

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

| | |
|---------------|------------------------------------|
| 研究期間 | ：2021～2025 |
| 課題番号 | ：21H05019 |
| 研究課題名 | ：環境と発光のデザインによる新原理光マニピュレーションシステムの開発 |
| 研究代表者氏名（ローマ字） | ：石原 一（ISHIHARA Hajime） |
| 所属研究機関・部局・職 | ：大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 |
| 研究者番号 | ：60273611 |

研究の概要：

環境（誘電環境、輻射環境）をデザインすることを戦略として、物質光学応答の最も基本的な現象の1つである「発光」により生じる力を利用した新原理の光マニピュレーションを開拓する。すなわち、励起状態にある分子やナノ微粒子の特定の線幅にある発光体のみを誘導光により引き寄せることや、発光によって機械振動を誘起するオプトメカニクスの可能性を実験実証する。

研究分野：ナノ光学

キーワード：光マニピュレーション、光圧、ナノダイヤモンド、オプトメカニクス、発光、誘導放出

1. 研究開始当初の背景

光は運動量を持ち、散乱・吸収されることにより物質に力（光圧）を及ぼす。この原理を用いて微粒子を捕捉・操作する光ピンセット技術は生体分子の微小ダイナミクス解明を可能とし、2018年のノーベル物理学賞の対象となった。光ピンセットはその後、マイクロ微粒子を操作するツールとして発展したが、ナノ微粒子を光圧で直接操作する技術は依然として挑戦的課題となっている。申請者等はナノ粒子に量子力学的に閉じ込められた電子系の離散化準位間の遷移に光を共鳴させることにより、個々のナノ微粒子のサイズ・形状・内部構造に依存した量子力学的個性を反映した選択的な光マニピュレーション（光圧操作）を理論提案し、新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」（2016年度-2020年度）によりその可能性が実証された。

本課題は上記研究成果からさらに発想を転換し、量子選択的光圧操作を、従来の原理とは全く異なる形で発展させようとするものである。

2. 研究の目的

本提案では、環境（誘電環境、輻射環境）をデザインすることを戦略として、物質光学応答の最も基本的な現象の1つである「発光」により生じる力を利用した新原理の光マニピュレーションを開拓することを目的とする。すなわち、励起状態にある（不均一な）分子やナノ微粒子のうち特定の発光線の粒子のみを誘導光により引き寄せることや、発光によって機械振動を誘起するオプトメカニクスが可能になることを実験実証することによって、新原理の量子選択的光マニピュレーションを開拓する。

3. 研究の方法

以下のように発光光圧技術の実現を明瞭に示すための典型的かつ具体的研究課題を取り上げる。

[1] 誘導放出による光圧発生の実証と発光ナノ粒子の選別を通じた発光線狭線化

この課題では、発光中心を有するナノダイヤモンドを対象として、誘導放出を用いた光圧発生を実証すると共に、発光中心の有無による大容量の選別的輸送に挑戦する。

[2] 金属基板上のペロブスカイト薄膜の発光によるオプトメカニクス機構の実証

この課題では、二次元材料を架橋して高精度な機械的共振測定を行う技術を駆使し、導波路モードで励起した架橋ナノ薄膜の発光を誘起する。これにより、発光型オプトメカニクスを実現する。

[3] 極低温下での μeV オーダーの超精密発光線選別とナノ粒子集団の超蛍光光圧の観測

この課題では、超流動ヘリウム中でナノ粒子の発光線の超精密選別を行い、またペロブスカイトナノ粒子などを強励起して反転分布を形成し、それに対して誘導光を照射して超蛍光光圧を誘起する。

4. これまでの成果

上記研究課題の[1][2][3]において、それぞれ以下の成果があった。

- [1] NV中心を持つダイヤモンドより遙かに細い線幅、かつ大きな振動子強度を持つSiV中心を一つレベルで含有するナノダイヤモンドの作製に成功し、これを水中で「吸収光圧」で選択的に輸送し、SiV含有ダイヤモンドの濃縮、及び発光線幅の狭線化が確認出来た。単一発光中心含有ナノダイヤモンドの初めての光圧輸送の成功である。
- [2] 超低振動冷凍機で熱雑音を究極的に抑え、機械的振動と発光特性の計測が可能な測定系を構築した。また、ペロブスカイトによる膜状機械振動子と鏡面基板からなる光共振器構造を形成し、発光強度の大幅な増大とピークシフトを確認した。これにより、薄膜の発光振動計測が可能であることが確認できた。
- [3] 超流動ヘリウム中で微粒子を捕捉・操作する要素技術を開発し、ナノ微粒子の光トラップに成功した。また、超蛍光状態にある粒子に対する光圧を記述する理論の定式化に始めて成功した。これにより、極低温下での超精密な発光光圧操作や超蛍光による光圧の観測を行う準備が整った。

