

---

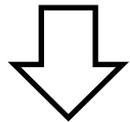
# 雰囲気ガス種がレーザー支持爆轟波の 伝播特性へ与える 影響についての数値解析

---

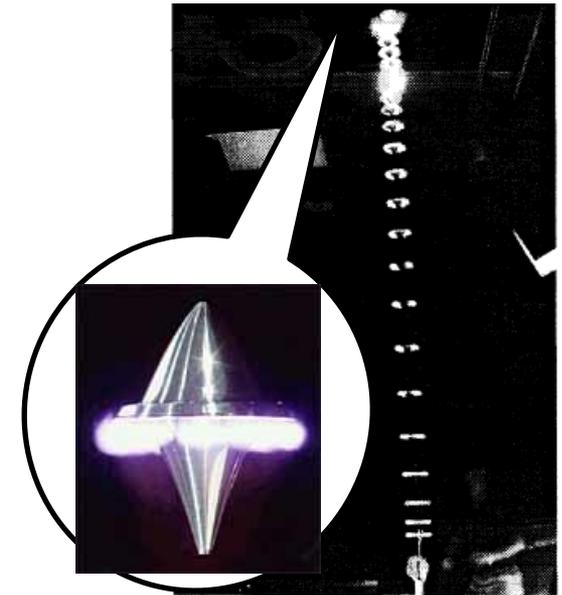
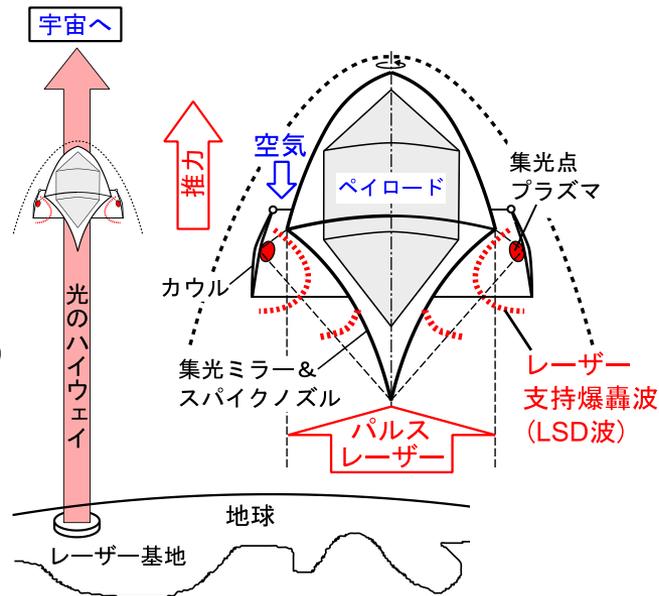
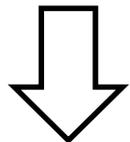
○佐々木絢香、葛山浩(山口大・院)

# 研究背景

- 次世代低コスト打ち上げ機：パルスレーザー打ち上げ機
- Laser Supported Detonation(LSD) を介して推力を得る

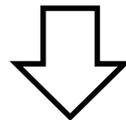


しかし・・・初期投資として、レーザー基地の建設が高価



<打ち上げ実験の様子>  
10 kW パルスレーザーで  
100 mの打ち上げデモ  
(Myraboら,2002)

そこで・・・できるだけレーザーパワーを抑えて打ち上げたい



出来るだけ低いレーザー強度でLSDを維持したい



# LSDを維持できるレーザー強度の閾値 $S_{LSD}^{Limit}$ に関する研究

- 森らの三次元実験(空気)(J. Appl. Phys. 2002)
  - LSDを維持できるレーザー強度の閾値( $S_{LSD}^{Limit}=5 \text{ MW/cm}^2$ )
- 嶋村らの準一次元実験(空気)(IEEE Trans. Plasma Sci. 2014)
  - LSDを維持できるレーザー強度の閾値( $S_{LSD}^{Limit}=0.2\sim 1 \text{ MW/cm}^2$ )
- 我々の研究
  - 空気を対象とし、一次元CFD解析を実施  
(先行輻射、衝撃波加熱、電子拡散・熱伝導を考慮)

