

Electron Density Distribution Behind a Laser Supported Detonation Wave

- レーザー支持爆轟波背後の電子密度分布 -

56208 河村 好一

(指導教員 小紫 公也 助教授)

Key Words: laser supported detonation wave, Mach-Zehnder interferometer and electron number density

1. 研究背景

1.1 RP(Repetitively Pulsed)レーザー推進

RPレーザー推進は地上からのレーザーを推進機内で集光し大気の絶縁破壊によるプラズマが爆風波を駆動し推力を得る宇宙推進システムである^[1,2]。従来にはない高ペイロード、コスト軽減の期待がある。

1-2 LSD 波

爆風波駆動時にレーザー支持爆轟[Laser Supported Detonation (LSD)]波を形成される^[3]。LSD状態では衝撃波に隣接したプラズマが衝撃波を支持する機構を持ち、プラズマ前面でレーザーが吸収され爆風波エネルギーに変換される。入射するレーザー強度の減衰とともにLSDの状態は終了する。LSD状態でのエネルギー変換が推力に大きく影響するため、LSD状態の維持は推進機効率を決める大きな要素となる。

1-3 これまでの研究

牛尾ら^[4,5]はパルスCO₂レーザーを線状に集光し、2次元や準1次元的に伝播するLSD波をシャドウグラフィ法により撮影し、それぞれのLSD終了時刻を求め、2次元で1.2μ秒、準1次元で1.8μ秒となった。

1-4 研究目的

同じレーザーでも、光学系の設計や雰囲気圧の変化などによりLSD波状態の継続時間は変化する。従って本研究の目的は、レーザー九州湯に直接関係のあるLSD波背後の電子数密度分布を測定し、LSD終了時の状態の変化を捉え、終了時の一定の条件を得て内部で起きている現象について調査することである。

2. LSD 波内の電子数密度測定

2-1 二波長マッハツェンダー干渉計

LSD波内の電子数密度を二波長マッハツェンダー法により測定した。実験装置の概略を図1に示す。

プローブ用レーザー光を用いて干渉縞を作り、式(1)のようにLSD波発生時の屈折率変化による干渉縞の変位からLSD波内部の数密度変化を導く。

屈折率変化は中性粒子、イオン、電子の密度に影響されるが、電子にのみプローブ光の波長依存性があり、

2 波長のプローブ光による屈折率変化から(2)式のように差をとることで電子密度が求まる。

$$n_e(r) = \frac{\Delta N_1(r) - \Delta N_2(r)}{K_e(\lambda_2) - K_e(\lambda_1)} \quad (4)$$

ここで N はプローブ光 1, 2 から求まる屈折率変化、 K_e はプローブ光の波長に依存する定数である。今回は波長 633nm、532nm の 2 種類のレーザーを用いた。

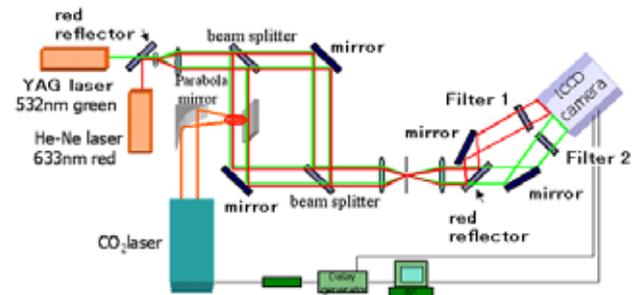


図1: 二波長マッハツェンダー系概略

2-2 LSD 波生成用レーザー

LSD波生成用に波長: 10.6 μm、形状: 30mm × 30mm、最大出力: 10JのCO₂パルスレーザーを用いた。

2-3 集光系

集光ミラーには非軸放物面鏡を用いた。焦点距離は48mm、F値(焦点距離/レーザー断面積)は1.5である。これを用いレーザーを線状集光し、さらにその中央部2mmを使った。集光系は図2のように2次元と準1次元用に2種類を用いた。

