

照射強度変化を考慮したBSW (BEAM-SUPPORTED WAVE) 特性の数値的検討

白石裕之（大同大学）

HIROYUKI SHIRAISHI (DAIDO UNIVERSITY)

電磁ビーム推進システムとは？

- レーザー光やマイクロ波をプラズマに照射して運動エネルギーへと変換するものであり、いわゆる化学ロケットの様に燃料によって推進性能の制約を受ける事は無く、 燃焼器を必要としないために軽量化が見込めるなどのペイロード上の利点を持つ。

電磁ビームとしてレーザーを利用したレーザー推進

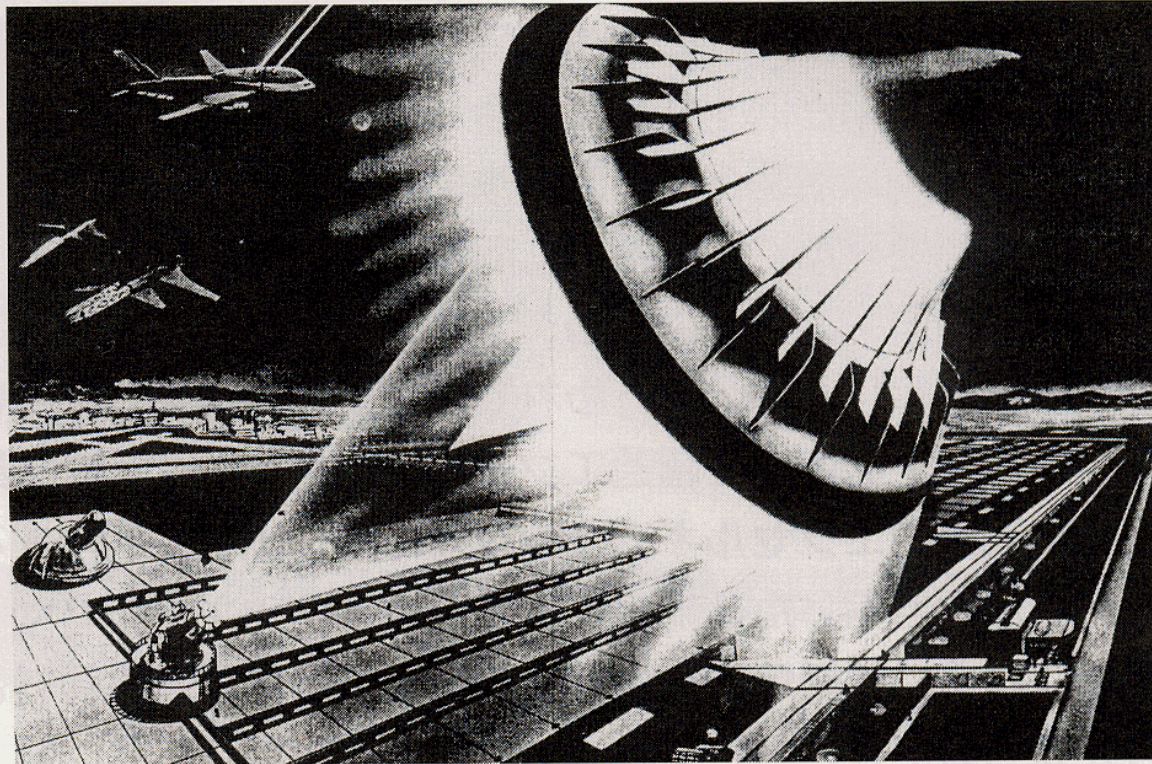


図. レーザー推進システム・構想図 (RP型)

- Kantowitz(1972)基本構想

- Pirriら(1972) RP型考案
(繰り返しパルス型)

※他に、
CW(連続照射型)あり。
Legnerら(1977)

出典: *Lightcraft Technology Demonstrator*,
SDIO Laser Propulsion Program, Final Technical Report, 1989.

電磁ビーム→運動エネルギーに
重要なメカニズム
→**BSW** (**Beam**-supported **Wave**)

