

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610195

研究課題名(和文) レーザープラズマ生成初期の構造形成のモデル化とEUV光源の高効率励起の機構解明

研究課題名(英文) Modeling of structure formation in the initial stage of laser plasma interaction and its application to the study of EUV source

研究代表者

佐々木 明 (Sasaki, Akira)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：10215709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープラズマ励起(LPP)極端紫外(EUV)光源において、短パルスレーザーによって照射された液滴が粒子になって飛散する機構の解明と、それを計算で再現する手法の確率を目指した研究開発を行った。

2次元ラングランジ流体のシミュレーションコードに、物質の分布に従ってメッシュを再配置する手法、気相と液相の間の相転移による気泡や粒子の精製のモデルを組み込んだ。スズのファンデルワールス状態方程式を用い、平均温度、密度に対する気相と液相の比を求め、それを満足するようにセルの分割、諸量の再配分を行う方法を開発した。初期に液体状態のスズ円柱ターゲットを、均一、時間的に一定の条件で加熱するテスト計算を行った。

研究成果の概要(英文)：Theoretical investigation of the particle emission from short pulse laser irradiated solid targets is carried out, and simulation code is developed, for its application to the analysis of laser pumped plasma (LPP) Extreme Ultra-Violet (EUV) light source. We develop the algorithms for the reorganization of mesh, along the distribution of the material, for the 2 dimensional Lagrangian hydrodynamics model. Furthermore, the liquid-to-gas transition is taken into account firstly by determining the ratio of volumes of liquid and gas region corresponding to the average temperature and density, and secondly by splitting the target cell and redistributing the mass and internal energy to the divided cells. Test calculations are carried out for uniformly heated tin cylinder to show the initial bubble formation to subsequent decomposition of the target into particles.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：レーザー生成プラズマ 流体シミュレーション EUV光源 状態方程式 相転移

1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の進歩によって、高エネルギー密度科学、核融合などの基礎研究から、加工や光源等の応用技術において、物質の高度な加工が可能になってきた。特に、EUV 光源では、これまではデブリ粒子生成等の問題において、もっぱら光源の性能を損なうものと考えられてきた、レーザー照射により固体ターゲットから発生する微粒子を、高出力、高効率化のためにプラズマ予備生成の過程で積極的に活用することが試みられるようになった。そのため、シミュレーションにおいても、従来のモデルでは十分考慮されていなかった、レーザー照射初期のターゲット物質との相互作用と、それによって引き起こされる表面の構造形成、微粒子放出を考慮し、レーザー生成プラズマの時間的、空間的特性をより忠実に再現するモデルを開発することが急務と考えられるようになった。

2. 研究の目的

本研究は、レーザーでターゲットを照射してプラズマを生成する際の初期の相互作用についてのモデルを構築することを目的として行なった。すなわちレーザーで照射された物質が固体、液体から気体、プラズマ状態へと変化する際に起こると考えられる、相転移に伴う自発的な構造形成の過程のモデル化を行う。セルを動的に分割、再配置するというアイデアに基づく流体シミュレーションの手法の研究開発を行う。EUV 光源において、プリパルスレーザーで固体ターゲットを微粒子に分散し、メインパルスレーザーの吸収率の改善や、温度、密度分布を最適化する手法の解析に応用するため、微粒子の発生の機構を明らかにする。またプラズマの構造が、高エネルギー密度プラズマ、warm dense matter 状態の物性に与える影響を明らかにする。

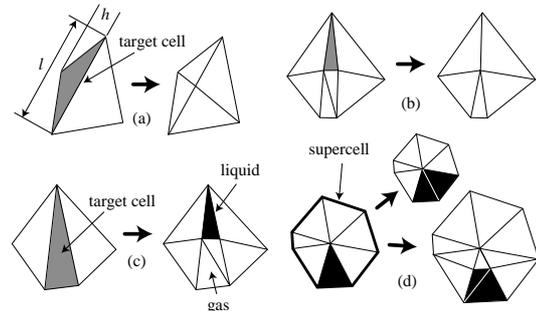
3. 研究の方法

相転移過程を取り入れた 2 次元流体シミュレーションの物理モデル、数値計算手法の研究開発を行った。まず流体運動に従って移動するラグランジアン流体モデルにおいて、物質の分布の変化に従ってセルを動的に再配置する手法の開発を行った。次に気液相転移と、それに伴って発生する構造形成について、状態方程式から、与えられた温度、密度に対する気液の比を求め、それに従うようにセルを分割することによって相分離を表現する手法を開発した。加熱されたターゲットが粒子に分解する過程を経て気化する現象の計算を行い、計算の結果を、理論モデル、実験結果と比較して検証した。さらに、モデルにレーザー生成プラズマに固有の物理過程を組み込むことにより、レーザー励起プラズマ EUV 光源の特性の解析への適用について検討した。

