

# レーザー支持デトネーションの ユゴニオ解析

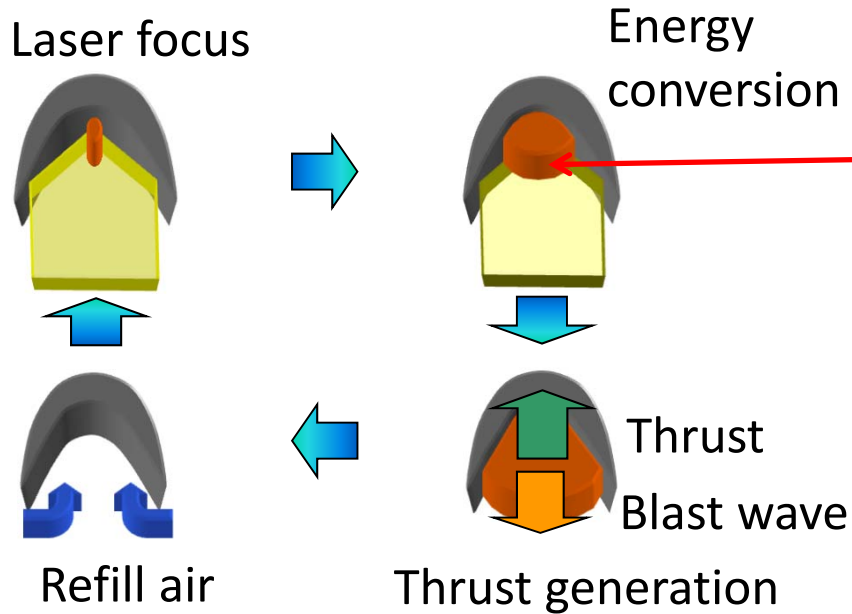
講演番号: B-3

神田 圭介<sup>1</sup>  
Jean-Luc Leonetti<sup>2</sup>  
○小紫 公也<sup>1</sup>  
小泉 宏之<sup>1</sup>

- 1) 東京大学
- 2) パリ工科高等学校

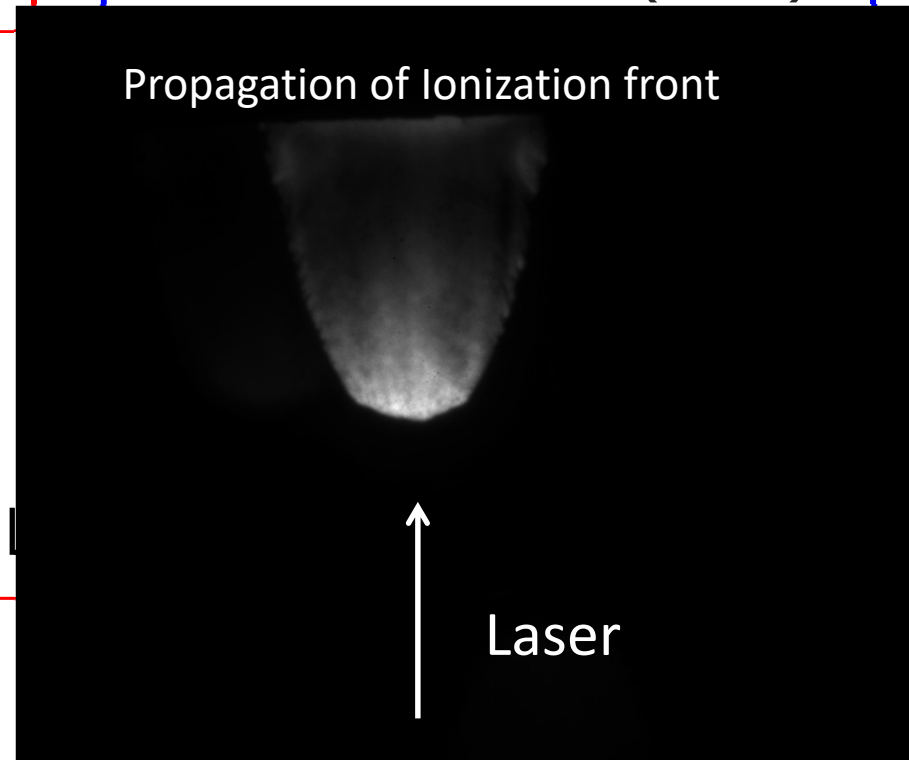
# 研究背景

# レーザー推進の推力生成原理



レーザー支持  
デトネーション (LSD)

Propagation of Ionization front

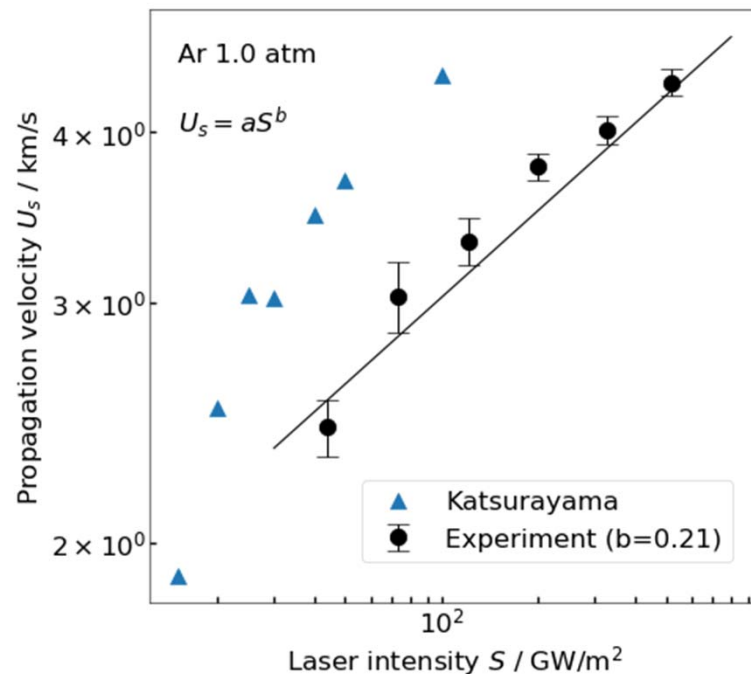


パルスレーザー推進のエンジンサイクル

レーザーによる加熱  
 $S/U_s$  [J/m<sup>3</sup>]

推力(圧力上昇)

# LSD波伝播速度の1次元CFDと測定結果の比較



Ar 1.0 atmにおける1次元CFDと  
実験による進展速度の比較

実験では

- ・レーザー吸収係数が小さい？
- ・ユゴニオ関係は成り立っている？

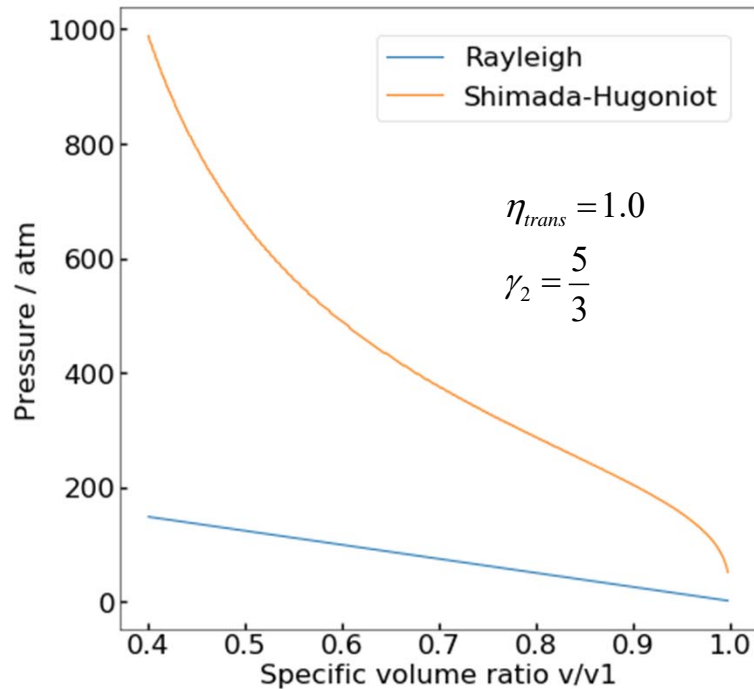
1次元CFD解析

- ・ Navier-Stokes (電子拡散・熱伝導あり)
- ・ 実在気体効果 (乖離、電離、励起反応、輻射など) 考慮
- ・ レーザーは波面で100%吸収