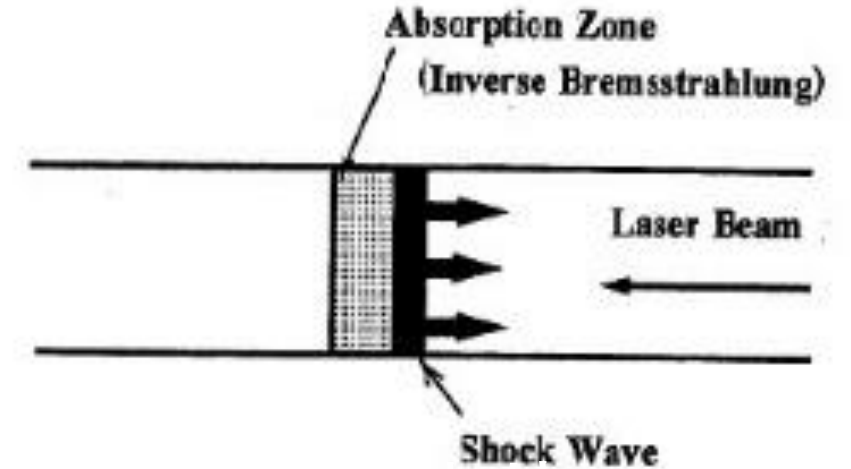
L: Laser

M: Micro-wave

照射レーザー強度の（時間的・空間
的）減少 LSD→LSC遷移

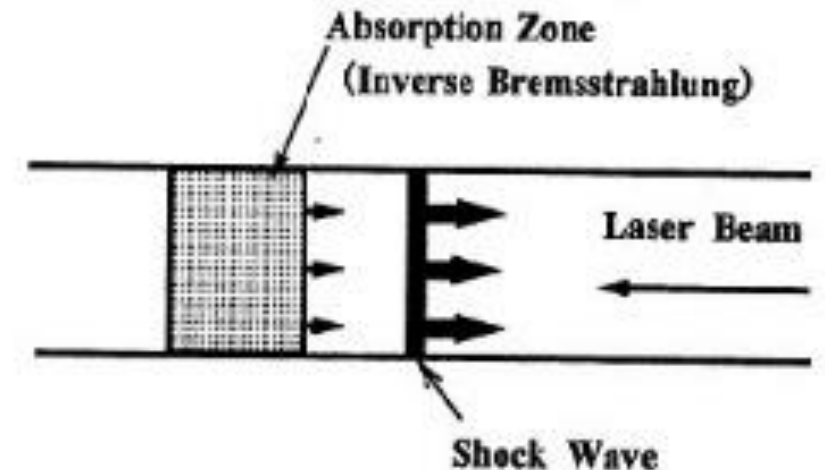
(a) レーザーデトネーション (LSD)

LSD Laser-supported Detonation



(b) レーザー支持燃焼波 (LSC) と先行衝撃波

LSC Laser-supported Combustion-wave



目 的

- 電磁ビームによって誘起される流体現象として、推進に必要な高温・高圧が得られる点でBSD (LSD, MSD) が最重要現象と考えられる。
- 本研究では、照射電磁ビームをCO₂レーザー
(波長：10.6 μm) とし、**レーザー強度変化** (減少) によるLSD終了までの非定常過程について数値的に検討を行う。

先行研究（LSD構造の維持）

衝撃波背後でレーザーを吸収するための電子が生成されている必要がある。

電子生成メカニズム

- 白石ら（1999）数値解析 アルゴン、CO₂レーザー
→ 衝撃波加熱，レーザー吸収帯からの電子熱伝導や電子拡散
- 遠藤ら・阪大のグループ（2008）実験 窒素、大径ガラスレーザー（1.053μm）
→ 光子が衝撃波を突き抜け，その前方の気体を光電効果によって電離
- 東京大学のグループ（2014）先行輻射加熱とストリーマ放電を組み合わせた電子生成モデル入力によるモデルの検討→大径CO₂レーザーによる実験

解析上の仮定

- (1) 作動流体は、電氣的に中性である.
- (2) 化学反応として、以下の電離過程を考慮：



- (3) 温度非平衡モデルとして、2温度モデルを用いる.
ここで電子励起モードに関連付けられた電子温度は、
他モードの重粒子温度とは別個に扱われる.

重粒子温度	T_h
電子温度	T_e

- (4) 輸送効果として、熱伝導を考慮する.
また、有効拡散係数の算出においては、両極性拡散を考慮する.

支配方程式：

1次元→準1次元Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + S$$

A：局所断面積

$$F = \begin{pmatrix} \rho u A \\ (\rho u^2 + p) A \\ (E + p) u A \\ E_e u A \\ \rho_i u A \end{pmatrix}$$

$$F_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (\kappa_{tr} \frac{\partial T_h}{\partial x} + \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial x} + \sum_j D_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial x}) A \\ (\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial x} + \sum_j D_j h_{e,j} \frac{\partial \rho_j}{\partial x}) A \\ D_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} A \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ p \frac{\partial A}{\partial x} \\ (Q_{IB} - Q_B) A \\ (Q_{EE} + Q_{IB} - Q_B) A \\ w_i A \end{pmatrix}$$

$$Q_{EE} = Q_T - p_e \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{E_e + p_e}{\rho_e} w_e$$

逆制動輻射

$$Q_{IB} = I(x, t) \times (K_{ea} + K_{ei})$$

輻射方程式

$$\frac{d(IA)}{dx} = IA \times (K_{ea} + K_{ei})$$

制動輻射

$$Q_B = 1.426 \times 10^{-40} n_e n_i T_e^{1/2} \left[\text{W} / \text{m}^3 \right]$$

先行輻射加熱による電子生成モデル (Katsurayama ら, 2007.) を追加。

周波数 ν の光子流束

$$I_B(\nu)d\nu = \frac{2\pi}{c^2} \frac{\nu^2}{\exp(h\nu/k_B T_{eq,B}) - 1} d\nu \quad (1)$$

全周波数光子流束

$$I_{B,t} = \int_{\nu_i}^{\infty} I_B(\nu) d\nu \quad (2)$$

衝撃波後方を黒体 (Black Body) と見做す。

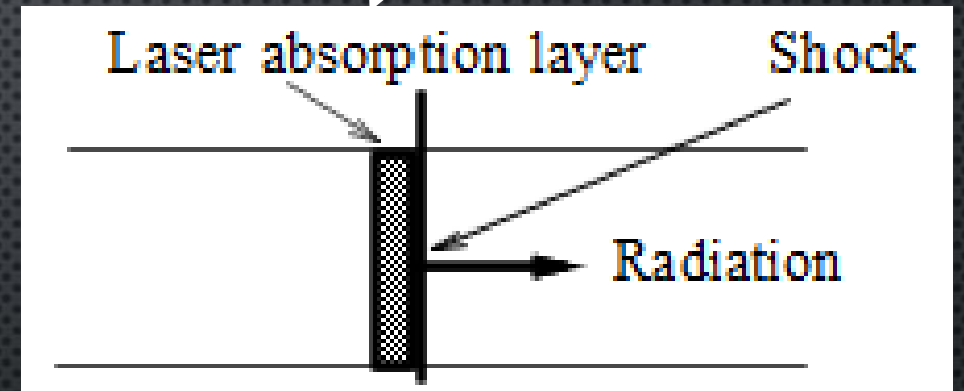
$h\nu \gg k_B T_{eq,B}$ の仮定の下,

$$I_{B,t} \cong \frac{2\pi\nu_i^3}{c^2} (\gamma + 2\gamma^2 + 2\gamma^3) \exp(-1/\gamma) \quad (3)$$

