

高圧水素噴流火炎における衝撃波構造の保炎への影響

緒言

社会的背景

- クリーンなエネルギーとして水素が注目
- 石油、石炭、天然ガスなどの一次エネルギーから副生ガスとして製造可能
- 水素は単位体積当たりのエネルギーが他の炭化水素系燃料と比べて小さいため高圧での貯蔵が必要

技術的背景

- 高圧ガス噴出時にノズル近傍に衝撃波が発生
- ノズル口径や形状、よどみ圧力によって保炎条件が変化

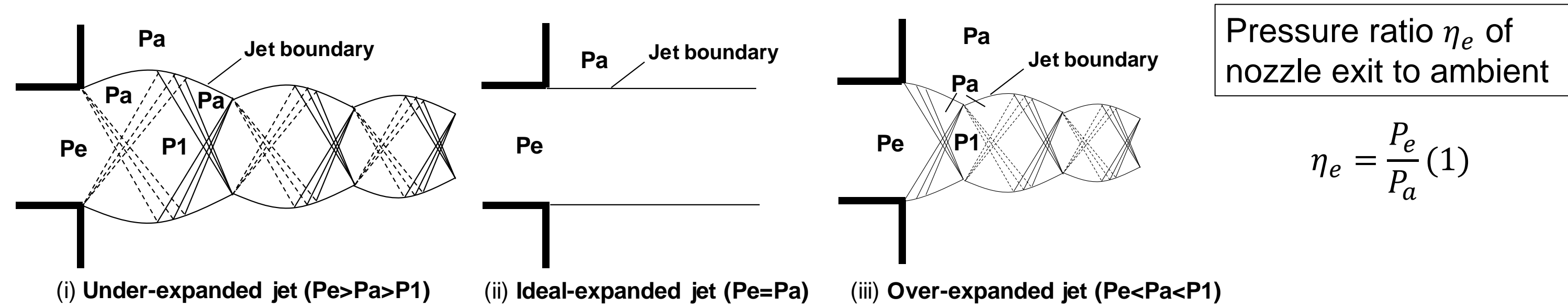


Fig.1 Schematic of shock structures near the nozzle exit [1]

- P_e : static pressure at the nozzle exit
- P_a : static pressure at the ambient
- P_1 : static pressure among various waves

- (i) Very highly under-expanded jet [2] : $3 - 4 < \eta_e$
- Highly under-expanded jet [2] : $2 < \eta_e < 4$
- Moderately under-expanded jet [2] : $1.1 < \eta_e < 3$
- (ii) Ideal-expanded jet : $0.9 < \eta_e < 1.1$
- (iii) Over-expanded jet : $\eta_e < 0.9$

技術発展、安全性の観点から保炎・吹き消え条件の調査が必要

実験・数値計算の両方のアプローチから解明

Table1 Physical property of H_2 , CH_4 , and C_3H_8

Physical property	Unit	H_2	CH_4	C_3H_8
Density	kg / m ³	0.0899	0.6784	1.8954
Calorific value per a unit of mass	MJ / kg	143.8	58.9	53.8
Calorific value per a unit of volume	MJ / m ³	12.8	40.0	101.9
Min. ignition energy	mJ	0.02	0.28	0.25
Combustion velocity	m / s	2.65	0.4	0.43
Flammability limit	vol %	4 ~ 75	5 ~ 15	2.1 ~ 9.5
Application	-	A fuel cell	A utility gas	A taxi

研究課題

実施事項 進行中 予定

実験

- 最小ノズル径を変化させて断面積比を合わせた場合の水素火炎の調査
- PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた定量的な速度場の計測

数値解析

- それぞれのノズルにおける非燃焼流れ場（濃度分布、速度分布）の違いを調査
- 燃焼モデルをカップリングさせて、浮き上がり火炎距離や流れ場の調査
- ノズル断面積比と流量を一定とした場合に、噴射圧力を変化させて衝撃波構造が保炎・吹き消えに与える純粋な影響の調査

