

レーザー誘起還元法によるナノ粒子合成と高効率化

株式会社 illuminus

中村貴宏

1. はじめに

レーザー光は、波長、エネルギー、出力、パルス幅、スペクトル幅など光の持つ優れた特徴を有する究極の光である。これらの特徴から、現在までに通信、情報技術、医療などの幅広い分野で学術・産業界を問わず幅広く応用されている。このうち、レーザー光を用いた材料加工、すなわちレーザープロセスは、加熱、溶接、切断、穴あけ、マーキング、表面改質、クラディング、積層造形、レーザーアブレーション法による薄膜形成、粒子合成など多岐にわたり、その応用範囲は急速に拡大している。これらの加工技術は、材料の形態変化という観点から、マイクロメートルオーダーの小さなものからメートルオーダーの大規模な加工対象までトップダウン的あるいはボトムアップ的なアプローチが行われている。一般にレーザープロセスの大きな特徴は、加工対象材料の結晶構造、組成、特性を維持あるいは制御できることであるとされている。

一方、レーザー技術の進歩、特に超短パルス発生と再生増幅技術の進歩に伴い、レーザー出力はこれまでにない超高強度光場を形成できるほど強くなっている。パルスエネルギー1 mJ、パルス幅 100 fs の超短パルスレーザーを無収差光学系で $10 \mu\text{m}^2$ 程度の領域に集光すると、集光点でのピーク強度は理論的には 10^{17} W/cm^2 程度と見積もられる。この値は、水素原子内部のクーロン電界 $5.0 \times 10^{11} \text{ V/m}$ ($7.0 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$) に相当する。すなわち、高エネルギーの超短パルスレーザー光は、地球上に存在しない究極の反応場を形成できる可能性がある。しかし、高強度レーザー科学のほとんどは、原子、イオン、フラグメント、分子の密度がそれらの相互作用を無視できるほど極めて希薄な気相反応にとどまっていた¹⁻⁴⁾。

近年、液体中におけるプラズマの閉じ込め効果によって生じる高エネルギー密度状態を利用した、液中レーザーアブレーション (Pulsed laser ablation in liquids, PLAL) と呼ばれる手法を用いた微粒子合成に関する研究が数多く報告されている^{5,6)}。この手法では、液体中に浸漬した固体ターゲット(あるいは液中に分散した微粒子)にレーザーを集光・照射することで生じるアブレーション反応によって元の物質よりも小さな微粒子が得られる。これまでに数多くの材料の微粒子の形成に関する研究が行われており、反応メカニズムについても詳細に検討されている。同手法ではターゲット表面から発生する粗大粒子(デブリ)の発生を避けるため、ターゲット表面でのレーザーエネルギー密度(レーザーフルエンス)を抑制することで、均一かつ高エネルギー密度の反応場が形成されている。一方、前述したように、mJ オーダーの超短パルスレーザーを小さなスポットに強く集光すると、市販の再生増幅レーザーシステムを用いて、液体や固体のような凝縮系物質中に超高強度レーザー場を形成することができる。この高強度レーザー場では、物質の光イオン化と光解離が瞬時に起こることで、高温・高密度のプラズマが形成される。プラズマの膨張は強く抑制され、温度は周囲の高密度低温物質によって急速に冷却されることから、従来の熱平衡プロセスでは達成することが困難な非平衡プロセスをもたらすことが期待される。

著者らは、高いピークパワーを持つ超高速レーザーパルスの焦点付近に生じる非線形・非平衡反応