

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

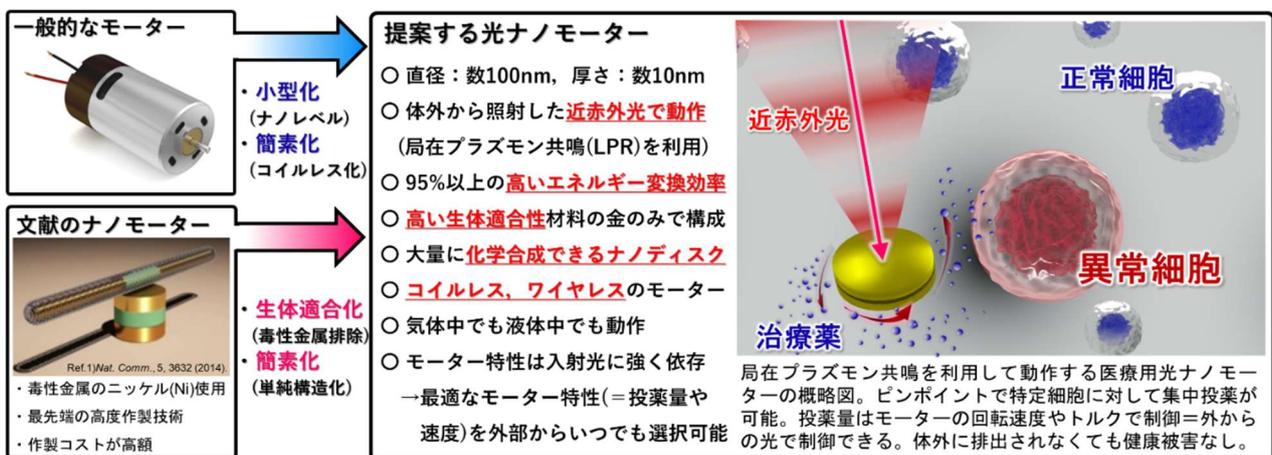
所属機関	大分工業高等専門学校 電気電子工学科
職位または役職	准教授
氏名	田中 大輔

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、スマート医療(超低侵襲, 超効果的, 超短時間)に向けた**人間の体内で動作する医療ロボットのための光ナノモータ(下図)の基礎技術を確立し、「私たちの豊かな生活」に貢献する。**具体的には、生体適応性の高い金のみで構成されたナノディスクの電子と近赤外光との間で発現する量子的効果(局在プラズモン共鳴)を応用したディスク型金ナノモータの原理を構築する。このナノモータは脳内の毛細血管内などの極狭領域での治療やガン治療薬の副作用を最小限にするドラッグデリバリーシステムへ応用できる。



3. 研究内容及び成果

(研究目標)

- i. ねらった回転周波数を実現する近赤外ベクトルビーム光は如何なるものか?の明確化
- ii. 溶液中でのナノモータについての実験検証

本研究で提案するスマート医療用光ナノモータは、金属電子と光波の共鳴現象(局在プラズモン共鳴)により、光エネルギーを回折限界以下のナノ構造に閉じ込め、それを駆動源とした回転動作を実現する。本モータの**特徴は、ワイヤレス・コイルレスで人体に対して非侵襲なナノサイズの光駆動による高い制御性を有すること**である。励起光源には、一般的なスカラービームではなく、軌道角運動量や進行方向の電場成分を持つ「ベクトルビーム」を採用し、オペラビリティの高い新たな光駆動ナノモータの技術確立を目指す。

(研究成果 i)

研究目標の i については、ベクトルビームの一種である光渦(L. Allen et. al., *Phys. Rev. A*, **45**, 8185 (1992).)を励起光源に採用し、光渦の入射条件によって回転周波数を制御できることを離散双極子近似(DDA)法による計算機実験から明らかにした。光渦は空間的・時間的に進行軸を中心に位相が回転するベクトルビームであり、一波長中の位相回転数(ねじれの数)をトポジカルチャージ l 、光渦の偏光度を σ で表現する。図 1 に厚さ 30 nm, 直径 400 nm の金ナノディスクが水中にある場合を想定したシミュレーション結果を示す。プラズモン共鳴モードの回転周期が l に依存していることがわかる。**回転周波数は位相と波長に比例するため、構造のサイズや材料種によって共鳴波長が制御できるプラズモン現象と光渦を組み合わせることで「所望する」回転周波数を実現できることがわかった。**

