



2017年3月23日 科研費S ミーティング

様々な雰囲気ガス中における レーザー放電の1次元進展現象

小紫研究室 松井 康平



目次

◆ 研究背景

- 繰り返しパルス型レーザー推進
- レーザー放電進展現象
- 研究目的

◆ 実験装置

- 可視化光学系
- 集光光学系

◆ レーザー放電実験

- 観測結果
- モデルとの比較

◆ ユゴニオ解析

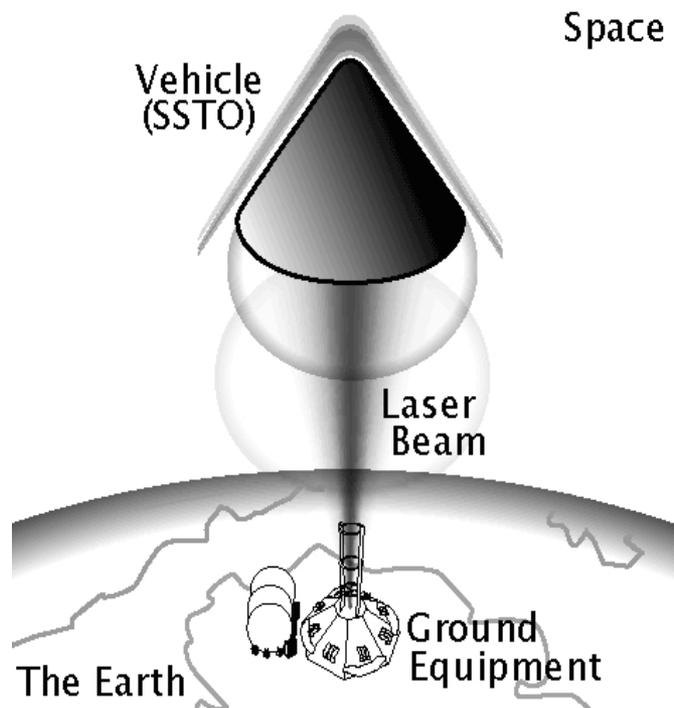
◆ 結言



研究背景



繰り返しパルス型レーザー推進



大気吸い込み型

推進剤不要

高ペイロード比

パルス detonation
作動

ポンプ等不要

単純な構造

地上レーザー施設

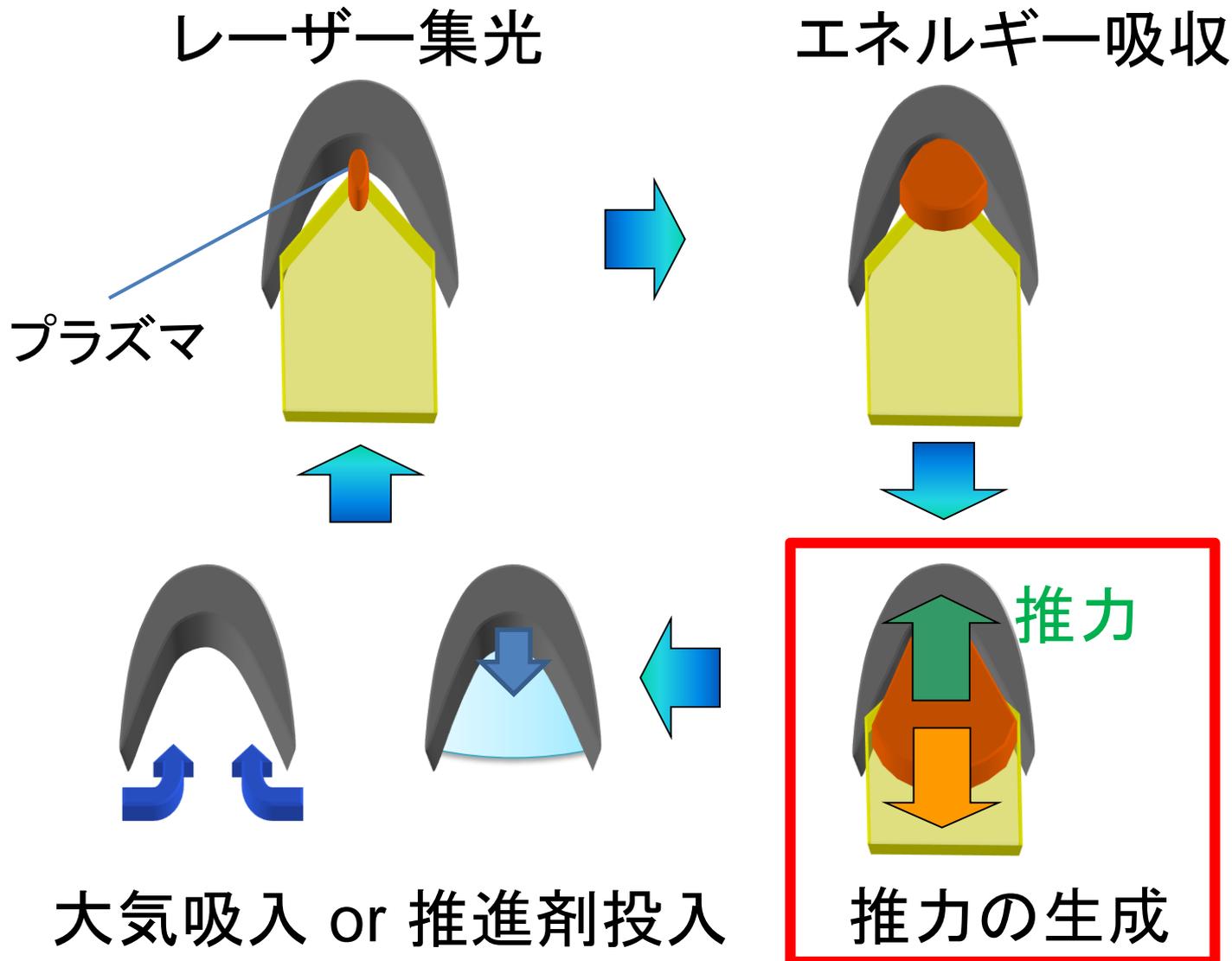
繰り返し利用可

コストを償還

宇宙輸送コスト
の大幅な低減

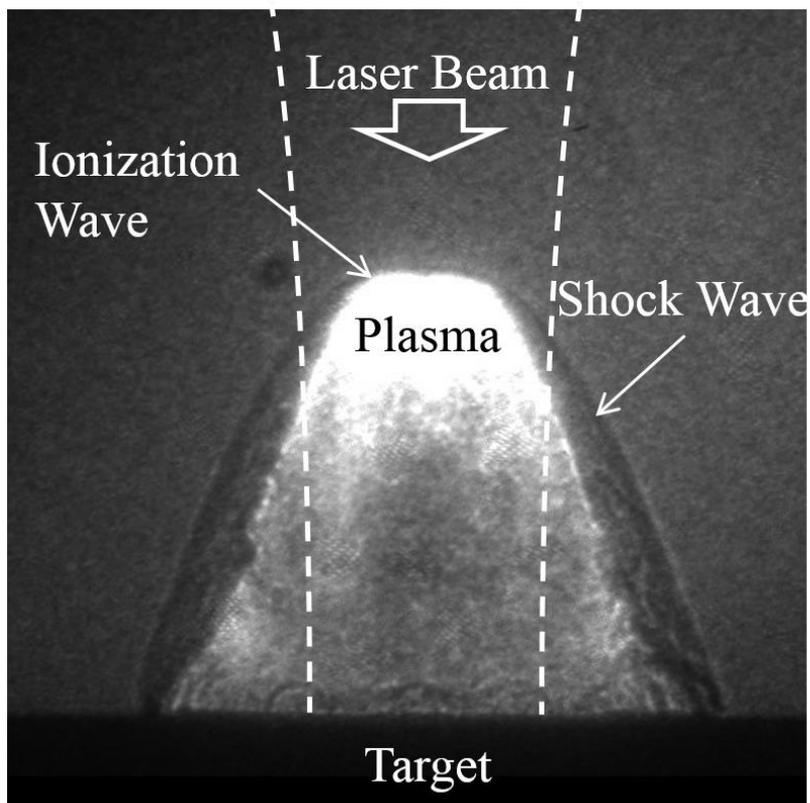


推力生成サイクル





レーザー放電の進展



- ▶ プラズマが電離を繰り返し進展
 - 超音速の進展 ⇒ 衝撃波
 - 定積加熱
 - 圧力上昇(エネルギー変換)



進展速度が推進器の性能を決定する



レーザー放電の進展モデル

◆ 先行研究

[2] K. Shimamura, *et al.*, *IEEE Tras. Plasma Science*, vol. 43, **10**, 2014.

– 光電離モデル

$$U = \frac{\nu_i l}{\ln(n_{e,l}/n_{e,0})}$$

ν_i : 電離周波数

$n_{e,l}$: 波面前方の電子数密度

l : レーザー吸収長

$n_{e,0}$: バルクの電子数密度



(a) Photon Emission



(b) Photoionization



(c) Avalanche Ionization

– 電子拡散モデル(マイクロ波放電)

[3] V. Shibkov *et al.*, *Technical Physics*, vol. 50, **4**, 2005.