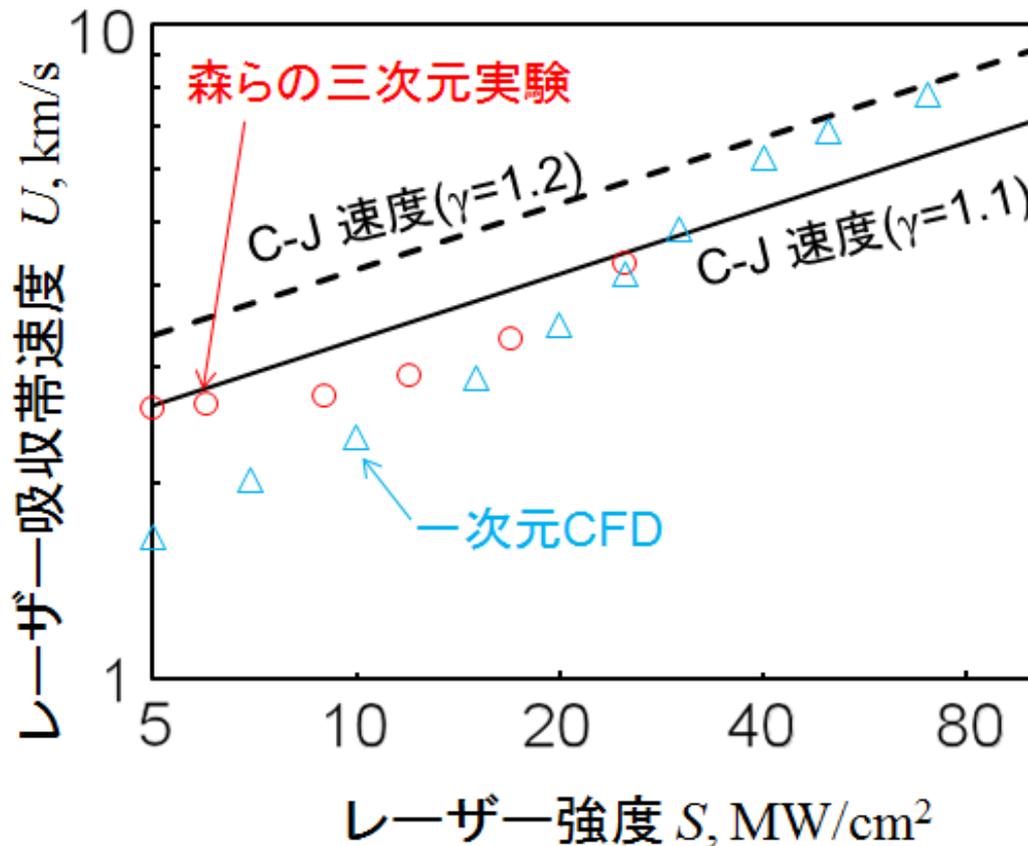
# LSDの理論伝播速度 $U_{CJ}$

- レーザー吸収帯と衝撃波が同速度で走る完全なLSDの場合、Chapman-Jouguet (C-J)条件を満たす
- 理論伝播速度 (Raizer)  $U_{CJ}$ は、

$$U_{CJ} = \left( 2 \sqrt{\gamma_{\text{eff}}^2 - 1} \frac{S}{\rho} \right)^{1/3} \propto S^{1/3}$$

