

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630089

研究課題名(和文) 金属化マイクロタービンの超高効率な光駆動メカニズムの解明と応用

研究課題名(英文) Investigation of optical driving mechanism of highly-efficient metalized microturbine and its application

研究代表者

丸尾 昭二 (Maruo, Shoji)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00314047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我々が発見した金属化マイクロタービンの超高効率な光駆動現象のメカニズムの解明を目的として、実験と解析によって駆動メカニズムの調査を行った。実験では、金属化させた樹脂製造形物にレーザー光を照射した際の光吸収による発熱現象を観察し、温度分布を計測した。また、マルチフィジックス解析により、光吸収による発熱、熱対流の連成解析を行い、レーザー照射による発熱によって生じるマイクロタービンまわりの流れを解析した。さらに、より高速かつ安定に回転するコマ型マイクロタービンを考案し、試作と駆動検証実験を行った。その結果、数mWの微弱レーザーで550 rpm以上の高速かつ安定な回転駆動を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the highly-efficient optical driving mechanism of a metalized microturbine. In experiments, we observed the temperature distribution around the metalized microstructure when a laser beam was irradiated. As a result, we confirmed the temperature of the surrounding liquid around the metalized microstructure was increased as the laser power was increased. In addition, the temperature increase and resultant flow generation were analyzed by multiphysics simulation. As a result, we confirmed the simulation results were similar to the experimental results. By analyzing the flow generated by the temperature increase, we found that the flow is too low to rotate the microturbine. We guess that surface tension due to temperature increase will be dominant to rotate the microturbine. Finally we demonstrated that a novel type of microturbine like a spinning top. The spinning-top microrotor was fabricated and rotated at high speed over 550 rpm at a ultralow laser power.

研究分野：3次元微細加工

キーワード：光ピンセット マイクロ光造形 マイクロマシン ラボオンチップ

1. 研究開始当初の背景

レーザー光の力(光の放射圧)を用いて微小物体を把持する「光ピンセット技術」は、細胞や DNA などの生体試料、さらにはマイクロマシンなどを操作する方法として広く利用されている。我々は、世界に先駆けて開発した「2光子マイクロ光造形法」を用いて作製したポリマー製マイクロマシンを流体回路に内蔵させて、レーザー光で遠隔駆動する「光駆動マイクロ流体制御素子」を提案・開発してきた。これらの研究成果は、世界的に注目され、欧州やアジアでもマイクロ光造形法を用いて光駆動マイクロ流体制御素子を作製する研究が広まっている。しかしながら、これまでの光駆動マイクロ流体制御素子は、透明な誘電体で形成されているため、光の放射圧が非常に小さく、対象物体を自在操作するために1W以上の高出力レーザーが必要であるという課題があった。

そこで本研究では、従来のポリマー製のマイクロマシンに金属をコートすることで、1mW以下の超微弱なレーザー光でも駆動可能な金属化マイクロマシンの創製を目指している。これまでに我々は、基礎実験によって、光造形によって作製したマイクロマシンに無電解銅めっきを行い、金属化マイクロマシンを作製する手法を確立した。さらに、ごく最近では、作製した金属化マイクロタービン(図1)が、0.7mWという超微弱なレーザー光でも高速回転できることを発見した。このような高効率な光駆動は、光の放射圧だけでは実現できないものであり、レーザー光が金属面で吸収されて局所的に熱が発生し、熱対流が生じているのではないかと推測した。本研究では、金属化マイクロマシンの駆動時に発生している発熱現象を解析的および実験的に調査し、その駆動メカニズムを明らかにすることを目指す。そして、この駆動メカニズムを解明することで、より高効率に駆動が可能な光駆動マイクロマシンの創製を目指す。