$$U = 2\sqrt{D_a \nu_i}$$

ν_i : 電離周波数

D_a : 双極性拡散の拡散係数



(a) Electron Diffusion



(b) Avalanche Ionization



現状の課題・研究目的

◆ メカニズムの解明

数値計算(1次元, 希ガス中)の
妥当性の検証に向けて



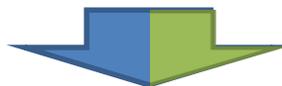
◆ ロケットモードの推進剤

レーザー推進のロケットモードでの
推進剤の検討



現状の課題

大気以外におけるレーザー放電1次元進展の
進展速度を観測した結果は報告されていない



研究目的

気体種を変えて, 進展速度への影響を明らかにする



モデルとの比較



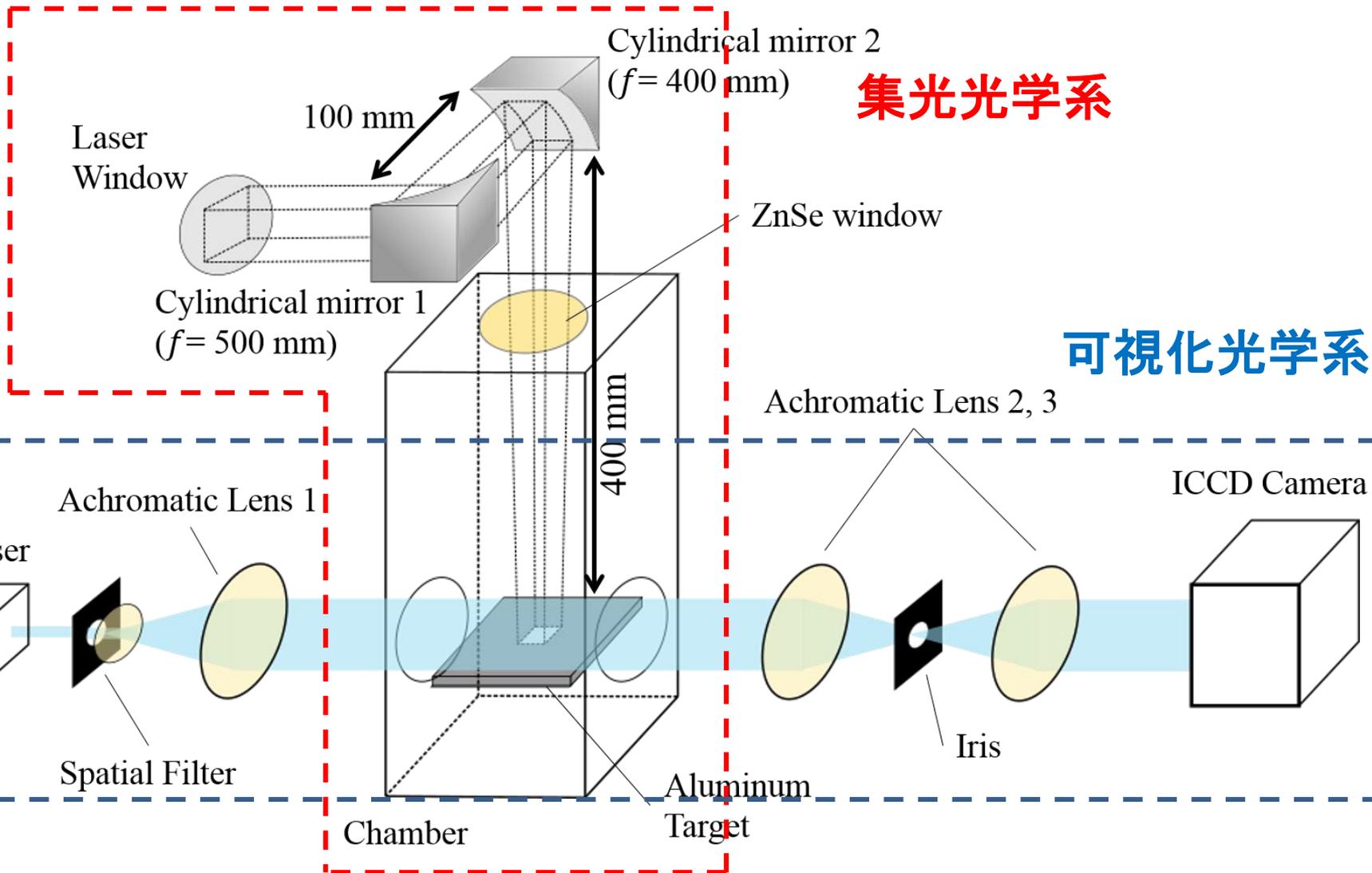
圧力上昇量・インパルス係数を推定



実験装置

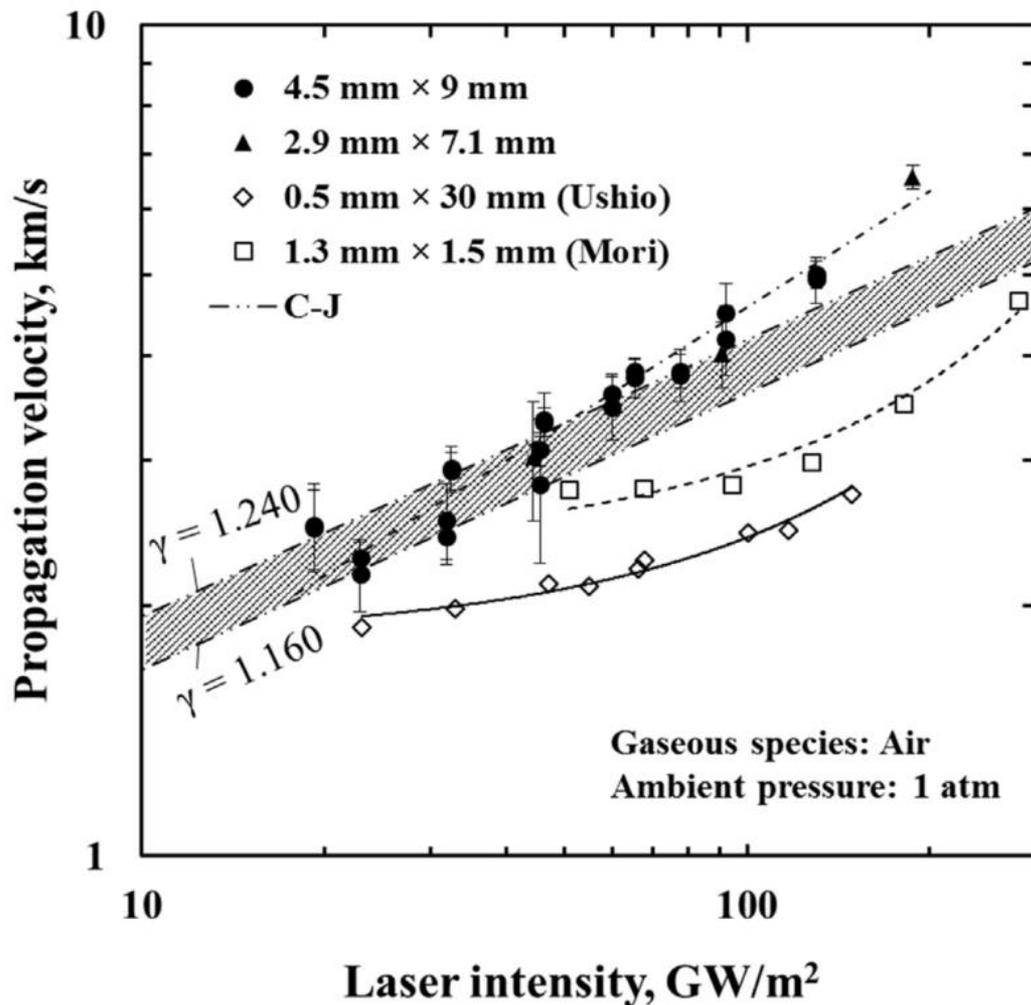


実験光学系





先行研究: レーザー径の影響



- ◆ $D < 5.1$ mm
→ レーザー径によって速度が変化
- ◆ $D \geq 5.1$ mm
→ レーザー径の影響なし



レーザー径を広げることで
1次元進展を達成できる



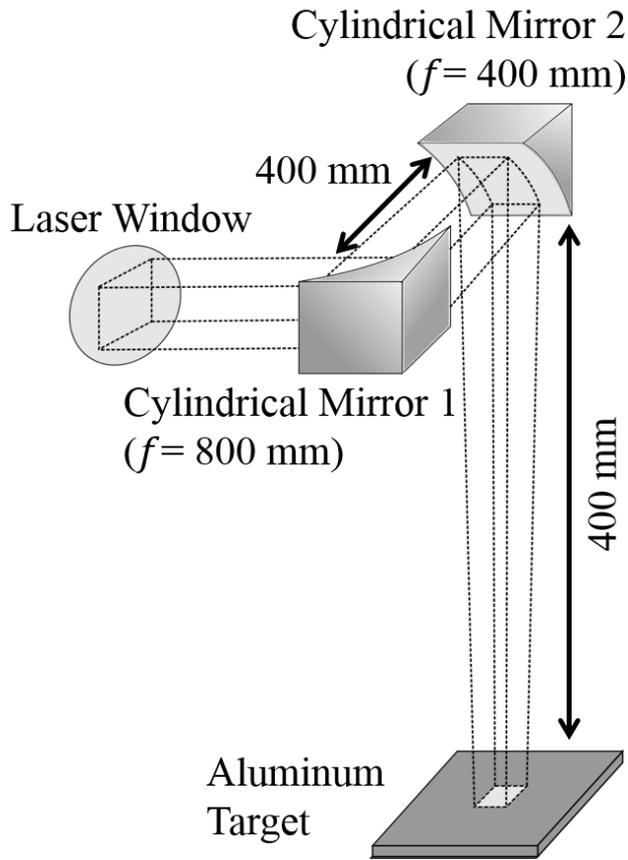
$D \geq 5.1$ mmを採用

[1] K. Matsui, et al., *Vacuum*, vol. 136, 2017.