[1] 葛山浩, 石田樹, "希ガス中を伝播するレーザー支持デトネーションの数値解析" 第63回宇宙科学技術連合講演会, 3R05, 久留米, 2019年11月.

[2] 白石裕之, "現実的な照射強度変化に対するレーザー支持爆轟波(LSD)の非定常解析" 第63回宇宙科学技術連合講演会, 3R03, 久留米, 2019年11月.

# 測定されたLSD伝播速度ではユゴニオ解がない



$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$\rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2$$

$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2$$

$$q = \frac{S}{\rho_1 u_1} \eta_{trans}$$

ユゴニオ線とレー  
リー線が交点を持た  
ない

Rayleigh

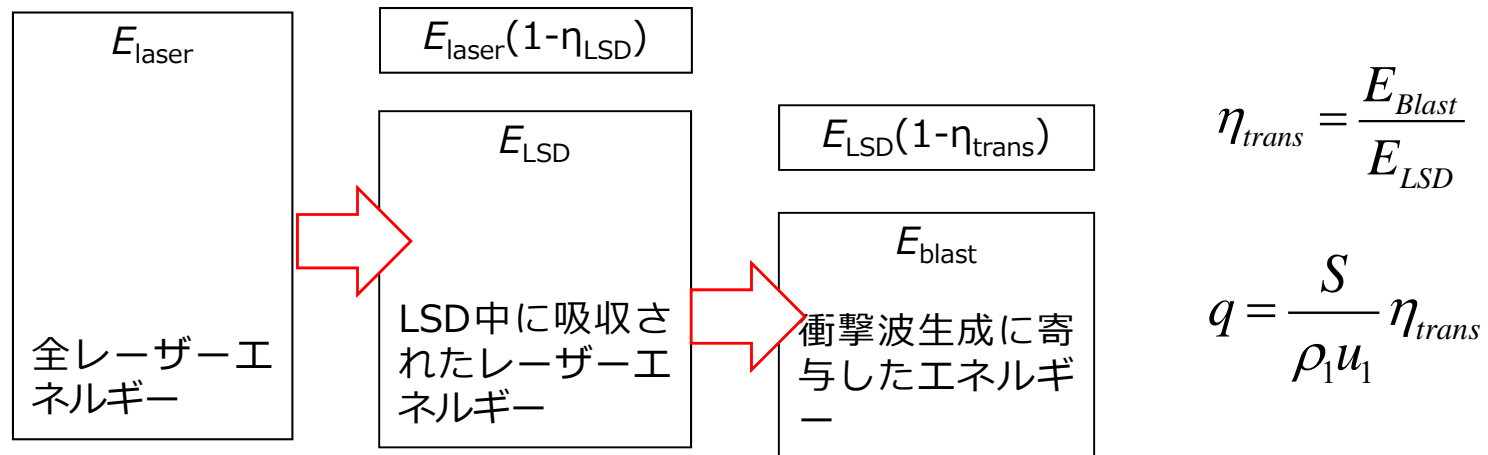
Hugoniot

吸収エネルギー  $q$  が  
小さいとユゴニオ線  
が下に移動する

ユゴニオ解析による Ar 1.0 atm, 300  
GW/m<sup>2</sup>での p-v 線図 ( $U_s$  は実験値)

解 (交点) が存在するには、レーザーから爆風波へのエネルギー変換効率  $\eta_{trans}$  が数%である必要があると示唆される

# 爆風波変換効率 $\eta_{trans}$



- LSD終了後の爆風波の膨張速度を計測し爆風波エネルギーを算出
- LSD過程のエネルギー変換効率 = 電力変換効率の時間平均
- 実在気体効果（励起・乖離・電離・輻射・透過など）を表したものの

## 研究目的

爆風波エネルギーを計測し、ユゴニオ関係を検証したい。

# 実験手法と解析

# 爆風波変換効率 $\eta_{\text{trans}}$ の推算方法

回転楕円形に断熱膨張する爆風波にSedovの自己相似解をフィッティングすると、爆風波の運動エネルギーは以下のように表せる

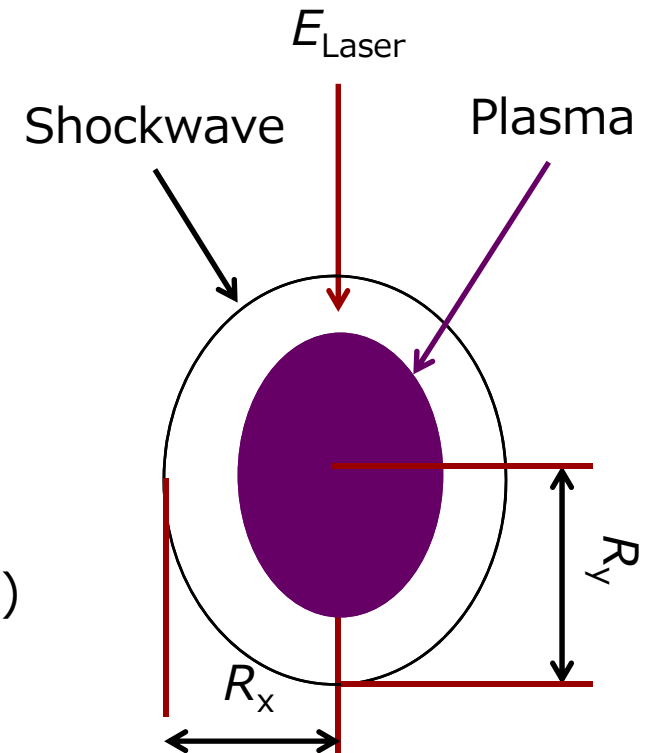
$$E_{\text{Blastwave}} = \frac{25}{4} \rho_1 \zeta^{-5} D^2 R_y R_x^2$$

$\rho_1$  : 雰囲気気体の密度

$\zeta$  : 定数 (比熱比に依存)