$$\gamma = k_B T_{eq,B} / h\nu_i$$

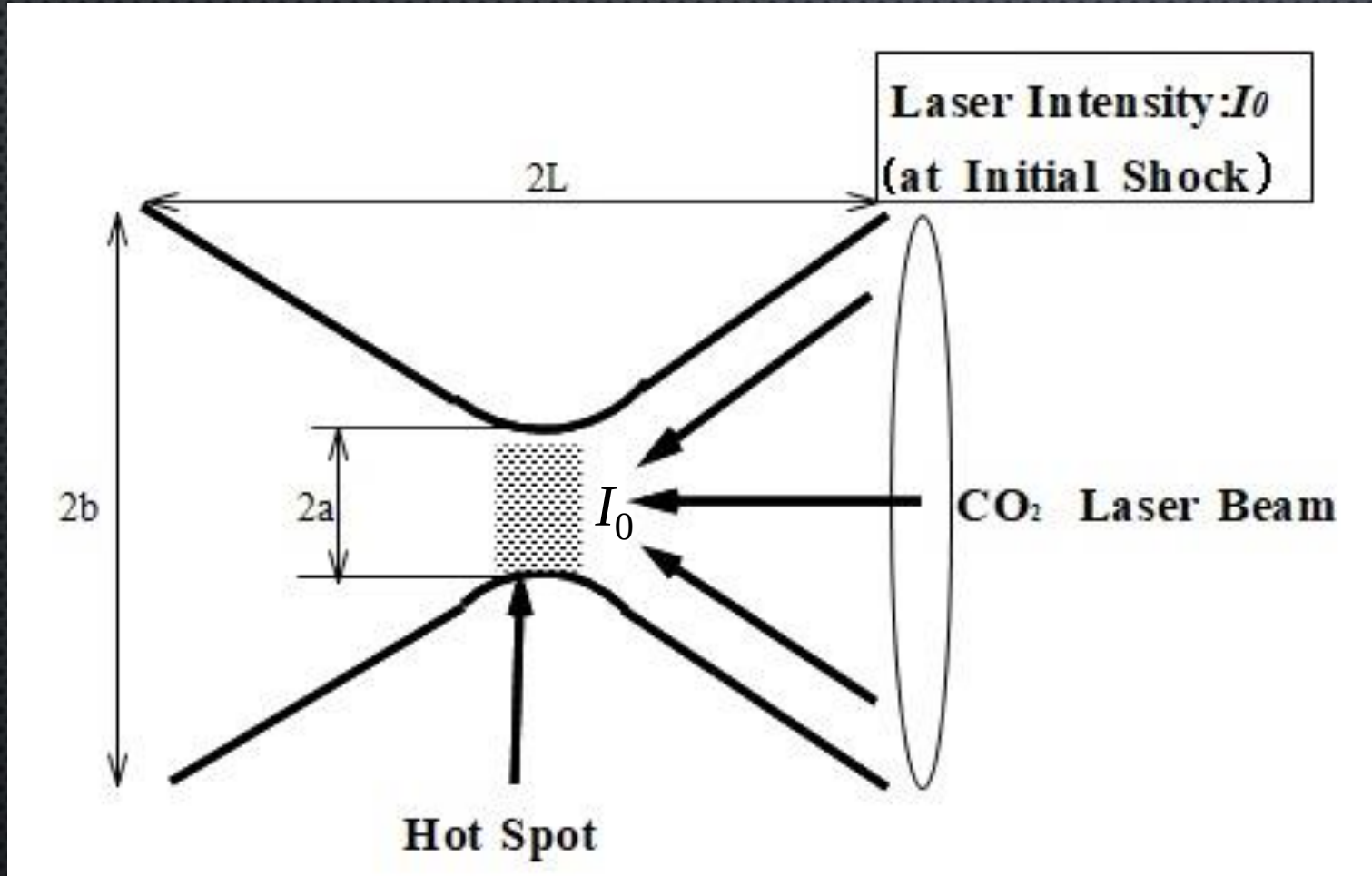
$$\frac{dI_t}{dl} = -\kappa I_t \quad (4)$$

※電離帯でもある。



光電離 電子は電離に使われなかった余剰エネルギーを持って生成。

解析模型（照射強度が空間的に変化）



作動流体（アルゴン）

常温（300K）

常圧（1atm）

a : 5mm

b : 10mm(Case1),
7.5mm(Case2),
5mm(Case3)