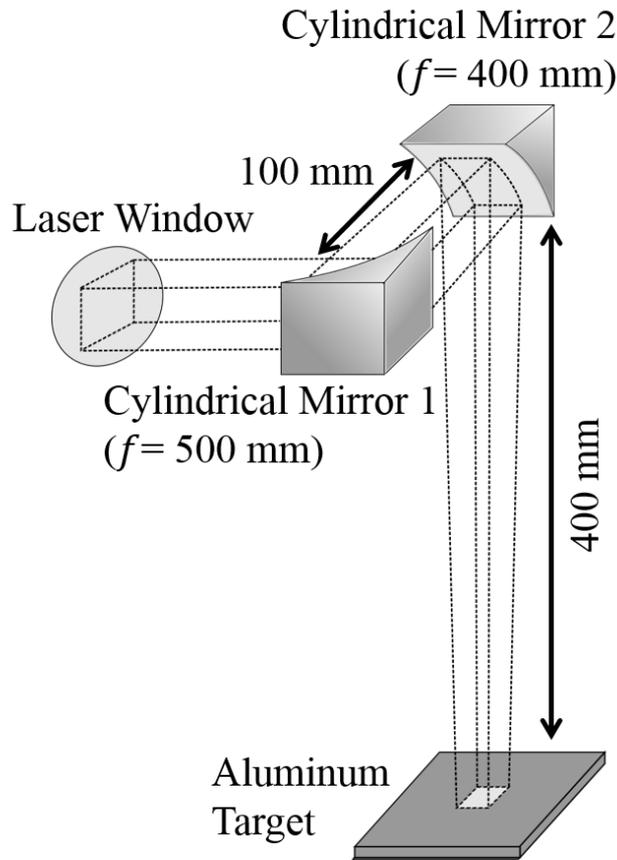


集光光学系

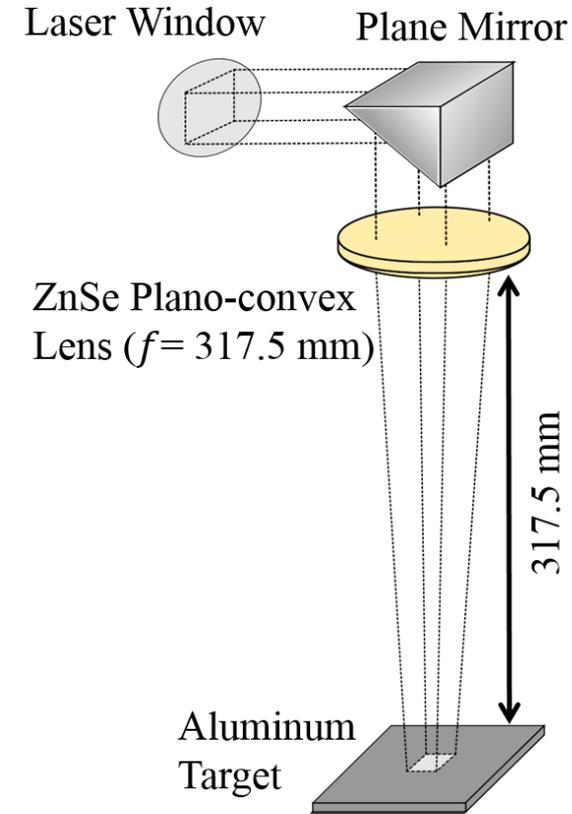
◆十分に大きなレーザー径を達成できる光学系



(a) $D = 9.1$ mm



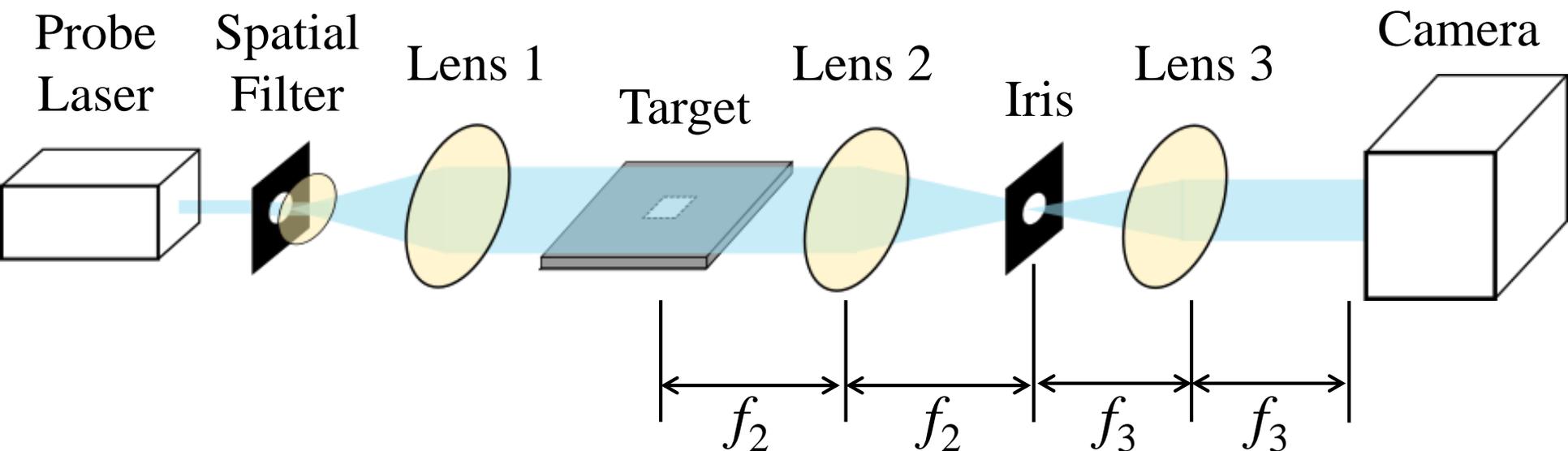
(b) $D = 7.2$ mm



(c) $D = 5.1$ mm



可視化光学系 – シャドウグラフ法 –



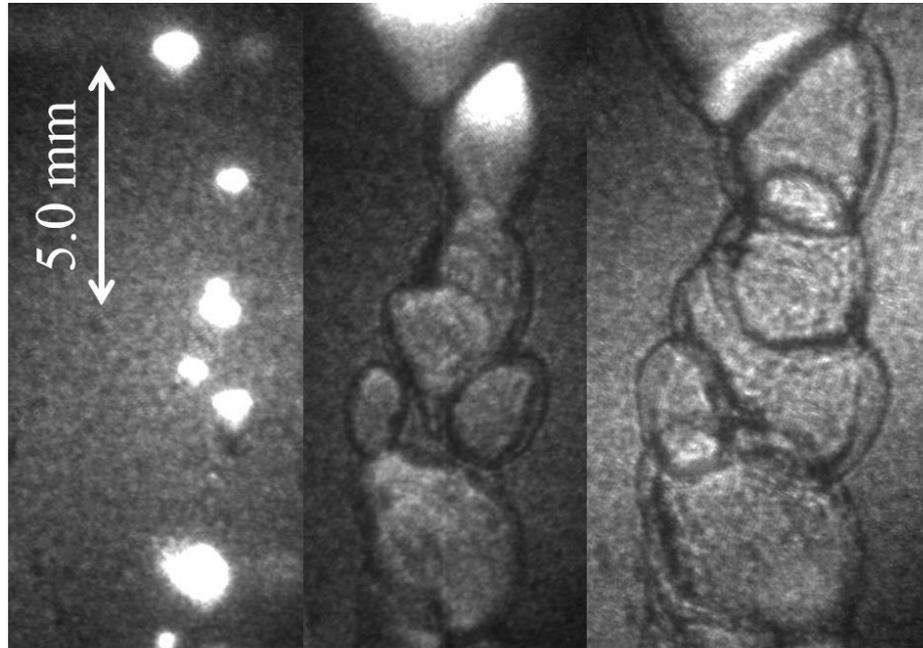
- ◆ アイリスによってプラズマの自発光をカット
- ◆ Target 後方は全て焦点距離に合わせて設置