$D$  : 衝撃波の速度

$$D = \frac{dR_y}{dt} = \frac{dR_x}{dt}$$



衝撃波の時間変位から  
 $R_x, R_y, D$  求めて  $E_{\text{blast}}$  を  
計算

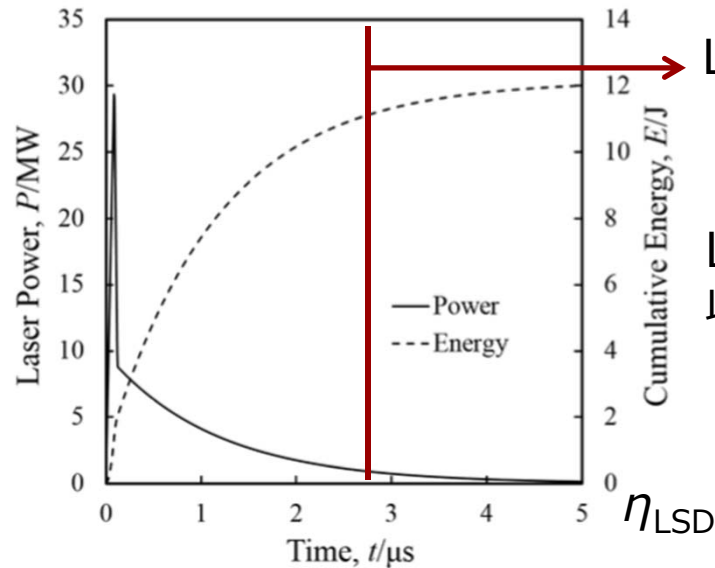
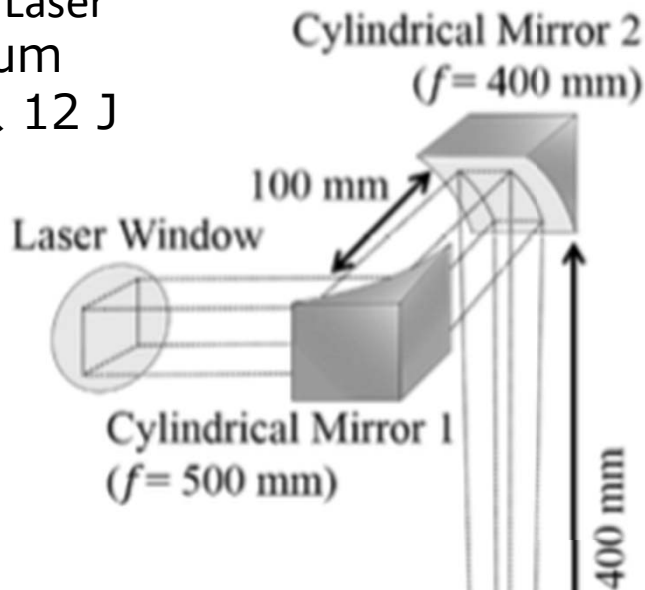
$\eta_{\text{LSD}}$  も写真から判断

[1] 遠藤琢磨 “デトネーションの熱流体力学2”, 理工図書 (2011)



# TEA-CO<sub>2</sub>レーザーと1次元集光系

TEA-CO<sub>2</sub> Laser  
波長10 μm  
1パルス 12 J



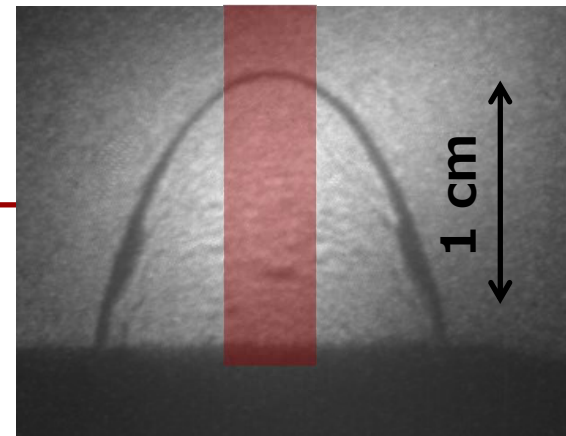
LSD終了時間

LSD中の吸収Eを計算

レーザーの出力時間履歴

・1次元伝播を再現するため長焦点距離放物面鏡で集光

・ビーム直径4.1 mm



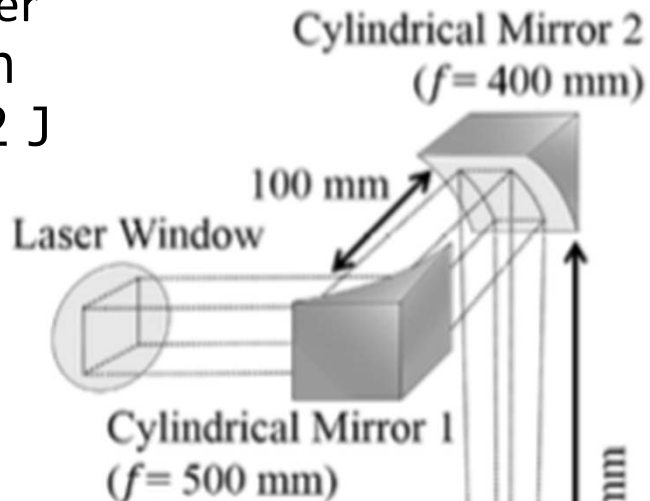
半楕円回転体衝撃波を形成

半楕円回転体として $E_{\text{blast}}$ 計算

レーザー集光系およびチャンバーの概略図

# 衝撃波可視化のためのシュリーレン光学系

TEA-CO<sub>2</sub> Laser  
波長: 10 μm  
1パルス 12 J

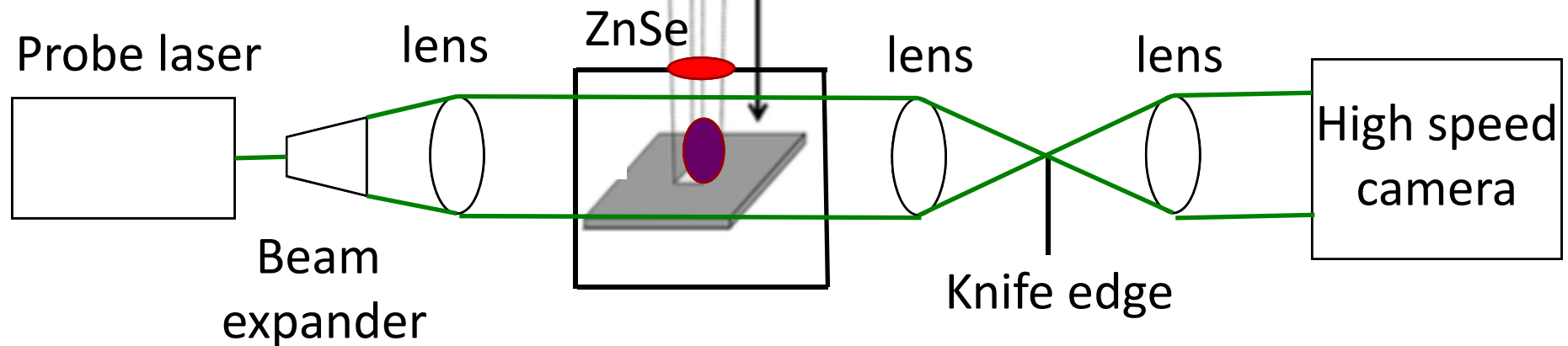


高速度カメラによるシュリーレン写真撮影で衝撃波波面の時間変位を取得

実験条件

1.0 atm Air

1.0 atm Ar (チャンバー内)