L : 25mm（適宜延長）

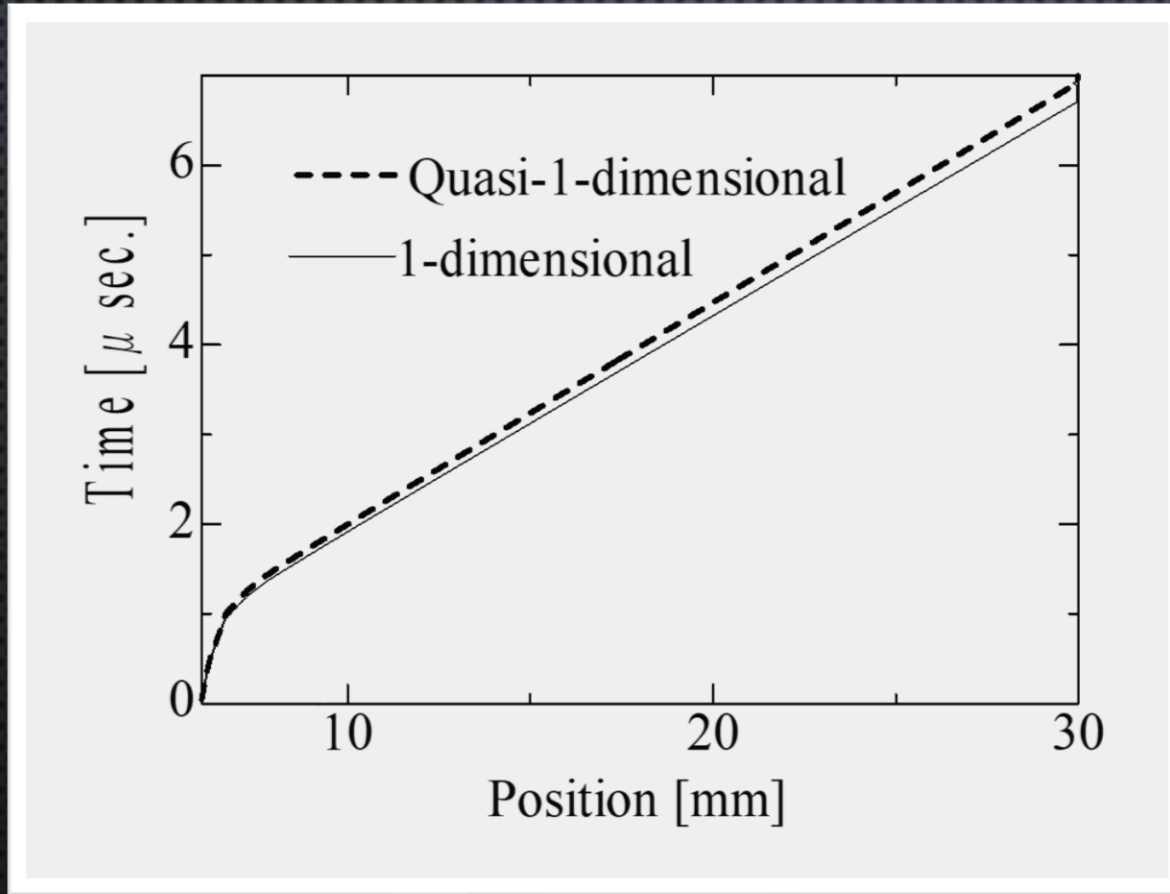
※レーザー集光は形状に沿う。

Grid Size : 0.01mm

Hot Spot Size : 2mm

(1%, $T_e = 15,000\text{K}$, $T_h = 300\text{K}$)

流路拡張の影響（まずは、レーザー集光無し）



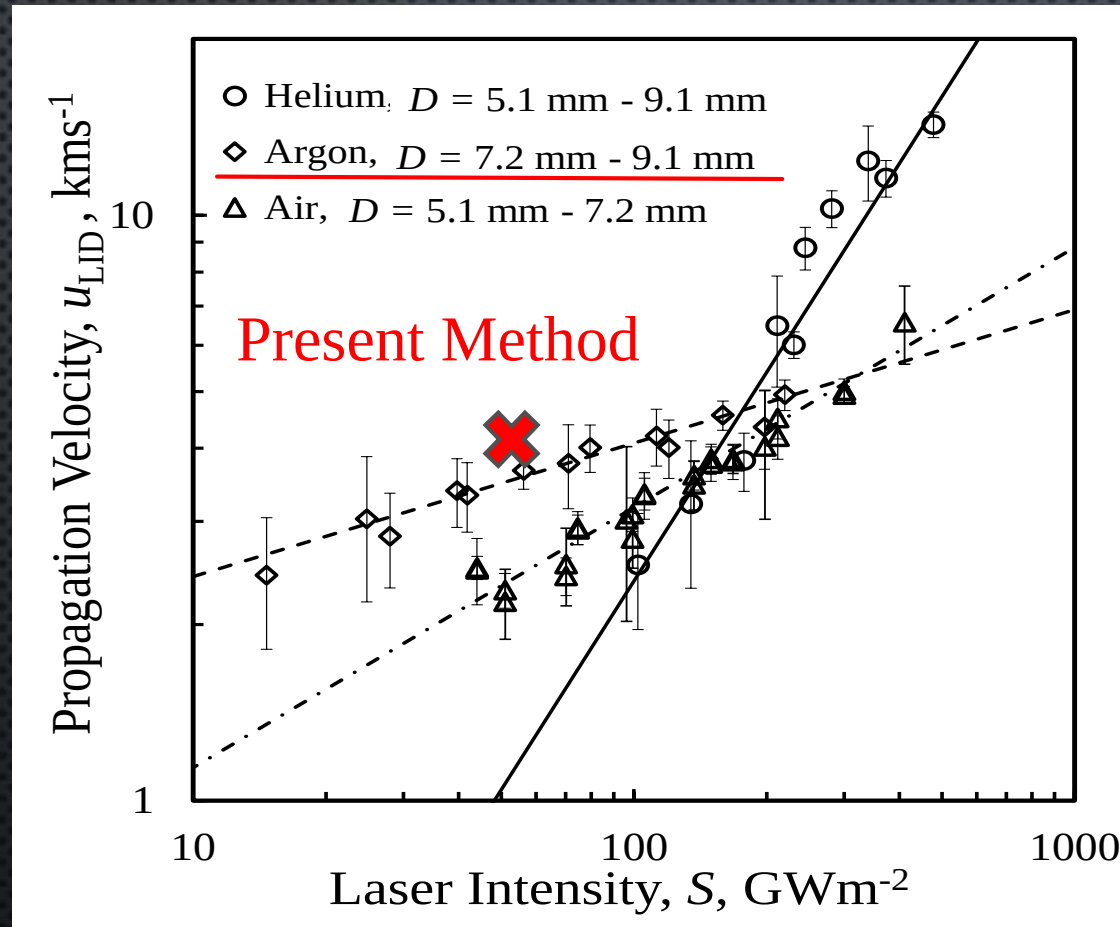
照射強度 $I_0 = 5.0 \text{ MW/cm}^2$

走時曲線より

1次元	$4.18 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
Case1	$4.07 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