倍率	2/3	5/6
焦点距離 f_2	300 mm	300 mm
焦点距離 f_3	200 mm	250 mm



Multiple Breakdown

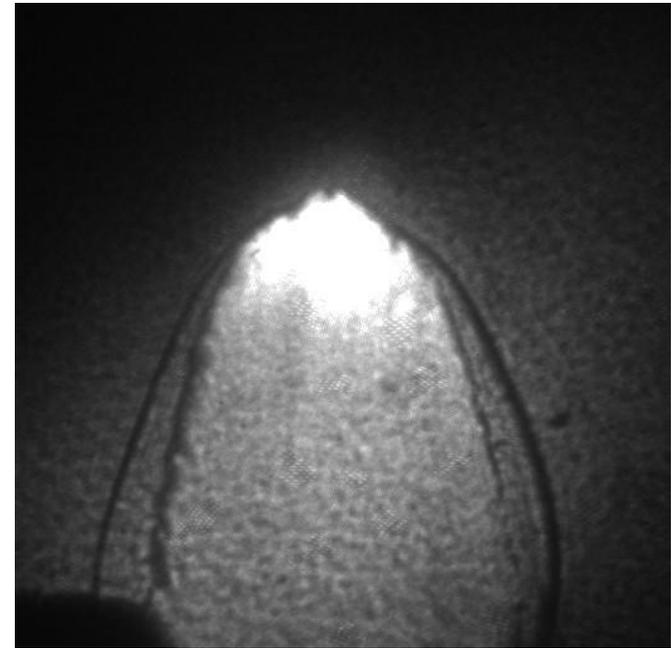
◆アルゴン気中での放電実験 ($D = 5.1$ mm)



$t = 100$ ns

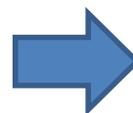
600 ns

1100 ns



$t = 2950$ ns

伝播を観測できない



よりターゲットから離れた
位置で伝播を観測した



実験条件

集光光学系詳細

光学素子	焦点距離 f	等価直径 D
円筒軸外し放物面鏡 × 2	800 mm, 400 mm	9.1 mm
円筒軸外し放物面鏡 × 2	500 mm, 400 mm	7.2 mm
平凸レンズ	317.5 mm	5.1 mm

