

レーザーの集光形状が LSD 伝播速度に与える影響

Effect of Laser Focusing Shape on Propagation Velocity of LSD

○島野 徹・松井 康平・オフォス ジョセフ(東大・院)・小紫 公也・小泉 宏之(東大)

○Toru Shimano・Kohei Matsui・Joseph Ofosu・Kimiya Komurasaki・Hiroyuki Koizumi (The University of Tokyo)

Abstract (概要)

Extremely high cost of conventional chemical propulsion is one of the biggest bottle-necks for accelerating space exploration. Alternative candidates containing Repetitively Pulsed (RP) Laser Propulsion are strongly desired to reduce the cost. Laser-Supported Detonation (LSD) is a phenomenon that ionization wave propagates supersonically to keep touching the induced shock wave. The propagation velocity of LSD is one of the important parameters which determine the thrust performance of RP Laser Propulsion. In this research, the propagation of LSD which is induced by focusing TEA-CO₂ laser beam into the spot with the equivalent diameter of 3 mm is observed. Obtained propagation velocity is compared with them of previous experiments whose spots have the equivalent diameter of 1.2mm, 5.1mm and 7.2mm. As a result, the required laser intensity to achieve same velocity increases with the laser beam width (produced plasma width) decreasing under the condition that cross-sectional area of the laser beam is relatively constant along optical axis.

記号の説明

- A: レーザー照射断面積
- D: 集光スポット等価半径
- E: レーザーエネルギー
- F: f 値
- f : 焦点距離
- P: レーザーパワー
- S: レーザーパワー密度
- t : 時間
- U: 伝播速度
- z : 変位
- λ : 波長

1. はじめに

近年、問題となっている宇宙輸送コストの低減を達成する方策のひとつとして、大気吸い込み繰り返しパルス型レーザー推進 (Air-Breathing Repetitively Pulsed Laser Propulsion) がある^{1,2)}。

これは機体周辺の大気を推進剤として、地上から照射されたレーザーのエネルギーを利用する推進機関である。レーザーの集光によって生成されたプラズマは、後続のレーザーを吸収しつつ電離を繰り返す。この電離面はレーザー光源に向かって超音速で衝撃波を伴って伝播していく。このような電離波面と衝撃波面が一体となって伝播していく現象を、レー

ザー支持デトネーション (Laser-Supported Detonation, LSD) と呼ぶ³⁻⁵⁾。レーザー支持デトネーションの場合は必ずしも化学デトネーションのように CJ 速度に一致しないという結果が得られている。

レーザー推進器を設計するためには、レーザー支持デトネーションの伝播速度を正確にモデル化する必要がある。そのため、レーザー支持デトネーションの伝播速度を実験的に求める研究がなされてきた。本来、1次元的な伝播においては、レーザーのパワー密度に対してデトネーションの伝播速度が一意に定まると考えられる。しかしながら、等しいパワー密度であったとしてもレーザーの集光形状によって伝播速度が異なるという結果が得られている。すなわち、等価半径 $D = 7.2, 5.1, 0.6$ mm の焦点にレーザーを集光して得られたデトネーション伝播速度の結果^{6,7)} (図 5 に本研究の結果と併記) があり、 $D = 7.2, 5.1$ mm の場合は、デトネーション伝播速度がレーザーパワー密度に対して一意に定まるという結果が得られている。また $D = 0.6$ mm の場合はこれに比べて伝播速度が遅くなるのが分かっている。

この伝播速度が一意に定まった場合とそれよりも遅くなった場合について、大きく異なるのはレーザーの集光径とその集光形状の 2 点である。すなわち前者は後者よりも集光径が大きく、かつ集光形状が 1次元 (平行) であり伝播する過程での照射面積の変化率が小さい。