4. 研究成果

レーザーでターゲット物質を照射すると、しばしば粒子発生のような時間、空間の構造形成が起こる。しかし、レーザー生成プラズマのシミュレーションは以前から行われているにもかかわらず、このような現象を再現することは、流体手法、粒子手法のいずれでも容易ではなかった[1,2]。本研究では、メッシュの動的再配置のアルゴリズムを組み込んだラグランジアン流体シミュレーションの手法の研究開発を行った。流体の各場所、各時刻における質量、エネルギーの保存を保障し、物質の状態を状態方程式によって評価できるようにし、物質の各場所、各時刻での気液の比を得て、それに従ってメッシュの分割、融合を行い、相転移を伴うレーザーと物質相互作用のシミュレーションを行う手法を新たに開発した。

(図 1)にメッシュの動的再配置のアルゴリズムを模式的に示す。計算ステップ毎にメッシュの歪みの大きさを監視し、それがある限界を超えた場合には、分割、融合を行うことによって、メッシュの破綻を避けるようにした。その応用として、状態方程式によってあるセルが気液共存状態になった時、セルを分割して気体の領域と液体の領域を作り出し、相分離(スピノーダル分解)を表現するようにした。

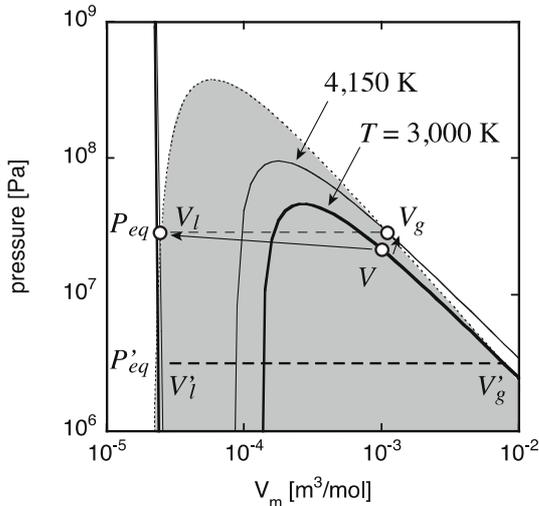


(図 1) 提案手法によるメッシュの動的再配置アルゴリズムの例。(a)メッシュの分割、(b)融合、(c,d)相分離の表現方法

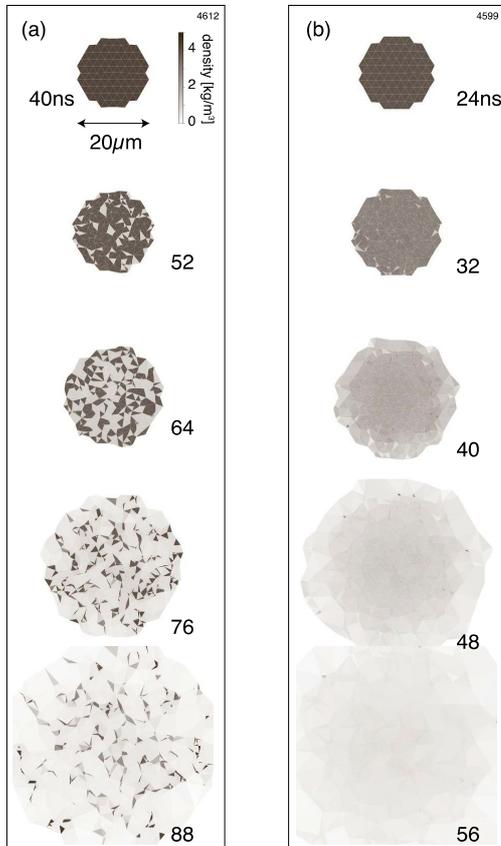
具体的な気体の領域と液体の領域の体積は、状態方程式を評価することで決定することができる。(図 2)は Sn のファンデルワールス方程式における、気液共存状態の温度、密度の領域を示す [3]。気液共存状態とは、物質が安定に均一な状態を保つことができず、気体の領域と液体の領域に分離する温度、密度条件の領域をさす。図は、質量、エネルギーの保存の関係から、相転移、総分離後の気体の領域と液体の領域の割合、温度を求めるところを示す。この方法では、相転移における潜熱の効果も自動的に取り入れられる。

(図 3)に、開発したシミュレーションコードによって、均一、時間的に一定のパワーで加熱された Sn 円筒についてのテスト計算の結果を示す。加熱パワーが 2.5×10^{12} W/mol の場合、まずターゲット内部に気泡が生じ、

