

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	大分工業高等専門学校 電気電子工学科
職位または役職	准教授
氏名	田中 大輔

1. 研究題目


スマート医療用ロボットのための光ナノモータの設計

2. 研究目的

本研究では、人間の体内で動作するスマート医療ロボットのための光ナノモータ(下図)の基礎技術の確立に関する研究により、「私たちの豊かな生活」に貢献する。具体的には、提案するサブシェル型光ナノモータの液中および大気中での動作特性を実験的に評価するための光学系の構築を継続し、最終的にナノモータの回転特性(特にその操作性と安定性)を評価する。

提案するサブシェル型ナノモータの構造と特徴

- 体外からの**近赤外光**で動作
- 90%以上の**エネルギー変換効率**
- **生体適合性**材料で構成
- **コイルレス、ワイヤレス**
- 気体中でも液体中でも動作
- モータ特性を外部光で制御可



金キャップ
+
薬剤粒子
} サブシェル構造

光渦の波長・偏光度によって3次元軸に対する回転自由度を持った光駆動ナノモータ



3. 研究内容及び成果

(研究目標)

i. 溶液中でのナノモータの動作評価システムの設計・構築

ii. 液中・大気中でのナノモータの動作評価

(研究成果 i)

現在、大分高専内に設置されている暗室の一部区間を共同利用し、その中でナノモータの動作評価システムの設計・装置を継続して行っている。図 1 に概略図を示す。本予算でハイスピードカメラ(K7-USB モノクロ、カトウ光研株式会社)を購入し、十分に回転動作を評価可能であることを確認している。第一段階として、光の入射方向軸に対する 1 次元の回転動作を観察するための光学系を構築中である。

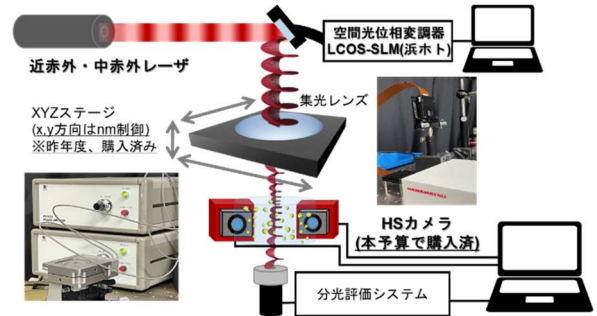


図 1. 回転動作評価システムの概略図

(研究成果 ii)

現在までにナノモータ粒子を固定基板(図 2 のように孤立状態のナノモータ粒子基板は作製済)から剥離し、溶液中に分散させた状態を維持するまで完了しており、大分県産業科学技術センターの協力を仰ぎながら複数のナノモータ粒子からの光学応答の評価を行っている。既存装置では S/N 比が悪く、測定が難しかったため、光電子増倍管を組み込んだ系を構築中である。

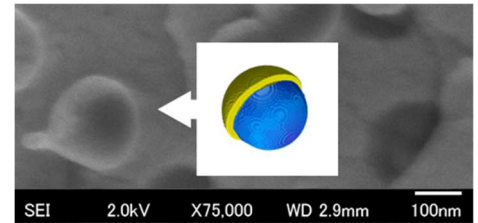


図 2. ナノモータ粒子基板の SEM 像

ナノモータの動作を顕微観察するにあたって、回折限界以下のナノ粒子の周辺にマイクロ構造の構築が必要となる。これについて呉高専の江口准教授、長岡技術科学大学の中田特任講師、北九州産業学術推進機構 共同センターの竹内氏らと共同研究を進め、フォーカスイオンビーム(FIB)リソグラフィによって顕微観察可能な一辺が 10 μm のマイクロ構造を削り出し、所望する位置で固定可能であることを確認している(図 3)。ただし、図からわかる様に、底面が斜めになっており、所望する立方体構造を作るには至っていない。今後は犠牲層エッチングなど他の手法も並行して検討する予定である。所望するマイクロ構造が作製可能な条件が決定した後、図 2 のサブシェル構造を内包し、顕微観察可能なモータ構造を作製する。

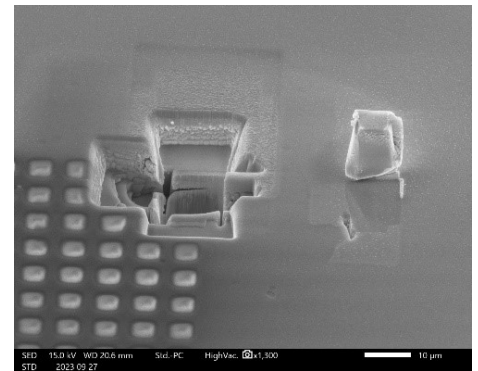


図 3. 作製した SiO₂ マイクロ構造の SEM 像

(その他の研究成果)

モータ構造に採用するコア材料についての検討を行った。高い光圧変換効率を実現するために、コア材料に半導体(Si で $n \sim 4$)を採用した場合についての計算を行った。この条件では、ミー型共鳴となるため、大きな変換効率が見られると期待した。結果を図 4 に示す。コア材料を高屈折率とすると、光散乱や光吸収のピーク値を非常に大きくできることがわかった(10 倍以上)。1 次元軸に対しての光圧も 10 倍以上、大きくなる(変換効率 10 倍)ことを確認している。しかし、構造の非対称性に由来する光学異方性がほとんどなくなることもわかった。3 次元軸に対するトルクは発生せず、1 次元軸に対する回転トルクになることが示唆され、適切な屈折率範囲があることがわかった。SiO₂ よりも高屈折率の TiO₂ をコアとした場合に 3 次元のトルクが発生することを確認している。

