

# レーザーデトネーション線図特性解析を応用したサイクル解析手法

○白石裕之（大同大），川上恭平，田川 遼（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，レーザー支持レーザーデトネーション(Laser-Supported Detonation, LSD)が挙げられる．レーザー推進システムの研究においても実験的検討は重要ではあるが，その一方でパラメータに対する自由度の高さの点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，CO<sub>2</sub>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<sup>1)</sup>．その結果，LSD発生およびレーザー吸収率の点でCO<sub>2</sub>レーザーの方が有利である事の確認が成された．

しかしながら，従前の流体解析は連続不変照射条件を用いて実施している一方で，現実の物理現象は空間的に有限かつ照射時間も有限である．そのため，多段サイクルの解析が実際の構想設計には必要不可欠なものである．

本研究では，多段サイクルの検討を実施する前段階として，単段階でのLSD非定常特性について整理した．具体的には，物理流体解析の解析結果に基づいて各位置におけるp-v線図を描き，それを基に単段階サイクルの最適な条件(寸法や照射時間など)を調査したものである．

## 2. LSDのp-v線図と単段階サイクル仕事

図1は本研究とp-v線図との関連を模式的に示したものである．図上の形状は先行研究<sup>4)</sup>によってLSDにおいても化学デトネーション様に振る舞う事が示された事に因るが，時間を無限に照射したとしても得られる仕事は限界を有する．更には現実のシステムに於いては空間的な制約から一回のLSDはごく短時間で終了してしまう．そのために実際にはLSDを繰り返して発生させる必要があり，サイクルとして最適な条件を検討する余地を持つのである．

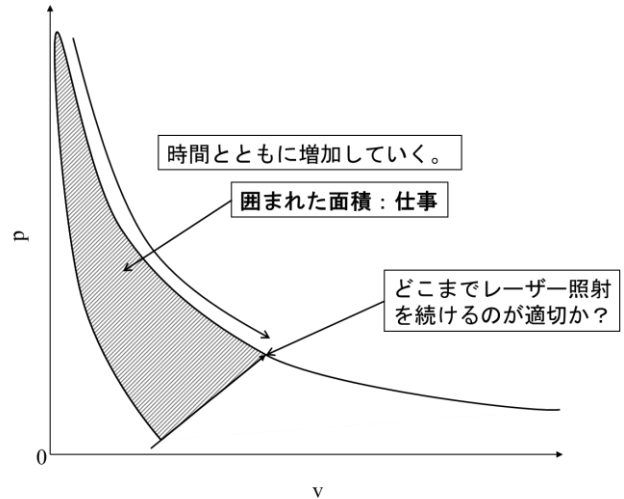


図1 単段階LSDにおける仕事最適化の必要性

そこで，本原稿では物理流体解析の解析結果に基づくLSDの各位置におけるp-v線図を描き，それを基に単段階サイクルの最適な条件 (寸法や照射時間など)を調査する手法について述べる．

## 3. 数値解析模型

検討の対象として，まずは典型的なLSDの物理流体解析を実施して各物理量のプロファイル，仕事の空間・時間分布を求める．図2は解析の元となる1次元模型である：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2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．

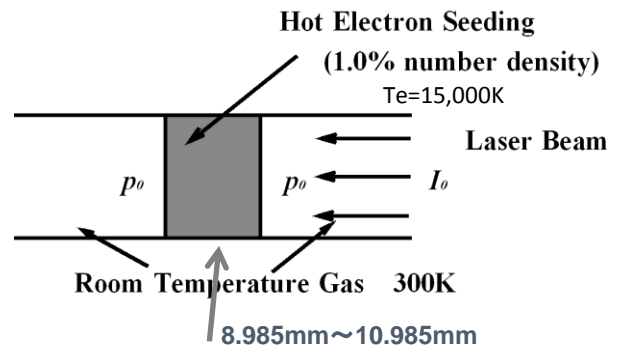
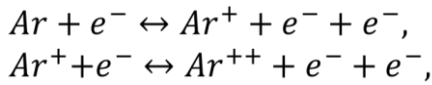


図2 数値解析模型

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<sup>2)</sup>。

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、それぞれ文献3)および4)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次元ナビエーストックス方程式である：

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

ここで、

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

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

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

上式において、 $\rho$ 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 $Ar$ 、 $Ar^+$ 、 $Ar^{++}$ 、 $e$ の4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<sup>5)</sup>とMatsuzaki<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>：