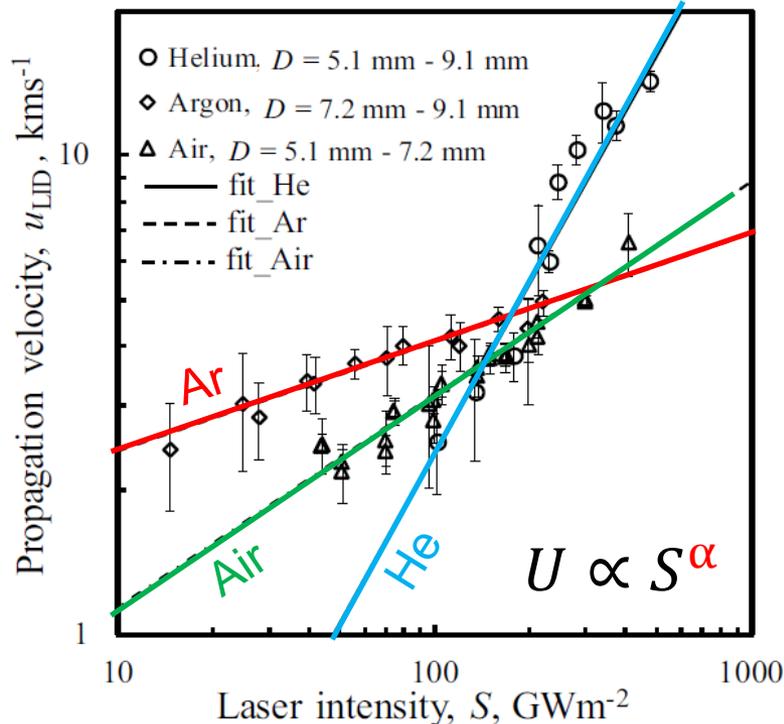
$U_{CJ}$ はレーザー強度 $S$ の1/3乗に比例

# LSD伝播速度の実験と計算の比較



- 実験(三次元)は、 $S=5$  MW/cm<sup>2</sup>以上でLSD形成
- CFD(一次元)は、 $S=40$  MW/cm<sup>2</sup>以下ではLSDが形成できない
- CFDでは、LSDを維持できるレーザー強度閾値( $S_{LSD}^{Limit}$ )付近での先行電子生成に必要な何らかの物理モデルが欠けている

# ガス種による伝播速度のレーザー強度依存性の違い



化学種	$\alpha$
He	1.18 (>1/3)
Air	0.46 (>1/3)
Ar	0.23 (<1/3)

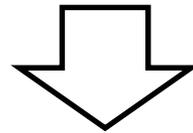
(C-Jの場合は $\alpha=1/3$ )

Shimamo, Komursaki, et al. Trans. JSASS (2017)

- 空気、アルゴン、ヘリウム雰囲気中でのLSD実験(準一次元)
- ガス種によって $U \propto S^\alpha$ の関係は異なる
- どのガス種の場合でもC-J条件の $\alpha=1/3$ の関係から外れている

# 研究目的

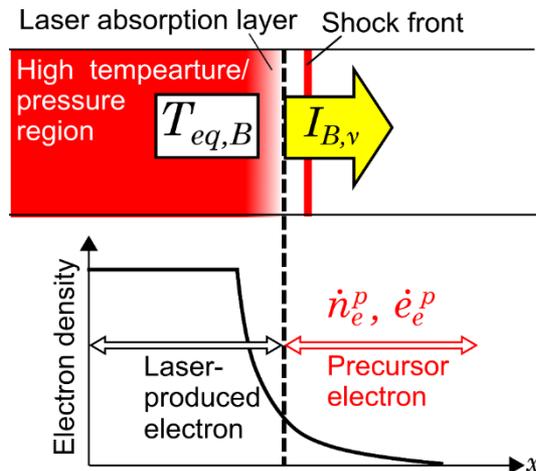
- 我々のこれまでの一次元CFDの結果
  - レーザー強度 $S$ が十分大きい場合は、伝播速度はC-J速度に一致
  - 実験ではLSDを維持できるレーザー強度の閾値付近で、CFDの伝播速度が実験値を大きく下回る
- Shimanoら (Trans. JSASS 2017) は、ガス種によっても伝播速度のレーザー強度依存性が異なると報告



- 空気、アルゴン、ヘリウム雰囲気中での一次元CFDを実施
  - LSD伝播速度と先行電子生成の化学種依存性を調査
- ⇒LSDのレーザー強度閾値付近での先行電子生成機構解明のヒントを見つけない

