

LSD-LSC 遷移で起きていること

Transition Phenomenon of LSD to LSC

○白石 裕之(大同大)

○Hiroyuki Shiraishi (Daido University)

Abstract

Laser-supported detonation (LSD) is one of the most important supersonic phenomena in laser propulsion because it can generate the required high pressures and temperatures. In this study, the stability of LSD will be discussed based on physical fluid analysis on the LSD termination when the laser intensity is reduced, that is, the phenomenon that occurs near the LSD-LSC transition.

1. はじめに

将来的に有望視されている宇宙推進システムとして、レーザー推進システムが挙げられる。これはレーザー等をプラズマ化した推進剤に照射して運動エネルギーへと変換するものであり、化学ロケットの様に燃料によって推進性能の制約を受ける事は無く、燃焼器を必要としないために軽量化が見込めるなどのペイロード上の利点を持つ。

レーザー推進には、レーザー支持爆轟波 (Laser-supported detonation, 以下 LSD) の存在が必須とされる。これは推進に必要な高温・高圧が得られるためである。Raizer¹⁾は LSD におけるエネルギー均衡について検討し、伝播が空間的に広がる事によって超音速伝播が終息する事を示した。この時点でレーザーを吸収していた電離帯は弱くなって先行衝撃波に追従出来なくなり、LSD は伝播の遅い Laser-supported combustion wave (LSC) へと遷移する²⁾。この LSD-LSC 遷移は、デトネーションの維持、延いては推力を維持するためには極めて興味深い現象である。

LSD の伝播機構に関しては、著者らの数値解析による先行研究などで概要は明らかになっている一方で、伝播速度などの定量的な面で実験等他研究と一致を見ない²⁾。

そこで、本研究では著者らによる 1 次元 LSD 数値解析手法を現実に即したレーザー照射強度変化を導入し、LSD-LSC 遷移の兆候についての検討を試みた。

2. 物理流体数値解析模型と解析上の仮定

2.1 解析模型 図 1 に準 1 次元物理流体数値解析の概念図を示す。電磁ビームとしては CO₂ レーザー ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) が右方からノズル内に沿って集光される様に照射され、室温 ($T_0 = 300 \text{ K}$) の常圧アルゴンガス中を LSD・LSC が伝播す

る。なお、解析する上で高い電子温度を有する Hot spot を設定している。これは、実験において金属をターゲットとしてレーザーを照射し、予め自由電子がシーディングされた状態からスタートさせる事に相当する。

本解析では、Hot spot 1 mm を中央に設置した。Hot spot の電子温度は 15,000 K であり、サイズは 5000 points \times 0.005 mm) である。なお、シーディング量は先行研究³⁻⁷⁾に基づいて被伝播気体の 1% 数密度としている。

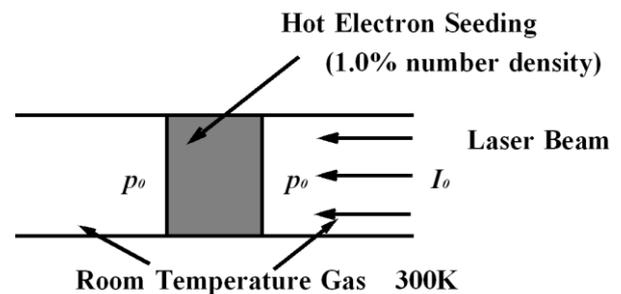


図 1 1次元解析模型

2.2 解析上の仮定 先行研究⁵⁾と同じく、以下の通りである。

- (1) 作動流体は、電氣的に中性である。
- (2) 化学反応として、以下の電離過程を考慮：

- 1) $\text{Ar} + e^- \leftrightarrow \text{Ar}^+ + e^- + e^-$,
- 2) $\text{Ar}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Ar}^{++} + e^- + e^-$

(3) 温度非平衡モデルとして、2 温度モデルを用いる。ここで電子励起モードに関連付けられた電子温度は、他モードの重粒子温度とは別個に扱われる。

(4) 輸送効果として、熱伝導を考慮する。また、有効拡散係数の算出においては、両極性拡散を考慮する。

2.3 支配方程式 本解析の支配方程式は準 1 次元 Navier-Stokes 方程式であり、これは各化学種及び全質量の保存式、運動量保存式、全エネルギー保存式及び電子エネルギー（電子並進-電子励起エネルギー）保存式から成っている。輻射エネルギー項 Q_{IB} , Q_B および Q_{EE} は陰的に扱われ、TVD 差分スキームによって時間進行が施される。

