

光の角運動量によるマイクロニードル加工

千葉大学 大学院工学研究院・分子キラリティー研究センター
尾松孝茂

1. はじめに

レーザー加工はレーザー応用の大きな分野の一つである。レーザー加工は、常に、レーザー技術の進展に伴い進化してきた。レーザー溶接・切断技術は、炭酸ガスレーザーやランプ励起 Nd:YAG レーザーなどの大出力レーザーの開発とともに誕生し、ファイバーレーザーや半導体レーザー励起固体レーザー、さらには、半導体レーザーの急速な高出力によって大きく進展した。

微細加工はエキシマレーザーなどの紫外気体レーザーの開発とともに誕生し、Nd:YAG レーザーなどの固体レーザーの波長変換による紫外レーザー、さらには、チタンサファイアレーザー・ファイバーレーザーなどのフェムト秒レーザーの普及によって、非熱微細加工・多光子過程による3次元微細加工へと成長した。

レーザーパラメーターには、出力・波長・パルス幅の他にも波面がある。しかしながら、これまで基本的にレーザー波面が平面波であるガウスビームが最も一般的に使われてきた。

螺旋電場を有する円偏光は、分子をはじめとする物質のキラリティーを検出（左右円偏光に対して物質のキラリティーに対応して光吸収が異なる円偏光二色性）するために広く用いられてきた。円偏光は螺旋電場に対応したスピン角運動量を持つことは古くから知られている。これに対して、1992年、Allenらは、光の螺旋波面に由来する軌道角運動量の存在を理論的に提唱した¹⁾。螺旋波面を有する光を光渦と呼ぶ。

一般に、光が微粒子に散乱されると、光の運動量が移譲し、微粒子が加速される。また、光の電磁波を感じて分極した微粒子は光電場に捕捉される。これら光と微粒子の相互作用によって現れる散乱力・勾配力は、2018年ノーベル物理学賞を受賞した Ashkin によって発明された光ピンセットの駆動力として知られている²⁾。当初、微小物質を公転運動させる光渦の軌道角運動量は、光ピンセットを進化させる新たな光圧として研究されていた³⁾。

われわれは、平面波ではない螺旋波面を持つ光渦をレーザー加工の光源に用いることを提案している。光渦の軌道角運動量が加工時に発生する融解あるいは蒸散した物質に作用することで螺旋に捩じれたサブミクロン・スケールのマイクロニードルが物質表面に形成されることを実証した。通常、螺旋マイクロニードルはトップダウン法を用いて形成するのが主流であるが、単一光パルス照射だけで形成できる光渦レーザー加工は、レーザー微細加工に新たなブレークスルーをもたらす。

本稿では、光渦の基本から光渦を用いたマイクロニードル加工の現状、将来展望について概説する。

2. 光の角運動量

螺旋波面を持つ光波の総称である光渦は、円筒座標系の周回方向の周期的境界条件で決まる方位量子数トポロジカルチャージ l で特徴づけられる。トポロジカルチャージは光渦の螺旋波面の螺旋度（1波長中に螺旋を巻く回数）に対応し、光渦の軌道角運動量の大きさは1光子あたり $l\hbar$ と記述され