

総合講演・報告 1 東京大学弥生研究会 ―原子・分子の分光分析技術とその応用―

レーザーの特長を利用した研究開発 III

Research developments using excellent properties of Lasers III

(2) レーザー加工時に発生するエアロゾルに関する理論的解析

(2) Theoretical study on aerosol caused by laser processing

*古河 裕之¹, 大道 博行¹¹レーザー総研

1. はじめに

「2018 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 共通基盤型原子力研究プログラム」において、研究開発課題「レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発」が採択された。本講演にて報告する研究課題は、蒸気及び微粒子の発生に関する理論的研究であり、上記プログラムとは独自に、かつ同プログラムで得られた実験データを参考にしつつ、相補的に研究を行うものである。

レーザー加工技術を原子力施設の安全な廃止措置等に適用するためには、レーザー加工により発生する微粒子の直径がマイクロメートルオーダー以下となるエアロゾルを外部に放出しない、ことが非常に重要である。大きな粒子サイズであれば、回収は一般的には容易になる。レーザー加工は、照射パワー密度が高く、高速切断等が可能であり、産業界で広く使われている。一方、そのために、レーザー照射部に熔融液体のみでなく蒸気も発生し、人体にとって有害な、特に原子力においては、放射性物質を含む直径 $1\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子が発生してしまう危険性がある。本研究では、大気中でのレーザー照射に加え、水中でのレーザー照射もモデリングし、金属の高速切断に伴い発生する可能性が高い、蒸気及び微粒子発生メカニズム等の理論的評価を行う。蒸気が発生した場合の微粒子の大きさ、蒸気と液体の割合等の理論的評価を行う。それらを、蒸気及び微粒子の閉じ込めに資するデータとしてまとめる。図 1 は、大気中でレーザーを金属に照射した場合の熔融現象、蒸気の発生現象と測定装置を表した概念図である。

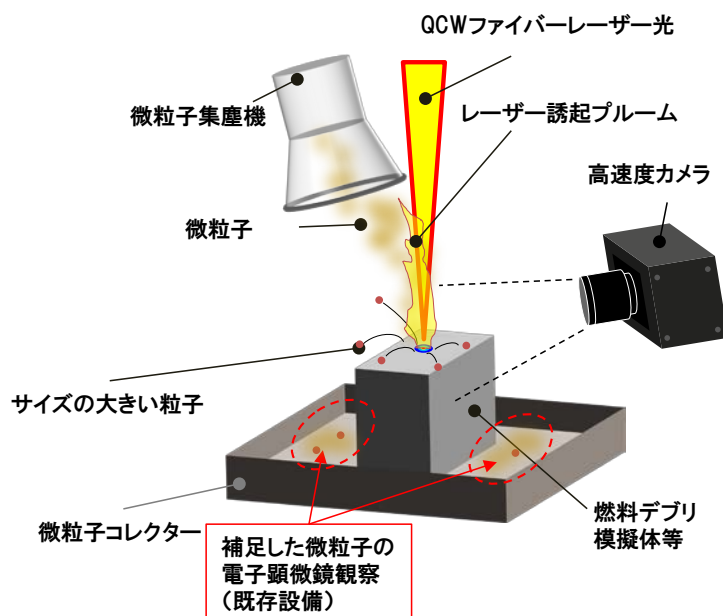


図 1 大気中でレーザーを金属に照射した場合の熔融現象、蒸気の発生現象と測定装置を表した概念図

*Hiroyuki Furukawa¹ and Hiroyuki Daido¹

¹Institute for Laser Technology

2. 本研究の目的

レーザー加工に関しては、物質の状態が「固体、固液混相、液体、気液混相」等の多岐にわたり、それらが混相状態として存在する。照射レーザーのパワー密度が高いと、これらの混相状態を経て、蒸気及び微粒子が発生する場合がある。蒸気及び微粒子の発生の様子は、照射レーザーのパワー密度、波長、パルス幅、パルス波形などにより、大きく変化する。

凝縮の基本的なメカニズムは、過冷却である。気体が何らかの理由で、局所的に気体のまま沸点以下の温度に低下すると、そこが凝縮核となる。気体を構成する原子は、発生した凝縮核の周囲に集まり、微粒子を構成する。その大きさは、冷却速度と気体の密度により決まる。図 2 は、過冷却による微粒子の生成の概念図である。

