

# レーザー励起 EUV 光源におけるターゲットの分散、 微粒子発生流体シミュレーション

## Hydrodynamics simulation of fragmentation of laser pumped target for EUV sources

佐々木明, 原子力機構, 京都府木津川市梅美台 8-1, E-mail: sasaki.akira@jaea.go.jp  
Akira Sasaki, Japan Atomic Energy Agency, 8-1 Umemidai, Kizugawa-shi, Kyoto, JAPAN

A hydrodynamics model for the laser plasma pumped (LPP) extreme ultra-violet (EUV) light sources is presented. A Lagrangian hydrodynamics simulation, which uses arbitrary mesh reconstruction and includes liquid-gas phase transition, is developed to investigate particle emission from a short pulse laser irradiated Sn droplet target.

### 1. はじめに

次世代半導体リソグラフィ技術の実現のため、レーザープラズマ EUV 光源が注目されている。レーザーでスズドロップレットターゲットを照射して生成するプラズマは、波長 13.5nm の発光を効率的に放出するが、応用で求められている高出力を実現するためには、シミュレーションによる最適化が重要である<sup>(1)</sup>。

EUV 光源を励起する際に、Fig.1 のようにまずプリパルスレーザーでスズドロップレットを照射し、プラズマを予備生成し、それをメインパルスレーザーで加熱すると、発光に適した低密度のプラズマが生成すると考えられている<sup>(2)</sup>。プリパルスレーザーの条件により、プリプラズマの特性が変化し、短パルスレーザーを用いた時には、プラズマというよりも微粒子が生成すると考えられている<sup>(3)</sup>。このような微粒子の生成過程を再現し、特性の評価を行うための流体シミュレーションモデルの研究を行っている。

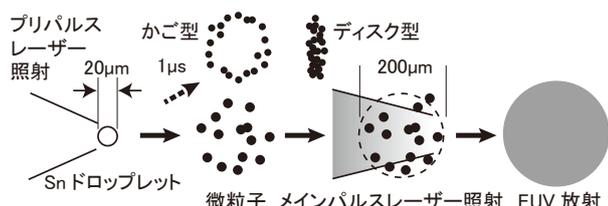


Fig. 1 Schematic diagram of pumping of the laser plasma EUV source.

### 2. シミュレーションモデル

これまで EUV 光源の特性の解析のためには、レーザー核融合分野で開発された輻射流体シミュレーションが用いられてきた。それらのコードでは、多くの場合あらかじめ均一なプラズマが存在することを想定されていたのに対し、EUV 光源の評価においては、レーザー照射初期のプラズマ生成過程が重要になっている。初期に固体のターゲット物質が溶融、蒸発する過程では、種々の不安定性が発生して、構造形成、粒子放出が起こると考えられており<sup>(4)</sup>、その特性を評価することは EUV 光源の解析だけでなく、レーザーアブレーションを用いるさまざまな応用において重要になると考えられる。

本研究では、ターゲット物質の相転移と、それによって起こる粒子放出を取り扱うシミュレーションのモデルについて検討した。流体とともに動くラグランジメッシュを用いたシミュレーションは、流体運動によってメッシュが破綻する問題を持っているが、本研究では、メッシュの歪みを評価して、任意に再構築することにより、液相中の気泡、気相中の微粒子を取り扱えるようにすることを考えた。さらにその方法の応用によって、気相と液相の間の相転移を取り扱うことを考えた。Fig.2 にメッシュの再構築のアルゴリズムの例を示す。セルが扁平になりすぎた時は、接続状態の変更を行うか、辺の中心に新しい格子点を生成し、セルを分割

する。また、2つの格子点が接近しすぎた時は、2つの格子点を1つに融合し、消滅したセルの物理量を周辺のセルに分配する。

本研究では、相転移の理論、相転移の発生条件を認めた上で、それを数値モデルとして表現する方法を考えた。物質の密度、圧力が急激に変化する相転移過程は、シミュレーションにおいて単一のセルだけを考慮しては考慮することが困難である。今回のモデルでは、セルの集合について、正しい気液の割合を定義することを考えた。平衡状態を考えると、物質の密度、圧力から混相状態の存在領域が定義され、気相と液相の比を求めることができる。そこで、あるセルが混相状態になったと認められた時、セルを分割して、液相中に気相の気泡、気相中に液相のクラスタを生成することを考えた。

