



Title	Theoretical Study on Sorting Nanoparticles Based on Absorption and Emission Properties Using Optical Forces
Author(s)	蓬萊, 貴大
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101730
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (蓬莱貴大)	
論文題名	Theoretical Study on Sorting Nanoparticles Based on Absorption and Emission Properties Using Optical Forces (光圧によるナノ粒子の吸収・発光特性に基づく選別手法の理論的研究)
論文内容の要旨	
<p>光圧を利用した蛍光ナノダイヤモンド、有機分子などのナノ粒子の選択的操作により新奇な物性を創発することは、ナノテクノロジーの発展に重要な寄与をなす。しかし、ナノ粒子に働く光圧は環境の外乱に比べて小さいため、溶媒中での操作には光圧の増強手段が必須となる。本博士論文は、ナノ物質の吸収および発光によって増強された光圧に基づく運動操作に焦点を当てるもので、新奇な光圧操作手法の提案を目的とする。</p> <p>第1章では光圧に関連する研究を概説し、第2章で光圧の理論的枠組みを示した。第3章と第4章では、誘導放出による反跳力（誘導反跳力）を利用した光圧操作手法について検討した。誘導放出による発光で生じる力は、吸収による力とは異なり、高強度のレーザー照射下でも飽和しない。次世代の量子センサとして着目されており、堅牢な構造に由来して光褪色を起こさない蛍光ナノダイヤモンドは、このような高強度レーザーでも飽和しない誘導反跳力による光圧操作の理想的な対象である。そこで、第3章では蛍光ナノダイヤモンドを対象にシミュレーションを行い、单一欠陥のみ含有する極微小のナノダイヤモンドであっても、室温の溶媒中で、含有しないものと選別して濃縮することが可能であることを示した。また、超流動ヘリウム中では発光線に応じた高精度な操作も可能であることを議論した。第4章では、より大きな蛍光ナノダイヤモンドを対象として、軌道角運動量を持つラゲールガウスビームによる誘導反跳力を検討した。運動シミュレーションによって、室温の溶媒中で安定的に捕捉され、ビーム軸方向の運動だけでなく、吸収力の場合とは逆向きに回転運動することを明らかにした。この結果は、光圧操作に回転の自在操作という新しい自由度を与えるものである。第5章と第6章では、共鳴吸収に基づく光圧操作によるキラル分子の選別について検討した。キラリティを持つ分子としてはポルフィリンダイマーを対象とした。分子の微視的キラル構造と光圧の定量的関係を明らかにし、左右円偏光による吸収差を利用した選別手法について定量的に議論した。第6章では、第5章の定式化で近似的に省略していた磁化の効果も取り入れ、キラル光学応答を記述する一般的な光圧理論の定式化を行なった。第6章で定式化した理論は、第5章での理論を包含しており、磁化による効果が無視できないキラル分子に対しては拡張した理論を用いる必要があることを明らかにした。</p> <p>本博士論文における以上の成果は、ナノ粒子の吸収・発光、空間構造などの量子力学的性質を反映させた光圧操作の新たな可能性を切り拓くものである。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　(　蓬　葉　貴　大　)		
	(職)	氏　名
論文審査担当者	主　査	教　授　　石原　一
	副　査	教　授　　戸田　博一
	副　査	教　授　　芦田　昌明

論文審査の結果の要旨

近年、光が運動量を持つことに起因する光圧を用いた微小物質の運動操作の研究とその応用が盛んになっている。特に、マイクロサイズ領域においてはレーザーピンセットが、また原子サイズ領域に於いてはドップラー冷却に代表される原子操作の技術がよく発達している。一方でナノ微粒子の操作に関しては、環境の擾乱に打ち勝つ光圧の発生が難しいため、上記の両領域に比べて技術の進展が遅れていた。光圧増強の手段として、ナノ微粒子に閉じ込められた離散的量子化準位間の遷移エネルギーと共に鳴る光を用いる手法が注目されている。本博士論文はそのような手法の具体例として、ナノ微粒子の光吸収、及び発光を利用した光圧増強を手段としたナノ微粒子の選別的操作を理論提案するものである。

本論文前半では、発光線で生じる誘導放出に伴って発生する反跳力（誘導反跳力）を利用して、色中心を含有する蛍光ナノダイヤモンドの新奇な選別手法を提案している。蛍光ナノダイヤモンドは量子情報や量子センサーへの応用で注目されているが、单一色中心を含む程度の微小なナノダイヤの場合、現状の製造技術では多くの粒子が色中心を含まない状態で生産される。従って色中心を含むものの選別、濃縮が実応用に対しては必須となるが、申請者はこれが誘導反跳力で可能であることを理論的に示した。特に、誘導反跳力は高強度レーザーでも飽和しないため、それを用いた操作は光褪色を起こさないナノダイヤの選別には極めて有用である。申請者は粒子の詳細な物質パラメーターを用いて現実的な実験状況に基づいたシミュレーションを行い、誘導反跳力による選別・濃縮が産業応用可能なレベルで実現できることを示した。さらに軌道角運動量をもつ光渦をナノダイヤに照射した場合には吸収力とは反対方向に微粒子が回転し、これが実験で観測可能であることも示しており、ナノ微粒子の新たな運動自由度として提案している。

論文後半では吸収力によるキラル分子の選別操作についての理論提案を行っている。キラル分子の光圧計算においては、従来、キラリティーの程度を現象論的パラメーターで表したモデルが用いられてきたが、申請者は微視的な分子の幾何学的構造を取り入れ、現象論的パラメーターを用いて光圧を計算した。これに基づき、左右円偏光によってキラル分子に働く光圧が異なることを利用した選別の光圧操作の可能性を議論した。また、その理論で近似的に無視されていた磁化の効果も取り入れたより一般的な理論も開発し、それが必須である対象があることも議論している。

以上の成果は、ナノ物質の吸収や発光に基づく光圧操作を基礎とする新しい研究分野を切り開くものである。よって、本論文を、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。