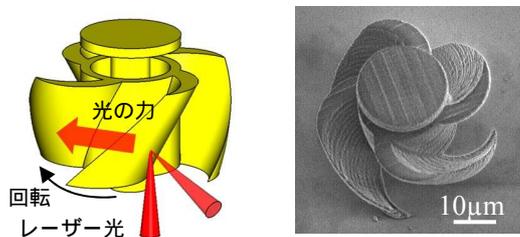


図1 金属化マイクロタービンの光駆動法と造形例

2. 研究の目的

本研究では、金属化マイクロタービンの超高効率な光駆動メカニズムの解明を目指す。実際に、金属化マイクロタービンにレーザー光を照射した際の温度分布を計測し、駆動現象を調査する。さらに、タービンに作用する力として、光放射圧、光誘起熱泳動、流体抵

抗などを総合的に考慮したマルチフィジックス解析によって、タービンの回転運動を解析する。以上の実験と解析の知見から、超効率な光駆動メカニズムの物理モデルを構築し、高効率な光駆動マイクロ光ミキサーなどへ応用を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、我々が発見した金属化マイクロタービンの超微弱レーザー光による駆動現象のメカニズムを実験と解析によって解明する。実験では、金属化させた樹脂製造形物にレーザー光を照射した際の光吸収による発熱現象を観察し、蛍光色素による温度分布の可視化を行う。また、マルチフィジックス解析により、光吸収による発熱、熱対流、回転による流体抵抗などを考慮したマイクロタービンの回転シミュレーションモデルの構築を目指す。そして、このモデルに基づき、最適なマイクロタービンを設計し、更なる高効率駆動を実現する。最終的には、高速回転マイクロタービンを用いたアクティブマイクロ光ミキサーを設計・試作し、高機能な光制御ラボオンチップへの応用を目指す。

4. 研究成果

まず、蛍光色素の発光強度の温度依存性を利用して、金属化した樹脂構造体にレーザー光を照射した際に生じる発熱現象を観察し、温度分布を可視化する実験を行った。図1に、温度測定用に作製した直方体樹脂モデル(40μm×40μm×2μm)および、無電解銅めっき処理を施した金属化樹脂モデルの光学顕微鏡写真を示す。

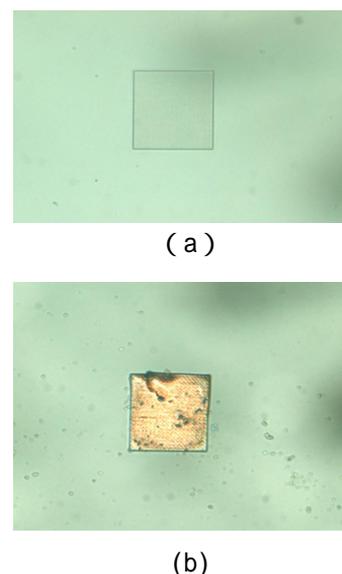
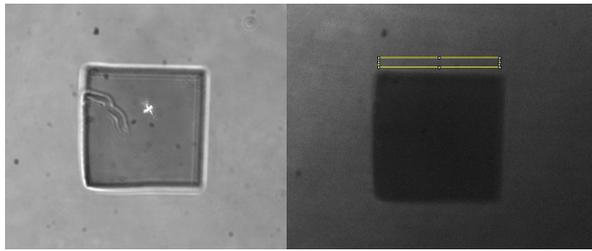


図1 温度測定に用いた直方体樹脂モデルおよび無電解銅めっきされた樹脂モデル(a)銅めっき前(b)銅めっき後。(40μm×40μm×2μm)

この金属化した直方体樹脂モデルに He-Ne レーザー(波長 633nm)を照射して、温度上

昇を計測した。図2は、この直方体モデルにレーザーを照射している様子と、蛍光観察像である。表1は、このときの測定条件である。



(a) (b)
図2 レーザー照射による蛍光観察実験 (a) He-Ne レーザーによる加熱 (b) 蛍光観察像と温度計測定領域 (枠線内)

表1 蛍光観察条件

対物レンズ	PLN 40x/0.65
蛍光色素	ローダミン B
蛍光溶液濃度	1000mg/L
溶媒	エタノール
励起光強度	13.2mW (波長 488nm)