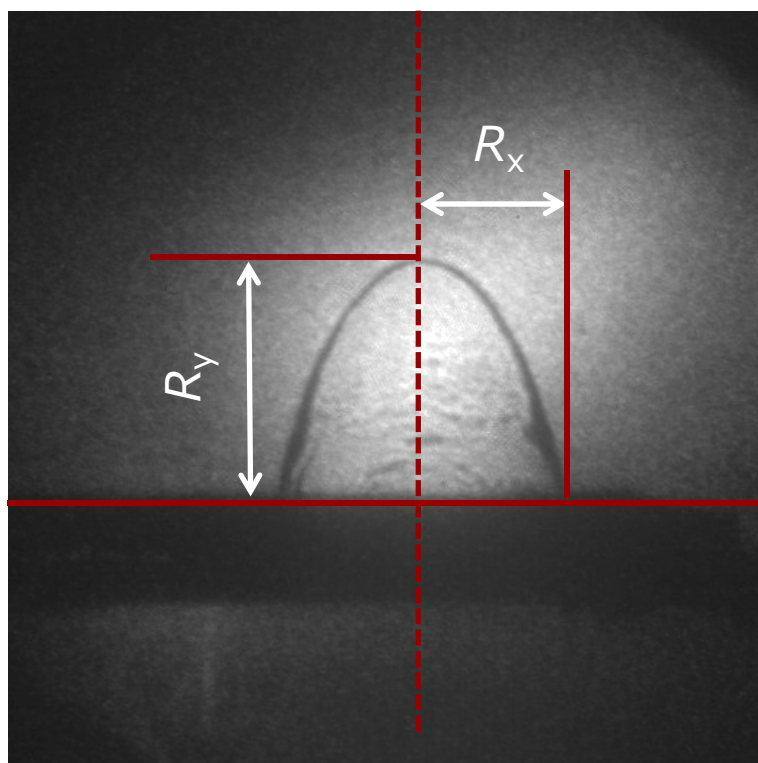


# 結果と考察

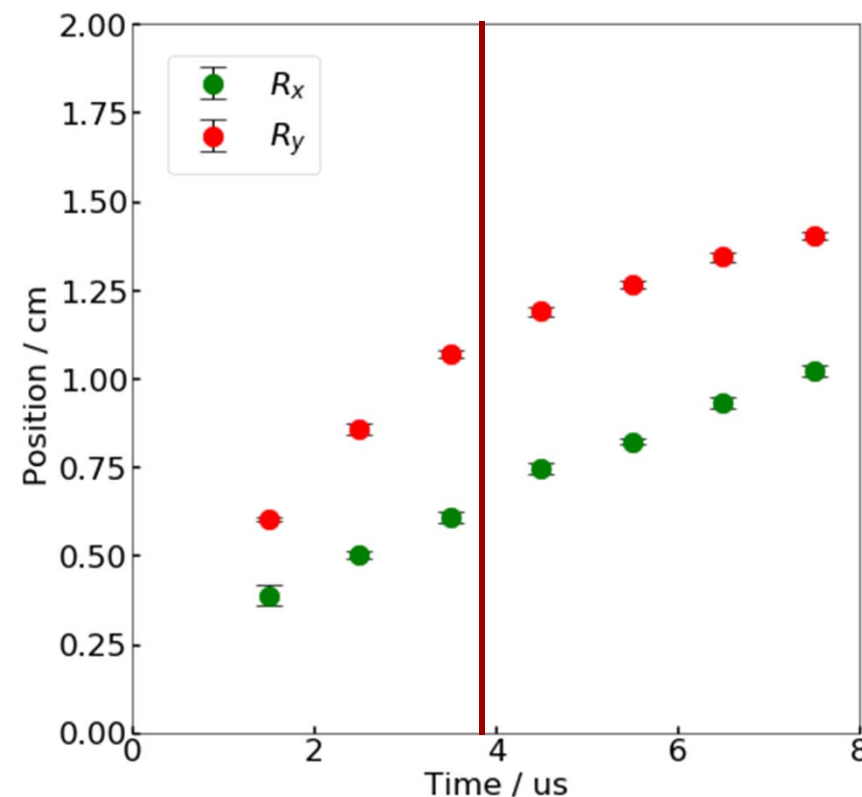
# 1.0 atm Airにおける爆風波のx-t線図

$\eta_{\text{LSD}}$	$\eta_{\text{trans}}$
0.92	0.45

LSD終了はレーザー発振の3.4  $\mu\text{s}$ 後



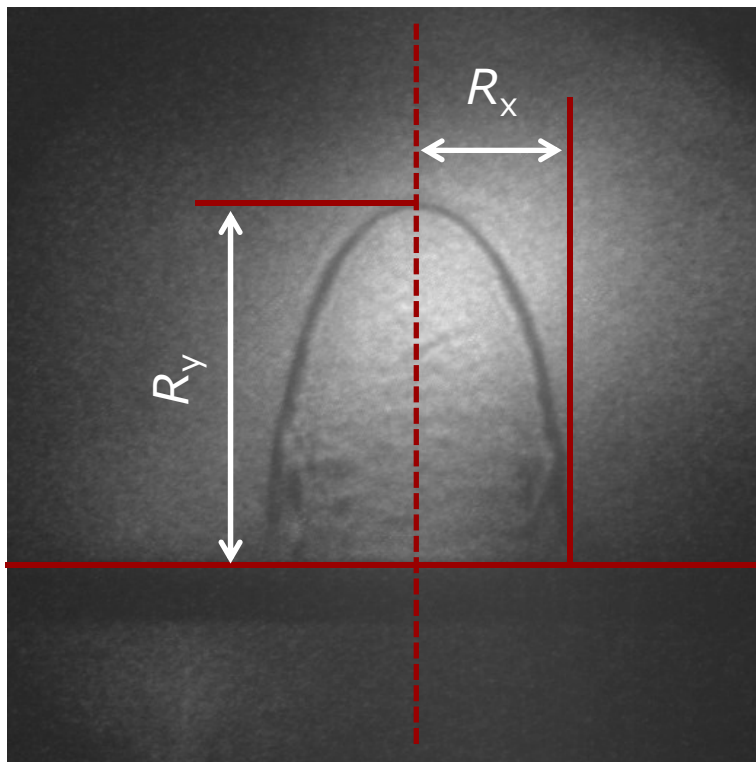
Air 1.0 atm レーザー発振後 4500 nsでのシュリーレン写真



Air 1.0 atm における爆風波のx-t線図  
時間はレーザー発振からの時間

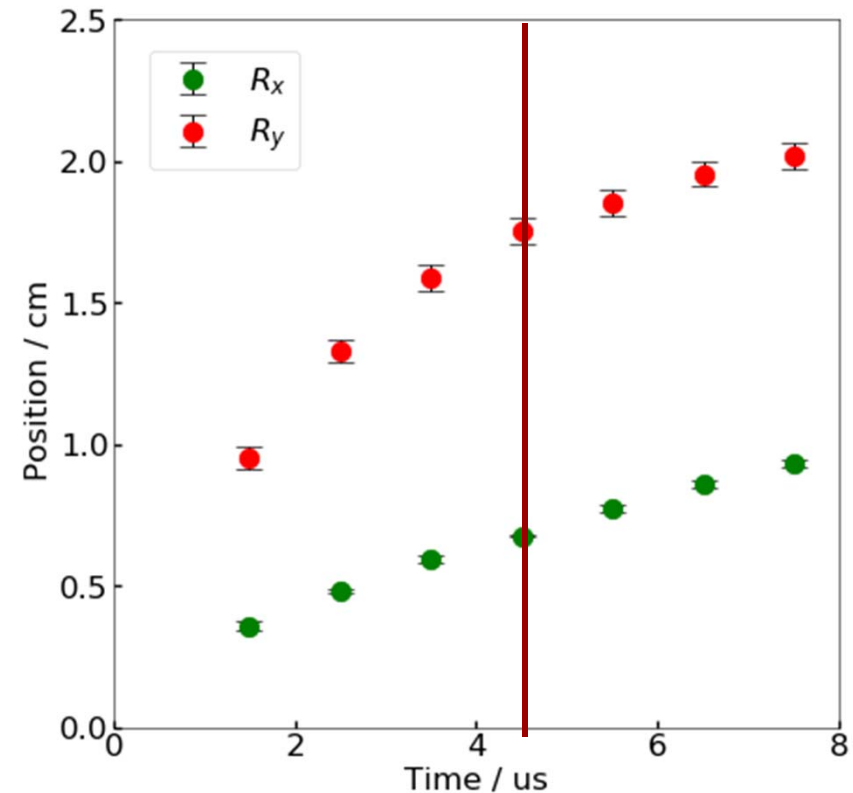
# 1.0 atm Arにおける衝撃波のx-t線図

$\eta_{\text{LSD}}$	$\eta_{\text{trans}}$
0.96	0.48



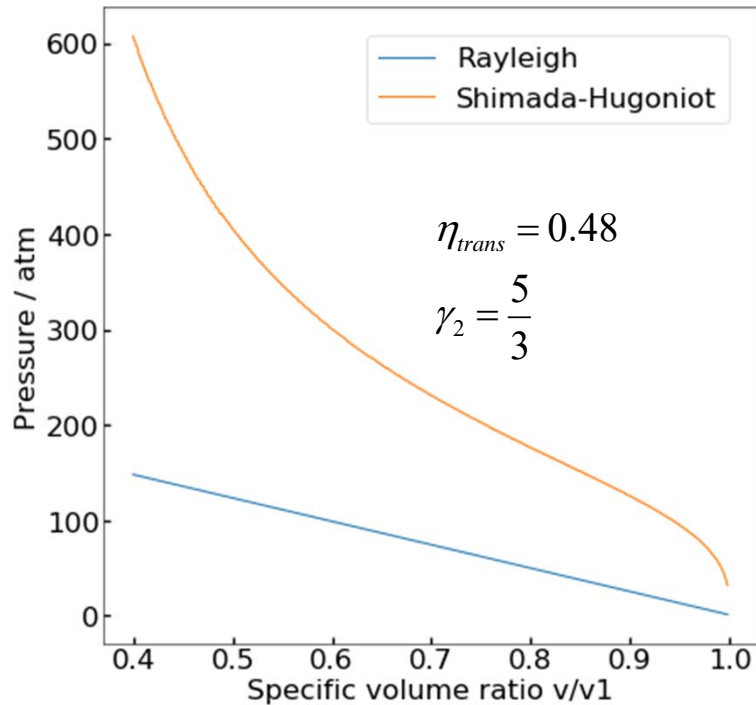
Ar 1.0 atm レーザー発振後 5500 nsでのシュリーレン写真

LSD終了はレーザー発振の4.5  $\mu\text{s}$ 後



Ar 1.0 atm における衝撃波のx-t線図  
時間はレーザー発振からの時間

# 爆風波変換効率を考慮したユゴニオ解析



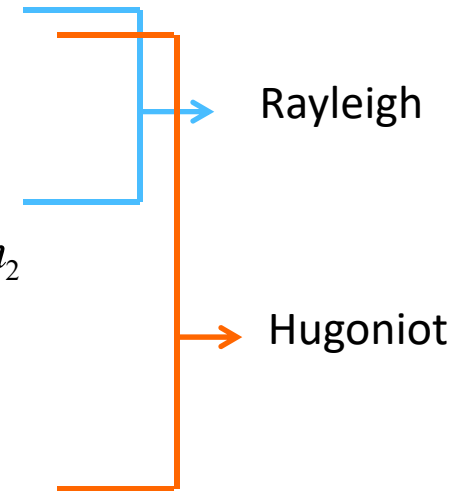