レーザー支持デトネーションの 1次元伝播モデルを議論する際には、このようにレーザーの集光径と集光角度といっ

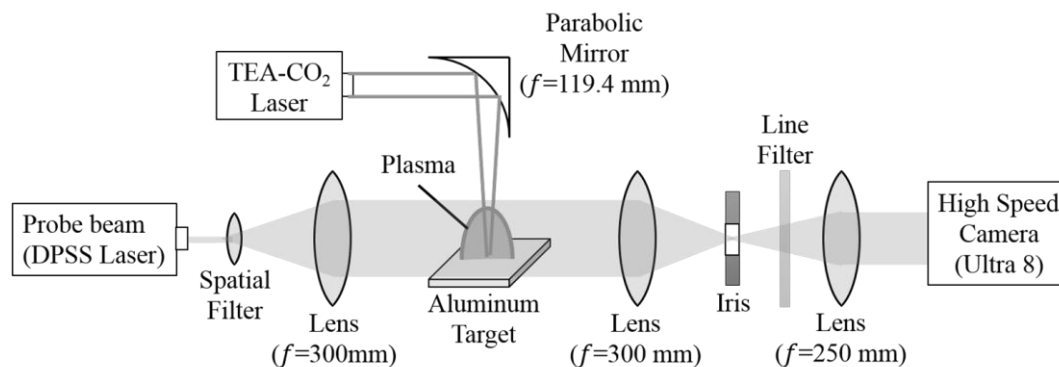


図 3 実験系概念図

た 2 次元的效果を排除する必要がある。ゆえにレーザー支持デトネーションの伝播速度をモデル化し、推進器の設計を考えていくうえで、集光直径と集光角度の影響を評価する必要がある。本研究においては、伝播速度がレーザー強度に対して一意に定まるかどうかの閾値を得るために、レーザーを $D = 3.0 \text{ mm}$ のスポットに集光した場合のレーザー支持デトネーションを観測した。

2. 実験装置

本研究で用いた実験系の概念図を図 3 に示す。レーザー支持デトネーションを生成するために、TEA-CO₂ レーザー ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) を使用した。レーザーパルスの時間履歴は図 2 のようになっており、半値全幅にして $120 \pm 20 \text{ ns}$ のスパイクと、それに続く $\tau = 1.15 \pm 0.05 \mu\text{s}$ の指数関数的な減衰から成る。またパルス毎のエネルギーは $E = 11.34 \pm 0.35 \text{ J}$ であった。

このレーザーを焦点距離 $f = 119.4 \text{ mm}$ ($F = 4.0$) の非軸放物面鏡によって点状に集光し、アルミ平板のターゲット上に照射した。集光点のサイズは $2.2 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ となり、等価直径で表せば $D = 3.0 \text{ mm}$ となった。また集光形状として、焦点付近での照射面積の変化を図 4 に示す。先行研究と比較すると本研究の場合は、伝播速度が一意に定まらなかった場合よりも大きなスポットサイズを持ち、より照射面積の変化が少ない平行なビームになっていることが分かる。またそれぞれの曲線の長さは、実験においてレーザー支持デトネーションが持続した距離を示している。

可視化手法としてはシャドウグラフ法を用いた。プローブ光には半導体励起固体レーザー ($P = 1.4 \text{ W}$) を使用した。カメラは高速 ICCD カメラ (Ultra 8) を用い、フレームレートは 25×10^6 、露光時間は 30 ns とした。

3. 実験結果および考察

デトネーション波面の変位履歴の傾きから得られた速度とその瞬間のピークレーザー強度を比較した結果を図 5 に示す。先行研究の結果と比較すると、 $D = 7.2, 5.1 \text{ mm}$ の伝播速度がレーザー強度に対して一意に定まっている場合よりも $D = 3.0 \text{ mm}$ での伝播速度の方が遅いことが分かる。またレーザー強度が $300 \text{ GW} \cdot \text{m}^2$ 程度以上の領域では、 $D = 0.6 \text{ mm}$ の場合よりも速くなっているが、レーザー強度がそ