図2 (b)の領域における蛍光強度(I)の変化を、レーザー照射前の光強度(I₀)で規格化した値のレーザー強度依存性を図3に示す。この結果から、レーザー強度の上昇とともに蛍光強度が減衰していることがわかる。また、実際に温度計測を行って、蛍光強度と温度のキャリブレーションを測定した結果を図4に示す。これらの結果から、レーザー照射によって直方体の周辺温度が26.2 となっており、約 5 の温度上昇が見られることがわかった。

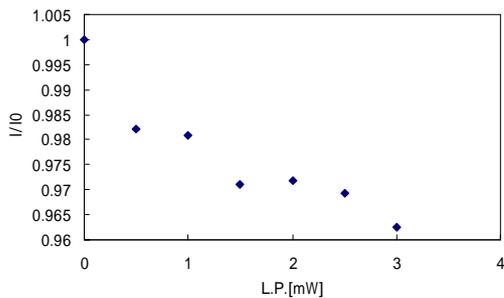


図3 レーザー強度と蛍光強度の関係

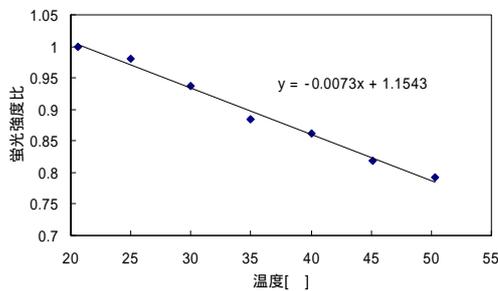


図4 蛍光強度と温度の関係

一方、マルチフィジックス解析によって、金属化直方体の周辺温度分布の解析を行っ

た。図5に解析例を示す。この結果から、先の実験と同条件でレーザー照射した場合には、約 28 の温度となっており、温度計測実験の妥当性が確認できた。

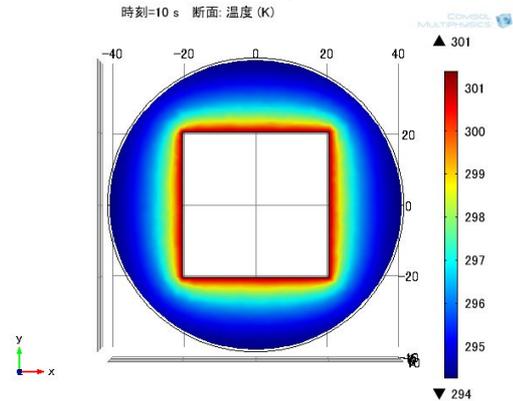


図5 金属化直方体の温度分布解析

次に、実際のタービン形状をモデル化し、伝熱(固体) 伝熱(流体)および流体の流れ(層流)の連成解析を行った。図6および図7に解析結果の例を示す。

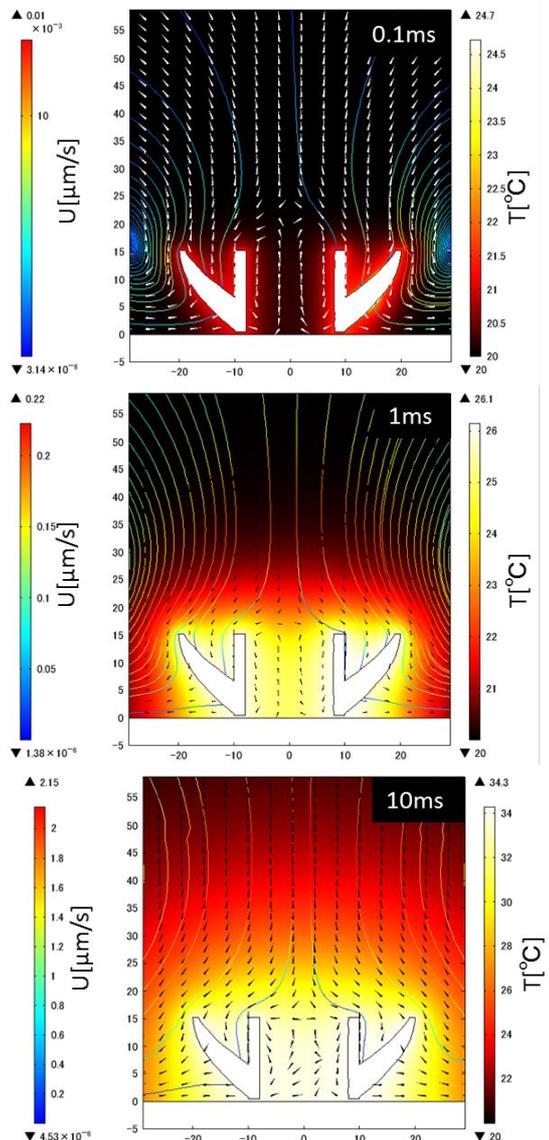