高速度ICCDカメラ設定

設定項目	設定値
フレームレート	$10 \sim 25 \times 10^6$
ゲイン	30 ~ 70
露光時間	10 ~ 30 ns

＜雰囲気ガス種＞
窒素, 酸素,
アルゴン, ヘリウム



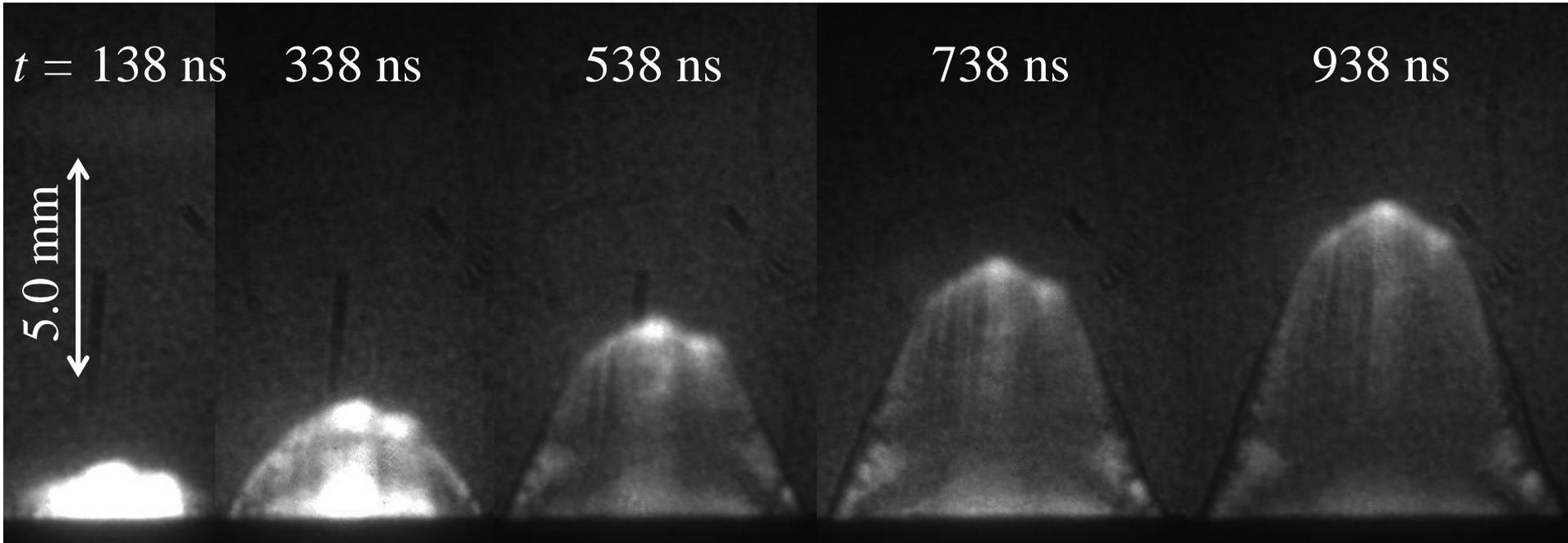
レーザー放電の観測

- ◆ 実験結果
- ◆ モデルとの比較



