

高精度ラゲール・ガウスビームによる光ピンセット

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所
安藤太郎, 兵士(大津)知子

1. はじめに

光ピンセットといえば、2018年ノーベル物理学賞受賞者である米国の Ashkin 教授抜きに語ることは不可能だろう。Ashkin 教授は S. Chu 教授らとともに光の輻射圧を利用して物体を捕捉・制御する構成をいくつか提案したが、特に 1986 年に実証された単一ビーム勾配力光ピンセットは¹⁾、物理学や光学分野の研究対象としてのみならず、生物物理学や生物学分野でも有用なツールとして発展した。勾配力とは光の強度分布の勾配 (gradient) に比例する力であり、たとえば対物レンズで集光したガウシアンビームを媒質よりも誘電率の高い物体に照射する場合、勾配力は焦点に向かって作用する。これに対し、光の運動量の一部が物体に移される「散乱力」は波面垂直方向に“押す”ように作用するため、単一ビームの光ピンセットでは、勾配力と散乱力が釣り合う位置に物体が捕捉される。

一方「光の軌道角運動量状態」として有名なラゲール・ガウス (LG) モードは、ライデン大学の客員研究員だった Allen 博士らによって 1992 年にその性質が示されて以降²⁾、物理および光学分野で注目されてきた。軌道角運動量をもつ LG モードの光学的実体である LG ビームは、ガウシアンビームと類似した集光・発散を示しつつ、光軸上で光強度がゼロとなるリング状パターンを保持したまま伝搬する(図 1)。光の軌道角運動量を実証する初期の実験³⁻⁹⁾はすべて、顕微鏡下でミクロンサイズの微小物体に LG ビームを照射し、誘起された物体の回転運動を観察するものだった。ここで勾配力捕捉の原理を思い出せば、LG ビームでも物体を捕捉できるはずである。その際、理想的に集光された LG ビームでは回転方向には勾配力が作用しないため、散乱力によって引き起こされるビーム断面内の回転運動は残る。この特徴から、LG ビームによる光ピンセットは光スパナとも呼ばれている^{5,10)}。

これを光学技術としてみるか、物理現象としてみるかで、注目のポイントは変わってくるだろう。光ピンセットの実験では、2 枚のカバーガラス間に微小物体を懸濁した純水を充填したのち、カバーガラス端を松脂などの樹脂で封じたフローセルをサンプルとして用いる。捕捉対象となる微小物体としては、比誘電率の大きなポリスチレン製のビーズが多用されている。高開口数の対物レンズにより LG ビームをフローセル内に集光し、焦点付近に微小物体を捕捉するわけだが、比較的大きな物体を LG ビーム中心の“穴”に嵌るような形で捕捉することは早くから行われ、捕捉力を高める、あるいは周辺媒質よりも屈折率の小さな物体を捕捉するなど、光ピンセットの機能向上手法としても知られていた¹¹⁾。これとは別に、LG ビームのリング半径よりも小さな物体を捕捉し、公転軌道的な回転運動を観測するイメージは、軌道角運動量の概念に直接対応しており、感覚的にもわかりやすい。にもかかわらず、このような状況での勾配力捕捉は、著者らが実証するまでは¹²⁾報告されていなかった(図 2)。

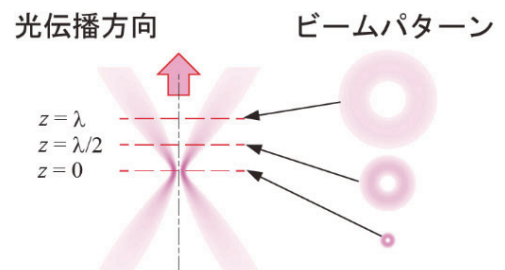


図 1 図の上方向に伝播する LG ビームに対する、光軸を含む平面上、および光軸に垂直な面上での光強度分布。 λ を光の波長、 $z=0$ を焦点面とした。