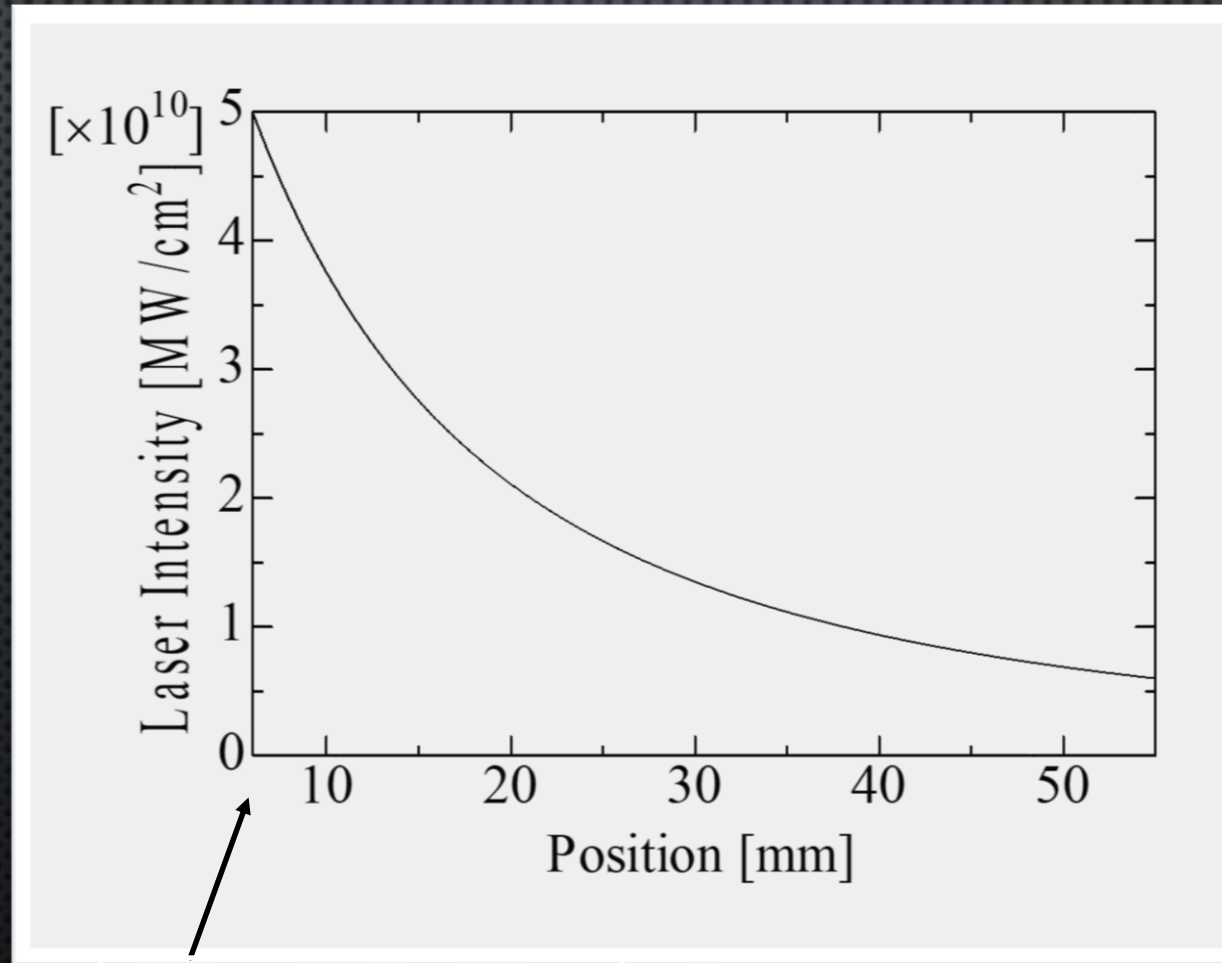
実験値との照合

(1次元に近い現象を得るため、大径レーザー)



(出典) Laser-Induced Discharge Propagation Velocity in Helium and Argon Gases, Toru SHIMANO, et. al, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 60, No. 6, pp. 378-381, 2017.

初期局所レーザー強度プロファイル (Case1)

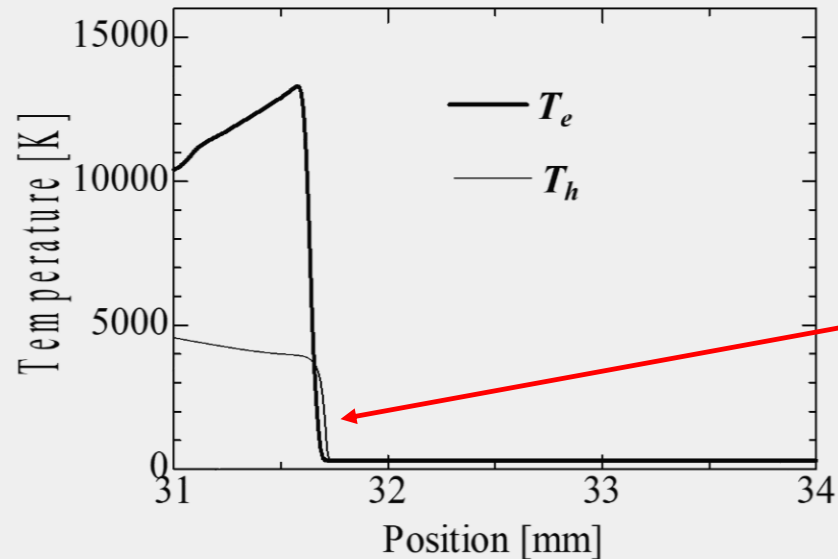
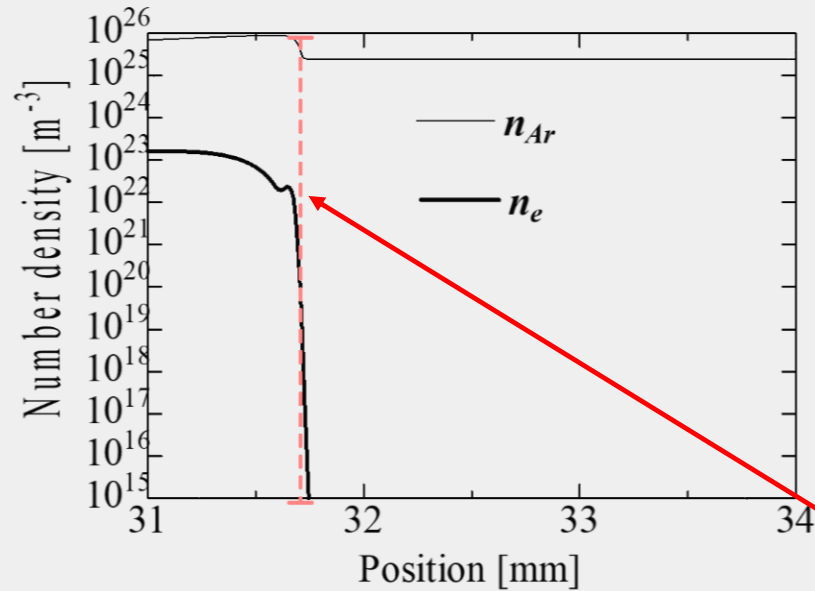