爆風波変換効率を考慮したユゴニオ解析による Ar 1.0 atm, 300 GW/m<sup>2</sup>でのp-v線図

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$\rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2$$

$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2$$

$$q = \left( \frac{S}{\rho_1 u_1} \right) \eta_{trans}$$



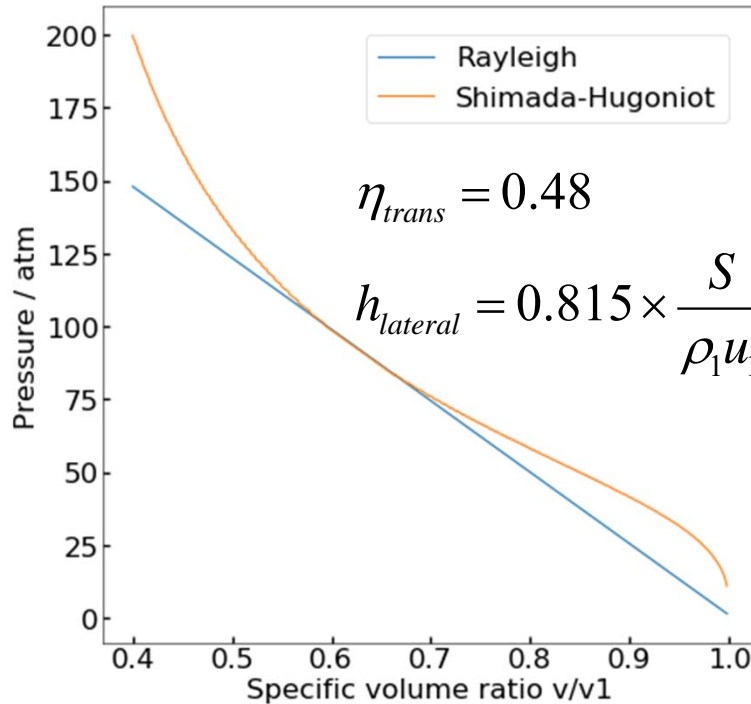
実験結果から

$$\eta_{trans} = \frac{E_{blastwave}}{E_{LSD}} = 0.48$$

→ ユゴニオ解析が成立しない

空気でも同様の結果

# 横方向エンタルピー流出を考慮した解析



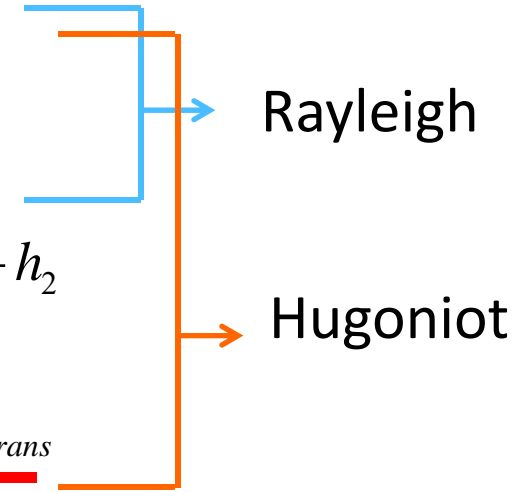
横方向エネルギー流出を81.5%とした  
ユゴニオ解析によるAr 1.0 atm,  
300 GW/m<sup>2</sup>でのp-v線図

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$\rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2$$

