

レーザーアブレーションプラズマのシミュレーションコード開発
Development of a simulation code for laser-generated plasmas

池田千穂¹、砂原淳²、松岡雷央¹、難波慎一¹
 Chiho Ikeda, Atsushi Sunahara, Leo Matsuoka, Shinichi Namba

広大院工¹、レーザー総研²
 Graduate school of Engineering, Hiroshima Univ.¹, ILT²

本文

ナノ秒パルスレーザーを固体ターゲットに照射すると、最初の段階として固体表面が熔融し、気化、電離を経て、ターゲット表面からプラズマとして噴出する。その後、プラズマはレーザー-プラズマ相互作用によって電子の加熱および電離が進行しながら、電子熱伝導の効果によって等温的に膨張してゆく。

本研究では、このようなレーザーアブレーションプラズマを2次元流体近似によってシミュレーションすることを目的としている。今回の発表ではロバストかつ高精度なシミュレーションを行うためのコード開発と従来スキーム及び従来モデルとの比較を行う。

プラズマ流体の基礎方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{D\rho}{Dt} &= -\rho\nabla\cdot\vec{u} \\ \frac{D\vec{u}}{Dt} &= -\frac{1}{\rho}\nabla p \\ \rho c_{vi} \frac{DT_i}{Dt} &= -p_{thi}\nabla\cdot\vec{u} - Q_{ei} \\ \rho c_{ve} \frac{DT_e}{Dt} &= -p_{the}\nabla\cdot\vec{u} + Q_{ei} + \nabla\cdot(\kappa_e T_e) + S_e \end{aligned}$$

ここで、 ρ は質量密度、 \vec{u} は速度、 T_i 、 T_e はそれぞれイオン温度、電子温度、 p はプラズマ圧力である。 p_{thi} 、 p_{the} はそれぞれ、イオン圧力、電子圧力に関する状態方程式モデルから次のように得られる。

$$\begin{aligned} p_{thi} &= T_i \left(\frac{\partial p_i}{\partial T_i} \right)_\rho \\ p_{the} &= T_e \left(\frac{\partial p_e}{\partial T_e} \right)_\rho \end{aligned}$$

また、 Q_{ei} は電子-イオン間のエネルギーの衝突緩和である。 κ_e は電子熱伝導係数であり、Spitzer-Harm の熱伝導係数を用いて、Fokker-plank 方程式の1次までの式から拡散近似を用いて得た。流体の時間スケールは電子熱伝導に比べて十分長く、この効果によってプ

ラズマはアブレーションフロントまで等温的に膨張してゆく。 S_e はレーザー加熱、輻射などの正味の入力エネルギーであり、逆制動放射によるレーザーエネルギーの吸収に加えて、光学的に厚いプラズマであるので、レーザー入射が終わった後も、電離、再結合、励起、脱励起などの原子過程を伴った輻射、吸収を繰り返して進展してゆく。とくに金属ターゲットを用いた場合には原子過程が輻射に与える効果が重要となる。これらの方程式をレーザープラズマ計算に従来用いられてきた非保存型の CIP 法と、保存型スキームである HLL 法を用いて数値計算を行った。HLL 法を質量、運動量、エネルギー保存則の全てに用いた場合、保存型となるが、二温度計算の必要上、イオン温度、電子温度のそれぞれを独立変数にとるため、エネルギー方程式を非保存型 CIP 法で計算する方法を試した。

さらに本研究では、レーザーアブレーション初期のプラズマ発生時の電離度の低い段階における中性粒子と電子の衝突緩和に注目した。酸素原子または窒素原子では、電離度が 1/100 から 1/1000 程度以下の場合、中性粒子-電子間の衝突緩和が、イオン-電子間の衝突緩和よりも重要になることが知られている。計算モデルに中性-電子間の衝突による吸収モデルを考慮し、レーザーアブレーションの進展に与える影響を検討した。

[参考文献]

- [1]砂原淳：プラズマ・核融合学会誌 **89**, 416-422 (2013).
 [2]R. C. Mjolsness and H. M. Ruppel, Phys. Rev. **154**, 98-109 (1967)