Hot Spot 右端

LSD終了までの過程 (Case1)

Time=10.1 μ sec.

(衝撃波前方) 1.13MW/cm²

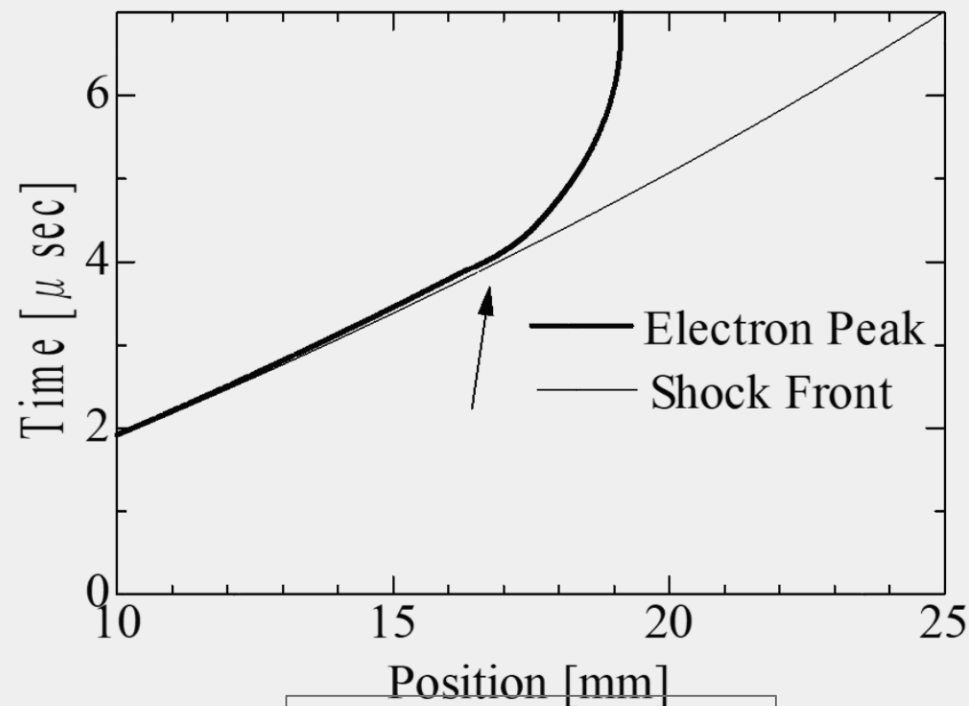


どんな電子数密度なら、
衝撃波面から離れると
言えるのか？

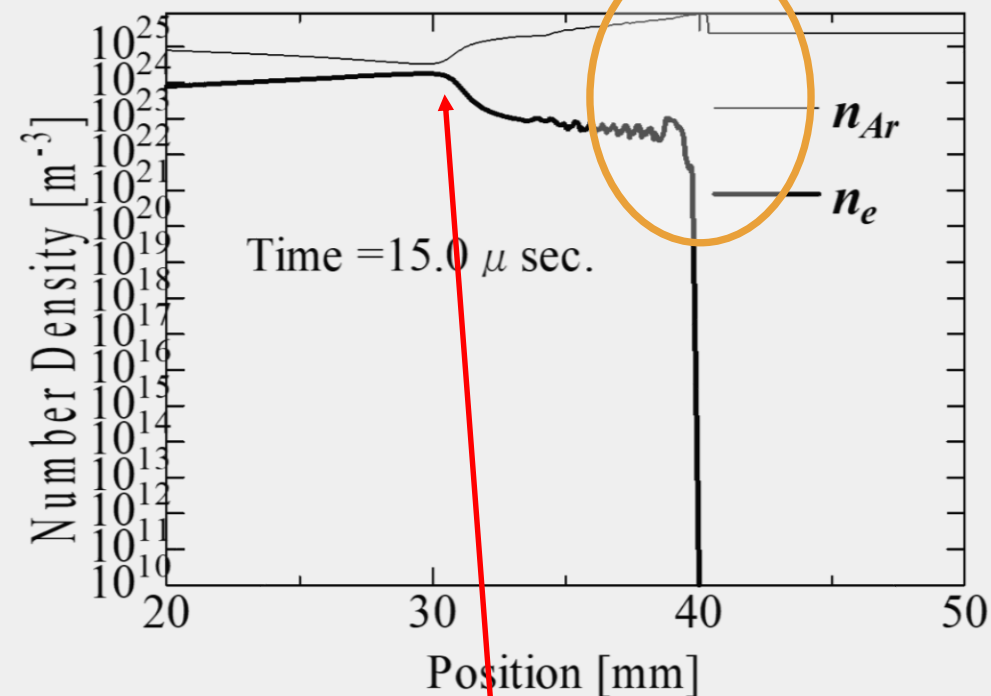