それが成長して全体が粒子に分解される様子を示す。



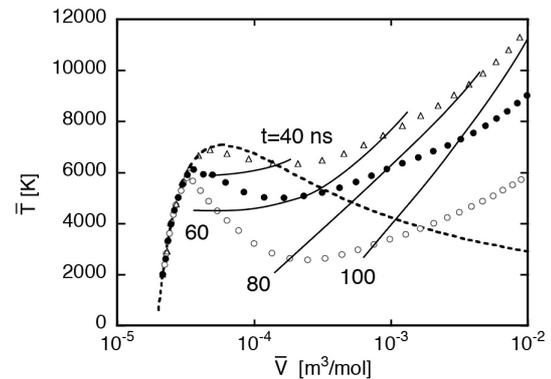
(図2) Sn のファンデルワールス状態方程式における気液の比の決定方法



(図3)加熱された Sn 円筒の密度分布の時間発展の計算例。加熱パワーがそれぞれ(a)2.5 (b) 6×10^{12} W/mol の場合を示す。

(図4)はターゲット物質全体を平均した、温度、比体積の時間発展を示す。加熱パワーが 2.5×10^{12} W/mol の場合、物質は気液共存状態を経て膨張、気化することを示す。一方、加熱パワーが 6×10^{12} W/mol の場合は、物質の温度はすぐに臨界温度以上となるため、粒子の生成は起こらず、物質は全体として一様に

気化することは(図3)からも示されている。開発したコードは、液体が沸騰して気化する場合に見られる現象を再現し、また粒子発生が起こる条件をも示すことが明らかになった。



(図4)加熱された Sn 円筒の平均温度、比体積の時間発展。加熱パワーがそれぞれ 2.5 (白丸) 4(黒丸)、 6×10^{12} W/mol (三角形) の場合を示す。点線以下は気液共存状態を示す。

<引用文献>

- [1] A. Sunahara, K. Nishihara, A. Sasaki, Plasma Fusion Res. 3, 043 (2008).
- [2] R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn, J. Ramirez, Comput. Phys. Commun. 180, 977 (2009).
- [3] D. A. Young, Phys. Rev. A3, 364 (1971).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, "A numerical model of emission of particulate debris from laser-irradiated metal targets", AIP Advances, 7, 95005 (2017), DOI: 10.1063/1.4991398 (査読あり)

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, "Investigation of the ionization balance of bismuth-to-tin plasmas for the extreme ultraviolet light source based on a computer-generated collisional radiate model", AIP Advances, 6, 105002 (2016), DOI:10.1063/1.4964496 (査読あり)

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, "Modeling of initial interaction between the laser pulse and Sn droplet target and pre-plasma formation for the LPP EUV source", Proceedings of SPIE, 9776, 07762C (2016), DOI: 10.1117/12.2219045 (査読あり)

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, F. Koike, "Atomic processes and equation of state of high-Z plasmas for EUV sources and their effects on the spatial and temporal evolution of the plasmas", J. Phys. Conf. Ser. 668, 12099 (2016), DOI: 10.1088/1742-6596/688/1/012099 (査読あり)

A. Sasaki, S. Kato, E. Takahashi, Y. Kishimoto, T. Fujii, S. Kanazawa, "Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model", Jpn. J. Appl. Phys. 55, 26101 (2016) DOI: 10.7567/JJAP.55.026101 (査読あり)

〔学会発表〕(計 7 件)

A. Sasaki, "Modeling of emission of particle debris from ablation of the tin target for the laser produced plasma extreme ultra-violet light source", SPIE Advanced Lithography 2018.

佐々木明、砂原淳、西原功修、西川 亘、"EUV 光源ターゲットのアブレーションによる粒子発生モデル構築"、第 78 回応用物理学学会秋季学術講演会、2017 年

佐々木明、砂原淳、西原功修、"EUV 光源ターゲットのアブレーションにおける気泡、粒子の生成過程"、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, "Numerical analysis of particle emission from laser irradiated tin targets for the optimization of the EUV source" SPIE Advanced Lithography 2017.

佐々木明、砂原淳、西原功修、"レーザー励起プラズマ EUV 光源ターゲット分散過程のモデル構築(2)"、第 63 回応用物理学学会春季学術講演会、2016 年

佐々木明、"次世代リソグラフィ用 EUV 光源におけるレーザー照射によるターゲット物質の分散、粒子生成過程のモデリング"、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年

佐々木明、砂原淳、西原功修、"レーザー励起プラズマ EUV 光源ターゲット分散過程のモデル構築"、第 76 回応用物理学学会春季学術講演会、2015 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 明 (SASAKI, Akira)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・主幹研究員

研究者番号: 10215709

(2) 研究分担者

砂原 淳 (SUNAHARA, Atsushi)

大阪大学・レーザー科学研究所・招へい准教授

研究者番号: 00370213

西原 功修 (NISHIHARA, Katsunobu)

大阪大学・レーザー科学研究所・名誉教授

研究者番号: 40107131

西川 亘 (NISHIKAWA, Takeshi)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号: 80243492