

CFD 解析結果に基づいた 線図によるレーザー支持デトネーション伝播構造の検討

白石裕之(大同大), 西村列順(DPT 株式会社)

Graphical analyses of LSD propagation by CFD results

by

Hiroyuki Shiraishi (Daido University) and Nobuyuki Nishimura (DPT Ltd.)

ABSTRACT

Laser-supported Detonation (LSD), one type of Laser-supported Plasma (LSP), is an important phenomenon accompanied by hypersonic flow because it can generate high pressures and temperatures for performing laser propulsion systems. In this study, graphical analyses using the thermal-non-equilibrium, one-dimensional numerical results of LSD waves are performed in the perfectly absorbed case, as a typical LSD propagation. This procedure confirms with the packaged structure of LSD propagation shown in ZND model, which is on type of a classical one-dimensional structure for a chemical detonation. On the other hand, it also shows the precursor absorption on the shock front as a characteristic of a LSD wave.

1. はじめに

宇宙レーザー推進システムに関連した物理流体現象として、レーザー支持プラズマ(Laser-Supported Plasma, LSP)の一形態であるレーザーデトネーション(Laser-Supported Detonation, LSD)が挙げられる。本物理現象は高効率のレーザー吸収が可能な超音速流動現象であり、特にパルス型(RP型)のビーム(レーザー、マイクロ波など)による推進においては最重要と考えられているものである。例えば米国においては1980年代までのRPレーザー推進の研究成果が纏められている¹⁾が、現在はその10分の1から5分の2スケールでの試験が実施されており²⁾、更なるレーザー出力の増大が望まれている。

レーザー推進システムの研究においては実験による検討の重要性は言うまでもないが、その一方でビームの波長、強度などのパラメータに対する自由度の高さから数値的検討も極めて有用である³⁾。

LSDを模式的に説明する場合に著者らを含めて従前から行われて来た手法とは、化学デトネーションを対象とした古典的な1次元ZND(Zel'dovich-von Neumann-Doering)モデルをLSDに当て嵌めたものである⁴⁾。しかしながら、レーザーの進行は音速を超えたものである事からLSDには化学デトネーションの特徴のうちの熱閉塞条件は保証されない、あるいは化学デトネーションでは完全反応が前提とされる一方でLSDでは完全吸収が保証されない⁵⁾など、完全には置き換えられないという点で注意が必要である。

そこで1次元ZNDモデルを再考し、LSD独自の伝播構造について数値物理流体解析結果を基にして検討する方法について言及する事とした次第である。

2. 化学デトネーションにおけるp-v線図

図1に化学デトネーションの古典1次元モデルであるZNDモデル、図2にそれに対応するp-v線図を示す。両者の比較においては、縦軸が圧力という点で共通している事にも留意されたい。

これらによれば、化学デトネーション構造を通過する前の状態(状態0)が先行衝撃波を通過する事によって von-Neumann 状態(状態vn)となり、燃焼による加熱により Chapman- Jouget (C-J) 点、すなわち状態1に落ち着く。

なお、この際の最終加熱量 q_{fin} は化学反応熱によって規定される量であり、 $q = q_{fin}$ のHugoniot曲線上に示される。

一方、図3は図1のZNDモデルをLSDに当て嵌めた模式図⁴⁾である。本研究においては、当該図の妥当性について評価するために図2に示す様なp-v線図を作成した上で伝播構造の検討を行った。まずは作図に先んじて数値流体解析(CFD)と輻射吸収とをカップリングさせた1次元物理流体解析¹⁾を実施する必要があると有り、次項においてはその概略について言及する。

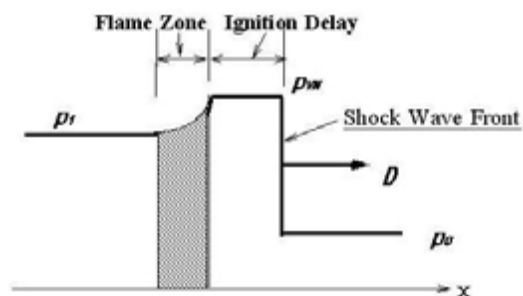


図1 1次元の化学デトネーション (ZNDモデル)

