

空気中を伝播するレーザー支持爆轟波の一次元数値解析

○寶川兼人, 永瀬真司, 葛山浩, 加藤泰生, (山口大学院)

One-dimensional numerical simulation of laser supported detonation in air
Takaragawa Kento, Nagase shinzi, Katsurayama Hiroshi and Katou Yasuo(Yamaguchi Univ.)

Key Words : Laser, Detonation, Propulsion

1. 緒言

全く新しい低コスト小型打ち上げシステムとしてパルスレーザー推進がある。この推進方式は、地上のレーザー基地から推進機にレーザーを伝送する。そのため、エネルギー源を推進機に搭載する必要がなく、ペイロード比を大きくすることができる¹⁾。また、機体の構造が簡潔なため、制作費を抑えることで、コスト低下が期待できる。さらに、一度レーザー基地を建設してしまえば、コストは主に電気代だけとなるため、何度も打ち上げることで打ち上げコストを償還することができる。しかし、推力を得るための作動原理であるレーザー支持爆轟波(Laser Supported Detonation Wave, LSD)の詳しいメカニズムがわかっていない。

本研究では、LSDの詳しいメカニズムを解明するための第一段階として、空気中を伝播するレーザー支持爆轟波の様子を再現できる一次元コードを開発する。また、開発したコードを用いて、レーザー支持爆轟波の雰囲気圧力依存性を調べる。

2. パルスレーザー推進の作動原理

図1にLSD波の伝播の概念図を示す。推進剤にレーザーを照射し、集光することで絶縁破壊が起こりプラズマ(レーザー吸収帯)が生成される。このレーザー吸収帯は、レーザーを逆制動輻射で吸収し、高温高压になり、急激に膨張する。その結果、レーザー吸収帯前方に衝撃波が発生する。その後、レーザー吸収帯は膨張し、衝撃波を押し出すことでデトネーション構造を維持する。推進機は駆動された爆轟波の伝播によって生じる反力から推力を得る。

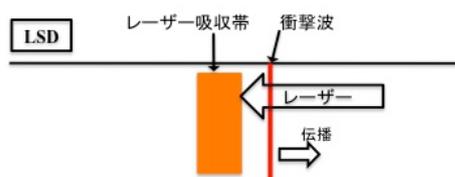


図1. レーザー支持爆轟波 (LSD波)

3. 計算方法

本研究では、熱化学非平衡を考慮した一次元

Navier-Stokes方程式を解く。作動流体を空気とするため、空気の11化学種の化学反応モデルを用いた。また、温度非平衡モデルは、一般的なParkの2温度モデル²⁾を用いた。空間積分は、MUSCL内挿を用いて、2次精度化したAUSM-DV法³⁾を用いて、有限体積的に解いた。時間積分はガウス-ザイデルライン緩和法⁴⁾を用い、時間精度は2次精度のCrank-Nicolson法を用いた。また、レーザー吸収機構として逆制動輻射を考慮している。逆制動輻射によるエネルギー吸収量 Q_{IB} は以下のように定義される。

$$Q_{IB}=I(x,t)\times k \quad (1)$$

ここで、 k は以下のKempのもの⁵⁾を用いた。

$$k=1.37\times 10^{-27}G\lambda^3T_e^{-1/2}n_e^2(e^{0.014388/\lambda T_e}-1) \quad (2)$$

ただし、簡単のために中性原子-自由電子間衝突に起因する吸収係数はイオン-自由電子間衝突に起因する吸収係数 k に比べて微小であるため無視する。また、ここでの $I(x,t)$ はレーザー強度であり、関数 x,t はそれぞれ空間、時間である。

ここで、 λ , n_e , T_e はそれぞれ、レーザー波長、電子数密度、電子温度である。また、ガウントファクター G を以下に示す。

$$G=1.04+3.74\times 10^{-5}T_e-3.28\times 10^{-10}T_e^2 \quad (3)$$

4. 計算条件

計算条件を図2に示す。左端に壁がある。壁面に絶縁破壊領域を用意し、予めレーザーを吸収するための電子が存在している。レーザーはMori⁶⁾らの実験と同じCO₂レーザーとするため、レーザー波長 $\lambda=10.6\mu\text{m}$ とする。また、Mori⁶⁾らの実験によると、LSD波が形成されるレーザー強度の閾値は4.0MW/cm²以上である。そのため、本計算でのレーザー強度は、確実にLSD波ができると考えられる10.0MW/cm²とした。レーザー吸収はレーザーの1波長程度のスケールで起きると考えられる。そのため、格子幅は、レーザー吸収を捉えられるように、CO₂