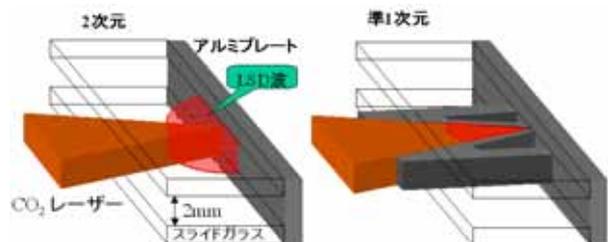


図2: 集光系

4. 実験結果・考察

4-1 干渉縞画像

二波長マッハツェンダー法により撮影した、LSD波による干渉縞変位の画像を図3に載せた。

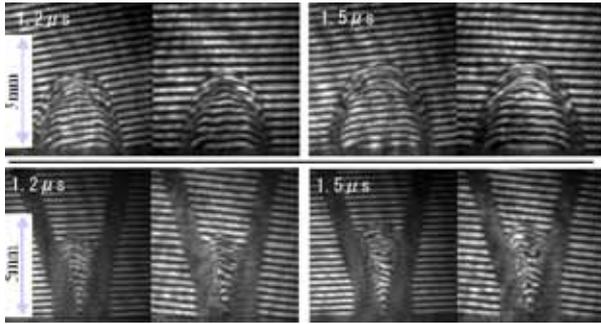


図 3: 干渉縞画像 上: 2D 下: quasi-1D 左: 532nm 右: 633nm

4-2 電子数密度分布

図 4 に電子数密度分布を示した。図中の縦線は衝撃波面である。図中では 3 回の結果を同時に載せている。

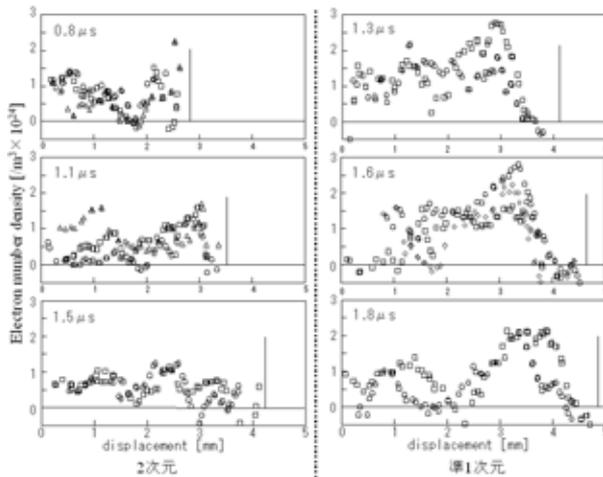


図 4: 電子数密度分布 中心軸上

4-3 電子数密度ピーク

図 5 に衝撃波面と電子密度ピーク部分の伝播履歴を、図 6 にはピーク値のレーザー強度履歴を示した。

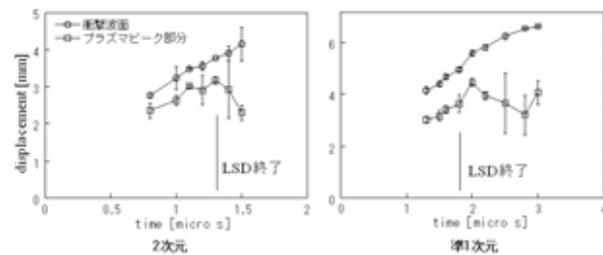


図 5: 衝撃波面、電子ピーク部分の伝播履歴

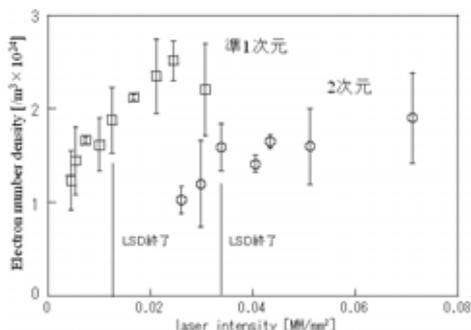


図 6: 電子数密度ピーク値のレーザー強度履歴

LSD 中でピーク部分は衝撃波面と一致し、終了後には位置は変化せず、分布が崩れていく形で伝播した。

図 6 から電子数密度は準 1 次元でレーザー強度が 2 次元の半分程度でも同程度で、終了時において特に $1.7 \sim 2.0 \times 10^{24} [\text{m}^{-3}]$ 程度であった。

4-4 電子温度、吸収長

次に 2 次元の場合について電子温度と吸収長を概算した。電子温度の導出には局所的熱平衡を仮定し、式(2)の saha の電離式を用いて概算した。

$$\frac{n_i n_e}{n_n + n_e} \approx 2.419 \times 10^{21} T^{3/2} e^{-\frac{U_i}{k_B T}} \quad (2)$$

簡単のために、イオン化エネルギー、分配関数等は窒素原子を用いた。ピーク値付近での温度は

$$14000 \sim 14500 \text{K.}$$

レーザーの吸収には式(3)の逆制動放射を仮定した。

$$K_{EI} = 1.37 \times 10^{-23} G \lambda^3 T^{-1/2} n_e n_i \left(e^{\frac{0.014388}{\lambda T}} - 1 \right)$$

$$K_{EN} = 9.6 \times 10^{-5} T^2 A(T) \lambda^3 \left(1 - e^{-\frac{0.014388}{\lambda T}} \right) n_e n_N$$

$$l = \frac{1}{K_{EI} + K_{EN}}$$

上記の式から、吸収長は

$$0.1 \sim 0.2 \text{mm.}$$

プラズマの存在範囲に対して非常に短くなった。

5. 結論

2 次元と準 1 次元ともに LSD 中と LSD 終了後で電子密度の分布に伝播の明らかな変化を観測。また次元にかかわらずピーク値はレーザー強度に明らかな違いがありながら同程度であった。

また LSD 波内部の構造も示すことができ、電子温度は 14000K 程度、これから求まる吸収長は 0.1mm 程度となった。電離領域に比べてかなり短く、ピーク値までにレーザー吸収はほぼ終了し、後方の電離部分は放射冷却と再結合などで電子の分布が減衰する構造であると考えられる。

[学会発表]

- 平成 17 年度 宇宙輸送シンポジウム 1 月, 2006
- 第 26 回レーザー学会講演会年次大会 2 月, 2006
- 衝撃波シンポジウム 3 月, 2006
- 25th International Symposium on Space Technology and Science June, 2006
- 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit Jan 2007
- 平成 18 年度 宇宙輸送シンポジウム 1 月, 2006

[投稿論文]

- Journal of the Combustion Society of Japan Vol. 48 No. 146 (2006) 323-327