一般的な書式に従えば、具体的には次の通りである：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \mathbf{S}, \quad (1)$$

where

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \\ E_e \\ \rho_i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (E + p)u \\ E_e u \\ \rho_i u \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \kappa_{tr} \frac{\partial T_h}{\partial x} + \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial x} + \sum_j D_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial x} \\ \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial x} + \sum_j D_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial x} \\ D_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \end{pmatrix},$$

$$\text{and } \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_{IB} - Q_B \\ Q_{EE} + Q_{IB} - Q_B \\ w_i \end{pmatrix}. \quad (2)$$

なお、 A は断面積であり、添字 i は Ar , Ar^+ , e^- , または Ar^{++} を示している。また、比熱比 C_p と比エンタルピー h は Gnoffo ら⁸⁾ や Matsuzaki⁹⁾ による温度多項式近似によって実在気体効果が考慮されている。

まず、生成項 \mathbf{S} の緩和項は、 w_e を電子の生成率として、

$$Q_{EE} = Q_T - p_e \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{E_e + p_e}{\rho_e} w_e \quad (3)$$

で与えられる。

次に、逆制動輻射項 Q_{IB} については、次の様に表される：

$$Q_{IB} = I(x, t) \times (K_{ea} + K_{ei}) \quad (4)$$

ここで、 K_{ea} および K_{ei} はそれぞれ Kemp ら¹⁰⁾ と Johnston

ら¹¹⁾の方法に拠る。

また、制動輻射によるエネルギー損失 Q_B は、振動数を積分した形によって与えられる：

$$Q_B = 1.426 \times 10^{-40} n_e n_i T_e^{1/2} [\text{W} / \text{m}^3] \quad (5)$$

差分スキームとしては、輻射吸収項 Q_{IB} , Q_B および緩和項 Q_T は陰的に扱った、semi-implicit Harten-Yee、非 MUSCL、修正流束型 TVD スキームを用いている。また、拡散および熱伝導項も陰的に扱っている。

2.4 輻射吸収モデル 局所レーザー強度 $I(x, t)$ は、次式によって求められる：

$$\frac{dI(x, t)}{dx} = I(x, t) \times (K_{ea} + K_{ei}) \quad (6)$$

照射レーザー強度に関しては、実験データに基づいて $2x$ (設定強度) $\times 0.4^x$ [(解析上の時刻) / (1 μ 秒)] の様に近似を行った¹²⁾。また本研究では、先行輻射加熱による電子生成モデルを考慮している¹³⁾。

3. 解析結果と考察

LSD において衝撃波に追従していた電離吸収帯が LSC では吸収できないのは、遷移の過程で電子エネルギーモードに何らかの失活が生じたためと推察できる。図 2 は衝撃波面（細線）および電子加熱帯前面（太線）の走時曲線であり、照射レーザー強度の減衰によって LSD から LSC に遷移する様子が見て取れる。

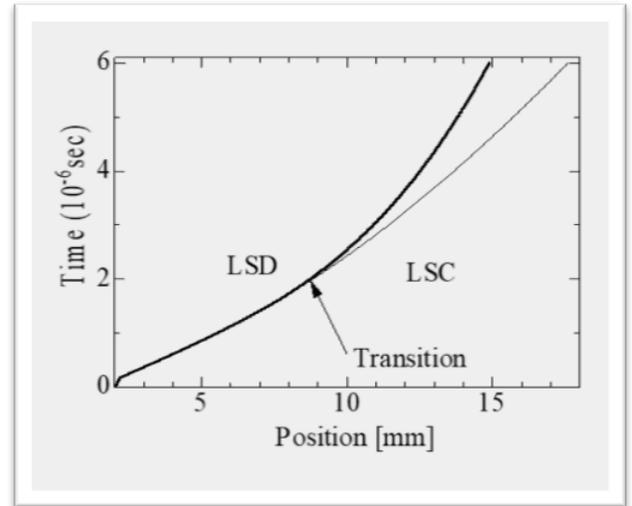


図 2 走時曲線

図 3 は、遷移終了と考えられる時点（時刻 2.14 μ sec.）における電子温度分布（太線）および重粒子温度分布（細線）である。本図によれば、確かにレーザー吸収帯は衝撃波後方に退き始めている。