レーザーの波長とほぼ同じの10 μm とした。

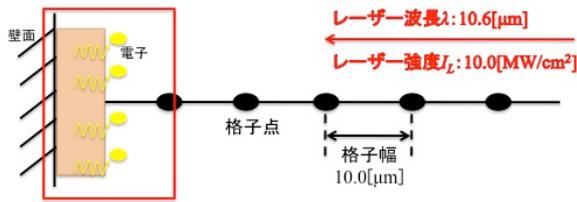


図2. 計算条件

5. 計算結果及び考察

雰囲気圧力 P_a は1atm \sim 0.1atmまで計算した。以下に、代表的な P_a の1atm, 0.1atmでの計算結果を示す。

5.1 1atmでの計算結果及び考察

図3に1atmでのLSD波の伝播の様子を示す。 $t=0.5\mu\text{s}$ ですでに初期条件の影響は消えており、その後はLSD波が定常的に伝播している様子がわかる。この結果から、LSD波が定常的に空气中を伝播する様子を再現できていることがわかった。

ここで、 $t=1.5\mu\text{s}$ での現象を見ていく。図4、図5、図6にそれぞれ1atmでの圧力 p 、重粒子温度 T_h 、電子温度 T_e の分布(拡大図)、吸収係数 k と電子数密度 n_e の変化、 n_e とレーザー強度 I_L/I_{L0} の変化を示す。衝撃波が発生し、衝撃波加熱により T_h 、 T_e が徐々に上昇する(図4)。この時、 T_h 、 T_e が上昇することにより化学反応が進み、電子が生成され、 n_e が上昇する(図5、図6)。その後、図4で示す電離遅れ領域の間(幅0.5mm)で電子が生成され続ける。そして、 n_e が $10^{22}/\text{m}^3$ 程度になると、吸収係数が急激に上昇する(図5)。その結果、レーザー吸収が開始されレーザー強度が100%から0%へ急激に減少している(図6)。つまり、衝撃波背後0.5mm程度でレーザー吸収帯が形成されている。また、レーザー吸収帯でレーザー吸収が行われることにより、 T_h 、 T_e が急激に20000K以上の高温になる(図4)。以上より、衝撃波が発生し、衝撃波背後に電離遅れ領域があり、その後ろにレーザー吸収帯が続

