

# Characteristics of Line Focused Laser Supported Detonation

## － 線状集光レーザー支持爆轟の特性－

47-46203 牛尾 正人

(指導教員 小紫 公也 助教授)

Key Words : Laser propulsion, Laser supported detonation, Mach Zehnder interferometry,  
Line focus, Cylindrical blast wave

### 1. はじめに

パルスレーザー推進は、将来の低コスト打上手段候補の一つである。地上または宇宙に建設されたレーザー基地から伝送されるエネルギーを推進機内の簡単な機構で変換し推力を得、大気を推進剤として利用することもできるため、ペイロード比を大きくできる。レーザー基地は高価だが、一度建設すれば以降電気代のみで打上げることが可能となる。

レーザー推進の推進原理を以下に説明する。基地から伝送されたレーザーは推進機内の空気中で十分に集光され、焦点で絶縁破壊を起こす。生成された高温高压のプラズマはレーザー光を吸収しながら周囲に膨張する。レーザー強度密度が $10\text{MW}/\text{cm}^2$ より大きい時に起こるレーザー支持爆轟 (Laser Supported Detonation, 以下 LSD) では、プラズマが衝撃波面を駆動する状態で、投入されたレーザーエネルギーが効率良く爆風波エネルギーに変換される。この爆風波が推進機壁面で反射し高速で排気されることで推力を得る。

以上のようにレーザー推進の性能や実現性を左右する重要な現象として、LSDが研究されている。本発表では特に線状に集光したレーザーによるLSDについて調べることで、LSDの終了条件について研究した。

### 2. LSD終了の理論

Raizerの一次元的なLSD伝播理論によるとLSDはその領域から側面方向への膨張に使用するエネルギーの割合が大きい時にLSDが終了する。このことからLSD領域(レーザー吸収層と等しい)の前面積 $S_{\text{front}}$ と側面積 $S_{\text{side}}$ の比、 $S_{\text{side}}/S_{\text{front}}$ の大きさがLSD終了条件となるとしている。従って、側面の膨張を塞ぎ止めた場合に、LSDの維持がしやすくなる可能性がある。

### 3. 本研究の目的

本研究ではLSDの側面膨張を防ぐことによるLSD維持への影響を検証した。さらに、LSD内部の電子密度分布を計測することで、上記LSD終了条件を確かめた。

### 4. 実験装置

#### 1) LSDの生成

レーザープラズマの生成用大出力レーザーとしては、TEACO<sub>2</sub>パルスレーザー(波長 $10.6\mu\text{m}$ 、ビーム形状:  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、出力10J)を用いた。

このレーザーをパラボラミラー(焦点距離は48mm、F値(焦点距離/レーザービーム断面長)は1.5)で線状に集光した。エネルギー密度が小さいためアルミ板に線状集光することでプラズマを着火した。アブレーションは起こっていない。

着火補助と塞ぎ止め用には図1の系を使用した。図1(a)では線状のLSD、図1(b)では側面膨張を楔形のノズルで塞ぎ止めた線状のLSD、図1(c)では干渉法のために光学ガラスを利用して2mmの厚みにしたLSDを生成する。図(a)のLSDは縦方向に一様であり、現象の伝播は二次元的である(2D)。また、図(b)の状態では、LSD波は一方向のみに面積を変えながら進展し、一次元的である(1D)。

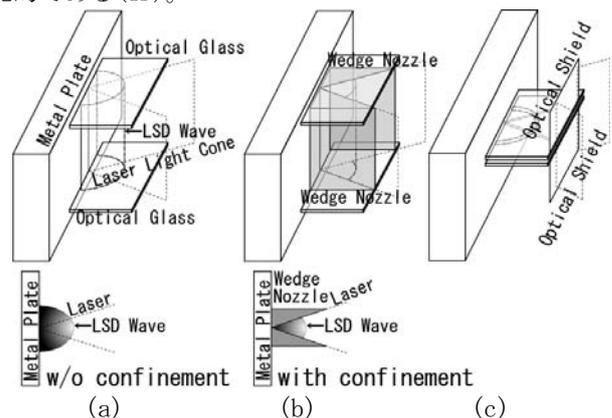


図1 着火補助とLSDの塞ぎ止めの系

#### 2) LSDの可視化

可視化はシャドウグラフ法とマッハツェンダー法で行った。その光源としては波長633nmのHe-Neレーザーと532nmの半導体励起固体レーザーを使用した。特にマッハツェンダー法では二波長のレーザーをビームスプリッターで合成し、図2に示すマッハツ