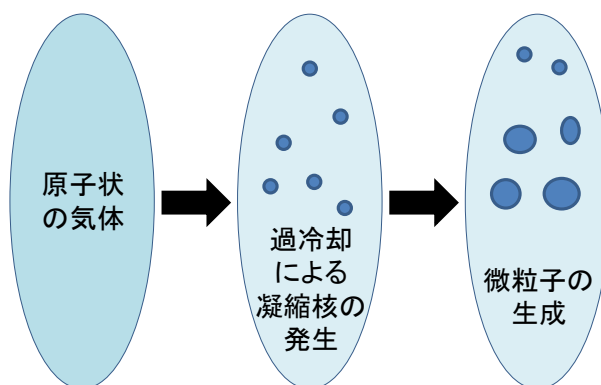


図 2 過冷却による微粒子の生成の概念図

上記に述べた、蒸気の凝縮による微粒子生成を、理論的に定量的に評価できる数少ない理論モデルの一つとして、Lukiyanchuk モデルがある。Lukiyanchuk モデルは、初期に、ある状態の原子状の金属蒸気が存在するとし、それが完全断熱球対称膨張を行うと仮定し、任意の時刻、任意の空間において、凝縮率、及び微粒子の直径等を求めることができるモデルである。凝縮率とは、ある微小空間において、全原子数に対する微粒子の構成に使われた原子の割合、である。Lukiyanchuk モデルは、蒸気の流体運動として「完全断熱球対称膨張」を仮定しており、任意の流体運動に適用するには基礎式の書き換えが必要である。

水中でレーザーを照射した場合に起こる現象は、大気中でレーザーを照射した場合と比べ、さらに複雑である。水圧効果による金属蒸気の閉じ込めは、膨張を抑え粒径を大きくするが、水による金属蒸気の冷却効果は、粒径の微小化をもたらすなど、相反する効果が競合し、生成される微粒子の大きさに複雑な影響を与える。図 3 は、水中でレーザーを金属に照射した場合の熔融現象、蒸気の発生現象、微粒子の発生を表した概念図である。大気中の場合と比べ、金属蒸気の膨張が抑制され、微粒子の大きさが大きくなり、金属の熔融領域も深くなる可能性もあり、定量的な評価が期待される。

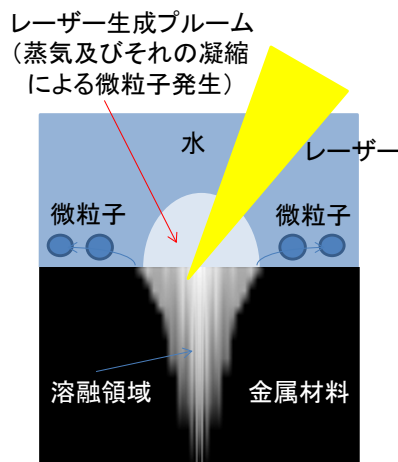


図 3 水中でレーザーを金属に照射した場合の熔融現象、蒸気の発生現象を表した概念図

3. 講演者のこれまでの研究成果

本講演者は、2003 年度から 2007 年度まで行われた、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」において、直径 $20\ \mu\text{m}$ 程度の錫ドロップレットターゲットにプレパルスレーザーを照射した場合の、ナノメートルオーダーの微粒子が生成される可能性について、Lukiyanchuk モデルを用いて解析した。多数の微粒子が生成されエアロゾル状態になると、メインパルスレーザー (CO_2 レーザー) との相互作用が、バルクの低密度プラズマとの相互作用と大きく異なる可能性があり、発光効率の最適化等に影響を与える可能性がある。図 4 は、錫ドロップレットターゲットにプレパルスレーザーを照射した場合の、微粒子生成の計算モデル (Lukiyanchuk モデル) の概念図である。図 5 は、求めた微粒子の直径分布と凝縮率分布である。