電子温度分布が衝撃波
面から後退。
温度分布の方が先に兆
候が表れる。

レーザー吸収帯前面の見積もり

→電子数密度では危険？



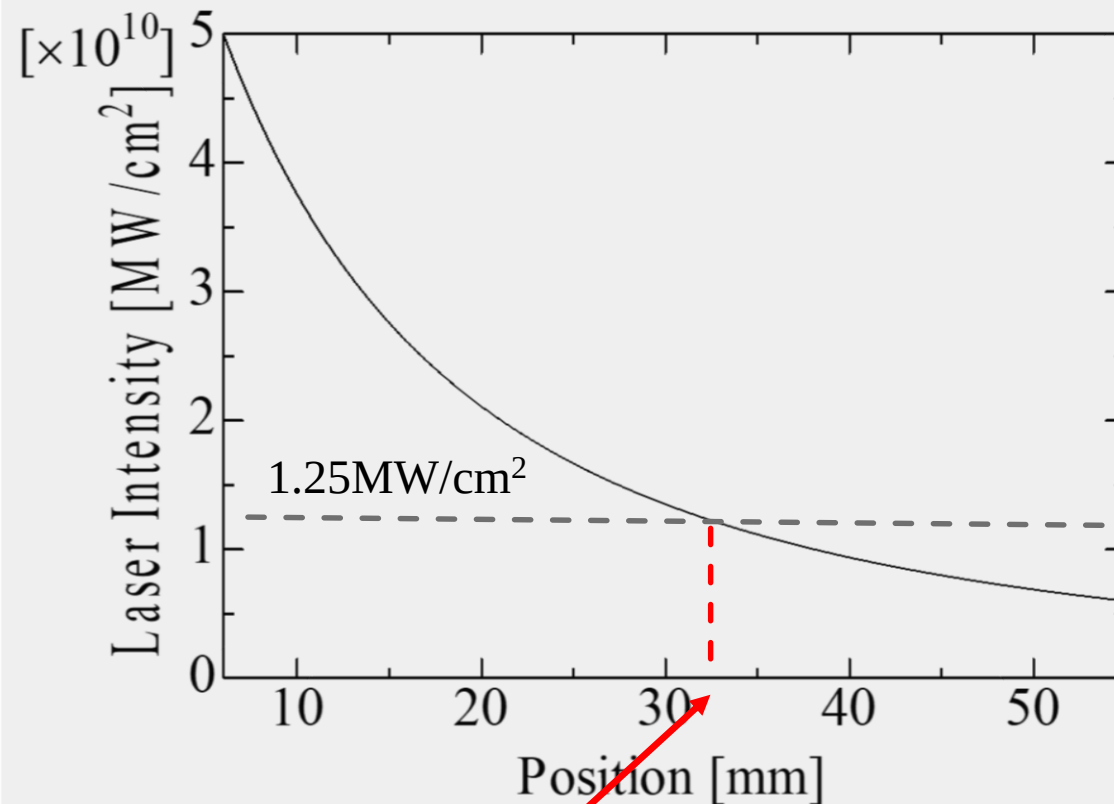
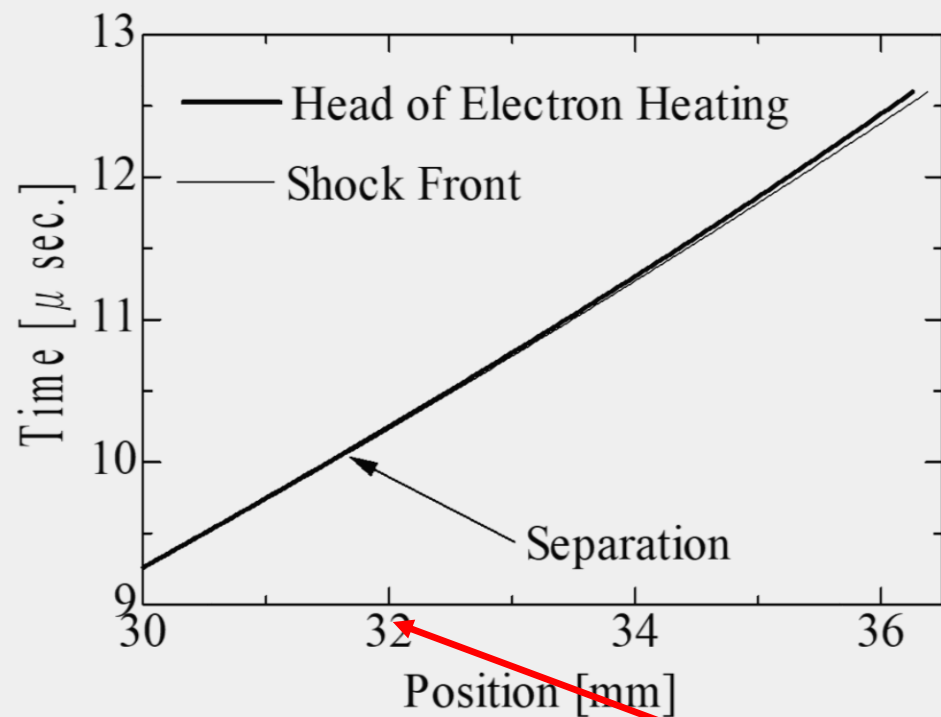
予稿集での図