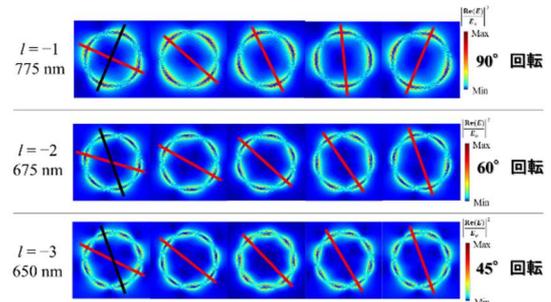
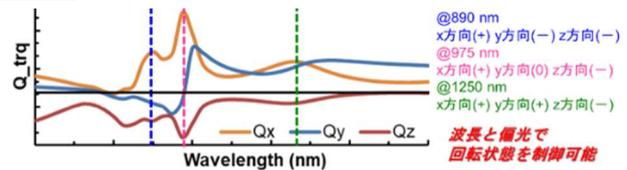


図 1. 一波長当たりの回転角度と光渦次数 l
 図 1. 一波長当たりの回転角度と光渦次数 l 。回転周期が l に依存していることがわかる。**回転周波数は位相と波長に比例するため、構造のサイズや材料種によって共鳴波長が制御できるプラズモン現象と光渦を組み合わせることで「所望する」回転周波数を実現できることがわかった。**

申請時には生体適合性の高い金のみディスク型ナノモータを検討していたが、1 軸性の回転自由度しか持たないことがわかってきた。一方、ナノスフィア粒子の一部が金属薄膜で覆われたコアシェル型構造は、図 2、図 3 に示すように入射波長に依存した 3 次元軸に対する回転自由度をもった回転動作の可能性が示されたため、ナノモータの構造をディスク型からコアシェル型に変更した。コアシェル型であれば、コア粒子に薬効を付加できるため、非侵襲というナノディスクの利点を保持したまま、先端医療に特化したナノモータを実現できる。成果は業績 2)、3)、4)で報告している。



特定波長でトルクは全軸に対して同程度で大きい値

図 2. コアシェル構造のトルクスペクトル

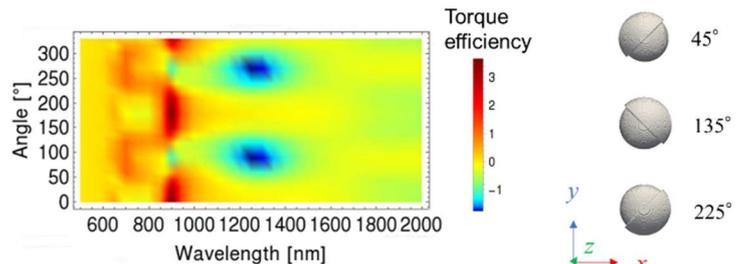


図 3. コアシェル構造のトルクスペクトルの入射角度依存性

(研究成果 ii)

研究目標の ii については、**コアシェル構造をボトムアップ的に作成する方法を確立し、コロイド溶液化(液中でナノ粒子が孤立して浮遊した状態)にも成功**した。その作製プロセスと、多層膜コアシェル構造(図 4)の光学特性について業績 1)で発表した。今年度は、入射光の中心軸と構造の中心を一致させるための位置制御システムの構築を実施したが、システムを完成には至っていない。

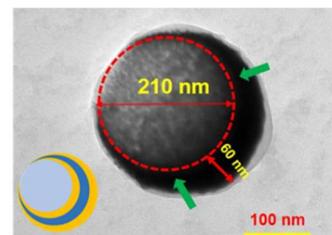


図 4. 多層膜コアシェル構造の電子顕微鏡

4. 今後の研究の見通し

(現在の進捗状況)

現在までに、独自の数値シミュレーション法を確立し、光渦 LPR に由来する光圧トルクを生み出し、コアシェル粒子をモータ構造に採用することで 3 次元の回転自由度を実現できる可能性を見出した。現在は、ナノモータ粒子 1 個の回転特性を評価するための光学系の構築を行っており、入射レーザーのナノメートルオーダーの位置制御に必要な XY 方向のピエゾステージを選定・購入した。