# 解析モデルと計算条件

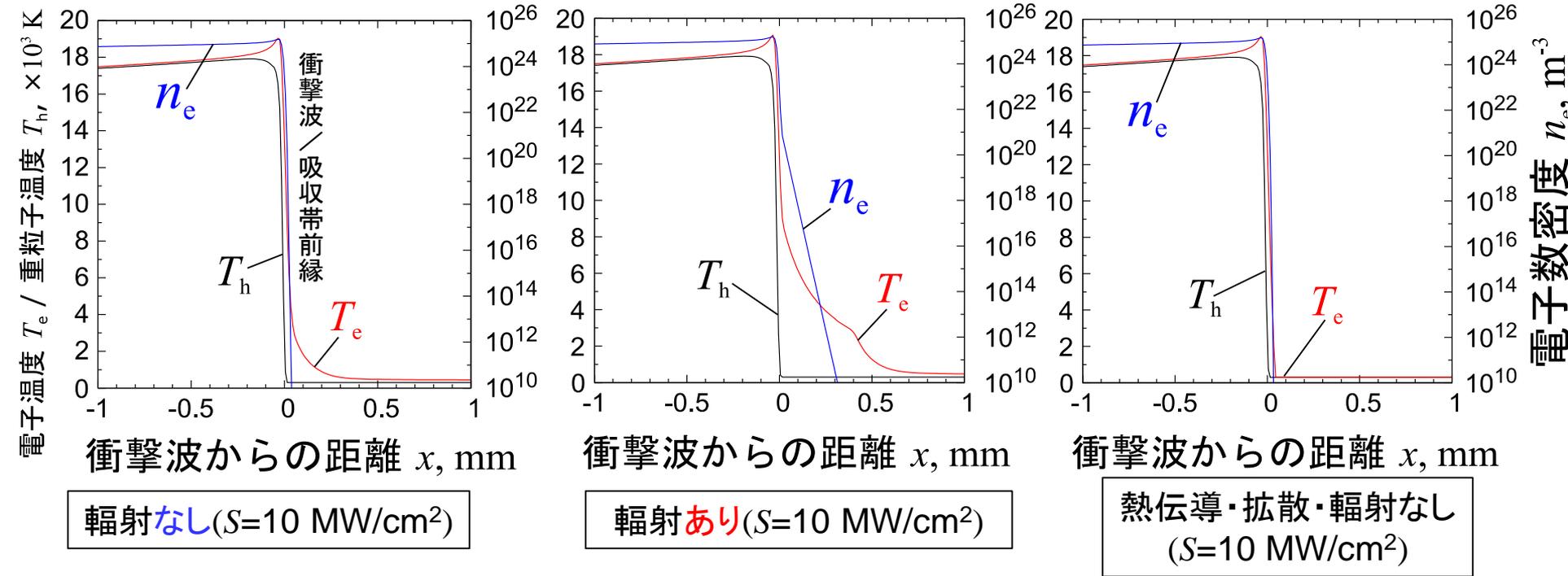
- 支配方程式：熱化学非平衡(二温度モデル)を考慮した  
1次元Navier-Stokes方程式(電子熱伝導、拡散を含む)
- レーザー吸収：逆制動輻射(電子-イオン、電子-中性粒子)
- 化学種
  - 空気：二価電離を考慮した13化学種
  - アルゴン：二価電離まで考慮した3化学種
  - ヘリウム：一価電離まで考慮した3化学種
- 先行輻射モデル：黒体輻射モデル(光電離断面積の周波数依存を考慮)