数値計算モデル

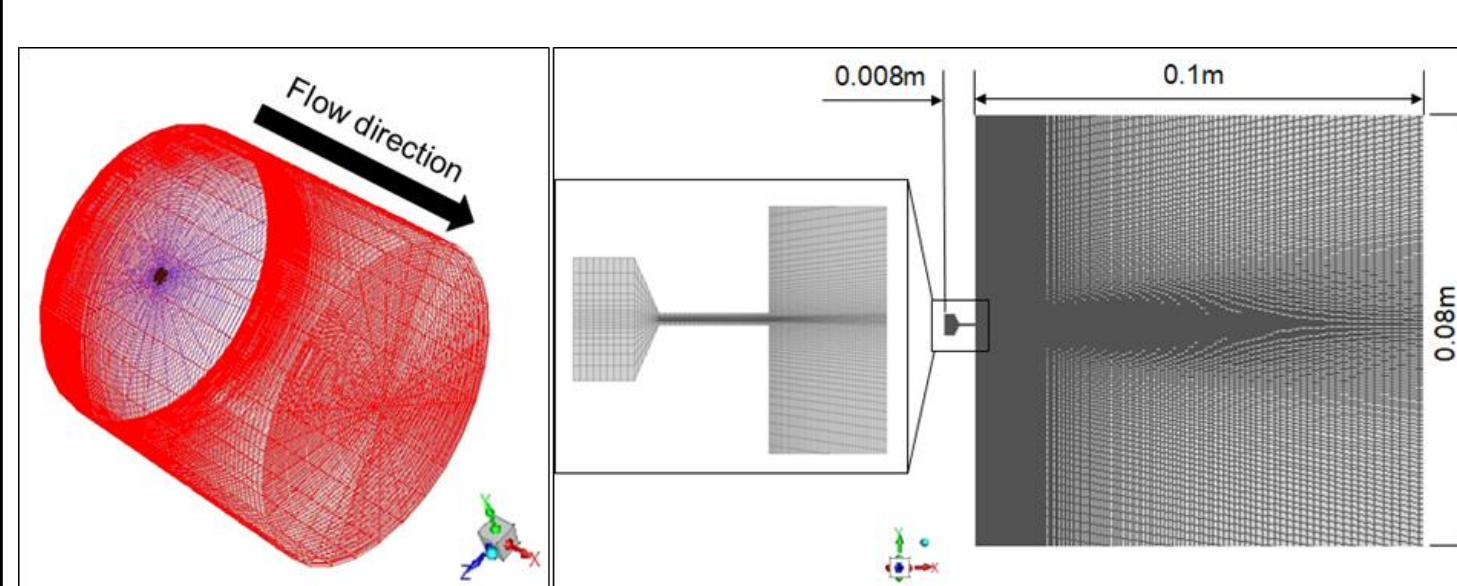


Fig.6 Computational three-dimension hexahedron grid

- 支配方程式
フィルターを施した圧縮性Navier-Stokes方程式
- 乱流モデル
LES
Dynamic Smagorinsky-Lilly
- 乱流 SGS モデル

フィルター化手法
フィルター化した変数 $\bar{\phi}$ フィルター関数 G (ANSYS fluent)

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (5)$$

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V & x \acute{e}v \\ 0 & \acute{x} \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$
 D : 流体領域 V : Volume of cell

Table4 Numerical conditions for the simulations

Nozzle diameter [mm]	Cross area ratio	Total pressure [MPa]	Total temperature [K]	Control volume	Min. cell size [μ m]
d0.50	1.00			761,580	25
d0.50-1.00	4.00	8.0	300	425,124	50
d0.50-1.30	6.76	(= 1.0 g/s)		343,260	65
d0.50-1.65	10.89			284,520	82