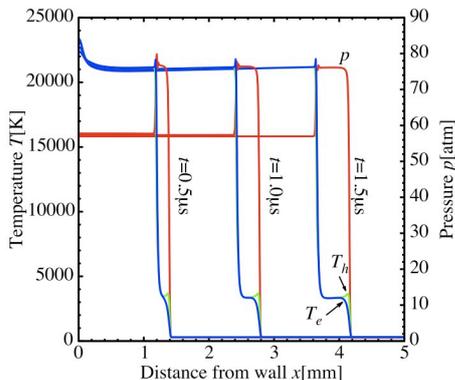


図3. 1atmでのLSD波伝播の様子

くLSD波の構造をしていることがわかった。また、レーザー吸収が開始される n_e は $10^{22}/\text{m}^3$ 程度であることが分かった。

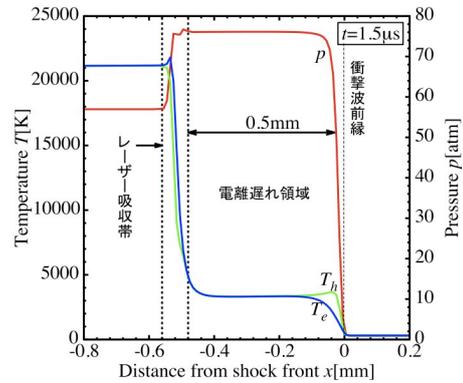


図4. 1atmでのレーザー支持爆轟波の構造

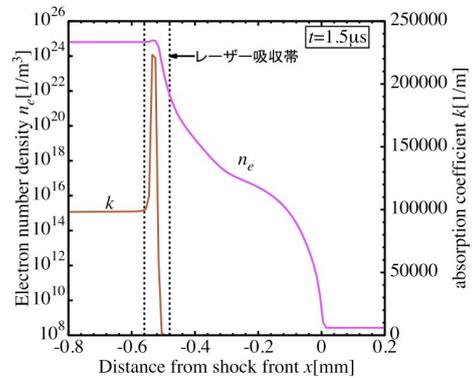


図5. 1atmでの吸収係数と電子数密度

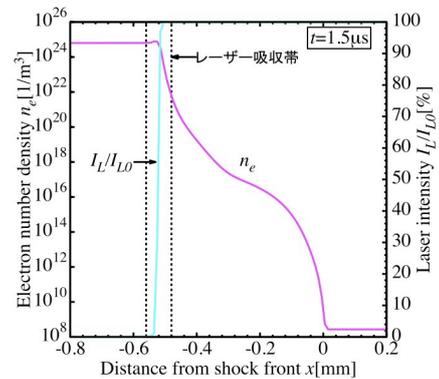


図6. 1atmでの電子数密度とレーザー強度

5.2 0.1atmでの計算結果及び考察

図7、図8、図9にそれぞれ0.1atmでの p 、 T_h 、 T_e の分布(拡大図)、 k と n_e の変化、 n_e と I_L/I_{L0} の変化を示す。衝撃波が発生すると同時に、 T_h 、 T_e が19000K以上の高温に急激に上昇している(図7)。また、衝撃波の発生と同時に n_e が一気にレーザー吸収の閾値である $10^{22}/\text{m}^3$ を超えるため、吸収係数が衝撃波発生位置とほぼ同じ位置で急激に上昇している(図8)。その結果、レーザー強度は衝撃波発生位置とほぼ同じ位置で

100%から0%へ急激に減少している(図9)。以上の結果から、レーザー吸収帯は衝撃波と同じ位置で発生していることがわかった。また、衝撃波のすぐ後ろでレーザー吸収が起きるため、 T_h 、 T_e が急激に上昇し、電離遅れ領域が消滅したと考えられる。

0.1atmでレーザー吸収帯が衝撃波に近づく原因を考える。衝撃波関係式より、雰囲気気圧力が下がることで、衝撃波速度が速くなる。その結果、衝撃波加熱が強くなり、衝撃波背後の化学反応が促進される。そのため、レーザー吸収帯が速く生成され、衝撃波に近づくと考えられる。