ガス種	$T_{eq, B}$ [K]
空気	25,000
アルゴン	20,000
ヘリウム	15,000

# 計算結果

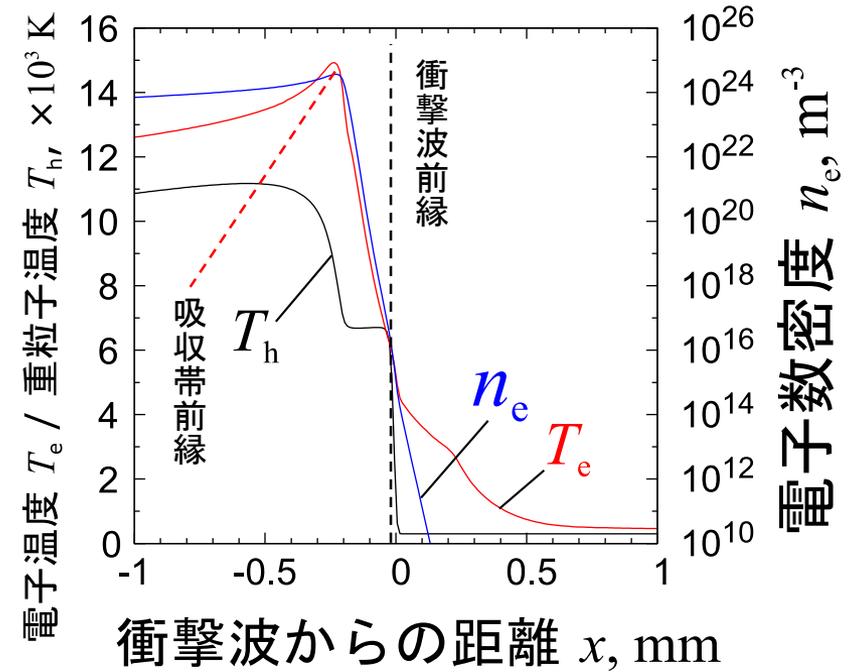
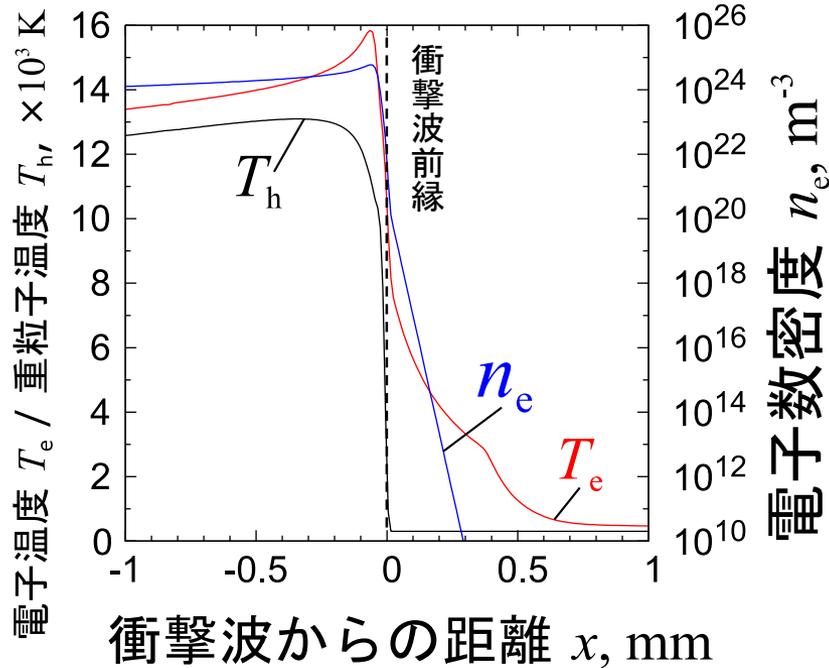
# 完全なLSDの場合の先行電子生成(アルゴン)



- 輻射なしの場合：
  - 熱伝導により  $T_e$  が上昇、 $n_e$  の生成(衝撃波加熱)
- 輻射ありの場合
  - 衝撃波前方から領域で  $n_e$  が生成されるが、LSD速度・構造に変化はない
- 熱伝導・拡散・輻射なしの場合
  - 衝撃波加熱による電子生成のみ、LSD速度・衝撃波背後の構造に変化なし