実験装置

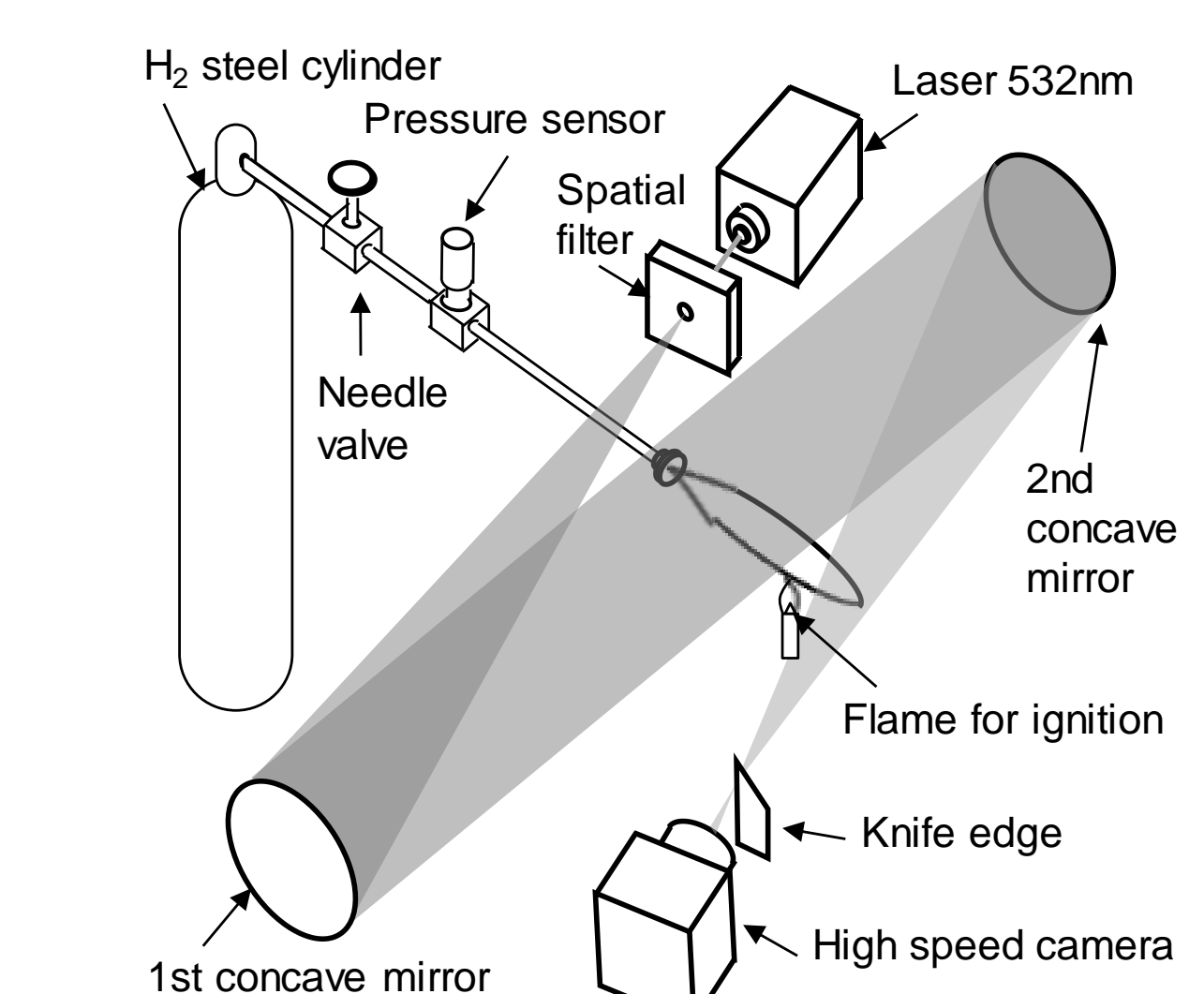


Fig.2 Schematic of experimental set up with Schlieren method

Table2 Specifications of experimental apparatus

Apparatus	Specifications
Laser (KATOKOKEN CO. LTD)	Light source LD pumped/YVO4 solid-state
	Output energy [mW] 50
	Wave length [nm] 532
High-speed camera (PHOTRON)	Flame rate [fps] 2,000
	Shutter speed [s] 1/80,000
Concave mirror x2	Focal length [mm] 1,500
	Radius [mm] 150

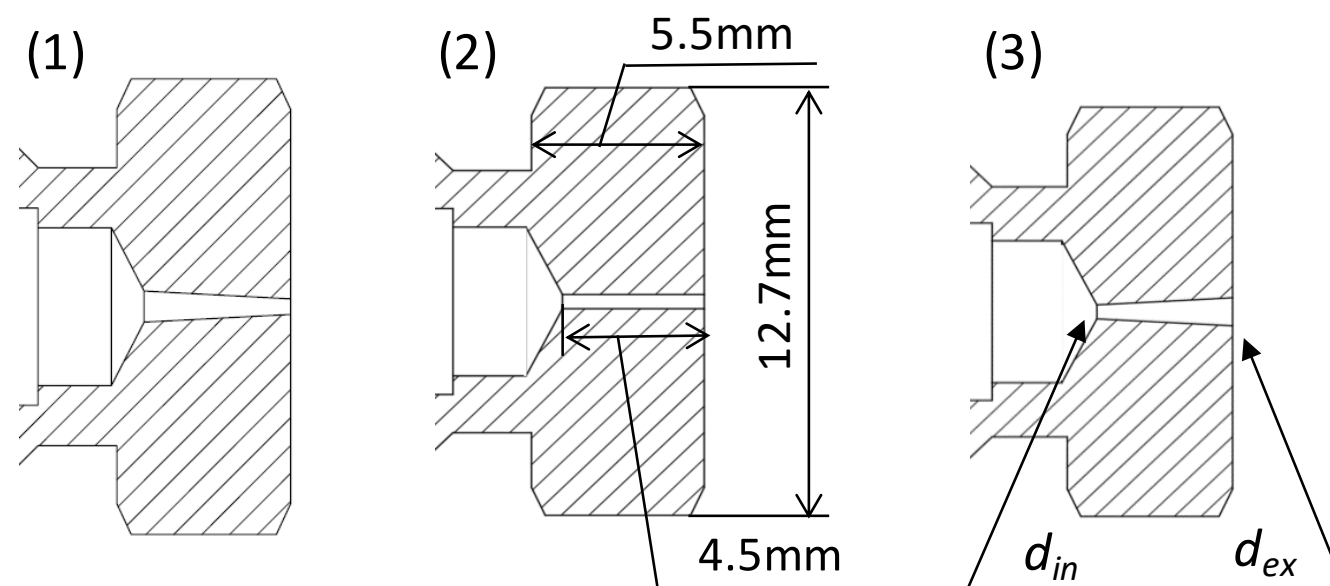


Fig.3 Schematic of cross-area of nozzles

ノズル内を等エントロピー変化を仮定した場合の関係式

$$\frac{A}{A^*} = \frac{A_{ex}}{A_{in}} = \frac{1}{M_e} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} M_e^2 + 2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2)$$

$$\frac{P_0}{P_e} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_e^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

