、表面張力の影響なく造形物を取り出す手法を確立した。ソフトモールドイングでは、母型に円筒や平面薄膜を付与すること、また実験条件を最適化することで、マイクロ可動部品など複雑な3次元立体構造の複製率を75%程度までに向上させ、可動部品を同時に複数複製することを可能とした。また複製した可動部品の駆動にも成功し、光ピンセットによる遠隔駆動、光照射高速スパイラルモータを用いた粘性ポンプ開発、また微弱レーザー光による光電駆動マイクロマシン等、幾多の提案と実証が行えたことは、本技術が実用技術として十分なレベルに達していることとして大きく評価できる。さらにハードモールドイングでは、最終的にはクラックのないシリカ構造体の転写に成功し、マイクロ構造体の複製も実証できたことは大きな成果である。今後は、3次元MEMSデバイスや、ラボオンチップ、マイクロ医療ツールなど幅広い分野への応用の期待がもてる。

7. 主な論文等

A. さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

①論文(原著論文)発表

1. S. Maruo, A. Takaura, and Y. Saito, "Optically driven micropump with a twin spiral microrotor," *Optics Express* **17**, Iss. 21, 18525–18532 (2009).
2. S. Maruo, T. Hasegawa, and N. Yoshimura, "Single-anchor support and supercritical CO₂ drying enable high-precision microfabrication of three-dimensional structures," *Optics Express* **17**, Iss. 23, 20945–20951 (2009).
3. S. Maruo, T. Hasegawa and N. Yoshimura "Replication of Three-Dimensional Rotary Micromechanism by Membrane-Assisted Transfer Molding," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, no. 6, 06FH05 (2009).
4. M. Inada, D. Hiratsuka, J. Tatami and S. Maruo, "Fabrication of Three-Dimensional Transparent SiO₂ Microstructures by Microstereolithographic Molding," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, no. 6, 06FK01 (2009).
5. S. Maruo and H. Inoue, "Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk," *Appl. Phys. Lett.* **91**, no. 8, Art No. 084101 (2007).

②特許出願

研究期間累積件数: 4件

1. 発明者: 丸尾昭二、井上宏之
発明の名称: マイクロポンプ
出願人: 横浜国立大学
出願日: 平成19年1月17日
2. 発明者: 丸尾昭二、長谷川拓也
発明の名称: 微小構造体の移動方法
出願人: 横浜国立大学
出願日: 平成19年3月12日
3. 発明者: 丸尾昭二、長谷川拓也
発明の名称: 微細構造造形方法
出願人: 横浜国立大学
出願日: 平成19年9月3日

③受賞

1. IEEE International Symposium on Micro-nanomechatronics and Human Science (MHS) 2007 Best paper award
対象論文: A. Takaura, H. Inoue, S. Maruo「Laser-driven viscous micropump

using a single microrotor」

受賞日:平成 19 年 11 月 14 日

2. 財団法人手島工業教育資金団 工業技術研究賞

受賞内容:「Optically driven micropump produced by three-dimensional two-photon microfabrication」

受賞日:平成 20 年 2 月 20 日

④著書

1. S. Maruo(分担執筆), Chapter 7(pp.275-314): Manipulation of Microobjects by Optical Tweezers, *Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis Systems, MEMS Reference Shelf*, Hardt, Steffen; Schonfeld, Friedhelm (Eds.) 2007, (Springer).
2. S. Maruo(分担執筆), Chapter 12(pp.291-309): Optically Driven Micromachines for Biochip Application, *Nano- and Micromaterials Series: Advances in Materials Research*, Vol. 9, Ohno, K.; Tanaka, M.; Takeda, J.; Kawazoe, Y. (Eds.) 2008 (Springer).
3. 丸尾昭二(分担執筆), “第 6 節立体加工技術 3.マイクロ光造形,”MEMS/NEMS 工学全集,桑野博喜監修(株式会社テクノシステム),pp.368-377(2009).

⑤学会発表

[招待講演]

1. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2007 (Baltimore) “Micro and nanostereolithography for production of lab-on-a-chip devices”(2007 年 5 月)
2. International Symposium on Novel Nano-Electro-Mechanical 3D Structures: Fabrication and properties “Microfluidic devices produced by microstereolithography”(2008 年 10 月)
3. International Conference on Nanophotonics 2009 (Harbin) “Multiphoton microfabrication and replication technique for MEMS application”(2009 年 5 月)
4. CLEO/Pacific Rim “Femtosecond laser stereolithography and replication technique for MEMS application”(2009 年 8 月)