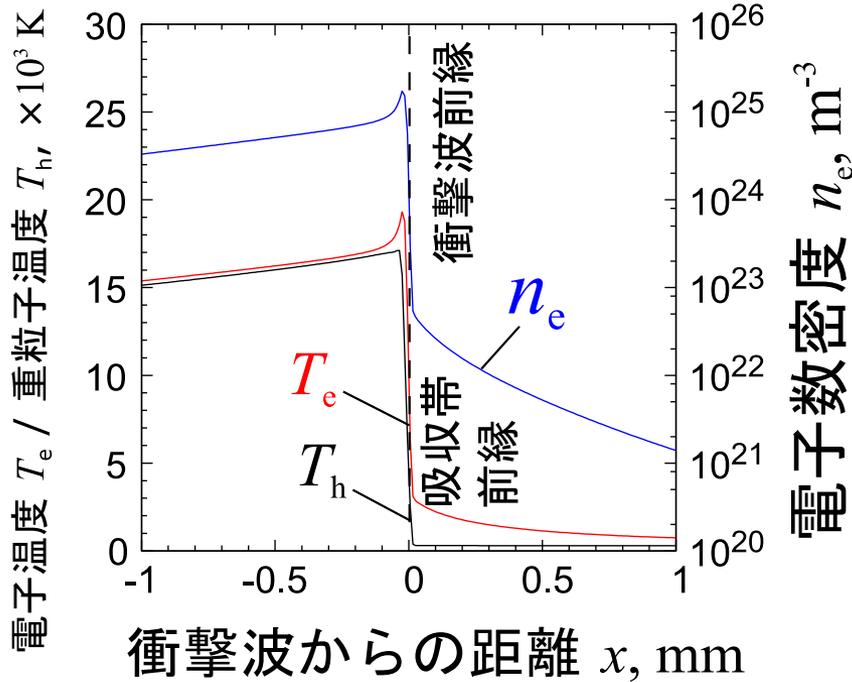
⇒レーザー強度  $S$  が大きい場合の主たる先行電子生成機構は衝撃波加熱

# $S_{LSD}^{Limit}$ 付近でのLSD構造(アルゴン)

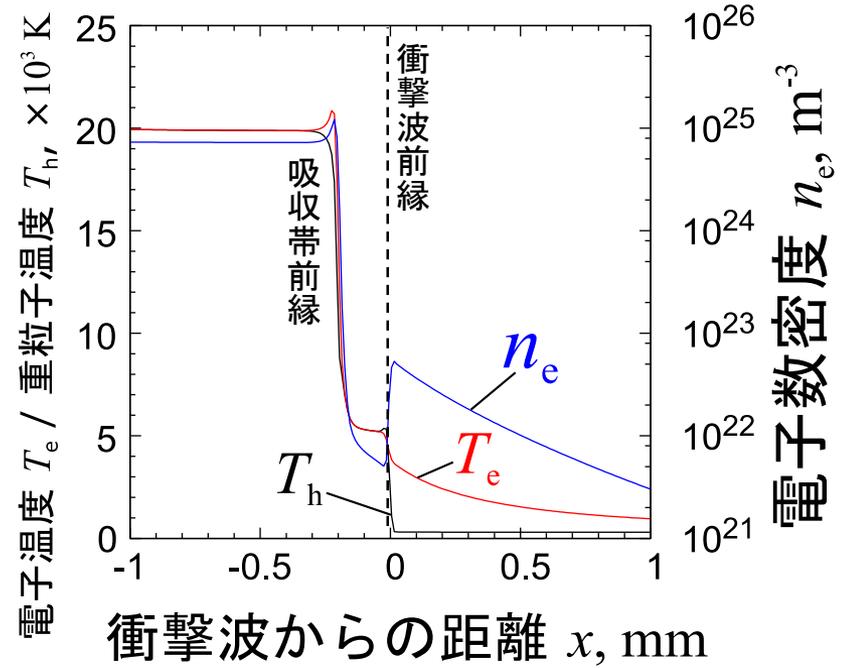


- アルゴンは、電離しやすいため、 $S$ が小さい領域でも衝撃波加熱により多くの先行電子が生成
- $S < 3 \text{ MW/cm}^2$ で衝撃波前縁とレーザー吸収帯が離れ、不完全なLSD構造となる