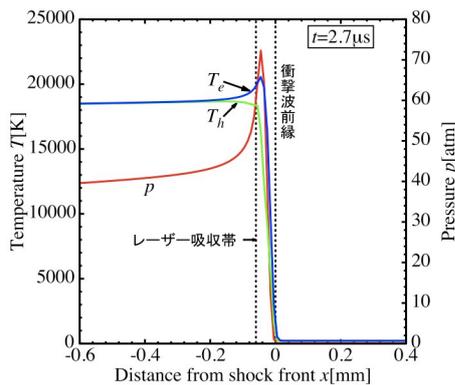


図7. 0.1atmでのレーザー支持爆轟波の構造

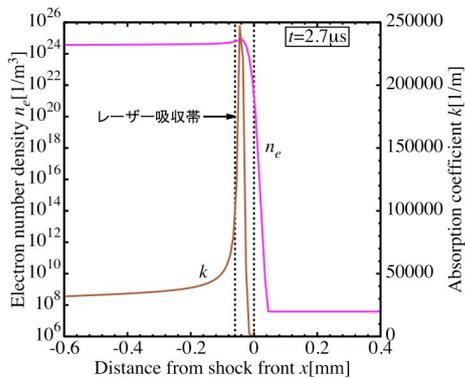


図8. 0.1atmでの吸収係数と電子数密度

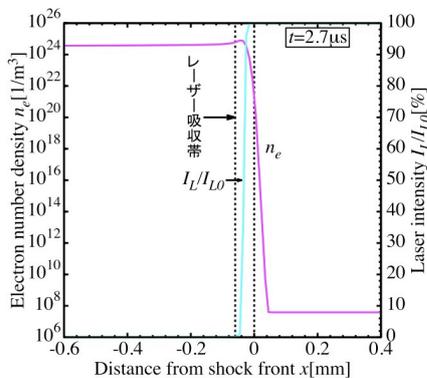


図9. 0.1atmでの電子数密度とレーザー強度

5.3 各雰囲気気圧力での衝撃波、吸収帯速度

各雰囲気気圧力での衝撃波速度 D_s 、吸収帯速度 D_a とRaizerの理論CJ速度 D_{CJ} を比較する。ここで、Raizerの理論CJ速度とはチャップマン・ジュゲ状態(CJ状態)での安定したデトネーション波の速度である。本計算は、一次元計算であり空間的なエネルギー損失がない。そのため、本計算で安定したデトネーション波が形成されているのであれば、理論CJ速度と一致すると考えられる。表1に1atmと0.1atmでの D_s 、 D_a 、 D_{CJ} を示す。1atmでは、 D_s と D_a に速度差があるため、時間が経過するとレーザー吸収帯と衝撃波が離れていく。その結果、レーザー吸収帯から衝撃波にエネルギー供給ができなくなり、LSD波の構造を保てなくなる。次に、0.1atmでは、 D_s と D_a の速度が一致している。そのため、LSD波の構造を保ったまま伝播することができる。しかし、LSD波構造を保ったまま伝播できるにもかかわらず、 D_{CJ} と D_s は一致しなかった。

表1. 各雰囲気気圧力における各速度

雰囲気気圧力 P_a [atm]	1.0	0.1
衝撃波速度 D_s [m/s]	2766	7537
吸収帯速度 D_a [m/s]	2466	7525
Raizerの理論CJ速度 D_{CJ} [m/s]	4711	9028

6. 前方放射加熱モデル⁸⁾

1atmでLSD波の構造を保てない原因や、0.1atmでLSD波を保てるにもかかわらず D_{CJ} と D_s が一致しない原因として、レーザー吸収帯からの放射による先行加熱を考慮していないことが考えられる。そこで、今回は、簡単な黒体放射モデルを用いて、先行加熱による効果を調べた。なお、計算は $P_a=1\text{atm}$ で行った。図10に黒体放射モデルの概略図を示す。レーザー吸収帯を温度 $T_{eq,B}$ の黒体と仮定し、レーザー吸収帯前方領域を温度 $T_{eq,B}$ の黒体放射で加熱する。レーザー吸収帯前方領域が加熱されることで電子が生成され、レーザー吸収帯の生成位置が衝撃波に近づくと考えられる。

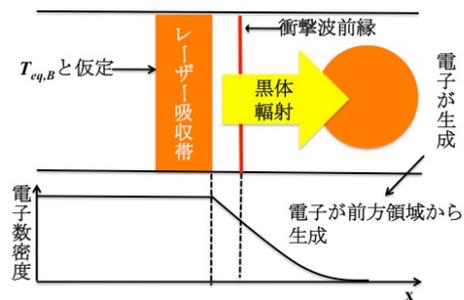


図10. 黒体放射モデルの概略図

6.1 輻射を仮定した計算結果

図11と図12にそれぞれ1atmでの輻射ありの場合、 p , T_h , T_e の分布(拡大図), k と n_e の変化を示す. 輻射加熱を入れると, 衝撃波前方で T_e が上昇する(図11). また, 衝撃波前方2mmから n_e が増加する(図12). さらに, 輻射なしの場合(図4)と比較して, n_e がレーザー吸収の閾値に速く到達し, レーザー吸収帯は衝撃波背後0.4mmで生成され, 吸収帯生成位置は0.1mmほど短くなることわかった. (図11, 図12).

次に, 1atmでの輻射ありとなしの場合の D_s , D_a , D_{CJ} の比較を表2に示す.

