

多電離モデルを考慮した物理流体解析に基づくレーザー支持デトネーションの線図特性解析

○白石裕之（大同大），鈴木 雄登（大同大・学部学生）

1. はじめに

宇宙ビーム推進システムに関連した物理流体現象として，ビーム支持プラズマ (Beam-Supported Plasma, BSP) の一形態であるビーム支持デトネーション (Beam-supported Detonation, BSD) が挙げられる．本物理現象は高効率のビーム吸収が可能であり，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．

本研究では，ビーム種をレーザーに特定したレーザー支持レーザーデトネーション (Laser-Supported Detonation, LSD) を扱う．もちろんレーザー推進システムの研究においても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「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．本研究グループにおいても平成21年度に数値流体力学

(CFD) を応用した物理流体解析 (CFD と輻射吸収過程や化学反応過程とのカップリングを施した解析) による検証を，CO₂レーザー (波長：10.6 μm) 及びNd:ガラスレーザー (波長：1.053 μm) を対象として実施した¹⁾．その結果，LSD 発生およびレーザー吸収率の点でCO₂レーザーの方が有利である事の確認が成された．

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²⁾．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³⁾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．

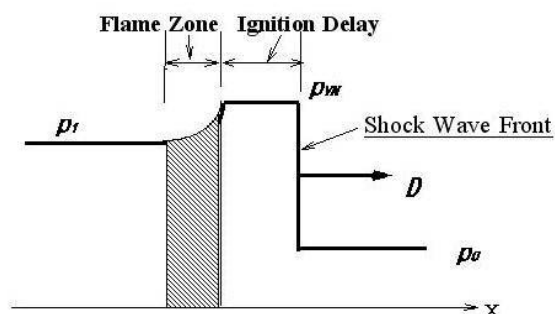


図1 1次元化学デトネーション(ZND)モデル

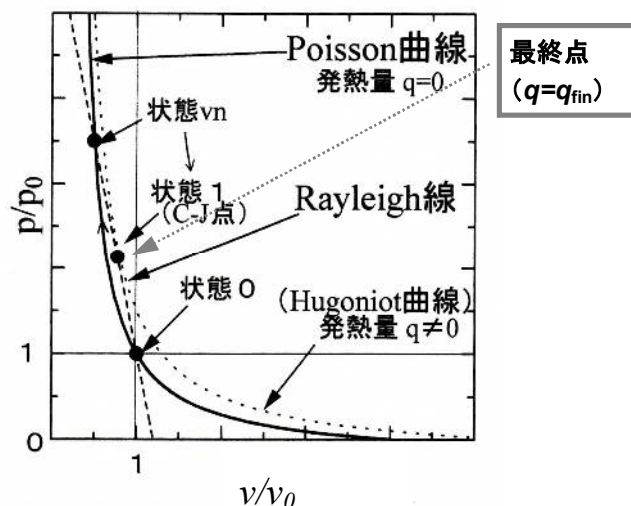


図2 化学デトネーションのp-v状態遷移

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 (v-n) 状態 (状態vn) となり，燃焼による加熱によりChapman-Jouget (C-J) 点 (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．

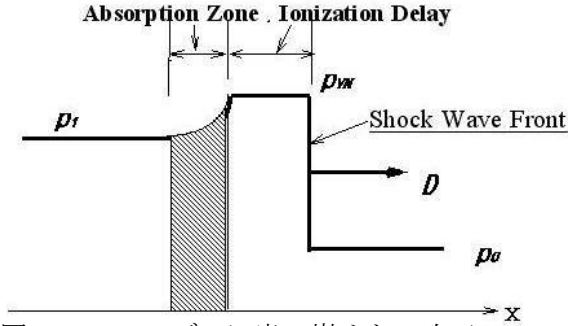


図3 ZNDモデルに当て嵌めた1次元LSD

一方、図3は図1のZNDモデルをLSDに当て嵌めた模式図²⁾である。LSDについてのイメージを概略的に説明する際には便利であるが、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では完全吸収が保障されない(すなわち、最終加熱量 q_{im} は既知ではない)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。