# $S_{LSD}^{Limit}$ 付近でのLSD構造(空気)



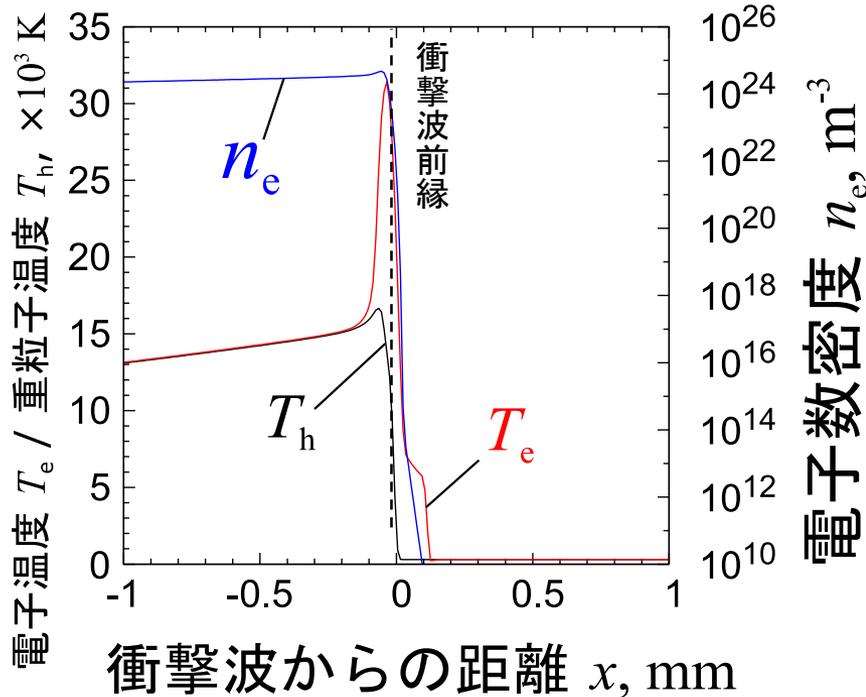
$$S=40 \text{ MW/cm}^2 = S_{LSD}^{Limit}$$



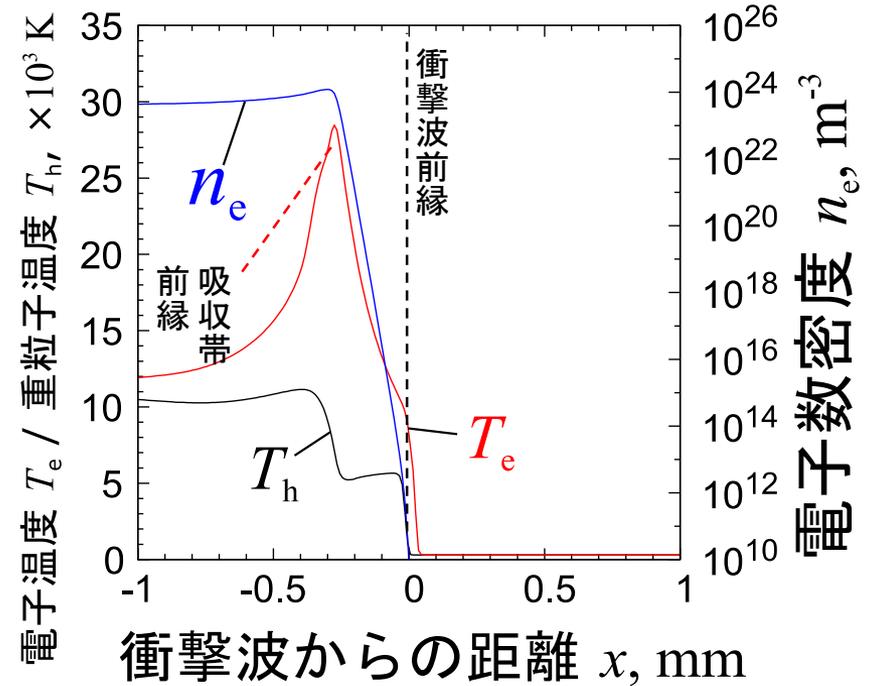
$$S=20 \text{ MW/cm}^2$$

- 分子の乖離の次に電離が起こるため、衝撃波加熱による先行電子生成がしにくい
- $S < 40 \text{ MW/cm}^2$  で衝撃波前縁とレーザー吸収帯が離れ、不完全なLSD構造となる
- 輻射先行電子は、衝撃波背後の電子再結合反応により失われる

