



光波の角運動量が拓く光マニピュレーション の新機軸

千葉大学 大学院工学研究院
千葉大学 分子キラリティー研究センター
尾松孝茂

1. はじめに

2018年のノーベル物理学賞が10月2日に発表され、元米国・ベル研究所のArthur Ashkinが受賞することになった。Ashkinは、光ピンセットの発明者として知られている^{1,2)}。一般に、光が微小な物質に散乱されると、光の運動量が移譲し、微小な物質が加速される。また、光の電磁波を感じて分極した微粒子が光の場に捕捉される。これら光と物質の相互作用で現れる力は、それぞれ散乱力・勾配力と呼ばれ、光ピンセットの大きな駆動力となる³⁾。Ashkinは、光を集光した時に微小な物質にもたらされるこれらの光の力を利用して、非接触でかつ効率よく微小な物質を3次元的に捕捉する手法（光ピンセット）を開発した。従来の機器では困難であったマイクロメートルサイズの微粒子を非接触で3次元的に捕捉することを可能にする光ピンセットは、現在、光マニピュレーションとして進化し、広く生命科学・バイオテクノロジーに応用されている。

一方、1992年、Allenによって光の螺旋波面に由来する軌道角運動量の存在が理論的に提唱された^{4,5)}。螺旋波面を有する光を光渦と呼ぶ。光渦の軌道角運動量を使うと、微小な物質の公転運動を光だけで誘導できるので、光マニピュレーションをさらに高度に進化させることができる。

我が国では、光の軌道角運動量を用いた様々な応用が早く研究されてきた。特に、単に微小な物体を操作する従来の光マニピュレーションとは一線を隔する物質の構造や物性、さらには、化学反応まで制御できる光パラメータとして活躍している。

本稿では、光波の角運動量を活用した光マニピュレーション、さらには、光波の角運動量を用いた物質の構造制御に関する研究例を紹介する。

2. 光波の角運動量

光渦は、螺旋波面を持つ光波の総称である。ビーム断面中央部分に暗点（位相特異点）があるため、環状強度分布を持つ。また、空間伝播方向とポインティングベクトルの方向が異なるため、その環状強度分布に沿った軌道角運動量と呼ばれる輻射力が現れる。一般に、軌道角運動量の大きさは、円筒座標系における周回方向の周期的境界条件で決まる量子数（トポロジカルチャージ） l を用いて1光子当たり $\hbar$ と書けることが知られている。

円偏光と光渦の違いについて良く質問を受けるが、円偏光は軌道角運動量ではなく螺旋電場によって生じるスピン角運動量 $\hbar s$ ($s=\pm 1$)を持つ。軌道角運動量とスピン角運動量は独立に定義できるが、しばしば両者の間に交換が起こる。したがって、軌道角運動量とスピン角運動量の和で与えられる全角運動量 $J\hbar$ を含め、軌道・スピン・全角運動量の3つの角運動量で光の状態を書き表すことが多い⁶⁾。

光渦を発生させる方法は、数多く提案されている。中でも最も簡便な方法は、周回方向に沿って厚みが連続的にあるいは階段状に変化する位相板（周回方向にレーザー波長の整数倍の位相を与える位相板）、すなわち、螺旋位相板を使う方法である⁷⁾。この螺旋位相板を光路に挿入するだけで、光渦は容易に発生できる。本稿では、光軸周回方向に沿って16分割されていて厚みが $\pi/8$ の整数倍(0~15)