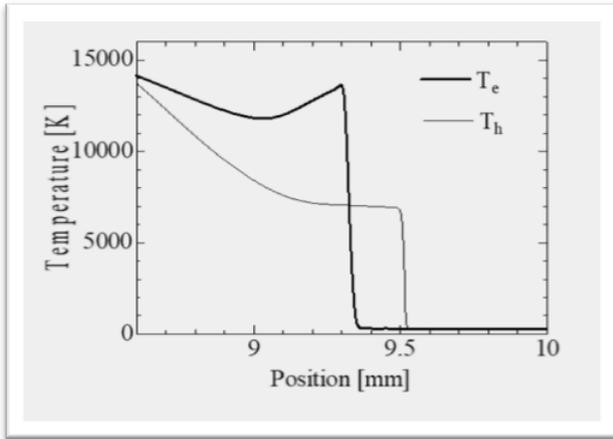
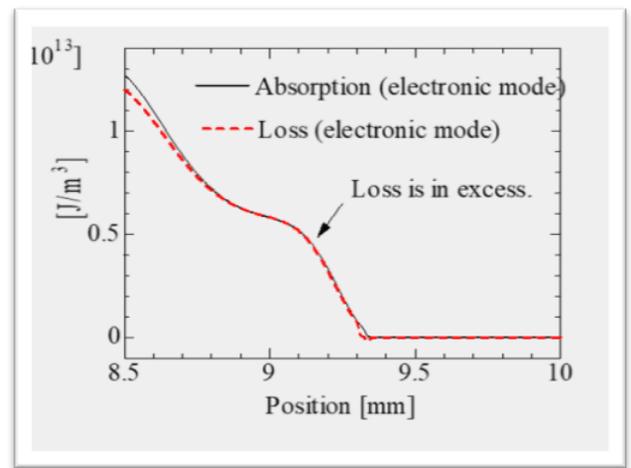


図 3 温度分布

図 4 は、同時点での電子・電子励起エネルギーモードのレーザー吸収による増加と電子-重粒子緩和による失活をプロットしたもので、およびその拡大図である。電子（・電子励起）エネルギー増加は先ず電子温度の上昇に費やされ、電子-重粒子緩和によってレーザー吸収で得られたエネルギーは重粒子温度の上昇および運動エネルギーに移される。

注目すべきは、衝撃波後方部分に得られた電子エネルギーを超過した重粒子エネルギーへの移動が存在する点。これによって電子エネルギーが失活し、衝撃波面座標系において電離帯が減速するという構図が見える。

このような電子エネルギー失活現象が起こる理由としては図 5 の数密度分布を御覧頂きたい。失活位置は 2 価電離イオンが減少していく箇所との一致が見られる事から、この現象は多価電離イオンの再結合開始によって引き起こされていると考えられる。レーザー強度の更なる低下のために電子エネルギーが衝撃波に追随出来る様な要素は無く、あとは波面座標系において停留出来る様な準安定的な間隙すら存在しないまま電離帯は後退していくのみとなる。



(拡大図)