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

#### 5. 数値解析と作図結果

表1に典型的なLSD発生条件としての実行例を示す。

表1 数値解析条件

特徴	圧力	照射レーザー強度	使用レーザー
完全吸収 完全電離	0.2atm	10MW/cm <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> レーザー (波長：10.6 μm)

図3は、各位置・各時刻で得られる仕事を $p$ - $v$ 線図から図1の要領で積分して求め、位置座標及びレーザー照射開始からの時刻を軸に取った仕事量3次元空間分布である。仕事を成さない初期状態から先行衝撃波の通過によって瞬時に仕事が成され始める事が本図より見て取れる。また、それ以降の経時変化が滑らかになる事は、照射レーザーが仕事に殆ど寄与しなくなる事を意味する。ここで特徴的なのは位置によって成される仕事の差異であり、このケースではLSDが発達していない(a)11.245mmを除けば(b)11.465mmの位置でピークを有している。なお、(c)13.155mmは後方での仕事の値が一定に落ち着くポイントである。

サイクルの性能には右端で成される仕事が必

要であるため、次の検討ではこれらの位置で領域をカットした上で再計算を実施した。また、1次元解析という制約上、右端にLSDの先端が到達した時点でレーザー照射を停止して解析を続行する。(c)の位置でカットして再計算した場合には仕事量には影響が無い一方で、(b)の場合には1～2割の仕事減が見られた。但し、得られる仕事量自体は(c)でカットした場合を凌駕しており、現時点ではピーク位置(b)でカットした場合が最善となっている。

## 6. まとめ

レーザー推進システムにおける最重要現象であるレーザーに支持された爆轟波(LSD)において、多回数照射も視野に入れた照射時間および寸法の最適化を図った。具体的には、各位置・各時刻における仕事量を  $p-v$  線図を基に算出し、それを3次元分布として纏めた。

その結果、仕事量のピークとなる位置・時刻が明らかとなった。ピーク位置で領域をカットしたものを最適寸法、境界右端に波面が到達した時点を照射停止時刻(=単段照射時間)として比較検証した結果、現時点での最善の結果という結論が得られた。

### 参考文献

- 1) 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), 2013.
- 2) 小出拓哉他2名: レーザーデトネーション-0.005mm~89.985mmのうち9.005mm~13.995mm

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, 2009.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Matsuzaki, R.: Specific Heat and Isentropic Exponent of High Temperature Gases. Exact Analytical Expressions, AIAA Paper 80-1532, 1980, pp. 1-11.
- 7) Shiraisi, H.: Numerical Analysis on Laser-Supported Plasma for Laser Propulsion Systems, The Journal of Space Technology and Science, 23(1), 2007, pp.20-29.

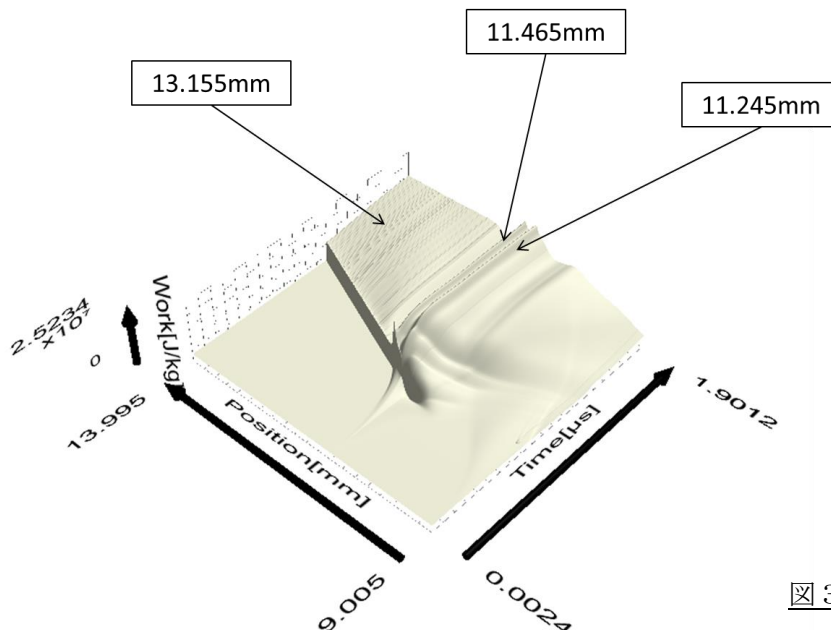


図3 3次元仕事量分布