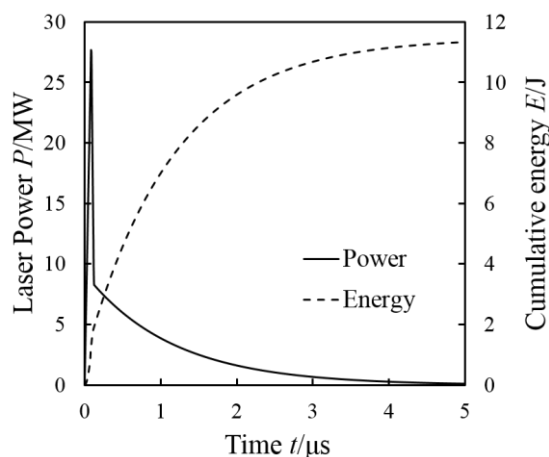


図 2 レーザーパルスの時間履歴

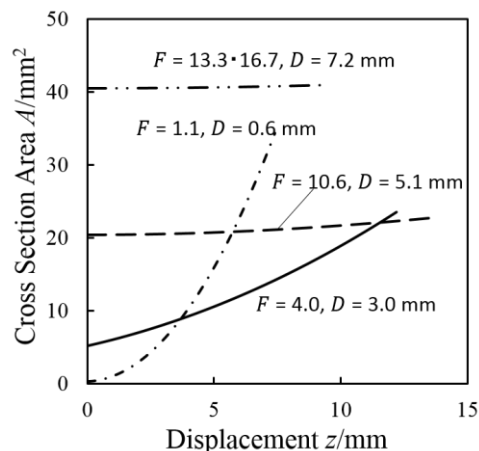


図 4 焦点付近のレーザー照射面積の変化

れよりも弱い領域では $D = 0.6, 3.0 \text{ mm}$ でほぼ同程度の速度となった。

特にレーザーの集光形状が 1 次元的であると言える最も集光点に近い部分に注目すると、伝播速度がレーザー強度に対して一意に定まるかどうかの閾値が 3.0 mm から 5.1 mm 程度であることが分かった。

加えて集光径が小さいほど、ほぼ等しい速度を達成するために必要なレーザー強度が大きくなっていることが分かる。すなわち、同じレーザー強度で入射させた場合には、集光径が大きいほど速くなり、 3.0 mm から 5.1 mm 程度で一定値になると考えられる。

これに関して、先行研究において種電子の供給メカニズムのひとつとして提案されている光電離⁸⁻¹⁰⁾の観点から考える。光電離とはプラズマ中で生じた紫外域輻射光が引き起こす電離である。この現象に関して、定性的に次のようなレーザー径の影響が考えられる。すなわち図6のように電離波面前方の特定の地点での電離を考えると、(a)のように径が細い場合は寄与し得る光子の放射体積が小さくなる可能性があるが、(b)のように十分に太い場合にはある太さを越えたところで放射体積が最大となる。これによって径が特定の太さよりも細いほど電離波の進展速度が遅くなり、太い場合にはある速度よりも速くならないと考えられる。

このような影響に関して、代表的な長さとしては光子の平均自由行程が考えられる。光子の大気中における平均自由行程は10~200 eVで0.1~1 mmとなり、今回の実験においても数 mmの径で変化が見られていることから、オーダーとして一致している。加えて電子拡散の平均自由行程は数 μm以下となる¹¹⁾ことから、この光電離がレーザー支持デトネーションの進展に大きく影響している可能性が示唆される。

4. まとめ

本研究においては、レーザーの集光形状がレーザー支持デトネーションの伝播速度に与える影響について評価するために、等価半径 $D = 3.0$ mmのスポットへの集光によるレーザー支持デトネーションの伝播を観察し、先行研究との比較・検討を行った。結果として、レーザー支持デトネーション伝播速度がレーザーの出力に対して一意に定まっていた $D = 5.1$ mm以上の場合よりも遅く、また $D = 0.6$ mmの場合よりも早い伝播速度が得られた。このことからレーザー支持デトネーション伝播速度は、集光径が大きいほど速くなり、3.0 mm から 5.1 mm 程度で一定値になると考えられる。