表2. 輻射ありとなしの各速度の比較

輻射	あり	なし
衝撃波速度 D_s [m/s]	3767	2766
吸収帯速度 D_a [m/s]	3550	2466
D_s と D_a の速度差[m/s]	217	300
Raizerの理論CJ速度 D_{CJ} [m/s]	4711	4711

輻射の仮定ありとなしで D_s を比較すると, 輻射加熱によって1000m/sほど速くなることわかった. また, 速度差を比較すると, 90m/sほど速度差が小さくなることわかった. つまり, LSD波の構造を保ちやすくなっている. さらに, 輻射ありの場合の D_s を D_{CJ} と比較すると, 速度が速くなるため D_{CJ} に近づく. し

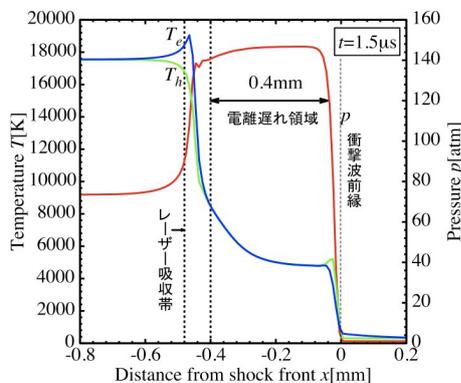


図11. 輻射を考慮したレーザー支持爆轟波の構造

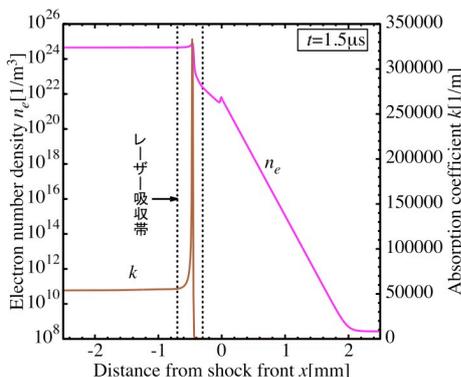


図12. 輻射を考慮した吸収係数と電子数密度

かし, 輻射による先行加熱を考慮しても, D_s は D_{CJ} に一致するまでには至らなかった. つまり, 輻射を考慮してもLSD波の構造を保ったまま伝播することはできなかった.

しかし, 今回用いた簡単な黒体モデルはあまりに簡単すぎるため, より現実の現象に近い正確な輻射モデルを使って詳しく前方輻射加熱の効果を調べる必要がある.

7. 結言

本研究では, 空気中を伝播するレーザー支持爆轟波の様子を再現できる一次元コードを開発した. また, 開発したコードを用いて, レーザー支持爆轟波の雰囲気圧力依存性を調べた.

- 開発したコードによってLSD波が定常的に空気中を伝播する様子を再現できた.
- 1atmでは, 時間が経過するとLSD波の構造を保つことができなかった.
- レーザー吸収が開始される n_e の閾値が 10^{22} 1/m³程度であることがわかった.
- 0.1atmでは, 減圧による強い衝撃波加熱の影響でLSD波の構造を保ったまま伝播することがわかった. しかし, D_{CJ} と D_s が一致しなかった.
- 1atmでLSD波の構造を保てなかったことや, 0.1atmで D_{CJ} と D_s が一致しなかった原因として, 輻射による先行加熱を考慮していないことが考えられる.
- 簡単な黒体輻射モデルを用いて計算を行った. その結果, D_s は D_{CJ} に近づいたが, LSD波の構造を保つことはできなかった. そのため, より現実に近い正確な輻射モデルを考える必要がある.

参考文献

- 1) 葛山浩ら, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 54, No. 625 (2006), pp. 63-70
- 2) Park, C. John Wiley and Sons, New York (1990)
- 3) Wada, Y. and Liou, M. S. SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 18, No. 3 (1997), pp.633-657
- 4) MacCormack, R. W. AIAA paper 85-0032, 1985
- 5) H. Kemp, and P. Lewis, "Laser-Heated Thruster-Inter Report," NASA CR-161665
- 6) Mori, K., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., Journal of Applied Physics, Vol. 95, No. 11 (2004), pp.5979-5983.
- 7) Raizer, Y.P.: Laser-Induced Discharge Phenomena, Consultants Bureau, New York and London, 1977, Ch.6.
- 8) 葛山 博, 松田 淳, 安部隆士: プリカーサ電離を伴う強いアルゴン衝撃波背後での熱化学非平衡の予備的調査