$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2$$

$$q = \left( \frac{S}{\rho_1 u_1} - \underline{h_{lateral}} \right) \underline{\eta_{trans}}$$



$$\eta_{Abs} = 0.48$$

$$h_{lateral} = 0.815 \times S / (\rho_1 u_1)$$

でユゴニオ解析が成立

軸対称系での中心軸は特異点なので $h_{lateral}$ は非常に大きい可能性がある  
→LSDを記述するには軸対称2次元解析が不可欠ではないか？

# 結論

① 実験で観測されるLSD波に関して爆風波変換効率 $\eta_{\text{trans}}$ を計測し以下の結果を得た

雰囲気ガス条件	爆風波変換効率 $\eta_{\text{trans}}$
Air 1.0 atm	0.45
Ar 1.0 atm	0.48
He 1.0 atm	0.54

② 吸収エネルギーの約8割が横方向へ流出( $h_{\text{lateral}}$ )していると仮定するとユゴニオ解析で解が存在する

→ **実験条件の再現には2次元軸対称のCFDが必要なことを示唆**



ご清聴ありがとうございました

The University of Tokyo  
Keisuke Kanda  
k-kanda@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

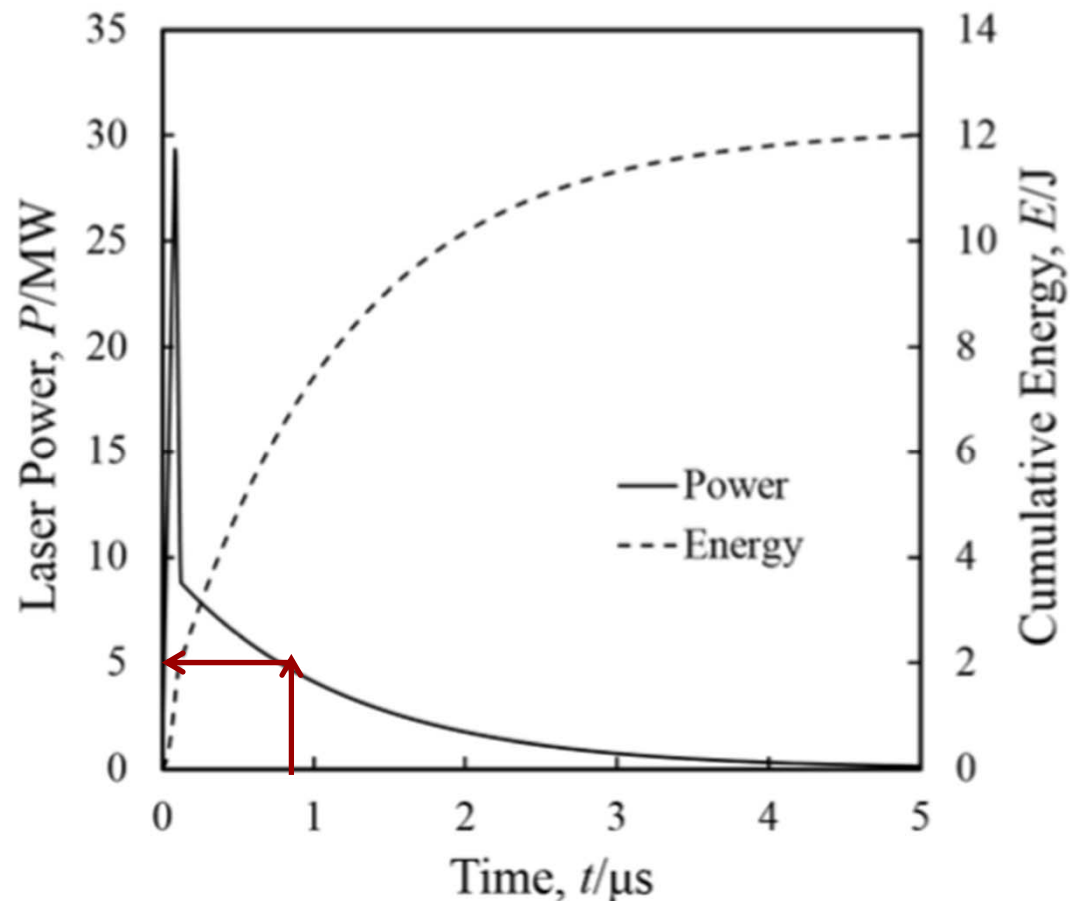
# Appendix



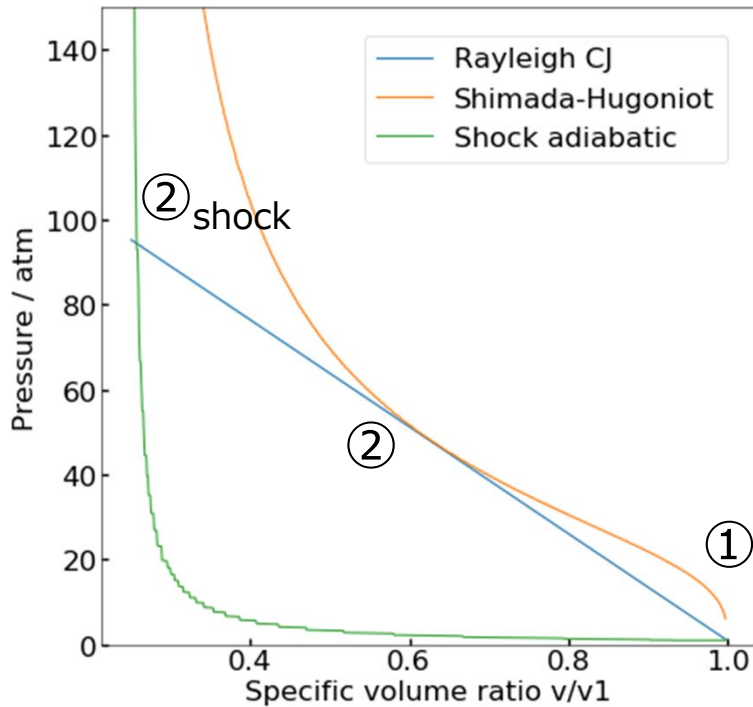
# レーザー強度の時間変化

レーザーパワーは時間変化する

➡ レーザー強度(レーザーパワー/断面積)も同様に変化する



# ユゴニオ解析のLSDへの適用(CJ)



Ar 1.0 atm,  $S=25 \text{ GW/m}^2$ のLSD  
でのユゴニオ解析によるp-v線図

LSD波面の進展速度  $U_s$  が  
CJ速度なら  $U_s \propto S^{1/3}$

$$U_s = \sqrt[3]{2(\gamma^2 - 1) \frac{S}{\rho_1}}$$

[1] Y. P. Raizer, "Heating of Gas by a Powerful Light Pulse", *Sov. Phys. JETP*, **21**, 5, pp.1009-1017 (1965).