γ : Specific heat ratio
 P_0 : Total pressure

Table3 Nozzle conditions for the experiment

No.	Channel shape	Nozzle diameter [mm]		Cross-area ratio A_{ex}/A_{in}	Mach number M_e	Pressure ratio η_e (2-14 MPa)
		Inlet, d_{in}	Outlet, d_{ex}			
1	Convergent	1.00	0.50	0.25	1.0	10.3 - 68.4
2	Straight	0.50	0.50	1.00	1.0	10.3 - 68.4
3	Divergent		0.65	1.69	2.0	2.47 - 15.9
4			0.80	2.56	2.5	1.19 - 7.71
5			1.00	4.00	3.0	0.586 - 3.79
6			1.30	6.76	3.5	0.255 - 1.71
7			1.60	10.24	3.9	0.136 - 0.921
8		1.65	10.89	4.0	0.124 - 0.841	

実験結果

噴射圧力 $P_0 = 8 \text{ MPa}$

Ex) $d_{in}0.50-d_{ex}1.00 = d0.50-1.00$

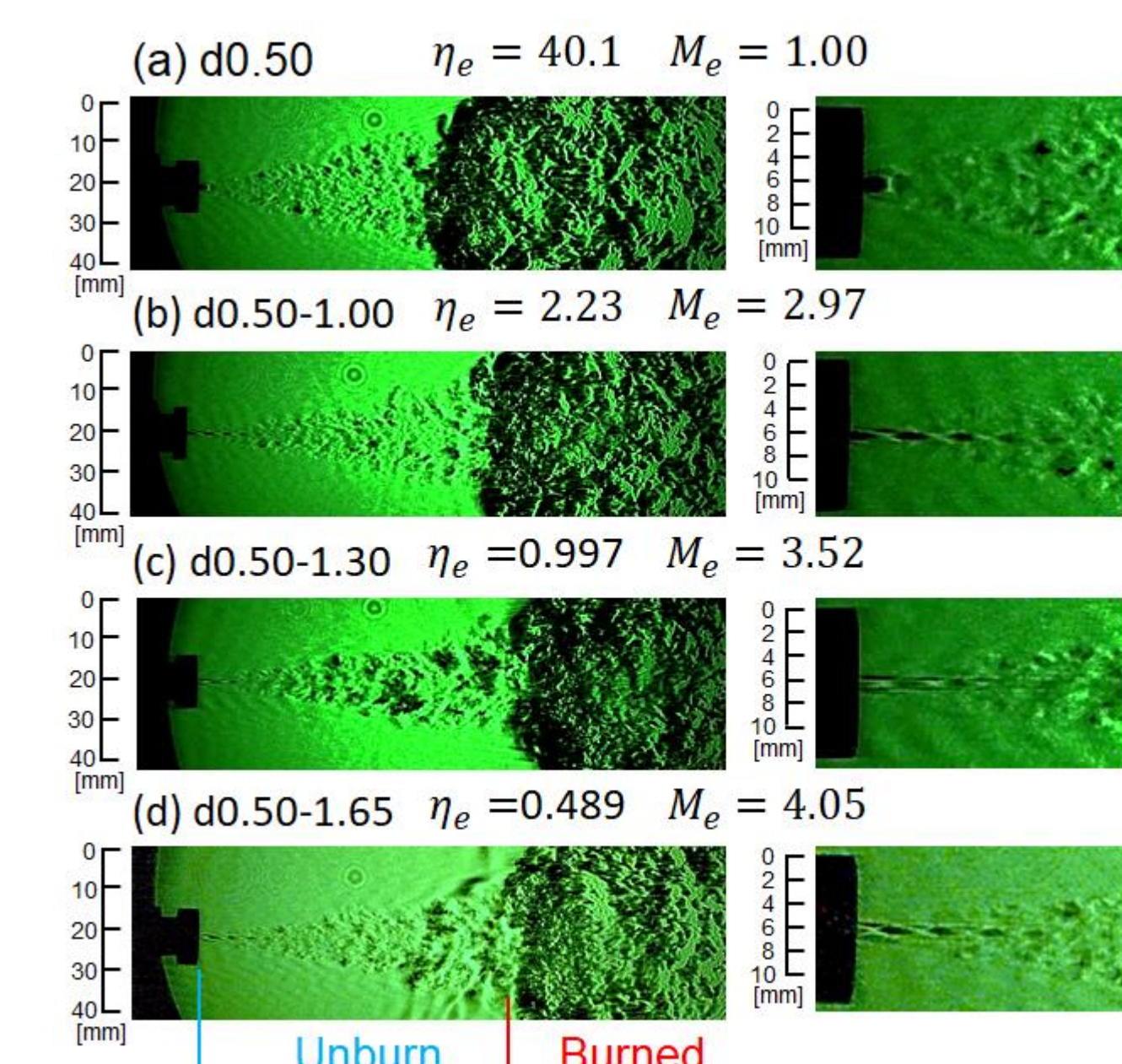


Fig.4 Schlieren photographs with varied nozzle types

- (a) Very highly under-expanded jet
Mach-diskとbarrel-shockが存在する
Single shock cell 構造
- (b) Highly under-expanded jet
膨張波がノズル出口から発生している
Sequential shock cells 構造
- (c) Ideal-expanded jet
膨張波及び圧縮波が存在しない
- (d) Over-expanded jet
圧縮波がノズル出口から発生している
Sequential shock cells 構造