# $S_{LSD}^{Limit}$ 付近でのLSD構造(ヘリウム)



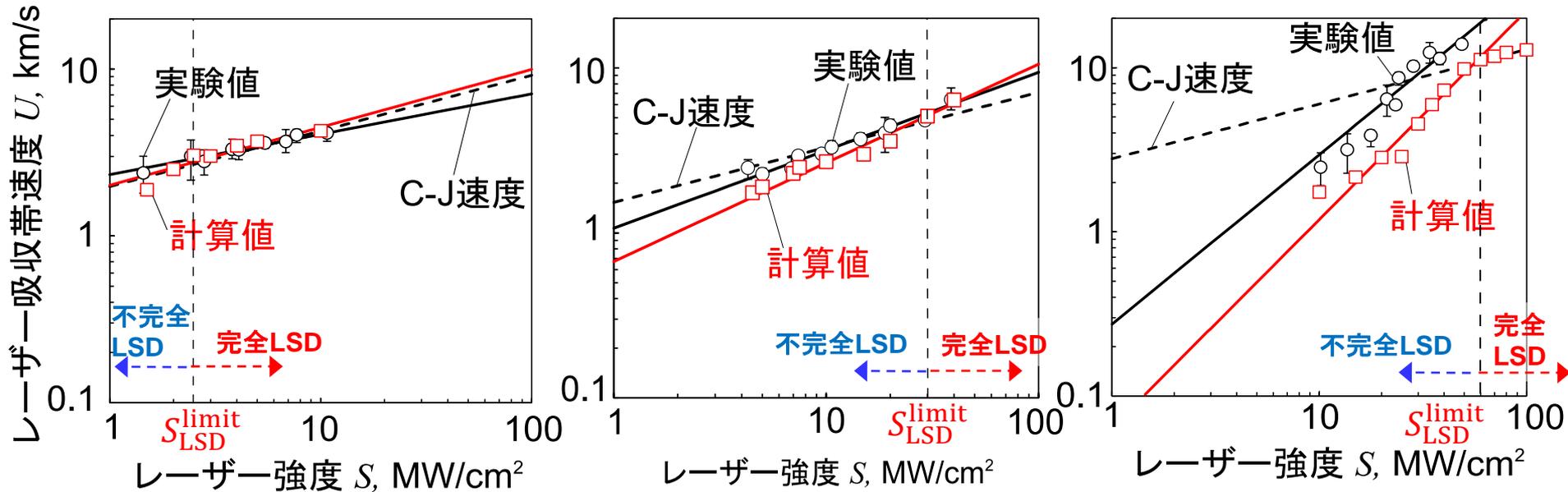
$$S=60 \text{ MW/cm}^2 = S_{LSD}^{Limit}$$



$$S=40 \text{ MW/cm}^2$$

- 電離エネルギーがArの約1.5倍も大きいため、LSDになるレーザー強度の閾値が大きくなる
- $S < 60 \text{ MW/cm}^2$ で、衝撃波前縁とレーザー吸収帯が離れ、不完全なLSD構造となる

# LSD伝播速度の化学種依存性



アルゴン

$$\alpha_{Exp} = 0.23 (< 1/3)$$

空気

$$\alpha_{Exp} = 0.46 (> 1/3)$$

ヘリウム

$$\alpha_{Exp} = 1.18 (> 1/3)$$

- アルゴンの場合、ほぼ $S$ の全域において、完全なLSD (C-Jデトネーション)
- 空気とヘリウムの場合、不完全なLSD ( $S < S_{LSD}^{Limit}$ ) の領域が多く含まれるため、傾きが大きくなる
  - 実験では、不完全／完全を区別するのは困難？ 不完全LSDも重要機構？
- 依然として、不完全LSDの領域で、CFDの伝播速度は実験値を下回る
  - $S_{LSD}^{Limit}$  以下 (不完全なLSD) の物理機構は未説明

# まとめ

LSDを維持できるレーザー強度の閾値付近での先行電子生成機構の解明を目指して...

- Shimanoら (Trans. JSASS, 2017) の実験
  - 化学種によりLSD伝播速度のレーザー強度の依存性が異なる
  - C-J速度に一致しない
- 一次元CFDによりLSD伝播の化学種依存性を調査
  - 電離しにくい気体ほど、不完全なLSD(衝撃波と吸収帯が一致せず離れていく)の領域が大きくなる、伝播速度がC-J速度からずれている
- 今後の予定
  - 不完全なLSDの速度は、計算値は実験値を下回る
  - $S_{LSD}^{Limit}$  付近(不完全なLSD)での先行電子生成機構は依然として未解明