エンダー系を通過後に再度分岐したものを撮影した。

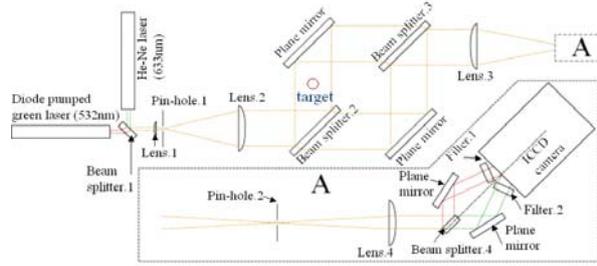


図2 二波長マッハツェンダーの系

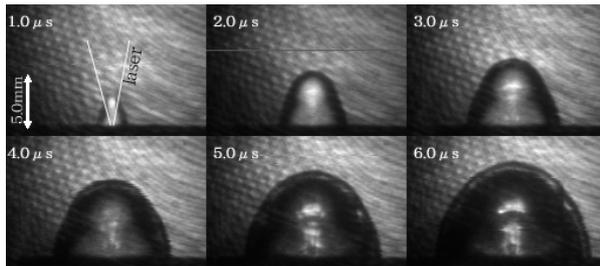
いずれの方法も撮影にはICCDカメラを利用した。

(Oriental Instruments InstaSpec<sup>TM</sup>V, model 77193-5)レーザー発振時に観測される、上記パルスレーザー発振装置のギャップスイッチ放電光を電気信号としてディレイジェネレータ(Stanford Research Systems, Inc. Model DG535)に送り、ICCDカメラに任意のタイミングでトリガー信号を送ることができるようにした。

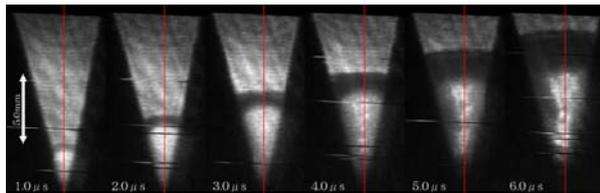
## 5. 実験結果・考察

### 1) LSD波側面膨張の塞き止め効果

図に(a)線状に生成したLSDと、(b)その側面膨張を塞き止めたもののシャドウグラフを示す。

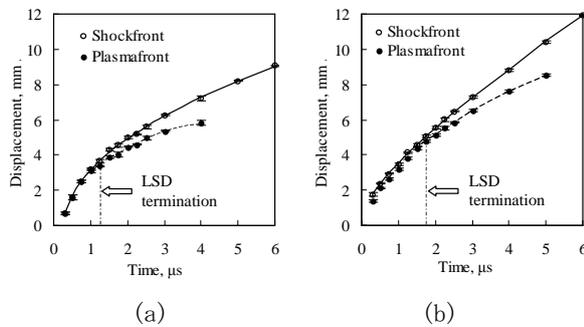


(a) 塞き止め無(現象は二次元的)



(b) 塞き止め有(現象は準一次元的)

図3 線状集光LSDのシャドウグラフ



(a)

(b)

図4 爆風波面と発光前面位置の時間変移

また、図4に爆風波面、発光前面の伝播を示す。図で発光前面・爆風波面が離れた時にLSDが終了したと考え、この時の時間 $t_{LSD}$ 、レーザー照射強度密度 $S_{LSD}$ 、

伝播マッハ数 $M_{LSD}$ 、LSD終了までに照射されたレーザーエネルギーの全体に対する割合 $\eta_{LSD}$ をまとめたものを表1に示す。

表1 3D(点状集光)、2D(線状集光)、準1D(側面を塞き止めた線状集光)LSDそれぞれの終了条件

LSD膨張の次元	3D	2D	quasi-1D
$t_{LSD}[\mu s]$	2.5	1.2	1.8
$S_{LSD}[\text{MW}/\text{cm}^2]$	3.7	3.4	1.7
$M_{LSD}$	5.4	5.3	6.3
$\eta_{LSD}[\%]$	90	68	81

側面の膨張を完全に塞き止めた準1Dの場合LSD終了レーザー強度密度は減り、その時のマッハ数も高い。結果、 $\eta_{LSD}$ も同様の集光方法で生成した2DLSDより高くなっている。従って、塞き止めによってLSDは維持しやすくなる。

### 2) LSD爆風波内の電子密度測定結果

マッハツェンダー干渉法で撮影したLSD内部の干渉縞を解析し、 $10^{24}(/\text{m}^3)$ オーダーの電子数密度を得た。得られた電子密度分布から**プラズマの厚み**(衝撃波面から電子密度が最大値の $1/e$ になる点までの距離とした)を推算した。 $S_{\text{side}}/S_{\text{front}}$ の時間推移図を図5に示す。

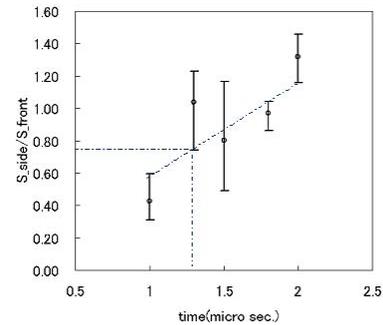


図5  $S_{\text{side}}/S_{\text{front}}$ の時間推移

図5より、時間とともに側面膨張による損失は大きくなっていることが分かった。LSD終了付近の $S_{\text{side}}/S_{\text{front}}$ は $0.8 \pm 0.4$ 程度であった。

## 6. まとめ

LSD側面膨張塞き止めにより、その維持に必要な最小レーザー強度密度が小さく(半分程度)になった。また、線状LSDを薄くすることで、LSD最中の電子密度が測定可能となり、電子密度分布から線状LSD終了付近のプラズマ存在領域幅を求め、線状集光LSD終了時は $S_{\text{side}}/S_{\text{front}}=0.8 \pm 0.4$ 程度であることを求めた。