図6 温度・流速分布のXZ断面の時間変化

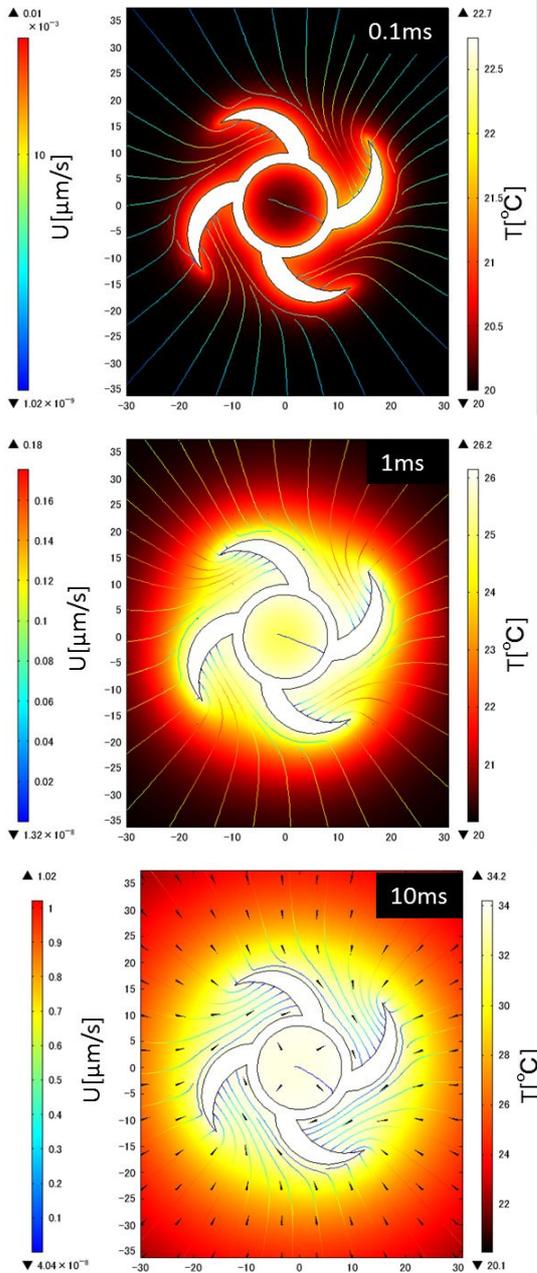


図7 温度・流速分布のXY断面の時間変化

これらの結果から、レーザー照射による加熱が始まって数ミリ秒以内に急速な温度上昇が見られることがわかった。

しかしながら、タービン周辺における流速は、数 $\mu\text{m/s}$ であり、温度分布による対流だけでは、実験で観測されたような高速回転は得られないということがわかった。

今後、解析方法として、温度分布に起因して生じる表面張力の違いによって生じる流れを考慮したタービンの回転モデルを構築することで、超高率な金属化マイクロタービンのモデル化を行いたいと考えている。

金属化マイクロタービンの駆動メカニズムの解析と平行して、より高精度かつ高効率なタービンの設計・試作にも取り組んだ。従来のタービンは、シャフトと羽根部が一体化しておらず、レーザー照射によって羽根部が

傾くことで、回転が不安定になるという課題があった。そこで、この問題を解決し、より安定な回転が得られるコマ型マイクロタービンを考案した(図8)。このタービンは、シャフトと回転部が一体化しており、シャフトが上下の軸受けで高精度に支えられている。このため、回転が安定する。また、羽根部が連続的に重なる形状となっており、レーザー照射によって連続した回転が得られるという特徴もある。

