

ナノ構造と量子効果に基づく革新的光マニピュレータの開発

研究代表者

坪井 泰之 大阪公立大学理学研究科 教授



1. 研究の背景と達成目標

【背景】光ピンセットとは、集光したレーザービームで細胞やバクテリアなどの小さな物体を「つまみ」、操る技術である。既に装置は市販され、実用化にまで至っている。次世代ナノテクノロジーの発展に不可欠な技術であると云われているが、超えるべきハードルは少なくない。その中の最大の問題は「ナノメートルサイズの物体は捕まえられない」並びに「微小物体を捕まえることはできても、個別選択的に弾く・掴むことはできない」の二つである。これらをクリアできる技術を確立すれば、光ピンセットは医学の実験室を飛び出し、マイクロマシン、エレクトロニクス、マイクロ化学などナノテクノロジー産業に広く普及し、新しい産業基盤を創出できる。

このような背景の下、本研究では私たちの独自の技術を結集し「ナノ構造と量子効果に基づく革新的光マニピュレータの開発」を目指した。捕捉力の源である「光圧」(電磁気学的な勾配力)をナノ構造が強く増強する。

【達成目標】

サイズ 20 nm 以下のナノ物質を捕捉・操作の実現
ナノ物質の個別選択的操作
装置プロトタイプ completion

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

・プラズモン光捕捉法の確立と DNA の捕捉と分離の実現

DNA は捕捉が困難なナノ物質であり、ミクロンサイズの誘電体球を結合させて光ピンセットで操作されてきた。我々はプラズモン光マニピュレータにより、DNA を捕捉することに成功した。さらに、二種類の DNA の混合溶液でプラズモン光捕捉を行い、サイズの異なる DNA を空間的に分離しながら捕捉することにも成功した(ナノ物質の個別選択的操作)。DNA を自由に操れるようになったので、細胞への遺伝子導入や DNA の塩基配列の直接観測などへの応用が期待できる。

Y. Tsuboi et al., *Sci. Rep.*, Vol. 10 (2020), 3349.

・インコヒーレント光マニピュレータの開発

従来まで光マニピュレータとは、「レーザーマニピュレータ」であった。つまり、捕捉用の光源は全てレーザーであった。私たちは金属チタンのナノ構造が大きな光電場増強能を持つ発見し、新たな革新に成功した。すなわち、レーザーではなく、水銀ランプの光で、それも従来よりも 100 万分の一弱い光強度で、20 nm サイズのナノ粒子の捕捉に成功した(サイズ 20 nm 以下のナノ物質を捕捉・操作の実現)。私たちの光強度は、

太陽の光を虫眼鏡で集めたそれに近く、天然のインコヒーレント光で光捕捉できる可能性を示したので、顕微鏡やレーザーという制約を一気に取り去った全く新しい光捕捉法への道を示した意義は大きい。

S. Hashimoto et al. & Y. Tsuboi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 23 (2021), 27586-27593.

・光マニピュレータによる量子状態制御

ブラックシリコン光マニピュレータにより、蛍光性ポリマーを捕捉できた(ナノ物質の祖捕捉と操作)。そして、その蛍光の色をレーザー光の強度だけで青、緑、黄緑、黄色、オレンジ色に完全リモートかつ可逆的に自在にコントロールできる方法を開発した。本技術は可視域だけでなく、紫外域や近赤外域における発光色の制御にも適用できる。マイクロカプセルの中にナノ構造シリコンとペリレン修飾ポリマー水溶液を封入すれば、波長可変型の、マイクロ光源となりえる。これは、マイクロマシンの部品や細胞内バイオイメージングへの応用などが考えらる。

R. Takao et al. & Y. Tsuboi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 61 (2022), e202117227).

4. 今後の展開

光によって微小な物質・物体の運動を制御し、空間的に操作する「光マニピュレーション」は非常に魅力的な研究分野である。事実、原子の操作を可能にした「レーザー冷却」、そして光学顕微鏡で見えるミクロンサイズの細胞などを操る「光ピンセット」に対して、それぞれノーベル賞が授与されている。つまり、光マニピュレーションは二度のノーベル賞に輝く、稀有な学塾分野なのだ。一方で、原子とマイクロ粒子の間に存在するバラエティに富む物質群、つまり分子、分子集合体、クラスター、高分子、量子ドット(半導体ナノ結晶)、蛋白質などの生体物質はナノサイズであり、光で操ることが困難であった。本研究はこの問題に斬りこんだものである。私たちが開発した手法を発展させれば、これらナノ物質を自在に操ることが可能になり、「光マニピュレーション物質科学」という新しい分野が誕生するかもしれない。

5. 発表実績

1. T. Shoji, K. Itoh, J. Saitoh, N. Kitamura, T. Yoshii, K. Murakoshi, Y. Yamada, T. Yokoyama, H. Ishihara and Y. Tsuboi, *Sci. Rep.*, Vol. 10 (2020), 3349.
2. S. Komoto, T. Nagai, R. Takao, K. Ushiro, M. Matsumoto, T. Shoji, D. P. Linklater, S. Juodkazis and Y. Tsuboi, *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 3, No. 10 (2020), 9831-9841.
3. S. Naka, T. Shoji, S. Fujii, K. Ueno, Y. Wakisaka, K. Murakoshi, T. Mizoguchi, H. Tamiaki and Y. Tsuboi, *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 3, No. 10 (2020), 10067-10072.
4. S. Hashimoto, Y. Uenobo, R. Takao, K. Yuyama, T. Shoji, D. P. Linklater, E. Ivanova, S. Juodkazis, T. Kameyama, T. Torimoto and Y. Tsuboi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 23 (2021), 27586-27593.
5. Y. Tsuboi, S. Naka, D. Yamanishi, T. Nagai, K. Yuyama, T. Shoji, B. Ohtani, M. Tamura, T. Iida, T. Kameyama, and T. Torimoto, *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 4, No. 11 (2021), 11743-11752.
6. “Fluorescence Colour Control in Perylene-Labeled Polymer Chains Trapped by Nanotextured Silicon”, R. Takao, K. Ushiro, H. Kusano, K. Yuyama, T. Shoji, D. P. Linklater, E. Ivanova, S. Juodkazis, Y. Tsuboi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 61, No. 11 (2022), e202117227.