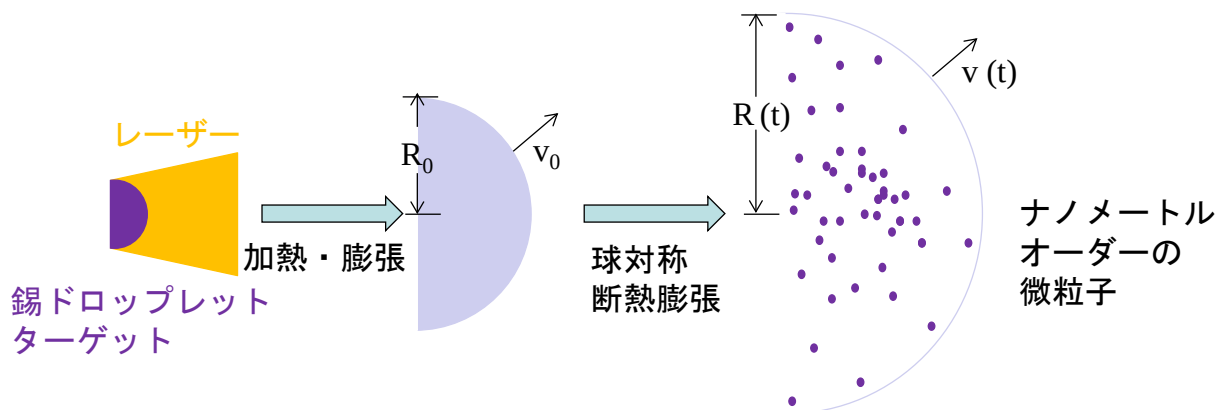


図 4 錫ドロップレットターゲットにプレパルスレーザーを照射した場合の、微粒子生成の計算モデル (Lukiyanchuk モデル) の概念図

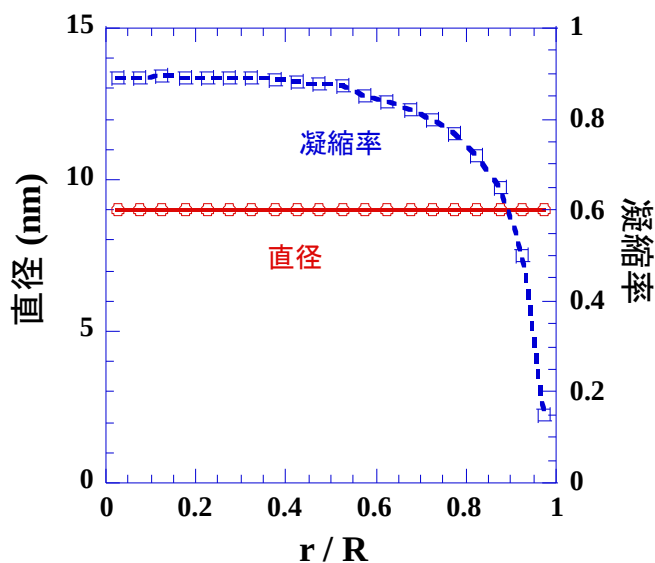


図 5 求めた、ある時刻のクラスターの直径分布と凝縮率分布

本講演者は、2003 年度から 2006 年度まで行われた、高速点火レーザー核融合炉プラント設計委員会「高速点火レーザー核融合炉発電プラントの概念設計」において、核融合生成 α 粒子等により加熱された液体壁からの蒸発金属中の微粒子生成について、Lukiyanchuk モデルを改良し、液体壁のアブレーション解析コードに組み込み、蒸気中の微粒子の粒径と凝縮率等の評価を行ってきた。図 6 は、液体壁レーザー核融合炉の炉壁表面近傍での課題、図 7 は、高速点火レーザー核融合炉プラント設計「KOYO-fast」に基づいて、液体壁からの蒸発金属のクラスター化を評価し求めた、ある時刻のクラスターの直径分布と凝縮率分布である。