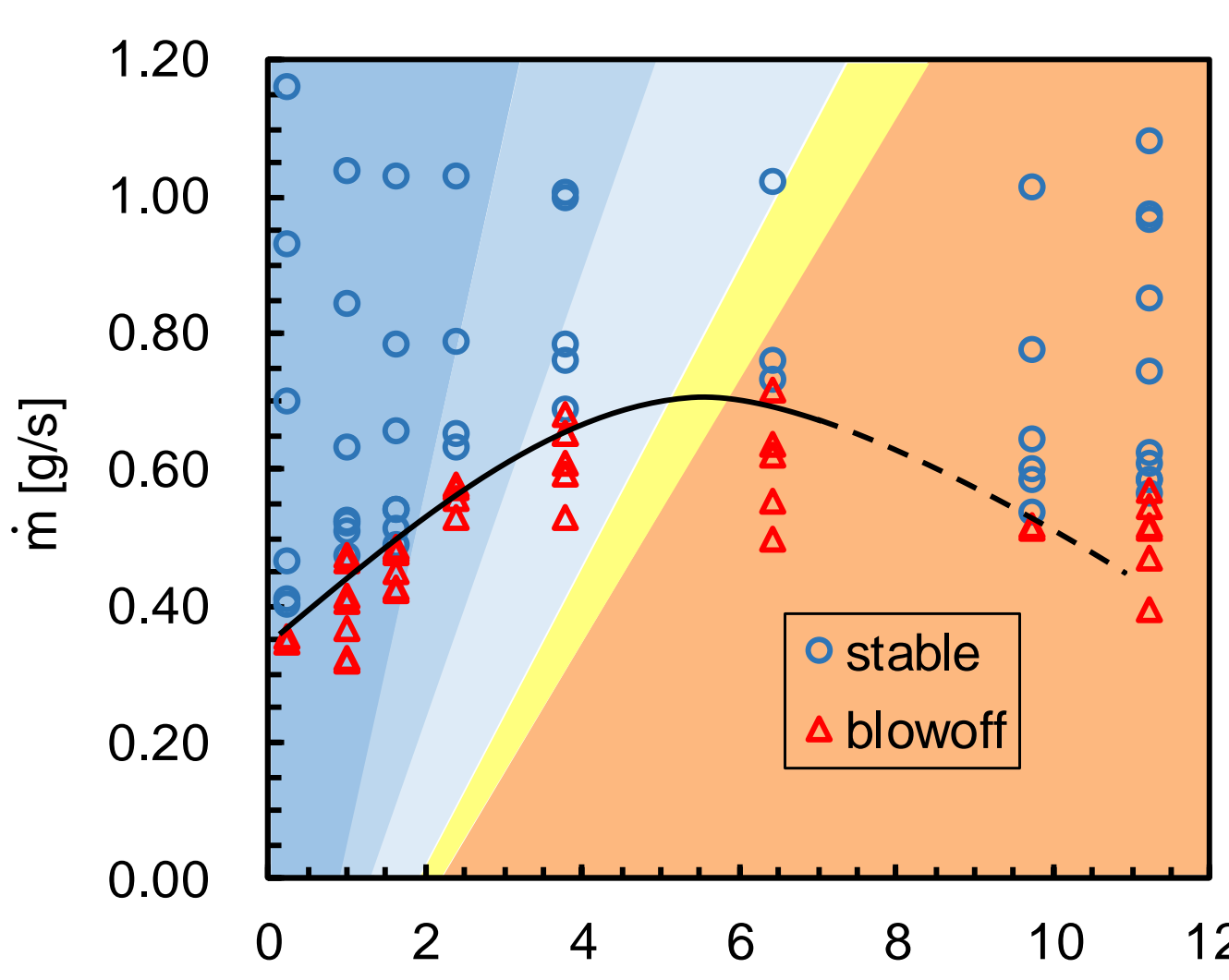


Fig.5 Conditions of flame stabilization and blow-off

- Very highly under-expanded jet $3 - 4 < \eta_e$
- Highly under-expanded jet $2 < \eta_e < 4$
- Moderately under-expanded jet $1.1 < \eta_e < 3$
- Ideal-expanded jet $0.9 < \eta_e < 1.1$
- Over-expanded jet $\eta_e < 0.9$