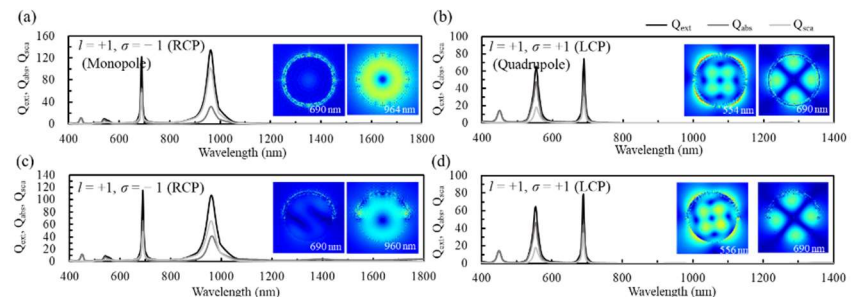


図 4. 高屈折コアのサブシェル粒子の光学スペクトルと電場分布図

4. 今後の研究の見通し

今後も継続して光学系の構築と、顕微観察のためのマイクロ構造の作製条件の探査を行っていく。マイクロ構造の作製については、呉高専 江口准教授、長岡技術科学大学 江村技術補佐員、古野 URA、らと FIB 加工の最適条件の探査を行い、底面を基板に対して平行に切断する新たな手法の開発を目指す。イオンビームの照射エネルギーによって、図 5 のように基板への加工精度に大きな差が出るのがわかっており、現実的に精度の良いマイクロ構造の作製を目指し、継続して共同研究を実施する予定である。

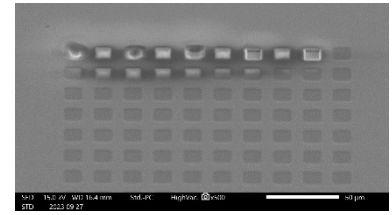


図 5. FIB 強度と切削状態

並行して、現在は過去の文献(図 6)を参考に、犠牲層エッチングによる手法も検討している。この手法の利点は、マイクロ構造底面が必ず基板に対して平行になる点であるが、構造作製後のハンドリングが非常に困難であるため、作成後に Si 表面から剥離し、特定の場所に固定化する手法の確立が必要になる。まずは目視できる大きさの構造を作製可能か実験を行い、並行してハンドリング手法について検討する予定である。また、溶液に分散したナノモータ粒子、およびマイクロ構造中に固定化したモータ粒子の光学特性評価についても大分県産業科学技術センターの協力を仰ぎながら継続して行っていく。

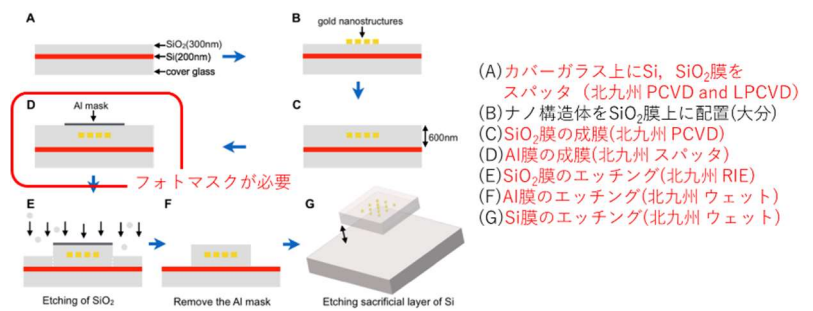


図 6. 犠牲層エッチングによるマイクロ構造作製工程

モータ構造については、現在のセミシェル構造外の構造についても数値シミュレーションによる検討を行っており、例えば図 7 のようにサブシェル構造よりも対称性の高い場合に 3 次元軸に対してどのような回転トルクが発生するのか、などについて数値計算を実施しており、継続して調査する予定である。

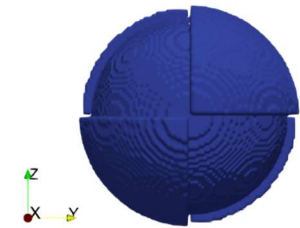


図 7. 新規ナノモータ構造

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

- 1) Daisuke Tanaka^{*}, Shungo Harajiri, Yuto Fujita, Kayn A. Forbes, Tien Thanh Pham, David L. Andrews, Multipole excitation of localized plasmon resonance in asymmetrically coated core-shell nanoparticles using optical vortices, *Laser and Photonics Reviews* (accepted). Manuscript Number: lpor.202300536
- 2) Nguyen, Thi Anh Vui; Nguyen, Quang Huy; Nguyen, Hoang Giang; Nguyen, Thi An Hang; Do, Danh Bich; Tanaka, Daisuke; Ha, Minh Hiep; Pham, Tien Thanh^{*}, Single-step fabrication of a large-scale broadband sunlight absorber based on multiple directional grating structures, *Scientific Reports*, Submission ID 9a8f0d03-8279-4fc3-a55e-cfb55b769e51(submitted, 関連の業績)

国際会議(査読付)

- 3) The 11th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP11) (2024)にて報告予定

国際会議(査読なし)・国内会議

- 4) Yuto Fujita, Daisuke Tanaka, "Optical properties of subshell structure", Satellite ICAI(BAGIS Track)@Imaging Conference JAPAN 2023, P8, 千葉大学, 令和 5 年 6 月 28 日~令和 5 年 6 月 30 日(ポスター発表・関連業績)
- 5) 3 月の応用物理学会春季学術講演会にてサブシェル型ナノモータに関する結果の一部を報告予定