

課題名

レーザー点火初期過程におけるプラズマ及び衝撃波の挙動に関する数値計算研究

研究背景

高出力レーザーの収束により爆発性混合気点火するレーザー点火では、ナノ秒オーダーという時間でマイクロ～サブミリメートルという空間にエネルギーを注入する。集光点におけるエネルギー密度は $10^{10} \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ に到達し、その結果、レーザー照射からナノ秒オーダー後にはプラズマが発生し、これが最終的に火炎核や自走燃焼波へ成長することで着火に至る。しかし、火炎核形成の前段階ではプラズマの生成と急速な膨張によって球状衝撃波が形成されており、これは早期に火炎核から離脱するが、図 1 のように楕円形空洞内で反射・収束させることで局所的な爆発を引き起こし着火が可能になる^[1]。

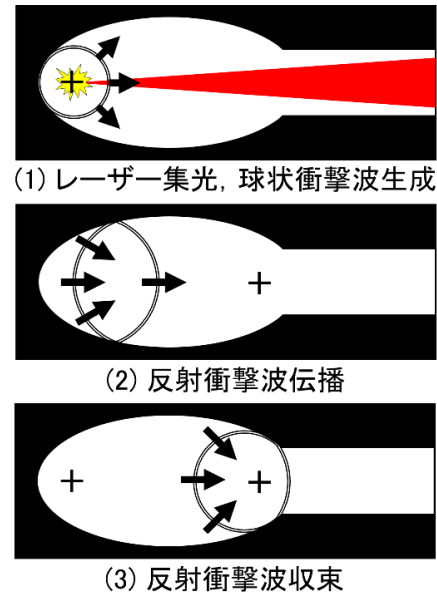


図 1. 本研究で提案する点火手法

目的

一般的なレーザー点火では火炎核の成長を主体としているが、本手法は衝撃波を主体としており従来と比べ $10 \sim 100$ 分の 1 程度の時間で自走燃焼波をつくることができ、極めて高い工学的インパクトを有す。しかし、レーザー照射からプラズマの形成・成長、衝撃波の形成・収束の段階には未だ不明な点が多く、特にプラズマ形成の前後ではレーザー・プラズマ干渉によってプラズマの成長方向に異方性が生まれる(図 2)^[2]。この異方性は初期衝撃波の形状に影響を与えるため、本研究では現象の明確化に加えプラズマや衝撃波の形成に影響を与える主要因子の精査を行う。

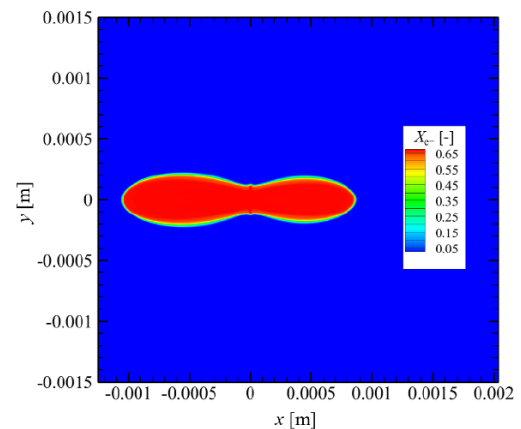


図 2. レーザー照射から 12 ns 後の電子密度分布

方法

本研究では、イリノイ大学 Panesi 教授から提供されたインハウス計算ライブラリ High fidelity tool for maGnEto gas dynamics simuLations (HEGEL)^[2-6]を用いて、レーザー照射から衝撃波形成までの流れ場の変化を明確化する。

遂行状況と今後の課題

名古屋大学スーパーコンピュータシステム「不老」への HEGEL 導入を試みたところ、当該ライブラリが Fortran 2008 で書かれており、スーパーコンピュータシステムの Fortran コンパイラのバグによって導入に長い時間を要した。学内及び富士通サポート班の技術補助により、HEGEL 導入時にはバグを回避するように、また Fortran コンパイラについてはバグの修正を行っていただいた。同様に、HEGEL と同調して動く 2 つのモジュールについても導入を試みたが、これらは Fortran 2018 で書かれていたため、学内の技術補助により Fortran 2008 でも動作するように修正を加えていただいた。

本研究は 2025 年度も継続する予定であり、現在は HEGEL のテストシミュレーションを実施している。

参考文献

1. Sato, T., Matsuoka, K., Kawasaki, A., Itouyama, N., Watanabe, H., Kasahara, J.: Experimental demonstration on detonation initiation by laser ignition and shock focusing in elliptical cavity. *Shock Waves*, **33**, 2024, pp. 521–531.
2. Munafò, A., Alberti, A., Pantano, C., Freund, J.B., Panesi, M.: A computational model for nanosecond pulse laser-plasma interactions. *Journal of Computational Physics*, **406**, 2020, 109190.
3. Alberti, A., Munafò, A., Koll, M., Nishihara, M., Pantano, C., Freund, J.B., Elliott, G.S., Panesi, M.: Laser-induced non-equilibrium plasma kernel dynamics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53** (2), 2020, 025201.
4. Alberti, A., Munafò, A., Pantano, C., Freund, J.B., Panesi, M.: Collinear dual-pulse laser optical breakdown and energy deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53** (20), 2020, 205202.
5. Alberti, A., Munafò, A., Pantano, C., Panesi, M.: Self-consistent computational fluid dynamics of supersonic drag reduction via upstream-focused laser-energy deposition. *AIAA Journal*, **59** (4), 2021, pp. 1214–1224.
6. Alberti, A.: Multi-scale modeling of laser induced breakdown in non-equilibrium plasmas. Ph.D. thesis, University of Illinois, 2020.