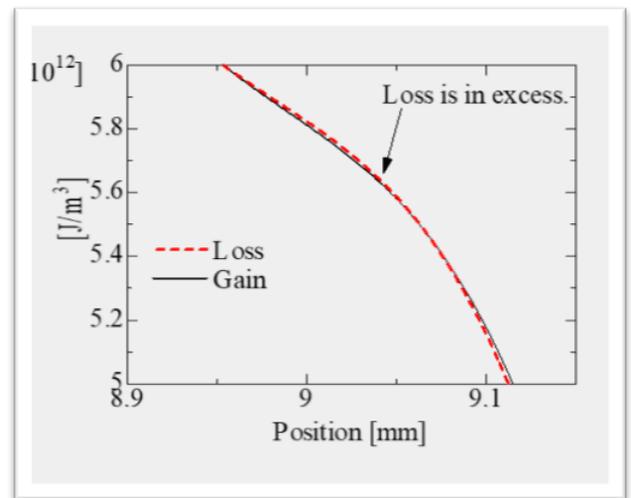


図 4 電子エネルギーモード收支

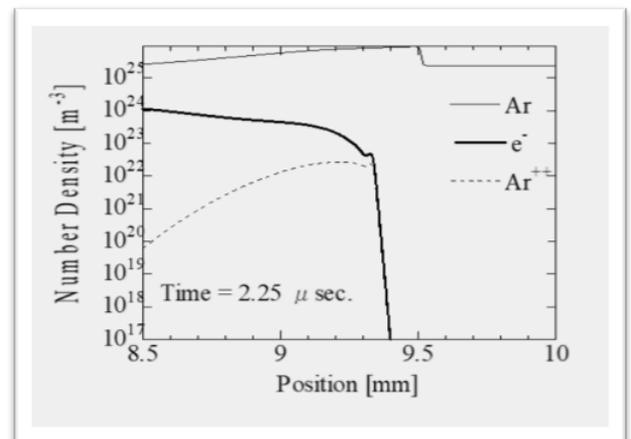


図 5 数密度分布

4. おわりに

本研究では、1次元LSD数値解析手法に現実に即したレーザー照射強度変化(単調減少)を導入し、LSD-LSC遷移付近の様子をCFD手法に基づいて確認を行った。

LSD伝播が継続する状態から照射強度を減ざると、電子・電子励起モードにおいてレーザー吸収(逆制動輻射)によって得られるよりも失われるエネルギーの方が過多になる箇所が衝撃波後方に発生する。

この現象は、多価電離イオンの再結合によって起こると考えられる。そして、一旦それが生じると電離帯は失活し、先行衝撃波面への追従が維持出来なくなつてたちまちLSCに至る。すなわち、一旦遷移が起これば安定したLSD-LSCの中間的現象は存在せず、電離帯は衝撃波面から離され続ける事になるという様な遷移のメカニズムが存在するものと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(15H05770)の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Raizer, Y. P.: Laser-induced Discharge Phenomena, Consultants Bureau, New York, 1977.
- 2) Keisuke Kanda, Kohei Matsui, Theo Rousell, Kimiya Komurasaki, Hiroshi Katsurayama, Hiroyuki Shiraishi, "Comparison of Measured and Computed Plasma Densities at Laser Supported Detonation Waves," The 26th Annual Meeting of IAPS, Naha, Japan, Mar. 2019.
- 3) Shiraishi, H. and Kumagai, Y.: Numerical Analysis of Threshold between Laser-Supported Detonation and Combustion Wave Using Thermal Non-Equilibrium and Multi-Charged Ionization Model, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, **10** (2012), pp. Pb_59 - Pb_63.
- 4) Shiraishi, H.: Numerical Analysis on Thermal Non-equilibrium and Multidimensional Laser-Supported Detonation Wave Using Multiply-Charged Ionization Model, *Proceed. 27th ISTS*, 2009, b-34, pp. 1 - 4.
- 5) Shiraishi, H.: Fundamental Properties of Non-Equilibrium Laser-Supported Detonation Wave, *Proceed. 2nd Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion*, 2003, pp. 68 - 79.
- 6) Shiraishi, H.: Numerical Analysis on Laser-Supported Plasma for Laser Propulsion Systems, *J. Space Tech. Science*, **23** (2007), pp. 20 - 29.
- 7) 照射強度変化を考慮したBSW(Beam-supported Wave)特性の数値的検討, 第62回宇宙科学技術連合講演会, 2018年10月.
- 8) Gnoffo, P. A., Gupta, R. N. and Shinn, J. L.: Conservation Equations and Physical Models for Hypersonic Air Flows

in Thermal and Chemical Nonequilibrium, *NASA Technical Paper* 2867, 1989, pp. 1 - 57.

- 9) Matsuzaki, R.: Specific Heat and Isentropic Exponent of High Temperature Gases. Exact Analytical Expressions, *AIAA Paper* 80-1532, 1980, pp. 1 - 11.
- 10) Kemp, N. H. and Lewis, P. F.: *Laser-Heated Thruster Interim Report, NASA Contractor Report*, NASA CR-161665, 1980.
- 11) Johnston, T. W. and Dawson: Correct Values for High-Frequency Power Absorption by Inverse Bremsstrahlung in Plasmas, *J. M. Phys. Fluids*, **16** (1973), p. 722.
- 12) Keisuke Kanda, Kohei Matsui, Theo Rousell, Kimiya Komurasaki, Hiroshi Katsurayama, Hiroyuki Shiraishi, "Comparison of Measured and Computed Plasma Densities at Laser Supported Detonation Waves," The 26th Annual Meeting of IAPS, Naha, Japan, Mar. 2019.
- 13) Katsurayama, et al.: Preliminary Investigation of Thermochemical Nonequilibrium behind a Strong Shock Wave with Precursor Photoionization in Argon, *AIAA* 2007-4552, (2007).