本報においても、前報等^{4), 5)}に引き続いて図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。但し、本報においては予め必要な1次元物理流体解析のモデル精細化、具体的には電離モデルの多電離化が施されている⁷⁾。

3. 数値解析模型

図4は数値解析模型である。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。

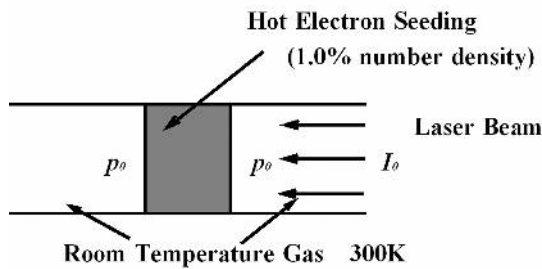
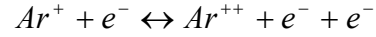
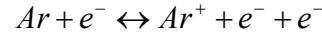


図4 数値解析模型

なお、数値解析においては、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、各ケースにおいては15,000Kの熱電子を1%個数だけ添加した箇所を解析領域の中央部に置いた¹⁾。

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、それぞれ文献7)および8)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、 T は温度、 u は x 方向の速度、 h はエンタルピー、 w は反応速度、 E は全エネルギーであり、添え字 i はそれぞれ Ar 、 Ar^+ 、 e の3化学種を示し、 s 種の全エンタルピー h_s 、及び定圧比熱 $C_{p,s}$ については、Gnoffoら⁹⁾とMatsuzaki¹⁰⁾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。また、差分スキームとしては、Harten-Yee，非MUSCL，修正流体束型 TVDスキームを用いている。

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¹¹⁾：

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

5. 新旧モデルの比較

5.1 対象とする物理流体解析結果

典型的な例として、同じ条件のもとで1価電離モデル（旧モデル）では薄いLSD³⁾に、2価電離モデル（新モデル）では典型的なLSDになる場合に基づいて両モデルを比較する。表1に対象としたLSD 数値解析条件を、それに対応する解析結果として局所レーザー強度及び電離度を図5に示す。なお、本図の無次元化局所レーザー強度は入射レーザー強度で除したものであり、電離度は全重粒子数密度に対するイオン数密度の割合である。また、横軸位置は解析領域の左端からの位置であり、相対位置を参照するために掲載したものである。

表1 数値解析条件

	特徴	圧力	伝播速度	使用レーザー レーザー強度
1価電離	不完全電離 完全吸収	0.05atm	$D=1.19 \times 10^4 \text{ m/s}$	CO ² レーザー (波長 10.6 μm) 50MW/cm ²
2価電離	完全電離 完全吸収		$D=2.39 \times 10^4 \text{ m/s}$	