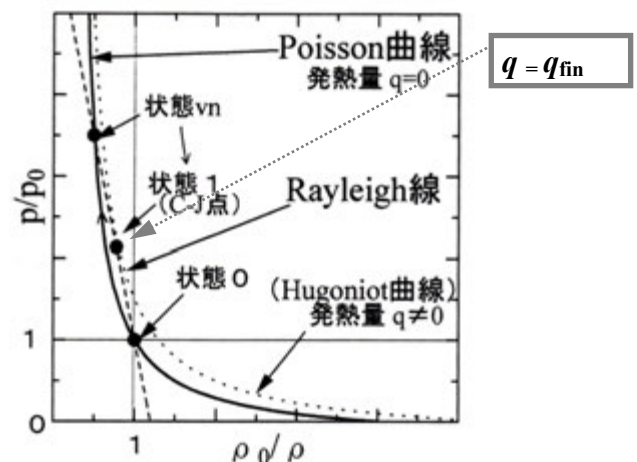


図2 化学デトネーションのp-v状態遷移

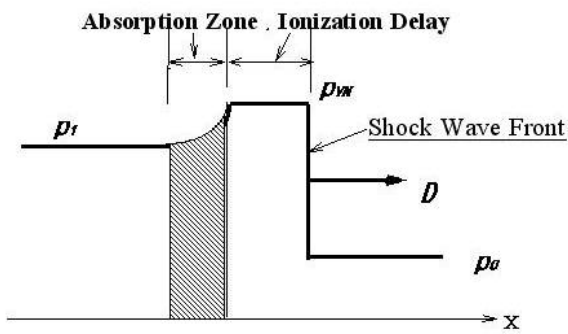


図3 ZNDモデルに当て嵌めた1次元LSD

3. 物理流体解析模型

図4に解析模型を示す。作動流体は簡単のために希ガス（アルゴン），被伝播部の状態は簡単のため常温（300K）としており，図に示す様に強度 I_0 で一定のレーザーを右方から照射させる1次元系を対象としている。

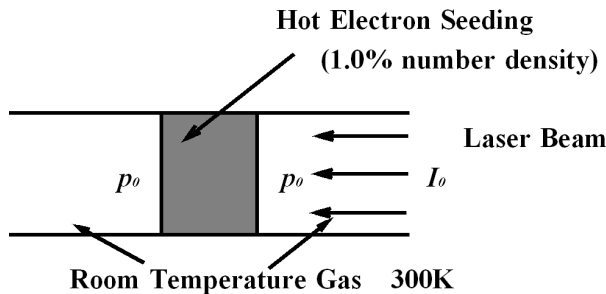


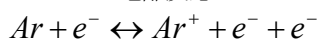
図4 物理流体解析模型

なお，解析においては，吸収現象を起こすために或る程度の自由電子が存在する状態から開始しなければならない。これはレーザープラズマの発生実験において金属ターゲットを用いる等で予め電子をシーディングさせる事に相当しており，15,000Kの熱電子を1%個数だけ添加した箇所（ホットスポット）を解析領域の中央部に置いた³⁾。

初期状態におけるホットスポットの設定には恣意性が残されるが，先述の添加数および設定領域を前後させても解析の進行に伴う衝撃波形成を経てLSDが発生する以降の伝播形態にはその影響を残さない事が確認出来ている。

本解析では中性プラズマを仮定しており，解離・電離によって中性重粒子（原子），イオン及び電子から構成される電氣的に中性なプラズマが生じるものとする。また，温度系は重粒子温度と電子温度とを区別する2温度モデルを用い，重粒子速度と電子速度とを区別しない1速度系としている。

なお，アルゴンの電離反応



の前進反応速度定数については，文献6)および7)に基づいている。

4. 支配方程式

本解析における支配方程式は次に示す1次元ナビエーストークス方程式である：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + S$$

ここで，

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

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

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_{IB} - Q_B \\ Q_{EE} + Q_{IB} - Q_B \\ w_i \end{pmatrix}$$

上式において， ρ は密度， u は x 方向の速度， T_h および T_e はそれぞれ重粒子温度および電子温度， E および E_e はそれぞれ全エネルギーおよび電子エネルギー， κ_{tr} および κ_e はそれぞれ並進および電子に関する熱伝導係数である。また，下添え字の付いた D は拡散係数， w は反応速度であり，添え字はそれぞれ Ar ， Ar^+ ， e の3化学種を示している。

なお， s 種の全エンタルピー h_s については，Gnoffoら⁸⁾とMatsuzaki⁹⁾によって得られた熱力学定数に基づいて，温度の関数として与えられる。差分スキームとしては，Harten-Yee，非MUSCL，修正流束型TVDスキームを用いている。

生成項の Q_{EE} は電子温度と重粒子温度の差に比例するエネルギー緩和項であり³⁾，単位体積あたりの逆制動輻射によるエネルギー吸収量 Q_{IB} は局所輻射強度を I として

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

で表される。ここで，電子-中性粒子相互作用に関する吸収係数 K_{ea} はJohnston¹⁰⁾，イオン-中性粒子相互作用に関する吸収係数 K_{ei} はKempら¹¹⁾の方法によっている。

なお，制動輻射によるエネルギー放出において，自由電子は制動輻射により運動エネルギーを失う事になる。この際にエネルギー放出量 Q_B は波長に依存するが，ここでは全波長で積分した次式で与えている⁴⁾：