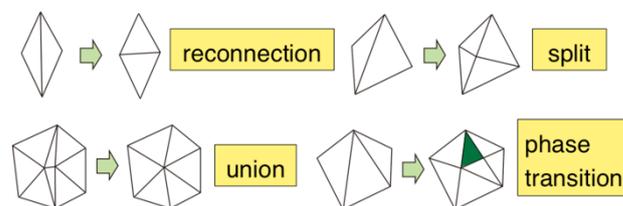


Fig.2 Methods of reconstruction of the mesh.

次に相転移の条件を決めるための状態方程式について検討した。これまでの流体シミュレーションでは、混相状態について、気相、液相を平均化した圧力、内部エネルギー等の熱力学的な量を与える状態方程式が扱われていた<sup>(5)</sup>。この方法は、それぞれの物質に対して正確な状態方程式を得ることが難しいことや、混相状態において音速が0になるなど、物性値が特異な値になる問題があった。

今回のモデルでは、Fig.3 のように、混相状態は、理想的な気相と液相の媒質の混合状態であり、決められた相転移条件によって両者の間の転移が発生すると考えた。気相については、理想気体を考え、液相については、理想的な液相、固相の性質を備えた仮想的な状態を考える。すなわち、液相、固相の媒質には温度ごとに決まる平衡体積があって、それからのずれに比例して、体積弾性率で決める圧力が発生すると考える。平衡体積から圧縮すれば正、進展すれば負の圧力が発生し、媒質はその体積を保つように振る舞う。エネルギーは熱と歪みの形で蓄えられ、熱エネルギーに対する比熱はデューロンプティの法則に従うとする。圧力は境界面に垂直な向きに働くとする。理想的な状態を考えると、熱力学的な量が解析的に求められ、相転移条件、潜熱などを相互に矛盾ない形で求めることができるようになると期待される。

Fig.4 にシミュレーションで現在使用している Sn の状態方程式を示す。気相と液相の間の転移の条件はファンデルワールス状態方程式<sup>(6)</sup>から求め、転移点の体積が液相の平衡体積になるとして

いる。転移点の体積が温度が高くなると増すことで、熱膨張の効果が考慮される。

計算では、セルに熱が与えられて膨張したり、力が作用して体積が Fig.4 の点線で囲まれる混相領域に入った時、Fig.5 のようにセルを全体の体積が保たれるように液相と気相の部分に分割する。同時に、熱エネルギー、歪みエネルギーに加えて、表面エネルギー、エントロピーからギブスの自由エネルギーを求め、転移の前後でそれが等しくなるように温度を定める。転移後は歪みのエネルギーは0になるようにする。隣接するセルも含めて分割することによって、三角メッシュの構成が維持される。この方法は、蒸発、凝縮に加えて力学的な破壊を扱う場合にも適用可能と考えられる。

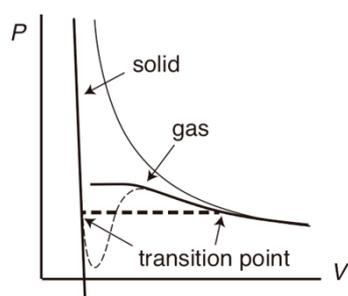


Fig.3 Equation of state of liquid and gas phase in the present model.

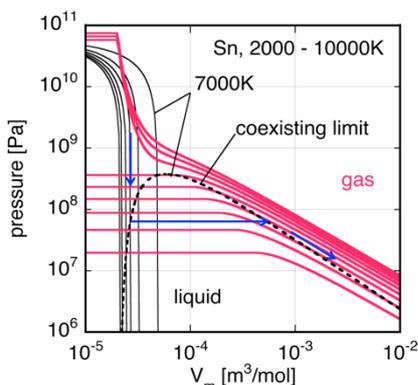


Fig.4 Equation of state of Sn.