典型的な進展の様子

◆ 酸素気中, $D = 5.1$ mmでの進展

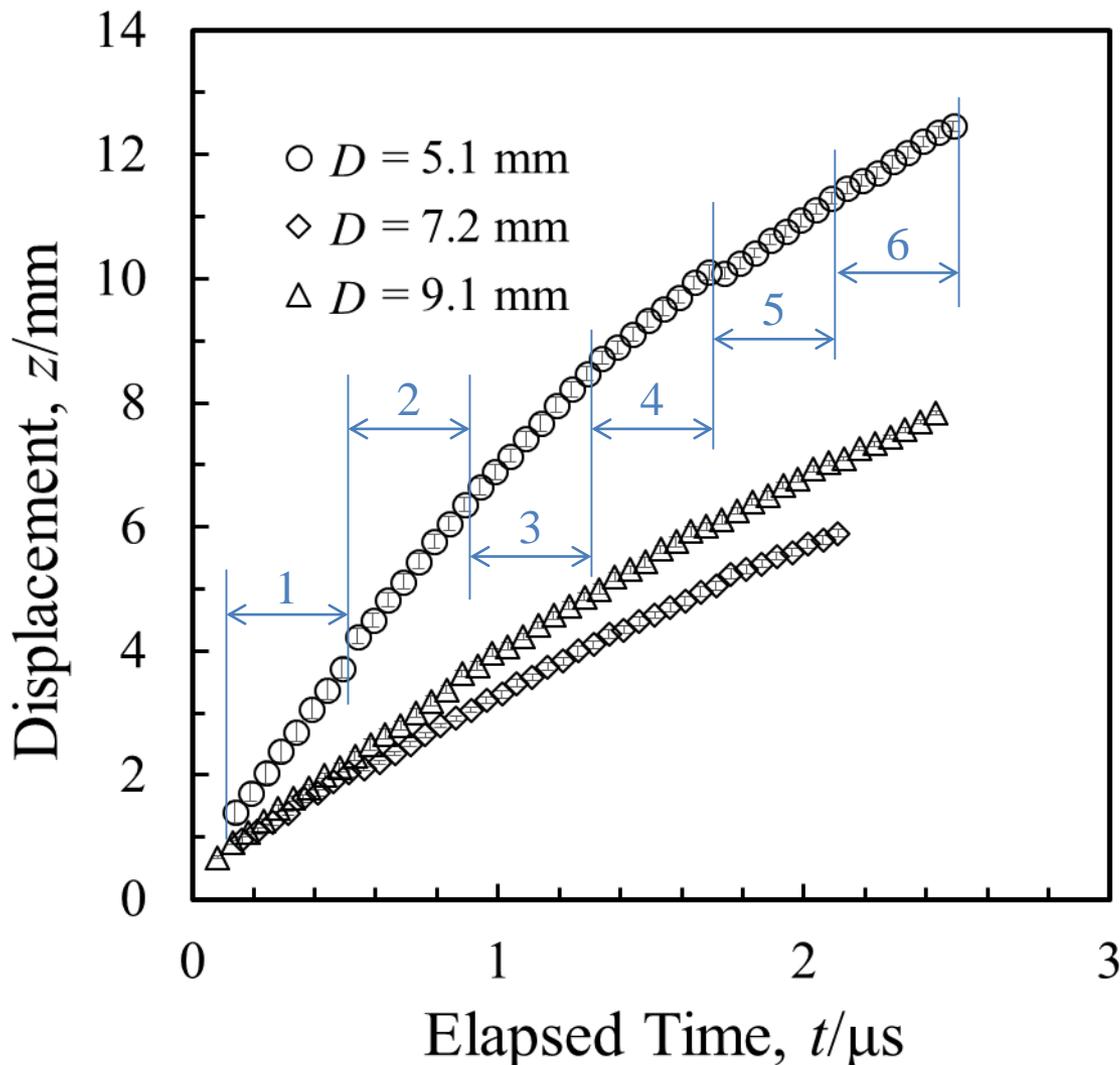


項目	設定値
露光時間	50 ns
ゲイン	30



典型的な変位履歴

◆ 窒素気中の進展



ICCDカメラで8フレーム連写

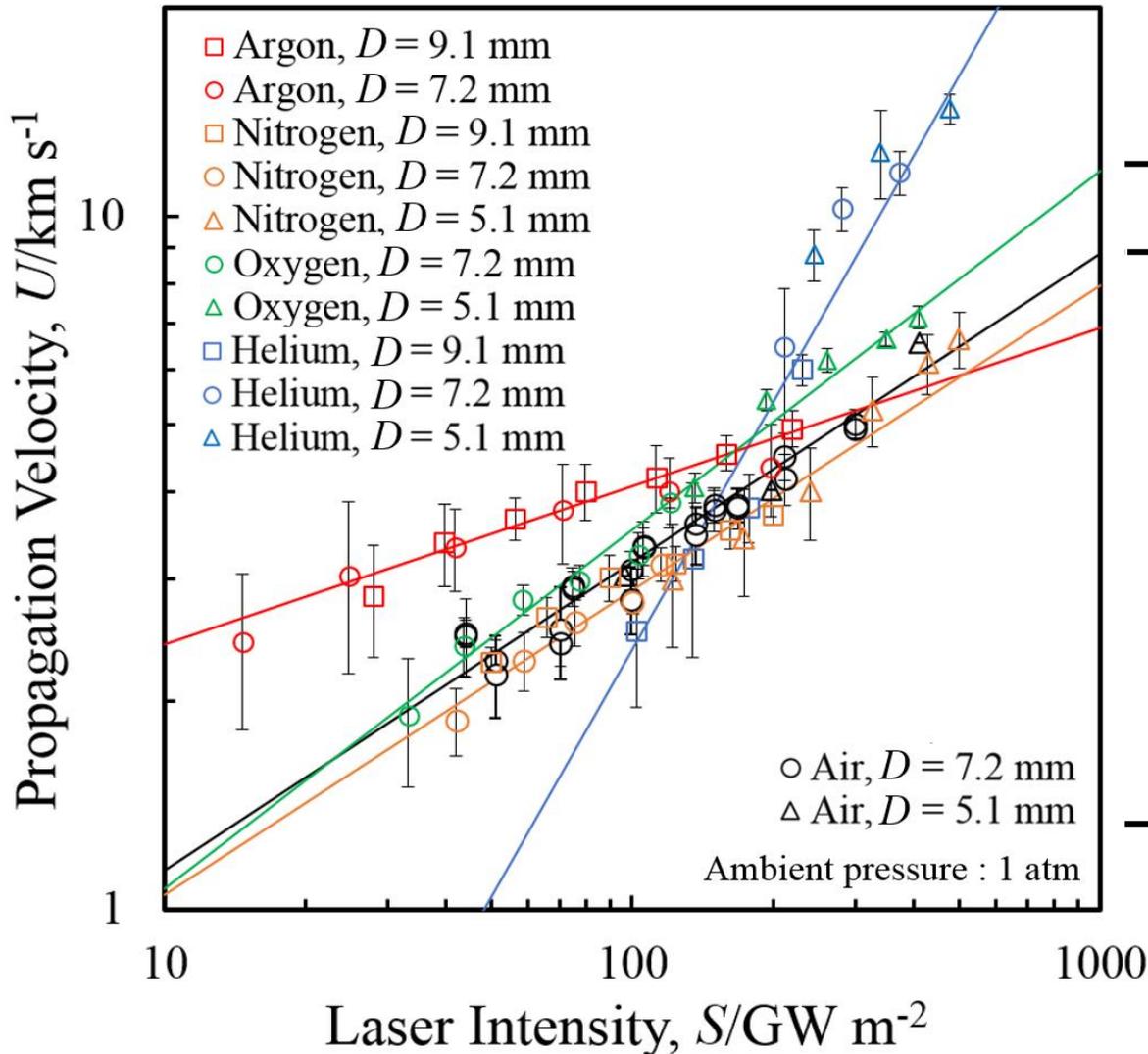


計測区間ごとに...

