

研究背景

[1] E. Rivard, Hydrogen Storage for Mobility : A Review (2019)

水素の特徴

- ・使用時にCO₂を排出しない
- ・多種多様な製造法がある
- 例：メタンからの燃料変換、核熱の利用、工業プロセスの副産物、バイオマスのガス化

次世代のエネルギーとして注目

- ・単位体積当たりのエネルギーが他の炭化水素燃料と比べて小さいため **高圧での貯蔵が必要**
- ・分子量が小さく軽いため容器の亀裂や接合不良から **容易に漏洩**

技術的背景

- 燃焼技術** 水素ガスタービンなどの燃焼器において **保炎** は基本的な現象
- 安全性評価** 水素事故への懸念

- ・水素ステーションのタンクから高圧漏洩し **着火**
- ・燃料電池自動車による事故で **火災が発生** (TPRDの作動)

噴出口径や形状、圧力の違いで着火・保炎条件が変化

技術発展、安全性の観点から **高圧水素噴流火災の着火・保炎に関する研究が必要**

Table1 Physical property of H₂, CH₄ and C₃H₈

Physical property	Unit	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Density	kg/m ³	0.0899	0.6784	1.8954
Calorific value per a unit volume	MJ/m ³	12.8	40	101.9
Min. ignition energy	mJ	0.02	0.28	0.25
Flammability limit	vol%	4~75	5~15	2.1~9.5
Application		a fuel cell	a utility gas	a taxi

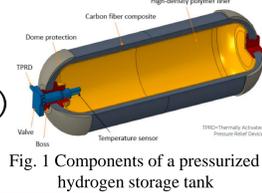


Fig. 1 Components of a pressurized hydrogen storage tank

研究目的

[2] 武野, 日本燃焼学会 52(160), 121-129 (2010)

従来研究

- ・超音速で噴出させた燃料に衝撃波が伴う流れにおける保炎条件の調査

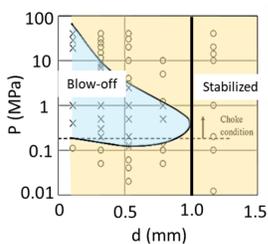


Fig. 2 Limit for stable and blow-off of the flame

- ・ノズル径 $d < 1\text{mm}$ の範囲で保炎する領域と保炎しない領域が存在
- 高圧側で再度保炎する領域が存在するメカニズムは未だに解明できていない
- ・ノズル出口圧と背圧の比によって衝撃波構造が変化