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

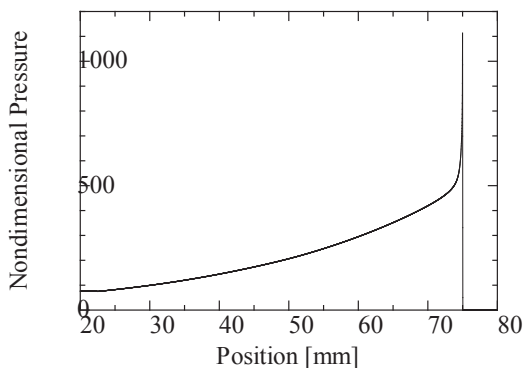
輻射の支配方程式については、吸収係数の和を K とすると次の通りである：

$$\frac{dI}{dx} = I(x, t) \times K$$

5. 対象とする LSD 物理流体解析結果

今回は解析手順について言及する事を主眼に置いている。従って、対象とした LSD は「ほぼ完全吸収、完全電離」の典型的な例⁵⁾であり、CO₂ レーザーの入射強度 $I_0 = 10\text{MW/cm}^2$ 、常温 (300K) の被伝播部初期圧力を 0.1atm とした。

(a) 圧力分布



(b) 速度分布

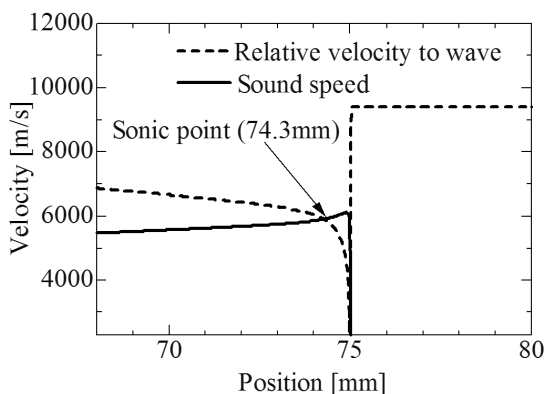


図 5 数値解析結果と音速点 (Time=7.68μsec)

図 5 は数値解析結果としての圧力分布および速度分布である。なお、(a) は初期圧力で除して無次元化しており、(b) の速度分布は局所音速分布および波面座標系における流体の相対速度分布を載せている。波面座標系での分布を作成するためには波面伝播速度 D が必要であるが、これも数値解析結果より走時曲線などを作図して決定するものである。

本図において、両者の交点が LSD 波面から見た音速点となる。なお、横軸位置は解析領域の左端からの位置であり、9mm から 10mm の領域で開始したホットスポットの影響が無くなって線図上の値が落ち着くまで解析を実行している。

6. 作図に使用する曲線と作図結果

圧力 (p) - 比体積 (v) 座標上に作図する曲線は物理数値解

析結果および Poisson 曲線を含む Hugoniot 曲線である。

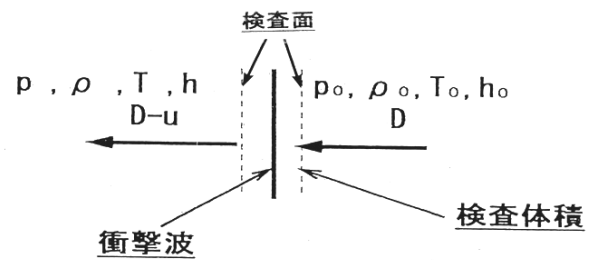


図 6 検査体積

当該曲線は、図 6 に示す様な波面の伝播速度 D [m/s] に乗った波面座標系において検査面で挟まれた領域に Rankine-Hugoniot 関係式 (1 次元の連続方程式、運動方程式、エネルギー保存式) を適用し、これらを連立させる事によって得られるものであり、発熱量を q [J/m³] とすると次の様な形式になる：

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{p}{\rho} - \frac{p_0}{\rho_0} \right) - q = \frac{1}{2} (p - p_0) \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho_0} \right)$$

なお、添え字の 0 は伝播前の初期値である。また、発熱量の無い場合は特に Poisson 曲線と呼ばれている。

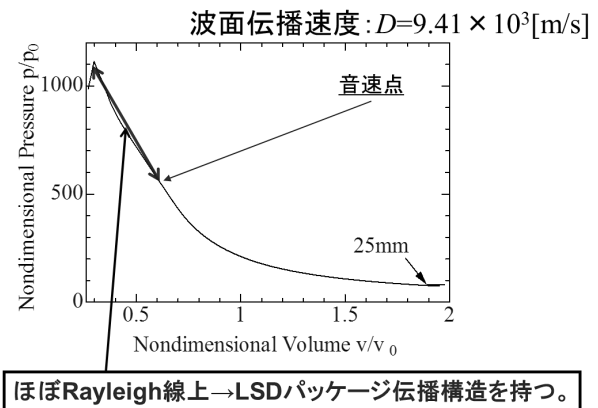


図 7 作図結果 (Time=7.68 μ sec)