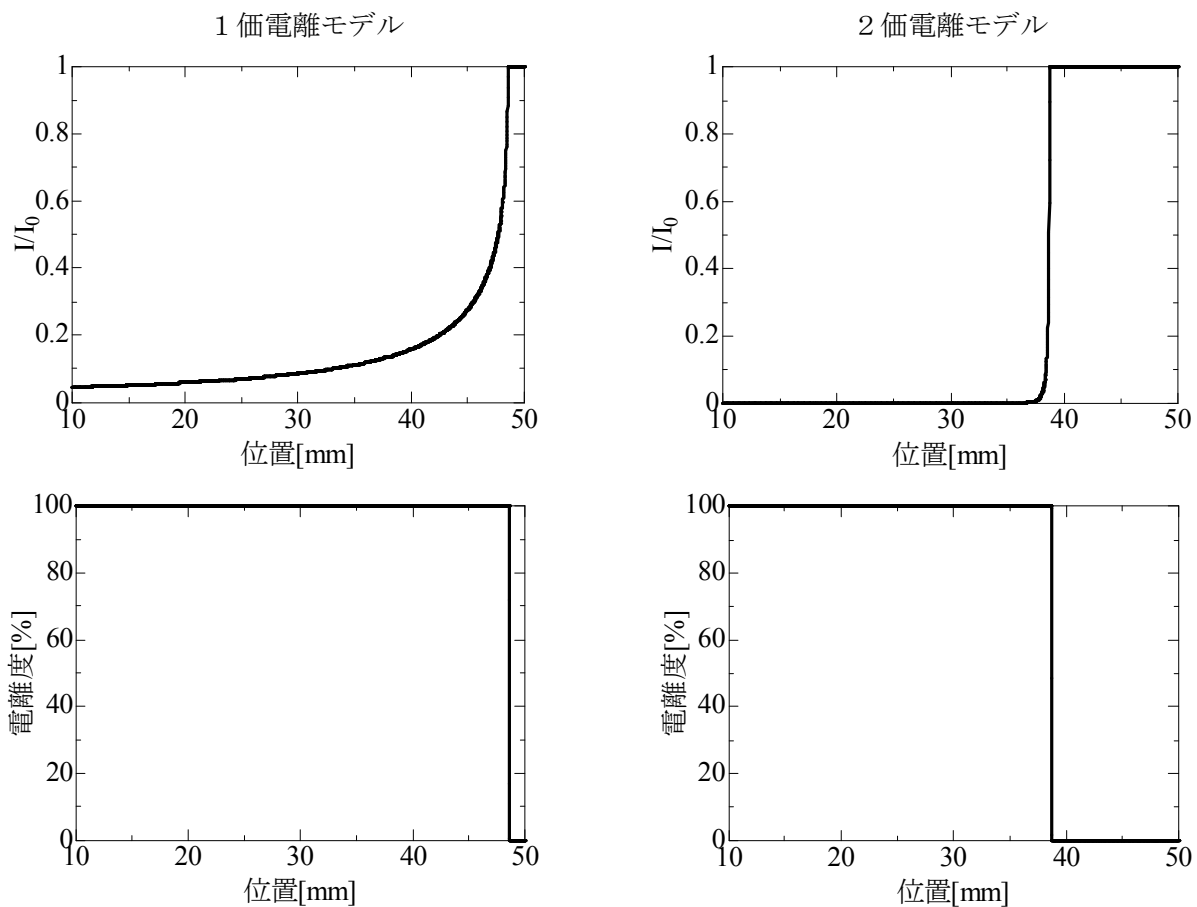


図5 検討用に準備された両モデルによる数値解析結果

5.2 2価電離モデルにおける作図結果

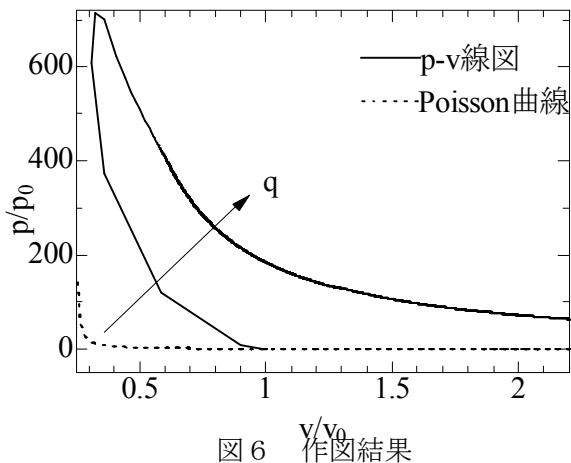


図6 作図結果

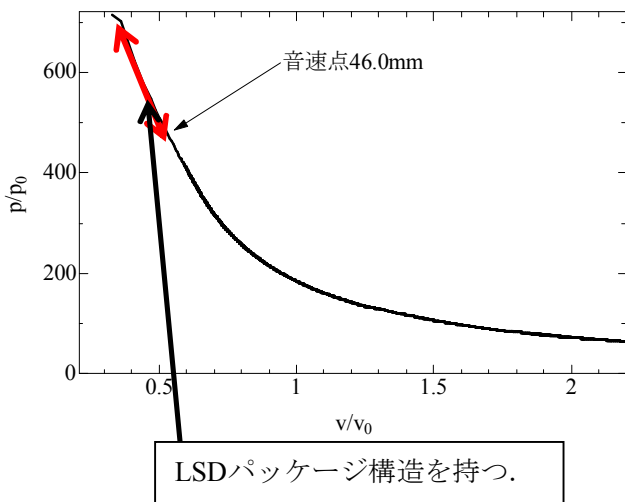


図7 p-v線図と音速点

図6及び図7に2価電離モデルでのp - v線図を示した. なお, 図7での音速点の算出に関しては, 走時曲線より伝播速度を求めて波面座標系にした上で求めている⁵⁾. 両図から, 2価電離モデルにおいても衝撃面前方でのレーザー加熱が生じている事やそこから音速点までで一種のパッケージ構造を有している事が示された.

5.3 電離モデルによるp-v線図の差異

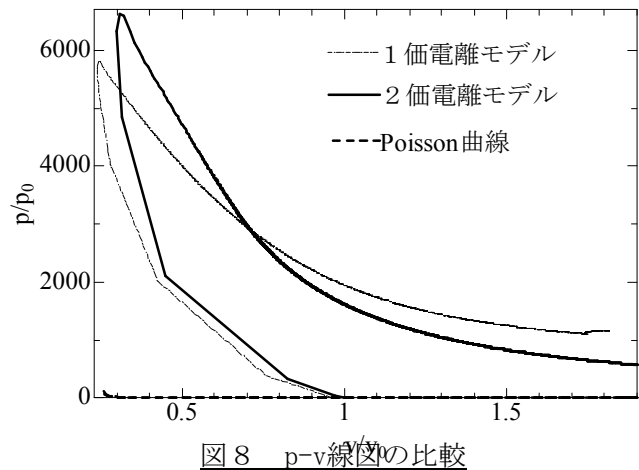


図8 p-v線図の比較

図8は電離モデルの違いによる線図の比較である. 左下端のPoisson曲線に対して2価電離モデルに基づいた方が右上方に一層離れており, 傾向は同様では有るものの前方でのレーザー吸収が強調されて示されている事が分かる.

6. 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:

- ①本モデルでの作図結果においても, LSDにおいては前方波面から音速点までで一種のパッケージ構造を持って伝播している事が確認出来た.
- ②加熱量が無い事を意味するPoisson曲線との比較から, LSDの前方伝播波面において既に加熱が開始されている事が分かる. 即ち, ZNDモデルに示される様な明瞭な先行衝撃波は2価電離モデルにおいても存在しない.
- ③従前の1価電離モデルとの比較によれば, 本モデルの方がレーザー吸収が強調される傾向に有る. この事から, エネルギーバランスの詳細を議論する場合には電離モデルの詳細化が必要であると考えられる.

参考文献

- 1) 小出拓哉他2名: レーザーデトネーションの形成・伝播における照射波長の影響, 平成20年度宇宙輸送シンポジウム講演集(CD-ROM), STEP-2008-30, pp.1-4, 2009.
- 2) 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.

- 3) Shiraishi, H.: Unsteady Numerical Analysis of Microwave/Laser-Supported Plasma, BEAMED ENERGY PROPULSION (7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion), pp.457-466, 2011.
- 4) 白石裕之, 西村列順: 物理流体解析結果による線図を用いた LSD 伝播構造解析(2012) 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム講演集 STEP-2012-029, (CD-ROM).
- 5) 白石裕之, 西村列順: 物理流体解析結果による線図を用いた LSD 伝播構造解析, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 特別資料, 掲載決定.
- 6) 白石裕之, 熊谷雄也: Numerical Analysis of LSC-LSD Threshold Using Thermal Non-equilibrium and Multiply-Charged Ionization Model, Proceedings of ISTS 2011.
- 7) 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.
- 8) Shiraisi, 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.
- 9) Matsuzaki, R.: Specific Heat and Isentropic Exponent of High Temperature Gases. Exact Analytical Expressions, AIAA Paper 80-1532, 1980, pp. 1-11.
- 10) 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.
- 11) 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.