- 5回ずつ撮影
- 1次スプライン近似
- 微分 → 進展速度を算出



進展速度とレーザー強度の関係



$U = aS^b$ によるフィッティング

ガス種	傾き(次数) b
ヘリウム	1.18
アルゴン	0.23
窒素	0.44
酸素	0.52
大気 [1]	0.46
Chapman-Jougue (CJ)	1/3

いずれの場合も誤差は±5%程度



先行研究のモデルと次数 b の比較

◆ 波面前方への電子の供給原理

– ストリーマ放電モデル

– 電子拡散モデル

$$U = \frac{v_i l}{\ln(n_{e,l}/n_{e,0})}$$

$$U = 2\sqrt{D_a v_i}$$

◆ 電離周波数

$$v_i = \frac{\alpha_{IB} S}{\varepsilon_i}$$

: 電離周波数 v_i はレーザー強度 S の1次関数
→ 気体種によらず $b = 0.5$ or 1.0 ✗



D_a や l の変化を含め, 種々の影響の結果として b が変化する



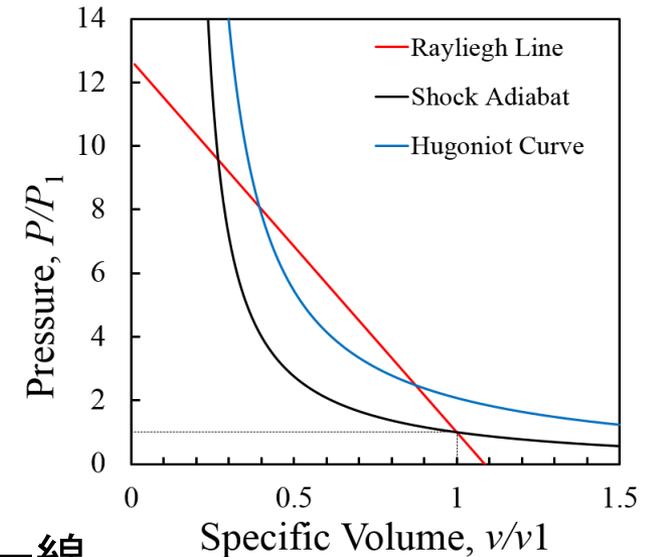
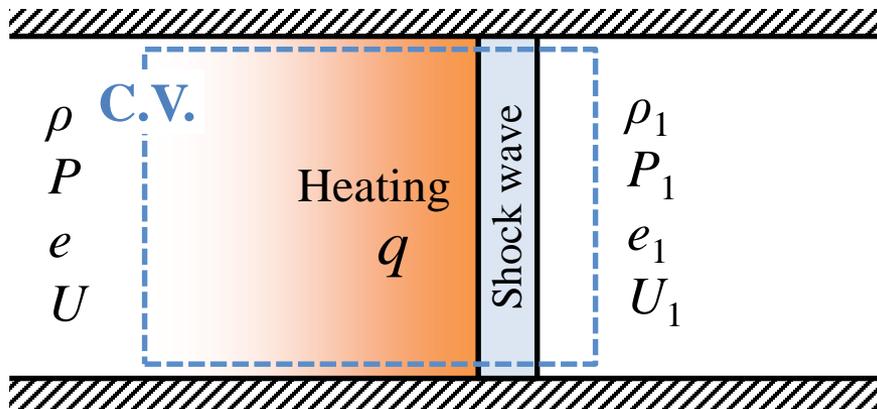
反応種を考慮して n_e, T_e の検討が必要



ユゴニオ解析



一般的なユゴニオ解析



◆ 質量保存

$$\rho U = \rho_1 U_1$$

◆ 運動量保存

$$\rho U^2 + P = \rho_1 U_1^2 + P_1$$

◆ エネルギー保存

$$a^2 \left(\frac{1}{\gamma - 1} + \frac{M^2}{2} \right) = a_1^2 \left(\frac{1}{\gamma_1 - 1} + \frac{M_1^2}{2} \right) + q$$

◆ レイリー線

$$\frac{P}{P_1} = (1 + \gamma M_1^2) - \gamma M_1^2 \frac{v}{v_1}$$

◆ ユゴニオ曲線

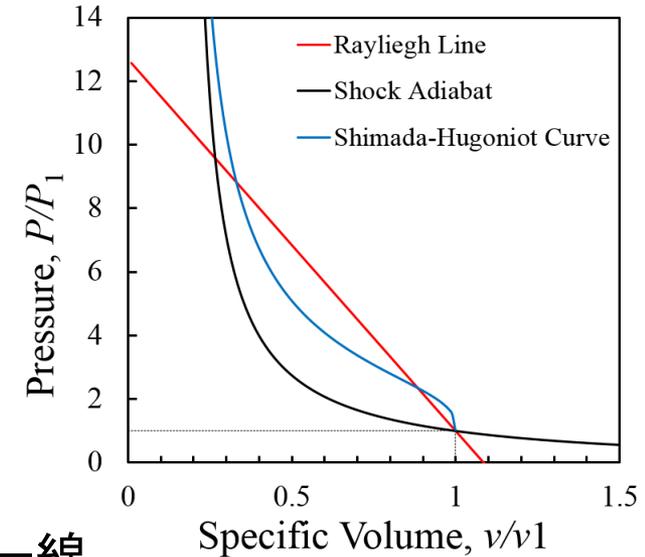
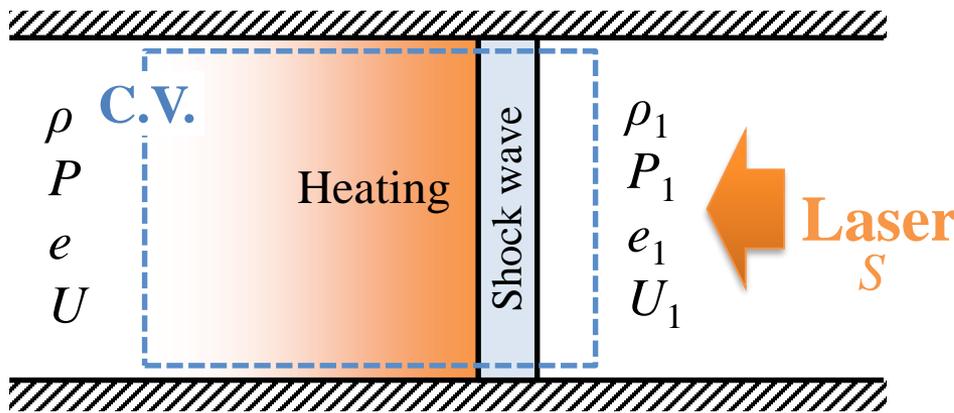
$$\frac{P}{P_1} = \frac{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} - \frac{v}{v_1} + \frac{2q}{P_1 v_1}}{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \frac{v}{v_1} - 1}$$

p - v 線図の交点から波面後方の状態を推定できる



レーザー放電におけるユゴニオ解析

[3] Y. Shimada *et al.*, *AIP Conf. Proc.*, 2010, vol. 1230, pp. 366-376



◆ 質量保存

$$\rho U = \rho_1 U_1$$

◆ 運動量保存

$$\rho U^2 + P = \rho_1 U_1^2 + P_1$$

◆ エネルギー保存

$$a^2 \left(\frac{1}{\gamma - 1} + \frac{M^2}{2} \right) = a_1^2 \left(\frac{1}{\gamma_1 - 1} + \frac{M_1^2}{2} \right) + \frac{S}{\rho_1 U_1}$$