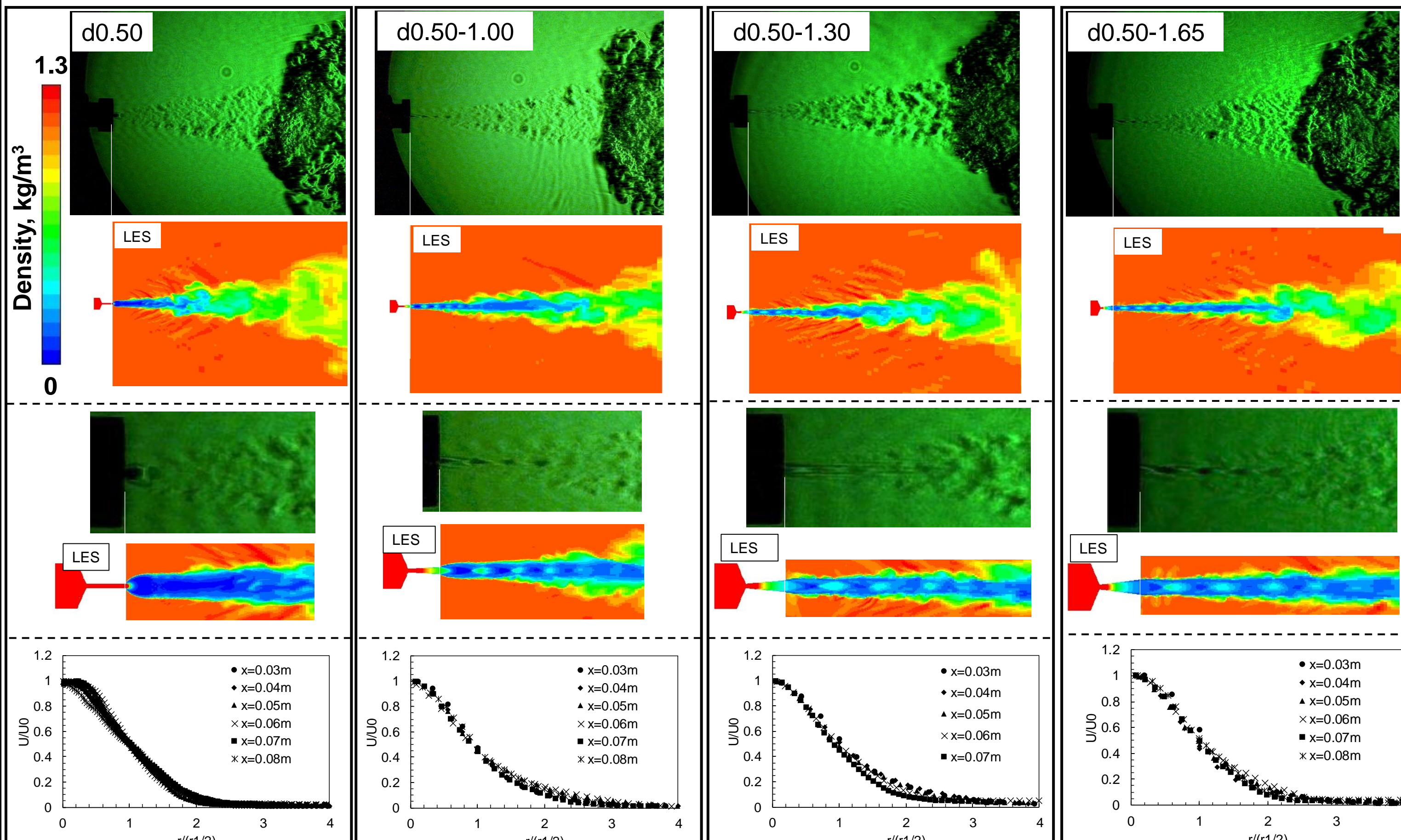
ノズル内を等エントロピー変化と仮定

$$\dot{m} = \frac{A^* P_0}{\sqrt{RT_0}} \left\{ \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2}} \right\} \quad (4)$$

γ : Specific heat ratio
 A^* : Minimum cross-area
 R : Gas constant
 T_0 : Total temperature

数値計算結果

実験結果の比較・再現性



速度 U , 中心軸速度 U_0 , 半径方向距離 r , 半幅 $r_{1/2}$ の定義 $U(x,0,0) = U_0(x)$ $U(x,r_{1/2},0) = \frac{1}{2} U_0$ $U(x,r,0) = U(x,r)$

Fig.7 Comparison of Schlieren photos from experiment to simulated cross-section snapshots of density contour

濃度分布

Z : Mixture fraction [3] ($Z=1$ for pure fuel, $Z=0$ for pure oxidizer)

Jet width: radial distance defined as $Z = 0.02$ [4]

$$Z = \frac{Z_H + \frac{2(Y_{O2,2} - Z_O)}{v_{O2} W_{O2}}}{\frac{Z_{H,1}}{n W_H} + \frac{2 Y_{O2,2}}{v_{O2} W_{O2}}} \quad (7)$$

Z_H : Element mass fraction of H
 $Z_{H,1}$: Element mass fraction for H in the fuel
 Z_O : Element mass fraction of O
 $Y_{O2,2}$: Mass fraction of O_2 in the oxidizer
 W_H : Element molecular weight of H
 W_{O2} : Molecular weight of O_2
 n : Number of H atom in the fuel
 v_{O2} : Stoichiometric coefficient of oxygen