5. 今後の計画

上記研究課題の[1][2][3]において、それぞれ以下のように計画する。

- [1] 前半で光学特性が把握出来た発光中心含有ナノダイヤに対して誘導放出を利用した選択的光圧操作に挑戦する。前半で得られた吸収光圧による結果と理論解析に基づいて構成した、誘導放出による発光光圧操作に最適な実験条件で誘導光を導入し、その運動を観測し、発光光圧操作を成功させる。
- [2] 前半期で完成させた、ペロブスカイト発光による機械振動子デバイスを用い、機能分離型デバイスにおいて光共鳴条件、熱緩和時間、機械的振動数を独立制御しそれぞれの影響を切り分けた測定を行う。また、発光の変調情報を、他の量子系に伝達させ、発光によるオプトメカニクスの新機能を実証する。
- [3] 前半で確立した超流動ヘリウム中でのナノ粒子操作技術を活用し、誘導光による操作でナノ粒子発光準位の超精密共鳴準位選択的操作を行う。また、含有される蛍光体の個数に応じたナノダイヤの選別に取り組み、さらに、超蛍光による光圧現象の観測に挑戦する。

最終年度には以上の成果を、発光による光圧操作の集大成として取りまとめ、それが拓いた学理、新しい技術分野の可能性を議論し、新原理のナノサイエンス、ナノテクノロジーとしての方向性を指し示す。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

〔雑誌論文〕（計 13 件）以下は抜粋

Unusual resonance property of graphene/h-BN stacked mechanical resonators

K. Yasoshima, R. Oishi, T. Arie and *[S. Akita](#)

Japanese Journal of Applied Physics 査読あり Vol. 62, SG1025 (1-5) (2023)

Basics of optical force

M. Tamura, T. Wada, and *[H. Ishihara](#)

J. Photochem. Photobio. C, Review 査読あり Vol. 54, 100570(1-7) (2023)

Directional Characteristics of Superfluorescence Controlled by Spatial Configurations

H. Shiraki, *[N. Yokoshi](#), [H. Ishihara](#)

Journal of the Physical Society of Japan 査読あり 92, 024402 (1-5) (2023)

Optical force spectroscopy for measurement of nonlinear optical coefficient of single nanoparticles through optical manipulation

T. Wada and *[H. Ishihara](#)

Optics Express 査読あり Vol. 30, pp. 17490-17516 (2022)

Chirality-selective superfluorescence based on chiral interactions

H. Shiraki, [N. Yokoshi](#), *[H. Ishihara](#)

Physical Review A 査読あり 106 053511 (2022)

Effect of Particle Size on the Optical Properties of Silicon-Vacancy Centers in Nanodiamonds Fabricated by a Detonation Process

Y. Makino, Y. Saito, H. Takehara, A. Tsurui, N. Okuyama, *[M. Ashida](#)

Physica Status Solidi A 査読あり Vol. 219, 2200342 (1-12) (2022).

Visualization of quantized vortex reconnection enabled by laser ablation

*Y. Minowa, S. Aoyagi, S. Inui, T. Nakagawa, G. Asaka, M. Tsubota, [M. Ashida](#),

Science Advances 査読あり Vol. 8, eabn1143 (1-6) (2022).

Optical trapping of nanoparticles in superfluid helium

*Y. Minowa, X. Geng, K. Kokado, K. Sato, T. Kameyama, T. Torimoto, and [M. Ashida](#),

Optica 査読あり Vol.9, 139-144 (2022).

〔学会発表〕（計 40 件）

[H. Ishihara](#)

"Optical manipulation based on linear and nonlinear resonant optical responses" [Keynote]

The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies [Pacifichem 2021], December, Hawaii, Online 2021

など

〔図書〕（計 2 件）

[H. Ishihara](#) and K. Cho

"Nonlocal optical response of nanostructures"

Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (Elsevier, 2022) など