図9に試作したコマ型マイクロタービンの電子顕微鏡写真を示す。シャフトと一体化したコマ型マイクロタービンと、軸受けが高精度に造形できていることがわかる。

このコマ型マイクロタービンに、He-Ne レーザー光を集光、円形に走査することで回転させる実験を行った。その結果、約 4mW のレーザー出力で、550 rpm 以上の回転数で安定した回転が得られることがわかった。今後、マイクロミキサー等への応用が期待できる。



図8 コマ型マイクロタービンの模式図

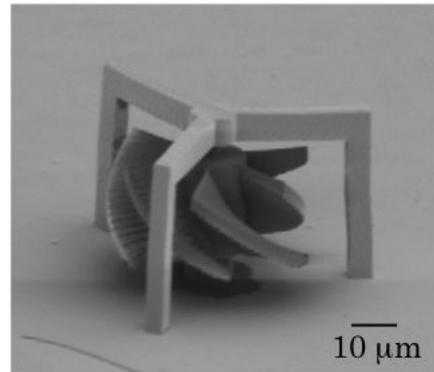


図9 コマ型マイクロタービンの造形例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5件)

- (1) 丸尾昭二, “フェムト秒レーザーによる3次元造形と無電解めっきによる金属化マイクロマシンの作製,”精密工学会誌(印刷中).
- (2) 丸尾昭二, “レーザーマイクロ造形によるマイクロマシンの作製,”O plus E, 第37巻, 第2号, 92-95 (2015).
- (3) 丸尾昭二, “マイクロ・ナノ光造形,”日本機械学会誌, 第118巻, 第1154

- 号, 26-29 (2015).
- (4) 丸尾昭二, “マイクロ光造形・鋳型技術の開発と機能デバイスの創製,” 日本ゴム協会誌, 第 87 巻, 第 9 号, 382-388 (2014).
- (5) 丸尾昭二, “3次元マイクロ・ナノ光造形による機能構造体の開発,” スマートプロセス学会誌, 第 3 巻, 第 3 号, 175-181 (2014).

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) Daishi Tsubaki and Shoji Maruo, “Fabrication of a high-precision metalized microturbine using two-photon microfabrication and electroless copper plating,” The 15th International Union of Materials Research Societies-International Conference in Asia 2014, (Aug. 28, 2014).
- (2) 椿大志, 丸尾昭二, “2光子マイクロ光造形法と無電解銅めっきを用いた高精度金属化マイクロタービンの開発,” ロボティクス・メカト ロニクス講演会 2014, (May 28, 2014).
- (3) 丸尾昭二, “レーザー光を用いた高精度 3D プリンティング技術の開発と応用,” 電気学会神奈川支所講演会、神奈川 (Feb. 18, 2014) (国内学会招待講演).
- (4) 丸尾昭二, “3次元デジタルマイクロファブ리케이션,” 情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 第 153 回研究発表会, 福岡 (Nov. 28, 2013) (国内学会招待講演).
- (5) Shoji Maruo, “Microscale three-dimensional laser printing and molding for MEMS application,” The third Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2013), Deajeon, Korea (Nov. 1, 2013) (国際会議招待講演).
- (6) Shoji Maruo, “Functional lab-on-a-chip devices produced by two-photon microfabrication,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto (July 3, 2013) (国際会議招待講演).

〔図書〕(計 2 件)

- (1) (分担執筆) S. Maruo, Chapter 12.3 “Remotely driven micro machines produced by two-photon microfabrication,” Three-Dimensional Microfabrication Using Two-Photon Polymerization: Fundamentals, Technology, and Applications (Micro & Nano Technologies book series), Editor Tommaso Baldacchini (Elsevier, 2015) (印刷中).
- (2) (分担執筆) 丸尾昭二, 第 5 章第 2

節 “マイクロ・ナノ光造形法による次世代造形技術,” 産業用 3D プリンターの最新技術・材料・応用事例 (シーエムシー出版 2015) (印刷中).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mnt.ynu.ac.jp/mlab/Index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸尾昭二 (Maruo Shoji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 00314047