

# ナノ構造光圧アクチュエータの開発

北海道大学 電子科学研究所  
田中嘉人

## 1. はじめに

2018年にノーベル物理学賞を受賞した光ピンセット技術は、集光レーザービームの光圧を利用して微小物体を操作する手法であり、微小マシンの駆動方法<sup>1,2)</sup>として応用範囲を拡大してきた。レーザー集光位置の高速走査や光強度の空間分布制御など、レーザー光の構造化・制御により、精密で複雑な微小マシンの操作が実現されている。しかしながら、照射レーザー光の空間パターンによって光圧の方向を制御する従来の光ピンセットでは、光の回折限界により、波長スケールより微細なナノ空間での操作が困難であった。この制約が、光駆動マシンの小型化・集積化における本質的なボトルネックとなってきた。さらに、集光光学系を用いる必要性から操作可能な物体サイズにも制限が生じ、ミリメートルを超えるマクロスケールの物体を制御することは困難である。このように従来の光ピンセット技術は、マイクロとマクロの両方向への展開において本質的な制限を抱えていた。

これらの課題を克服するため、照射レーザー光を構造化・制御する従来のアプローチとは異なり、光の受け手側である金属ナノ構造の局在プラズモン共鳴により光の運動量を制御する新しい手法<sup>3,4)</sup>が提案されてきた。具体的には、光照射によって誘起される分極と入射光の光電場の相互作用によって記述される従来の光圧ではなく、誘起分極と局在プラズモン共鳴によって制御される散乱光の光電場の相互作用によって生じる反跳光圧を利用する。この原理により、光の回折限界を超えた分解能で光圧の位置と向きを精密に設計することが可能になり<sup>3)</sup>、光駆動マシンの小型化・集積化への道が開かれる。また、本手法はレーザー光の集光を必要としないため、スケーラブルな手法として、マクロスケールの物体制御への展開<sup>5)</sup>も可能になると期待される。さらに、ナノ構造の局在プラズモン共鳴に基づくことから、構造周辺の局所的な誘電率に応じた光圧制御<sup>6)</sup>が実現できれば、自律制御型の光駆動マシンなどユニークな応用展開も期待される。

本稿では、光散乱制御の反跳によりナノ構造に働く光圧およびそのアクチュエータ応用について概説した後、このナノ構造光圧アクチュエータの開発・評価において重要となる高精度光圧光トルク 6軸計測法について、著者らの最近の研究成果を紹介する。

## 2. 局在プラズモン制御によるナノ構造光圧アクチュエータ<sup>3)</sup>

### 2-1 光散乱制御の反跳によりナノ構造に働く光圧

光波長より十分小さいナノ粒子に平面波を照射すると、等方的な光散乱（双極子放射）が起こり、光の運動量保存則より伝搬方向に粒子を押し光圧（散乱力）が働く。一方、金属ナノ構造中の自由電子の集団振動（局在プラズモン共鳴）の位相空間分布を精密に設計することにより、ナノ構造は光散乱放射を制御するアンテナとして働く。これにより、散乱光の持つ運動量の反跳として、ナノ構造に働く光圧を制御する。

長さの異なる2つの金ナノロッドに、ロッド長軸方向に沿って直線偏光した光を $z$ 方向から照射すると、構造面内の $-x$ 方向に指向性の高い側方光散乱を示す(図1)。この原理について簡単に説明する。