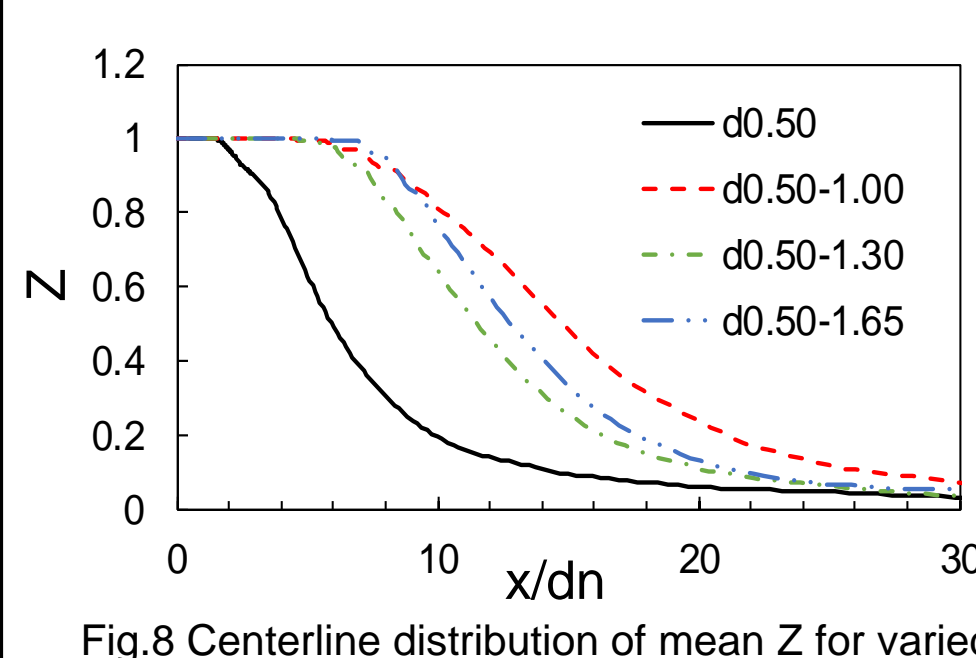


Fig.8 Centerline distribution of mean Z for varied nozzle types

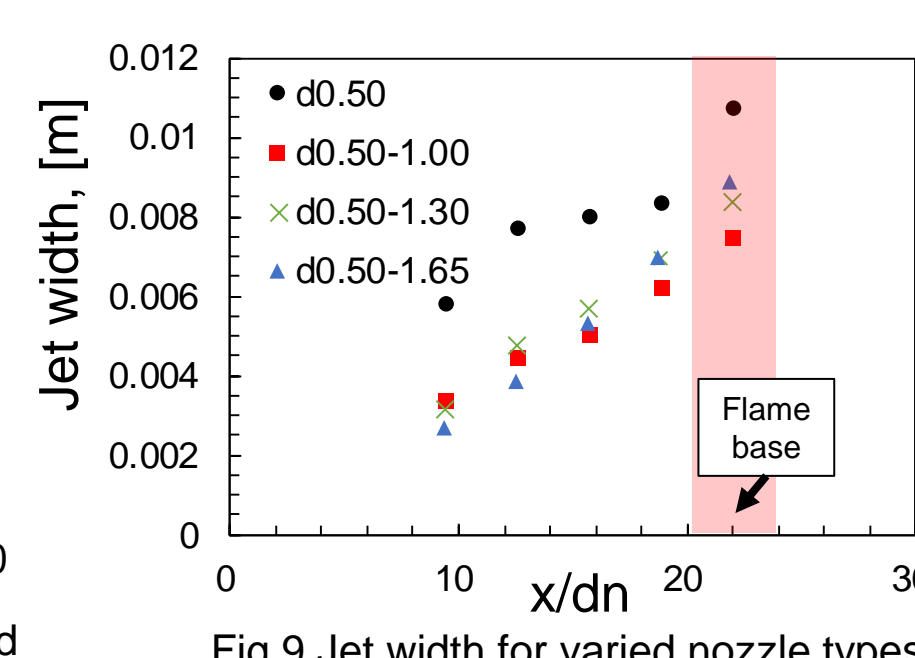


Fig.9 Jet width for varied nozzle types

- Fig.8より、
d0.50ストレートノズルの燃料濃度低下は上流側で起こる
- d0.50-1.00拡大ノズルは後流側においても燃料濃度を保つ
- Fig.9より
d0.50の噴流幅は大きく、d0.50-1.00では小さい
- d0.50-1.65の噴流幅は再び大きくなっている
- 衝撃波構造によって噴流幅の大きさが変化して、保炎に必要な限界質量流量が小さい条件において噴流幅は広がっている

速度分布

Re_0 : Local Reynolds number [5]

$$Re_0 = \frac{r_{1/2} \cdot U_0}{\nu} \quad (8)$$

$r_{1/2}$: Half-width
 U_0 : Centerline velocity magnitude
 ν : kinematic viscosity

