

様々な雰囲気ガス中におけるレーザー放電の1次元進展現象

学生証番号 47156071 氏名 島野 徹
(指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words : Laser-induced discharge, Laser propulsion, Laser plasma, Shadowgraph

1. はじめに

膨大な宇宙輸送コストを低減し得る将来型の推進手法として、繰り返しパルス型レーザー推進が提案されている[1].

この推進手法では、地上から照射されたレーザーによって生成されたプラズマが、後続のレーザーを吸収しつつ電離を繰り返し超音速で進展していくため、衝撃波およびその背後での圧力上昇を伴う。この圧力を受けることで推力を得る。

また地上付近では大気を推進剤とし、上昇するに連れて、大気を圧縮して吸い込むラムジェットモード、オンボードの推進剤を利用するロケットモードに切り替えることで、軌道までレーザー推進によって上昇することが可能である。

この手法では、レーザー放電の進展現象が推力生成の起点となっている。推力を見積もる上で放電の進展速度を正確に記述できるモデルが必要となるが、未だ得られていないのが現状である。先行研究では複数の異なるメカニズムに基づくモデルが提案されてきたが、特にレーザー推進で利用が検討される強度帯 ($S \leq 1000 \text{ GW m}^{-2}$) において適用され得るものとして、光電離モデル[2]と電子拡散モデル[3]がある。

また、レーザー径を十分に広げることで1次元的な進展が達成され、レーザー強度に対応した進展速度が一意に得られることが示されている[4]. 現象を解明するためには、進展の1次元性などを正確に調査する必要がある。またレーザー推進の

表 1, 集光光学系

Optical devices	Focal length, f /mm	Equivalent diameter, D /mm
Cylindrical mirror $\times 2$	800, 400	9.1
Cylindrical mirror $\times 2$	500, 400	7.2
Plano-convex Lens	317.5	5.1

推進剤を検討するという観点から、気体種の影響評価は不可欠である。しかし進展の1次元性を考慮した実験は大気中でのみ行われており、異なる気体種での実験結果は報告されていない。

そこで本研究の目的は、進展の1次元性を考慮した上で種々の雰囲気ガス中におけるレーザー放電進展現象を観測し、進展速度への影響を明らかにすることとする。

2. 実験装置

本研究における光学系の全体図を図 1 に示す。レーザー放電の発生には、 CO_2 パルスレーザー (波長: $10.6 \mu\text{m}$, 定格出力: 12 J) を利用し、集光光学系を介してチャンバー内に設置されたアルミ板上に集光する。集光光学系は表 1 の3種類を用いた。なおレーザー径は等価直径で評価する。またチャンバー内には、アルゴン、ヘリウム、窒素、酸素をそれぞれ充填した。

可視化には、DPSSレーザー (出力: 1.4 W) によるシャドウグラフ法を用いた。ICCDカメラ (Ultra 8, フレームレート: 20×10^6 , 露光時間: 50 ns) によって得られた画像を解析して放電の変位・速度履歴を、これと CO_2 レーザーの強度履歴から、進展速度とレーザー強度の関係を得る。

3. 実験結果

撮影された画像をもとに得られた進展速度とレーザー強度の関係を図 2 に示す。

アルゴン気中では $D \geq 7.2 \text{ mm}$ において、ヘリウム、窒素、酸素気中では $D \geq 5.1 \text{ mm}$ において進展速度とレーザー強度の関係が一意に定まり、

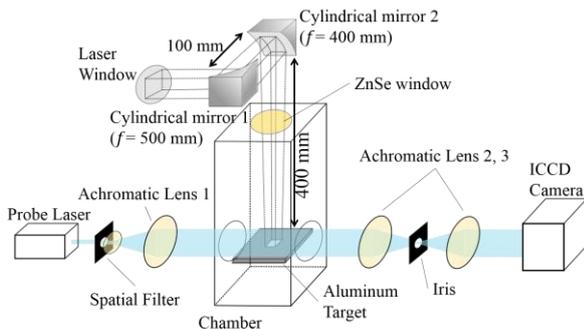


図 1, 実験光学系 ($D = 7.2 \text{ mm}$)

$U = aS^b$ と近似すると表 2 のようになった。

しかし提案されている光電離モデルおよび電子拡散モデルに関して、解析的に得られる進展速度はそれぞれ次のようになり、エネルギー保存則から電離周波数 ν_i はレーザー強度の1次関数となるため、気体種に寄らずに $b = 1, 0.5$ となる。

$$U = \frac{\nu_i l}{\ln(n_{e,l}/n_{e,0})} \quad (1)$$

$$U = 2\sqrt{D_a \nu_i} \quad (2)$$

この矛盾から、 ν_i 以外のパラメータがレーザー強度によって変化し、それらの影響を総合した結果として b の値が変化すると考えられる。すなわち解析的な検討の際には、拡散係数やレーザー吸収長、すなわち電子温度や電子数密度の変化を考慮する必要があると考える。