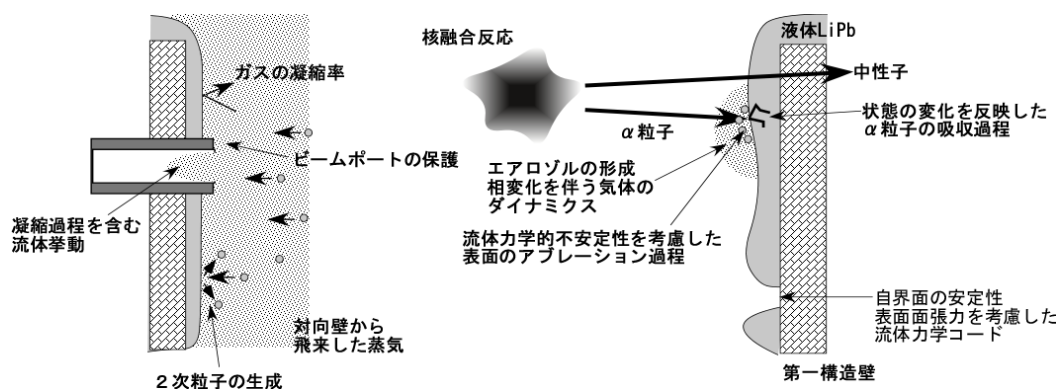


図6 液体壁レーザー核融合炉の炉壁表面近傍での課題

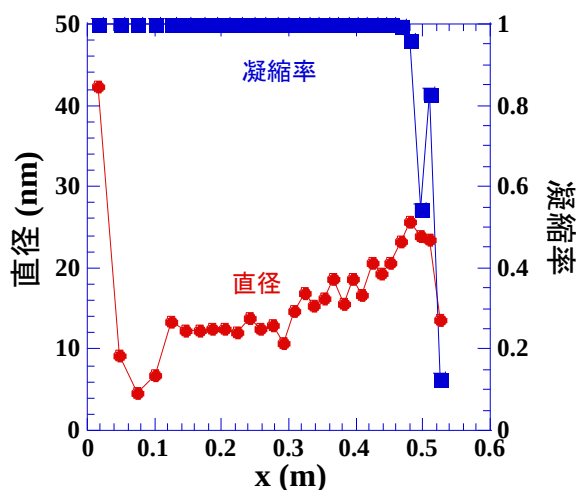


図 7 ある時刻のクラスターの直径分布と凝縮率分布

4. パルス幅 10 ms の高強度パルスレーザーをサンプルに照射した場合の、1 次元シミュレーション

レーザー加工において、使用が想定されるレーザーのパラメーターを用いて、1次元のシミュレーションを行い、温度分布の時間発展を評価した。パルス幅は 10 ms、強度は $5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、対象物質はタングステン、とした。融点は 3695 K、沸点は 5828 K である。レーザーの吸収はランバート則に従うとし、吸収長 $\delta = 100 \text{ nm}$ の場合と $\delta = 1 \text{ }\mu\text{m}$ の場合で 0.2 ms 時の温度分布の比較を行った。結果を図 8 に示す。蒸発は、表面から非常に薄い領域で起こり、微粒子発生は蒸気の温度密度に大きく影響を受けるので、微粒子発生に関してこの温度分布の差異は無視できない。固体金属のレーザーの吸収長は数十 nm 程度である。

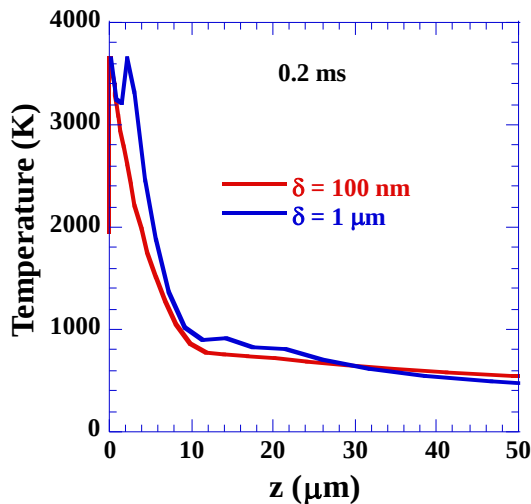


図 8 吸収長 $\delta = 100 \text{ nm}$ の場合と $\delta = 1 \text{ }\mu\text{m}$ の場合の 0.2 ms 時の温度分布の比較

5. 今後の課題

固体から始めて、10 ms のレーザー加工のシミュレーションを行うのは、計算時間的に大変難しいものがある。ある程度溶融池ができた時点を初期値とし、そこからの蒸発現象をシミュレーションする方向で、検討を行う。また、得られた温度分布等から、蒸気、微粒子等の発生を評価する。