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$\rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2$$

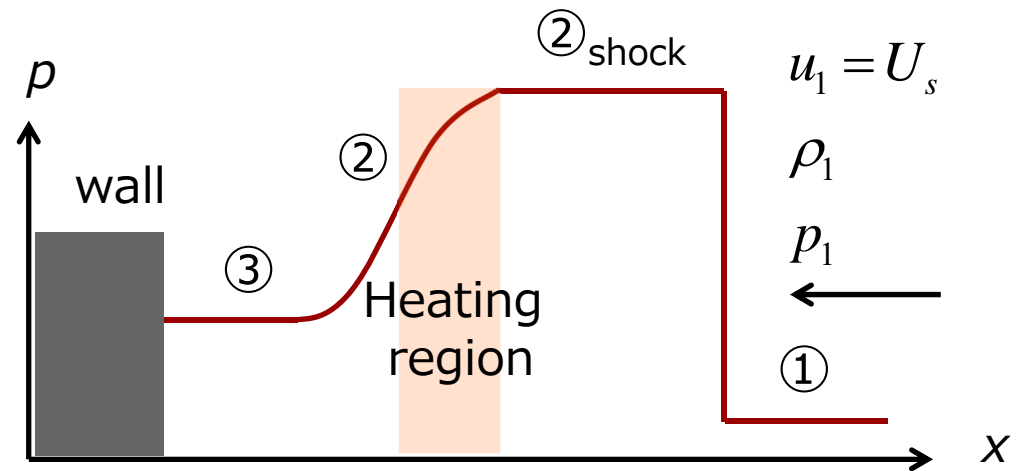
$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2$$

$$q = \frac{S}{\rho_1 u_1}$$

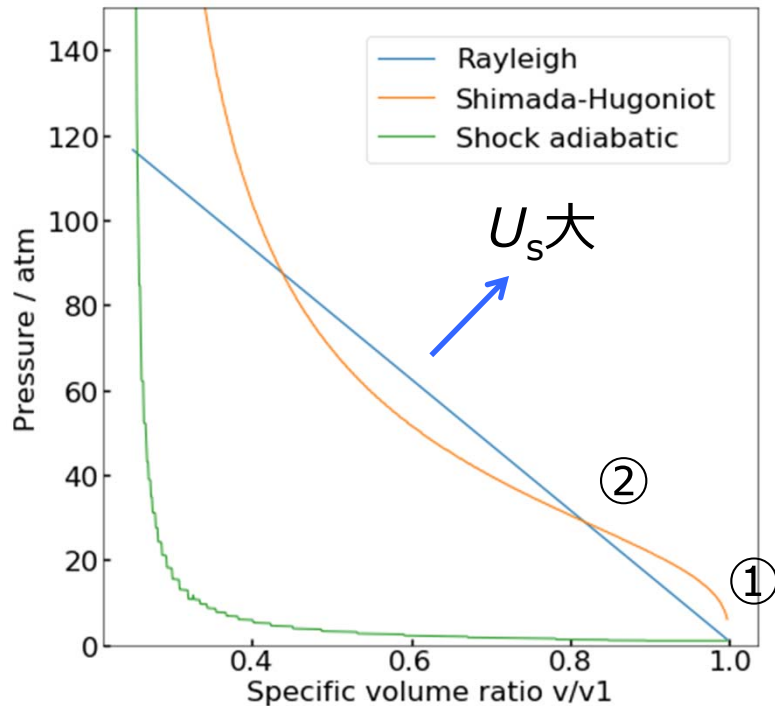
レーザー強度  
 $S \text{ [W/m}^2]$

Rayleigh

Hugoniot



# ユゴニオ解析のLSDへの適用(overdriven)



Ar 1.0 atm,  $S=25 \text{ GW/m}^2$ のLSD  
でのユゴニオ解析によるp-v線図

LSD波面のCJ速度は  $U_s \propto S^{1/3}$  だが  
Overdrivenなデトネーションの  
可能性ある  
(その時  $p_2$  は速度に依存)

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$\rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2$$

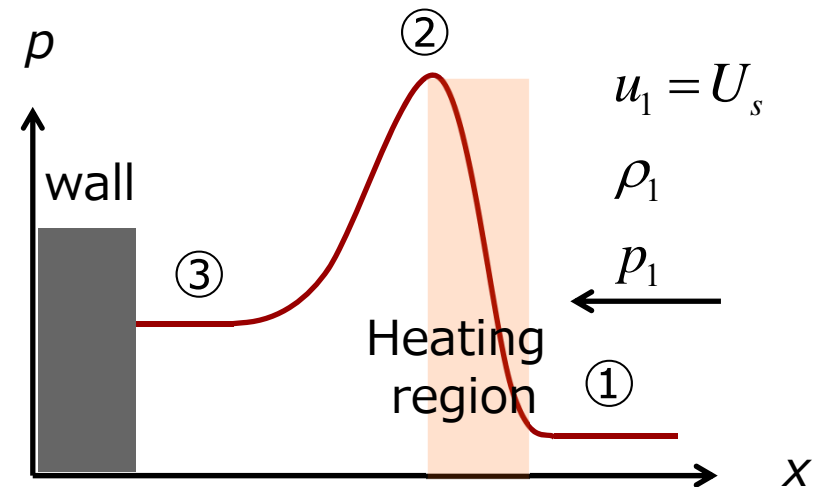
$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2$$

$$q = \frac{S}{\rho_1 u_1}$$

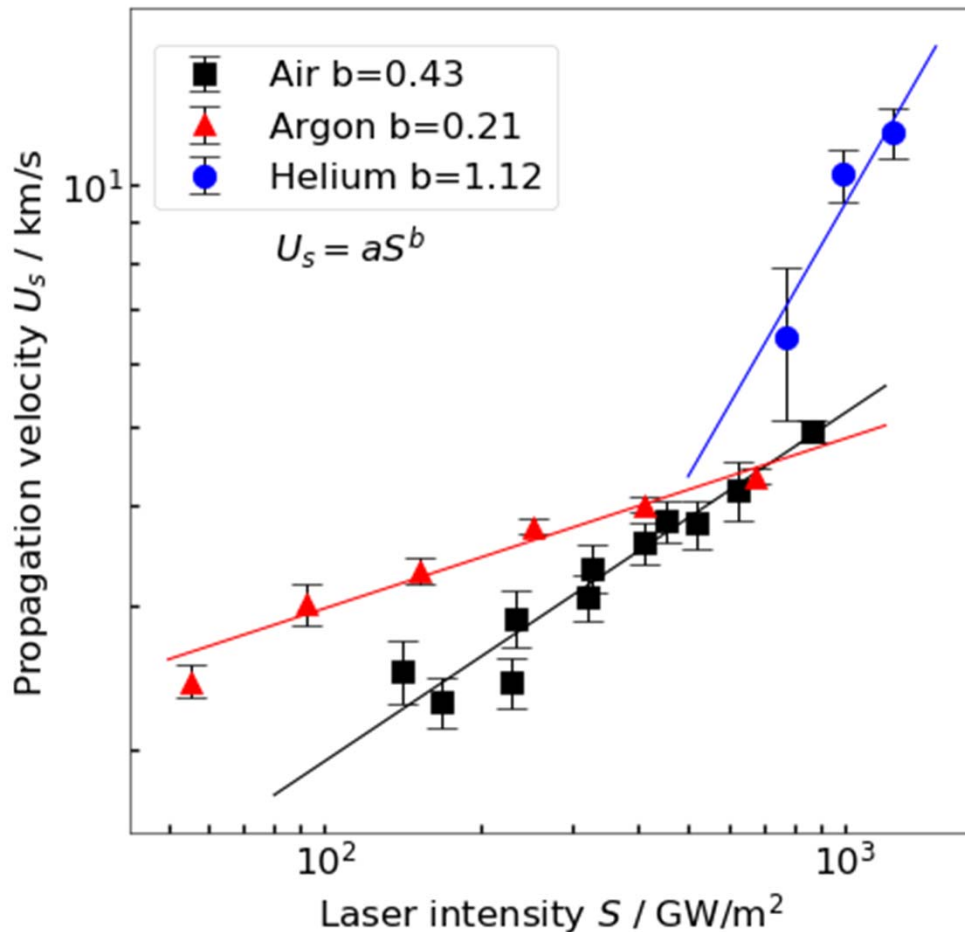
レーザー強度  
 $S \text{ [W/m}^2]$

Rayleigh

Hugoniot



# LSDの進展速度はCJ速度に従わない



様々なガス種におけるLSD進展速度のレーザー強度依存性

$U_s$ がCJ条件で決まるなら

$$U_s = \sqrt[3]{2(\gamma^2 - 1) \frac{S}{\rho_1}} \quad \begin{array}{l} \text{レーザー強度} \\ S \text{ [W/m}^2\text{]} \end{array}$$