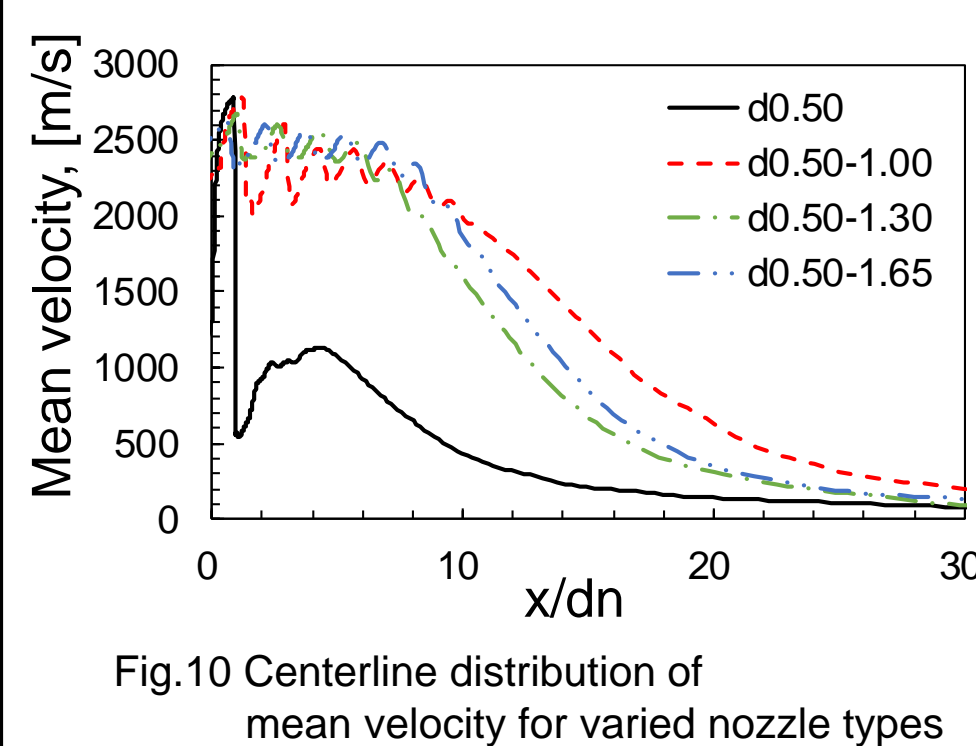


Fig.10 Centerline distribution of mean velocity for varied nozzle types

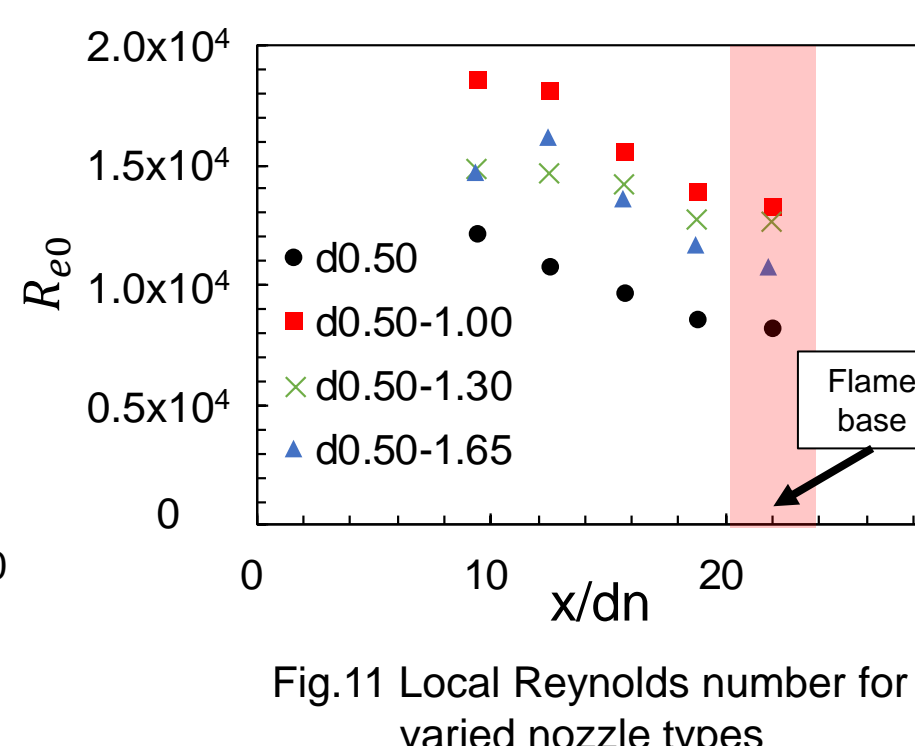


Fig.11 Local Reynolds number for varied nozzle types

- Fig.10より、
d0.50ではMach diskによるSingle shock cellによって速度の急激な低下
- 拡大ノズルではSequential shock cellsによって速度の増減が確認
- Fig.11より、
d0.50では Re_0 は小さく、d0.50-1.00では大きい
- d0.50-1.65の Re_0 は再び大きくなっている
- 衝撃波構造によって Re_0 の大きさが変化して、保炎に必要な限界質量流量が小さい条件においては Re_0 は大きい

まとめ

- ノズル流路形状を変化させることでノズル近傍の衝撃波構造を変化させた
- 衝撃波構造によって保炎・吹き消え境界に変化があることが確認された
- 現象の理解のために数値計算を行った結果、衝撃波構造の変化によって噴流幅と局所レイノルズ数が増減することが分かった
- 噴流幅が大きく、局所レイノルズ数が小さいと保炎に必要な限界質量流量が小さくなるということが分かった