4. ユゴニオ解析

ロケットモードでの推進剤の初期検討として、各気体における波面後方の気体の状態をユゴニオ解析から推定、比較した。

4.1. Shimada-Hugoniot Curve [5]

レーザー放電では入熱量 Q が

$$Q = \frac{\eta S}{\rho_1 U} \quad (3)$$

となることから、ユゴニオ曲線は

$$\frac{P}{P_1} = 1 + \frac{1}{9P_1} \left(\sqrt[3]{\frac{m + \sqrt{n}}{2}} + \sqrt[3]{\frac{m - \sqrt{n}}{2}} \right)^2 \quad (4)$$

となる。ただし、

$$m = 27c, n = 729c^2 + 108b^3$$

$$b = \frac{1}{2} \left(P_1 - \frac{\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} \frac{v}{v_1}}{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{v}{v_1} - 1} \right)$$

$$c = -\frac{2\sqrt{v_1 - v}\eta S}{v_1 \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{v}{v_1} - 1 \right)}$$

4.2. 解析結果

実験結果から得られた進展速度をもとに算出した、波面後方の圧力およびインパルス係数 I とレーザー強度の関係を図 3 に示す。

$$I = \frac{P}{P_1} \left(\frac{1}{U} + \frac{1}{a} \right) \quad (5)$$

結果としてはレーザー強度によって、アルゴンまたは大気が、圧力上昇、インパルス係数ともに最も大きいことが分かった。

5. 結言

本研究では、アルゴン、ヘリウム、窒素、酸素気中においてそれぞれレーザー放電の1次元進展を観測し、進展速度の依存性を明らかにした。

表 2, 進展速度の近似パラメータ

	Argon	Helium	Nitrogen	Oxygen
a	1.43	0.0102	0.380	0.325
b	0.228	1.18	0.440	0.518

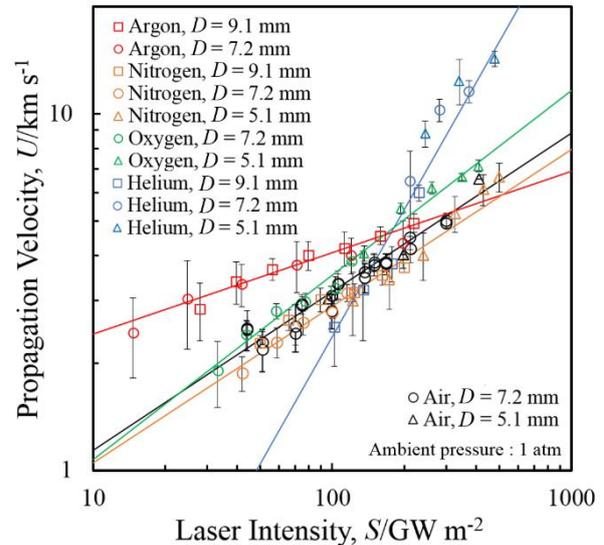


図 2, 進展速度とレーザー強度の関係

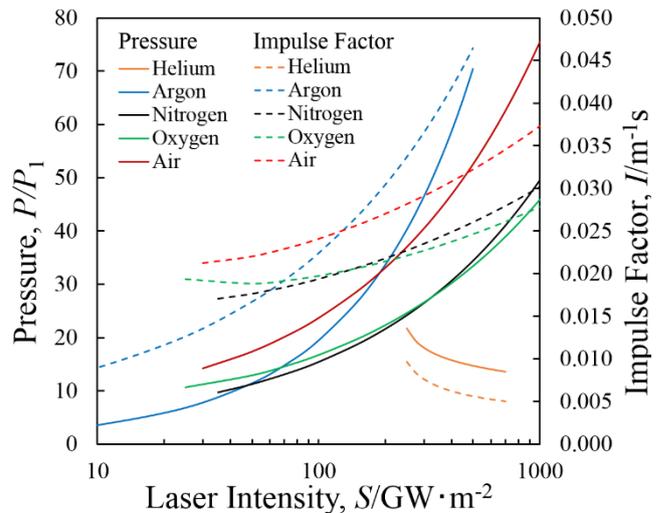


図 3, 圧力, インパルス係数とレーザー強度の関係

また推進剤の初期検討として、ユゴニオ解析によって圧力上昇およびインパルス係数の比較を行い、レーザー強度ごとにアルゴンまたは大気が、最も大きい圧力、インパルスを得られることが分かった。

参考文献

- [1] K. Komurasaki, et al., "Laser Propulsion" in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2010.
- [2] K. Shimamura, et al., *IEEE Trans. PLASMA Sci.*, vol. 42, no. 10, pp. 3121–3128, 2014.
- [3] V. Shibkov, et al., *Tech. Phys.*, vol. 50, no. 4, pp. 462–467, 2005.
- [4] K. Matsui, et al., *Vacuum*, vol. 136, pp. 171–176, 2017.
- [5] Y. Shimada, et al., *AIP Conf. Proc.*, 2010, vol. 1230, pp. 366–376.