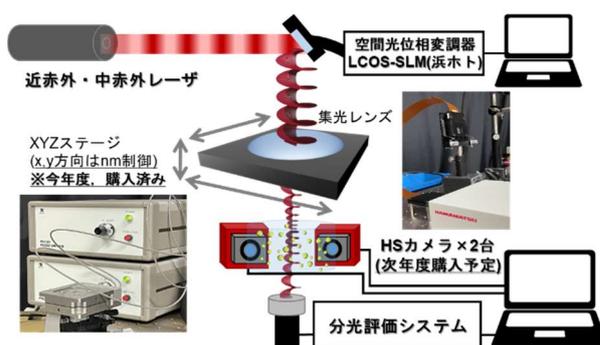


図 5. 光ナノモータの回転動作評価システム

(次年度以降の予定)

2 年目に図 5 の測定系を完成させ、コアシェル粒子の分散水溶液中に光渦を入射し、入射光渦の条件（偏光、ねじれの数、波長）に即したコアシェル粒子の 3 次元軸に対する回転動作を光学顕微鏡に設置したカメラを用いて観測する。具体的には、直径 300~800 nm のシリカ粒子を固定したガラス基板にスパッタリングによって金薄膜を 30~100 nm コーティングすることでモータ粒子を作製する。その後、超音波によってモータ粒子を水中に分散させる。空間位相変調器を用いて形成した光渦を溶液内に集光し、集光点に光ピンセットの原理によって留めたモータ粒子が 3 次元回転する様子をハイスピードカメラ (950 fps) で観察する。その際、必要に応じて金表面に蛍光分子膜を形成させ、回転動作に依存した発光強度の経時変化から回転の様子を間接的に（粒子の非対称性・化学的選択性を利用）評価することを検討する。また、入射光渦を変調制御することにより、モータ粒子の回転運動が瞬時に制御できるかについても検討する。

上記実験実証で得られた、光渦の特性（波長、ねじれ数、偏光、光強度）と回転動作の観測データを解析し、LPR を介してモータ粒子へ遷移した光渦の全角運動量が生み出した 3 次元軸に対する光圧トルクを算出し、提案する光ナノモータの原理構築を行う。その後、モータ粒子が安定に回転し、かつトルクが効率的に発生する最適な条件・構造を決定する。熱運動による擾乱の影響を受けない安定した動作に必要なトルク (10 pN・m) は、入射光強度が 0.5 W で達成できることが理論計算から導かれており、その実現可能性は高い。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文

- 1) T. T. Pham*, D. D. Pham, T. A. H. Nguyen, M. T. Vu, L. H. T. Nghiem, T. V. Nguyen, D. Tanaka*, and D. C. Nguyen, “Synthesis and optical characterization of asymmetric multilayer metal–insulator nanocrescent in aqueous solutions”, *Applied Physics Express*, **13**, 122004 (20th November 2020). (査読あり, IF:3.086)

国際会議

- 2) D. Tanaka*, S. Harajiri, D. L. Andrews, K. A. Forbes, “Discrete dipole approximation simulation of optical vortex excited plasmonic properties of a partially capped core-shell nanostructure”, Proc. SPIE 11701, Complex Light and Optical Forces XV, 117010Y (5th March 2021); doi: 10.1117/12.2583976. (査読あり, IF:0.56)
- 3) Daisuke Tanaka*, Haisong Jiang and Kiichi Hamamoto, “Proposal of the all-optical memory using the pseudo-localized plasmon resonance excited by an optical vortex beam”, 26th Microoptics Conference(MOC2021), PO-62, Online, Sep. 26-29, 2021(ポスター・査読あり)

国際・国内会議

- 4) ○田中 大輔, 原尻 駿吾, 「DDA 法によるコアシェル構造の光渦励起 LPR の特性調査」, 『第 17 回プラズモニクスシンポジウム』, オンライン(zoom), 2021 年 1 月 (口頭・査読なし)
- 5) ○田中 大輔, 原尻 駿吾, 「サブシェル構造の光渦励起 LPR モードの次数変遷」, 『第 68 回応用物理学会春季学術講演会』, 16a-P08-5, オンライン, 2021 年 3 月 (ポスター・査読なし)