$$U_s(S) \propto S^{1/3}$$



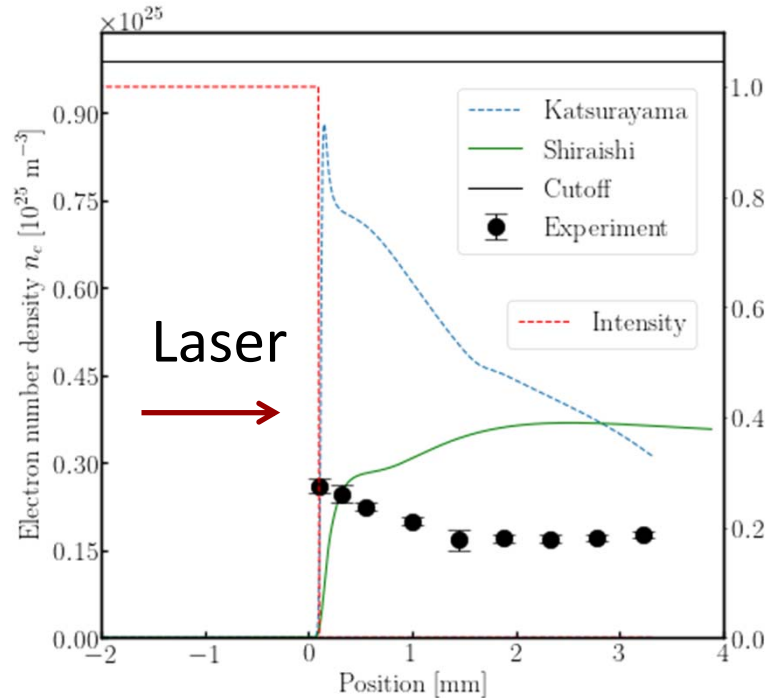
実験による進展速度は  
Ar, He, Airのいずれも  
1/3乗則に従わない[1][2]

進展速度 $U_s$ はCJに従っておらず  
Overdrivenなデトネーションの  
可能性がある

[1] K. Matsui, T. Shimano, J. A. Ofosu, K. Komurasaki, T. Schoenherr, and H. Koizumi, "Accurate propagation velocity measurement of laser supported detonation waves," *Vacuum*, **136**, 171 (2016).

[2] T. Shimano, J. A. Ofosu, K. Matsui, K. Komurasaki, and K. Koizumi, "Laser-Induced Discharge Propagation Velocity in Helium and Argon Gases," *Trans. JSASS*, **60**, 6 (2017), pp. 378-381.

# LSD波面ではほぼレーザーは完全吸収されている



He 1.0 atm, レーザー強度607 GW/m<sup>2</sup>  
における電子数密度の1次元分布

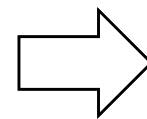
$$n_e = n_i = 2.6 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$$

$$T_e = 2.1 \text{ eV (from Saha)}$$

レーザーの吸収係数

$$k_{IB} = \sigma_{ei} n_e n_i (\exp(hc / \lambda k T_e) - 1)$$

$$\sigma_{ei} = 1.37 \times 10^{-27} \lambda^3 / T_e^{1/2}$$



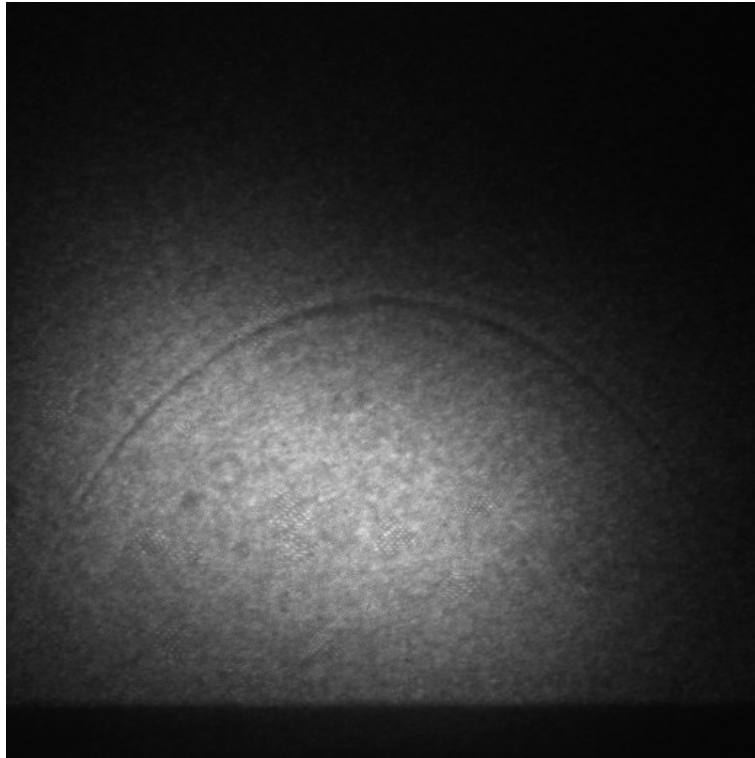
$$k_{IB} = 4.45 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

$$L = 1/k_{IB} = 0.225 \text{ mm}$$

① レーザー吸収長  $k_{IB} \sim 0.2 \text{ mm} < \text{プラズマのスケール} \sim 4 \text{ mm}$   
→ 透過少ない

②  $n_e (\sim 2.6 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}) < \text{カットオフ密度} (\sim 0.99 \times 10^{25} \text{ m}^{-3})$   
→ 反射は少ない

# チューブによるLSC遷移の変化



He 1.0 atm でのシュリーレン写真  
t = 3.3 us w/o tube

- ・ LSDからLSCへの遷移はチューブ内では遅い
- ・ チューブのLSD領域では速度上昇



He 1.0 atm でのシュリーレン写真  
t = 3.3 us (w tube)

チューブなしでは横方向へのエンタルピー流失を示唆



# レーザー吸収長さ

## レーザー吸収長

$$k_{IB} = \sigma_{ei} n_e n_i (\exp(hpc / \lambda kT) - 1)$$

$$\sigma_{ei} = 1.37 \times 10^{-27} \lambda^3 / T^{1/2}$$

$$n_e = n_i = 4.05 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$$
$$T_e = 2.1 \text{ eV (from Saha)}$$

レーザー吸収長は  
プラズマよりも小さい

エネルギー吸収が十分は  
行われている

$$k_{IB} = 1.15 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$$
$$L = 1/k_{IB} = 0.09 \text{ mm}$$