◆ レイリー線

$$\frac{P}{P_1} = (1 + \gamma M_1^2) - \gamma M_1^2 \frac{v}{v_1}$$

◆ ユゴニオ曲線

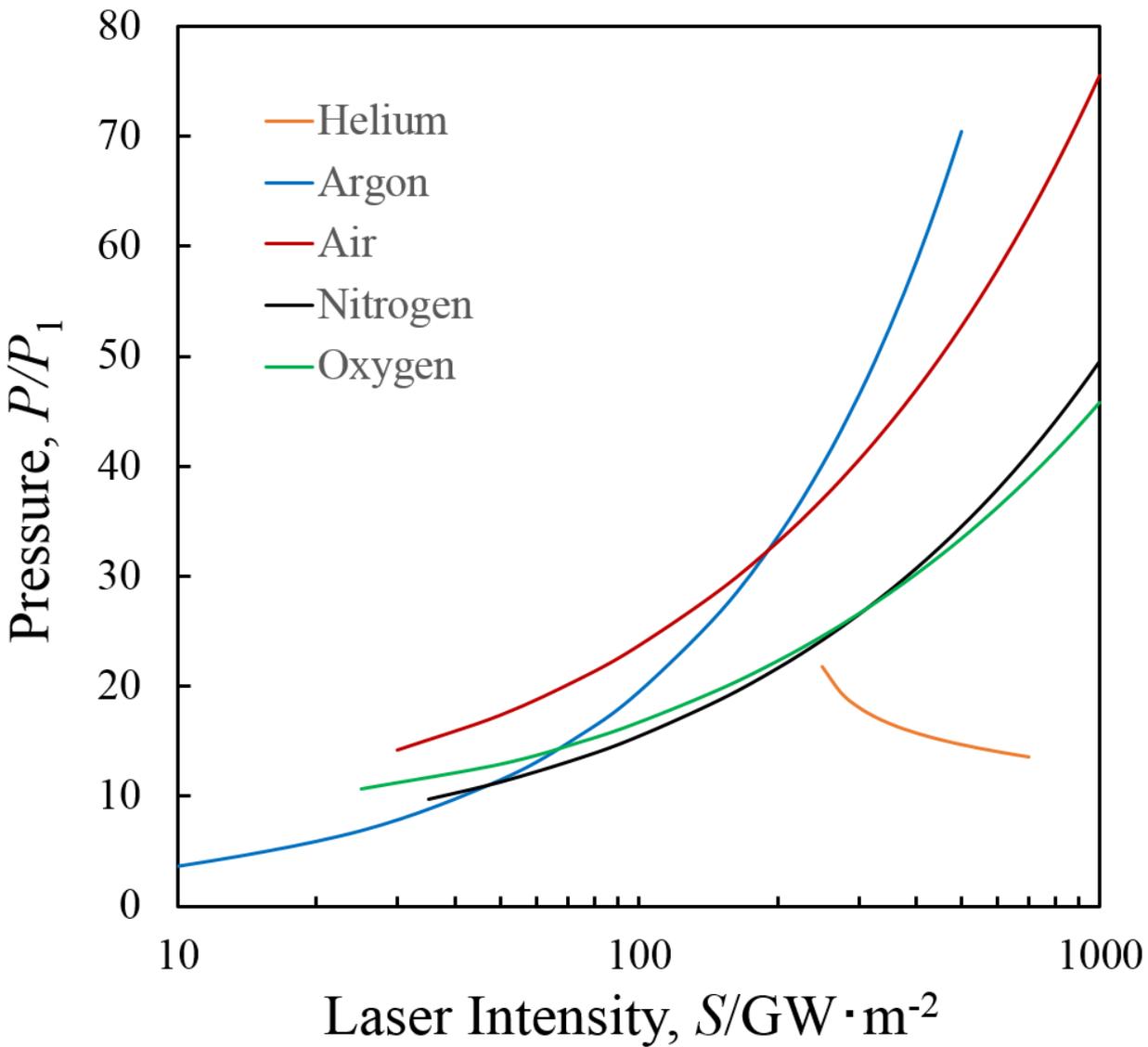
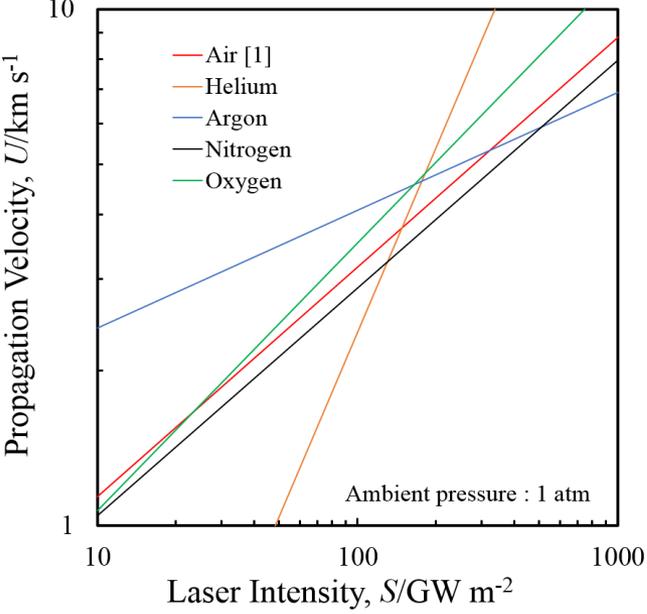
$$\frac{P}{P_1} = 1 + \frac{x^2}{P_1}$$

進展速度とレーザー強度の関係に依存



レーザー強度に対する圧力上昇の関係

◆ Pressure P/P_1



レーザー強度 $S/\text{GW m}^{-2}$	ガス種
$5 < S < 30$	アルゴン
$30 < S < 190$	大気
$190 < S < 500$	アルゴン
$500 < S < 1000$	大気



結言



Ar, He, N₂, O₂気中においてレーザー放電の 1次元進展を観測した

- ◆ レーザー放電進展速度のレーザー強度依存性 $v = aS^b$

	Argon	Helium	Nitrogen	Oxygen
<i>a</i>	1.43 ± 0.0968	0.0102 ± 0.00715	0.380 ± 0.0507	0.325 ± 0.0361
<i>b</i>	0.228 ± 0.0144	1.18 ± 0.122	0.440 ± 0.0268	0.518 ± 0.0214

- ◆ 進展速度を数値計算によって模擬する際に、電子数密度、電子温度、反応種の検討が必要
- ◆ $S = 5 \sim 30$, $200 \sim 500 \text{ GW/m}^2$ においてはアルゴンが、 $S = 30 \sim 200$, $500 \sim \text{GW/m}^2$ においては大気が、圧力最大



ご清聴ありがとうございました