ここがグラフに出る。

初期照射強度プロファイルと比較

→LSD終息強度を暫定的にSeparation時点の波面照射強度とする。



1.25MW/cm²でLSD終了に見える。

LSD終息時の照射レーザー強度（準1次元）

Case1（傾斜大）：1.25MW/cm²

Case2（傾斜小）：1.38MW/cm²

進行方向に対するレーザー強度減の度合いが大きいほど、
波面構造の変化がそれに追従できない？（変化する頃には、
もうレーザー強度が低いところまで進んでしまっている？）

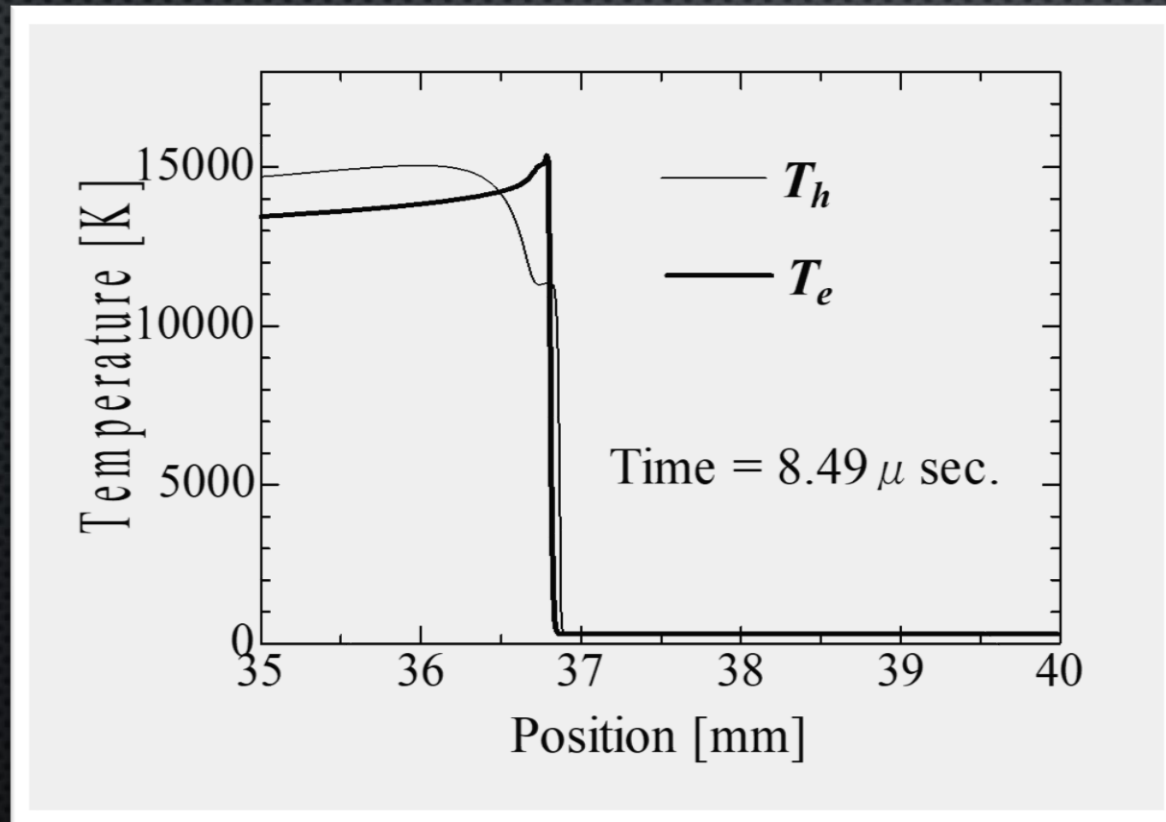
↓
1次元ではどうなるか？

照射レーザー強度の（時間）変化によるLSD終息 (1次元)

- $I_0 = 5.0 \text{ MW/cm}^2$ から 4.0（一定）, 3.0（一定）
...と遞減させる。



$$\underline{I_0} = 2.7 \text{ MW/cm}^2$$



$I_0 = 2.7 \text{ MW/cm}^2$ で明らかに
レーザー吸収体が衝撃波面
から離れる。

このモデルでの閾値は
 $I_0 = 2.75 \sim 2.85 \text{ MW/cm}^2$
と推定される。

準1次元での値（LSD終了
値）の倍以上高い。

LSD終息時の照射レーザー強度（準1次元）

Case1（傾斜大）：1.25MW/cm²

Case2（傾斜小）：1.38MW/cm²

レーザー強度減の度合いが大きい（1次元性が低い）ほど、
波面構造の変化がそれに追従できない。

1次元：約※2.8MW/cm²よりも高い（見掛け上の）終息
値となってしまう。

※正確な値を得るには、膨大な計算量が必要。

結言と今後の展望

- ・本研究では、照射電磁ビームをCO₂レーザー（波長：10.6 μm）とし、電磁ビームによって誘起されるBSW、特にLSD、（Laser-supported detonation）のレーザー強度変化（減少）による終了（LSD→LSC遷移）までの非定常過程について、空間的拡がりのパラメータ化が可能な準1次元数値解析に拡張して検討を行った。

- ・デトネーション終了は、電離帯（レーザー吸収帯）の先行衝撃波面からの後退によって判断されるが、電離面の後退よりも電子温度上昇位置の後退が顕著に現れる。

- ・1次元解析との比較において、LSD終息時の波面での照射レーザー強度は同一初期圧力であっても準1次元では相当に低い。この傾向は進行方向に対するレーザー強度の減少度合いが大きい（実験系では、1次元性が乏しい）ほど顕著であり、レーザー強度の変化によるLSD波面構造の変化に時間的な遅れが存在する事の証左である。

真のLSD-LSC閾値というものが定義出来るのかも含め、実験との意味のある比較が可能となる様に、今後は次元を拡張して同様の検討を進める予定である。

御清聴、有り難うございました。

了