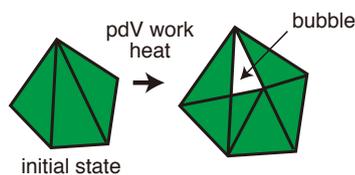


Fig.5 The method to represent phase transition, the cell is split to conserve volume and Gibbs free energy.

このようなモデルに基づき、流体運動の計算、温度の計算に加え、相転移の計算、メッシュの再構築の処理を、タイムステップごとに繰り返すことによってシミュレーションを行うようにした。解法は単純な前進解法によるが、液相部分のエネルギー方程式については、反復によって変化前の熱、歪みエネルギーと作用した仕事の和が、変化後の熱、歪みエネルギーの和になるようにした。

### 3. 結果と考察

Fig.5 にテスト計算の例を示す。初期に高温 (4000K) に加熱された Sn 円柱の沸騰する様子を示す。媒質は真空中に置かれてい

て、ある遅れ時間の間、媒質はもとの形を保っているように見えるが、この状態で正の圧力が働くために少しずつ膨張し、相転移条件を満たした時点で内部に気泡が生成するようになる。気泡は次第に成長し、後半では気相中に液相のクラスタを残した状態で全体が急激に膨張するようになることを示す。メッシュの再構成が繰り返して行われて、気泡やクラスタが表現される様子を示す。

現在、モデルをより適切なものとするための検討、改良を進めている。まず、メッシュ再構築のアルゴリズムについて、エネルギーと熱力学的な諸量の保存を保証するとともに、計算を安定化させる方法について検討している。流体力学シミュレーションでは、数値不安定性が常に問題になるが、メッシュの再接続処理は、運動エネルギーを熱に変える粘性の作用を持ち、融合処理は、数値的な揺動を平均化する拡散の作用を持つと考えられる。

次に、状態方程式の記述において、気相、液相のエントロピーおよび潜熱の評価を行い、相転移の物理モデルと計算手法において、離散的なメッシュを用いながら、核生成条件を正しく表現することと、表面張力の効果を考慮し、気泡やクラスタの成長を表現する方法を検討している。

このようなシミュレーションに、照射レーザーの吸収過程、電子や放射による輸送過程を導入することにより、EUV 光源の特性の評価が行えるようになると考えている。

### 参考文献

- (1) K. Nishihara, et al. Phys. Plasmas, **15**, 056708 (2008).
- (2) A. Sasaki, et al. J. Appl. Phys. **107**, 113303 (2010).
- (3) A. Endo, proceedings of the 2012 EUV source workshop, <http://www.euvlitho.com/>
- (4) S. Anisimov, et al. "Instabilities in laser-matter interaction" 1995 CRC Press, Tokyo.
- (5) R. More, et al. Phys. Fluids, **31**, 3059 (1988).
- (6) D. A. Young, et al. Phys. Rev. **A3**, 364 (1971).

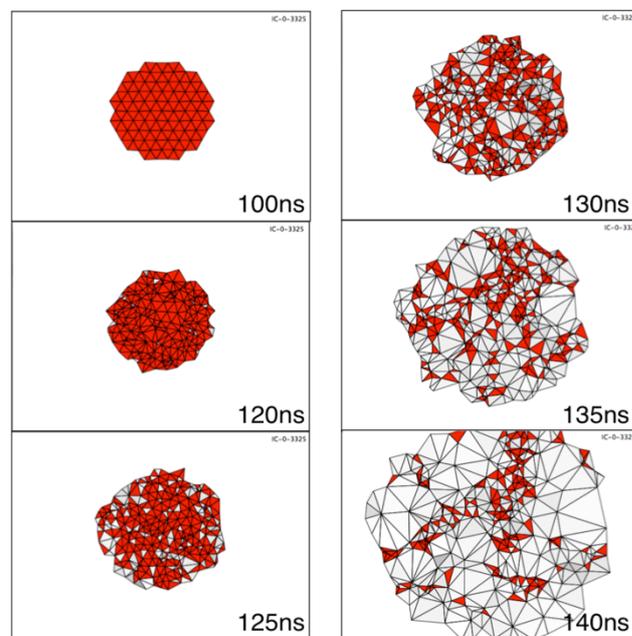


Fig.6 Result of a test calculation for boiling hot Sn liquid.