図 7 は、先述の解析結果に基づいて作図した $p-v$ 線図である。前方波面から音速点までにほぼ線型の分布となる箇所があり、これは図 2 に示した Rayleigh 線に相当する。ここで言う Rayleigh 線とは Rankine-Hugoniot 式における質量及び運動量保存式から得られる直線であり、単純な検査面で対処できる 1 次元流れはこの線上を移動する事が知られている。これは音速点以降の領域では定常保存則を適用出来る様な検査面を設定出来ない事を示しており、波面に追いついているのは前方波面から音速点までの領域に限られている事が分かる。

以上の議論により、LSD においても化学デトネーションと同様に先行波面から音速点までの「パッケージ構造を持つ」伝播している事が確認出来た。

7. LSD における前面の伝播構造

図8は、LSD 前面での伝播形態を知るために $p-v$ 線図と Poisson 曲線とを比較したものである。

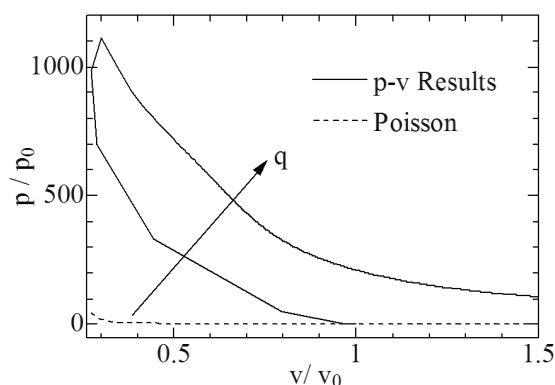


図8 作図結果と Poisson 曲線 (Time=7.68 μ sec)

Poisson 曲線は Hugoniot 曲線において発熱量，すなわち LSD においてはレーザー加熱量が $q=0$ の場合であり，図2と同様に q の値が正に大きくなるほど図中では右上の位置を占めるようになる。

本図より，LSD においては ZND モデルにおいて Poisson 曲線上に乗る状態，即ち von-Neumann 状態が存在しない。すなわち前方波面では既にレーザー加熱が開始されており，ZND モデルでの着火遅れに相当するものは存在しない事が示された。

8. まとめ

希ガスを伝播する LSD の伝播特性を、輻射吸収過程を考慮した数値物理流体解析結果を元に $p-v$ 線図により検討した。その結果、

- ① 本作図による検討結果から，LSD においても化学デトネーションにおける ZND モデルと同様に前方波面から音速点まででパッケージ構造を持って伝播する事が確認出来た。
- ② その一方で，LSD の前方波面においては既にレーザー加熱が開始されている事，すなわち ZND モデルに示される様な明瞭な先行衝撃波は存在せず，化学デトネーションの着火遅れに相当する状態も存在しない事が判明した。

参考文献

- 1) Lightcraft Technology Demonstrator: SDIO Laser Propulsion Program, Final Technical Report, 1989.
- 2) Salvador, I. I., et al.: 2-D Airbreathing Lightcraft Engine Experiments in Quiescent Conduits, BEAMED ENERGY PROPULSION (7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion), pp.158-173, 2011.
- 3) Shiraishi, H., et al.: Numerical Analysis of Effects of Incident Laser Wavelength on Thermal Nonequilibrium Laser-supported Detonation Wave, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 8 (2010), No. ists27, pp.Pb_1-Pb_5.

- 4) Shiraishi, H.: Numerical Analysis on Laser-Supported Plasma for Laser Propulsion Systems, The Journal of Space Technology and Science, **23**(1), 2007, pp.20-29.
- 5) Shiraishi, H.: Unsteady Numerical Analysis of Microwave/Laser-Supported Plasma, BEAMED ENERGY PROPULSION (7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion), pp.457-466, 2011.
- 6) Nishida, M., Kaita, K. and Tanaka, K. : Numerical Studies of the Flow Field in a DC Arcjet Thruster, DGLR/AIAA/JSASS 20th International Electric Propulsions Conference, IPEC 88-105, 1988.
- 7) Shiraishi, H.: Numerical Analysis on Non- Equilibrium Mechanism of Laser-Supported Detonation Wave Using Multiply-Charged Ionization, BEAMED ENERGY PROPULSION (4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion), pp.142-150, 2005.
- 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) 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.
- 11) Kemp, N. H. and Lewis, P. F.: Laser-Heated Thruster Interim Report, NASA Contractor Report, NASA CR-161665, 1980.