参考文献

- 1) Katsurayama, H., Komurasaki, K. and Arakawa, Y. A preliminary study of pulse-laser powered orbital launcher. *Acta Astronaut.* **65**, 1032–1041 (2009).
- 2) Salvador, I. I. and Myrabo, L. N. Airbreathing Hypersonic Laser Thermal Propulsion. 1–17 (2009).
- 3) Raizer, Y. P. *Laser Induced Discharge Phenomena*. (1977).
- 4) Ofosu, J. A., Shimamura, K., Komurasaki, K. and Koizumi, H. 2 Dimensional Electron Density Profiling of Plasma by Interferometry and Fringe Pattern Analysis. 1–4
- 5) Shimamura, K., Hatai, K., Kawamura, K., Fukui, A. and Fukuda, A. Structure Analysis of Laser Supported Detonation Waves by. **58**, 323–329 (2010).
- 6) Mori, K., Komurasaki, K. and Arakawa, Y. Energy transfer from a laser pulse to a blast wave in reduced-pressure air atmospheres. *J. Appl. Phys.* **95**, 5979–5983 (2004).
- 7) Matsui, K. *et al.* Laser-Supported Detonation Generated in a Laser Beam of 7 mm Diameter. *Adv. Appl. PLASMA Sci.* **10**, 45 (2015).
- 8) Ramsden, S. A. and Savic, P. A Radiative Detonation Model for the Development of a Laser-induced Spark in Air. *Nature* **201**, 1212–1213 (1964).

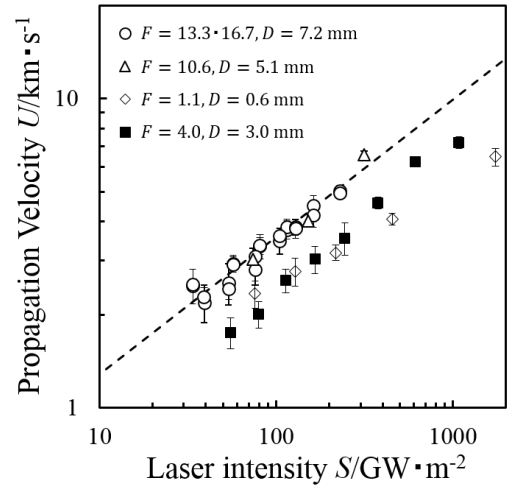


図5 レーザー強度による伝播速度の変化

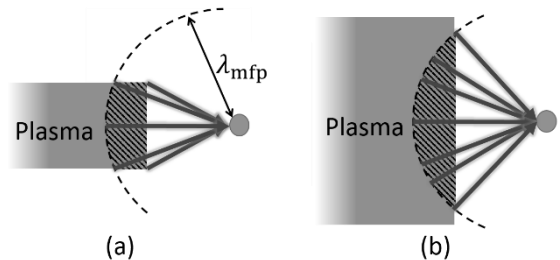


図6 太さによる光子数の変化

- 9) Raizer, Y. P. Heating of a Gas by a Powerful Light Pulse. *Sov. Phys. JETP* **21**, (1965).
- 10) 嶋村 耕平 *et al.* 2 波長マッハツェンダー干渉法を用いたレーザー支持爆轟波構造の解明. *日本航空宇宙学会論文集 = J. Japan Soc. Aeronaut. Sp. Sci.* **58**, 323–329 (2010).
- 11) 遠藤 琢磨, 本田 智久. 6. レーザー駆動デトネーションの加熱構造(<小特集>大型レーザー装置を用いた科学研究の展開). *プラズマ・核融合学会誌* **86**, 598–603 (2010).