- $p_e > p_b$: 不足膨張
- $p_e = p_b$: 適正膨張
- $p_e < p_b$: 過膨張

衝撃波構造が着火条件に関係

- ・衝撃波構造に着目した保炎の研究事例は少ない

本研究の目的

高圧水素噴流火災の保炎限界の解明
衝撃波構造の変化に伴う着火条件(限界流量)の調査

測定原理

シュリーレン法

光の屈折率が媒質の密度勾配によって変化することを利用して画像の明暗により密度勾配を可視化する方法

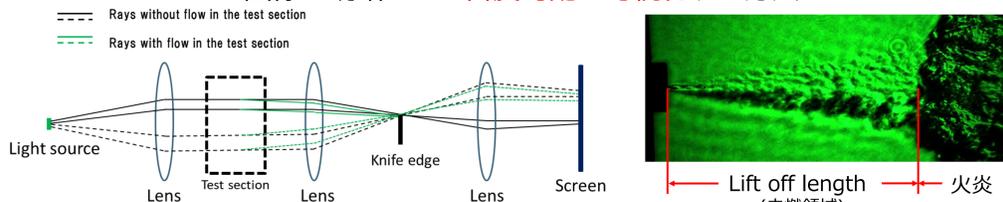


Fig. 3 Basic constitution of schlieren method

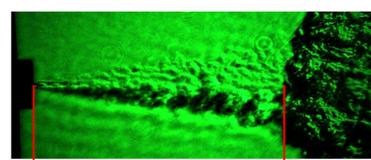


Fig. 4 Schlieren image of lift-off flame

従来の装置では凹面鏡を用いていたが、より鮮明な画像を得るために本実験では凸レンズを用いた

実験内容

実験装置

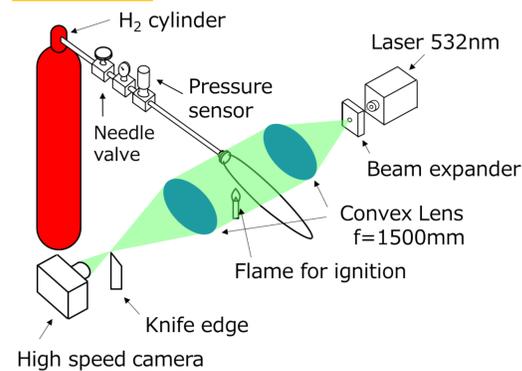


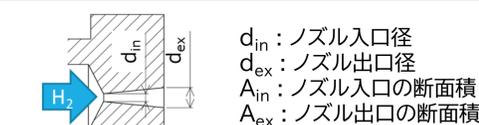
Fig. 5 Experimental apparatus

Table2 Nozzle diameters (mm) and cross-sectional area ratios

d_{in}	d_{ex}	A_{ex}/A_{in}	d_{in}	d_{ex}	A_{ex}/A_{in}	d_{in}	d_{ex}	A_{ex}/A_{in}
0.41	0.58	2.02	0.52	0.66	1.62	0.62	0.86	1.93
0.41	0.90	4.89	0.51	1.16	5.17	0.61	1.36	5.00
0.42	1.18	7.93	0.51	1.44	7.88	0.61	1.72	8.07
0.41	1.29	9.78	0.52	1.63	9.72	0.61	1.92	9.84
0.40	1.46	13.24	0.53	1.81	11.58			

実験方法

- ・断面積比を変えた拡大ノズルを使用
- ・大気圧下において水素を噴射(2MPa~12MPa)
- ・着火源(プロパン火炎)消炎後、水素が保炎するかを観測



衝撃波構造を変化させるため流路が異なるノズルを設計

放電加工または切削により穴あけ

Table3 Specification for the optical system of schlieren method

器具	仕様
レーザー	光源 LD励起/固体レーザー
	出力 50mW
(カトウ光研)	発振波長 532nm
スペシャルフィルター	適応入射光束径 1.0mm
(シグマ光機)	ピンホール径 25μm
高速カメラ	ピンホール 1.75mm
(PHOTRON)	最高撮影速度 8.0×10^6
	フレーム撮影速度 2000fps
凸レンズ	焦点距離 1500mm
	レンズ径 150mm

実験結果

衝撃波構造

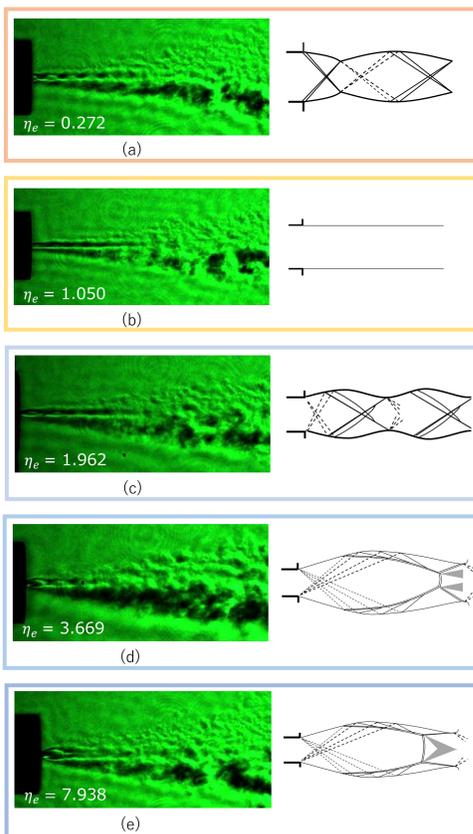


Fig. 7 Schlieren image and cell structure

p_{ex} : 出口圧力 m : 質量流量
 p_{∞} : 背圧 (大気圧) A^* : ノズル流路の最小断面積
 p_0 : よどみ点圧力 T_0 : よどみ点温度
 η_e : 出口圧力と背圧の比 R : 気体定数
 M : マッハ数 κ : 比熱比 (水素は1.406)

ノズル内を等エントロピー流れと仮定

ノズル出口圧力と背圧の比

$$\eta_e = \frac{p_{ex}}{p_{\infty}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{\kappa - 1}} \left(\frac{p_0}{p_{\infty}}\right)$$

- (a) $\eta_e < 0.9$: over-expanded jet
- (b) $0.9 < \eta_e < 1.1$: ideal-expanded jet
- (c) $1.1 < \eta_e < 2$: moderately-under-expanded jet
- (d) $2 < \eta_e < 4$: highly under-expanded jet
- (e) $\eta_e > 4$: very highly under-expanded jet

質量流量はよどみ点圧力に依存

$$m = \frac{A^* p_0}{\sqrt{RT_0}} \left\{ \kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

衝撃波構造と保炎限界

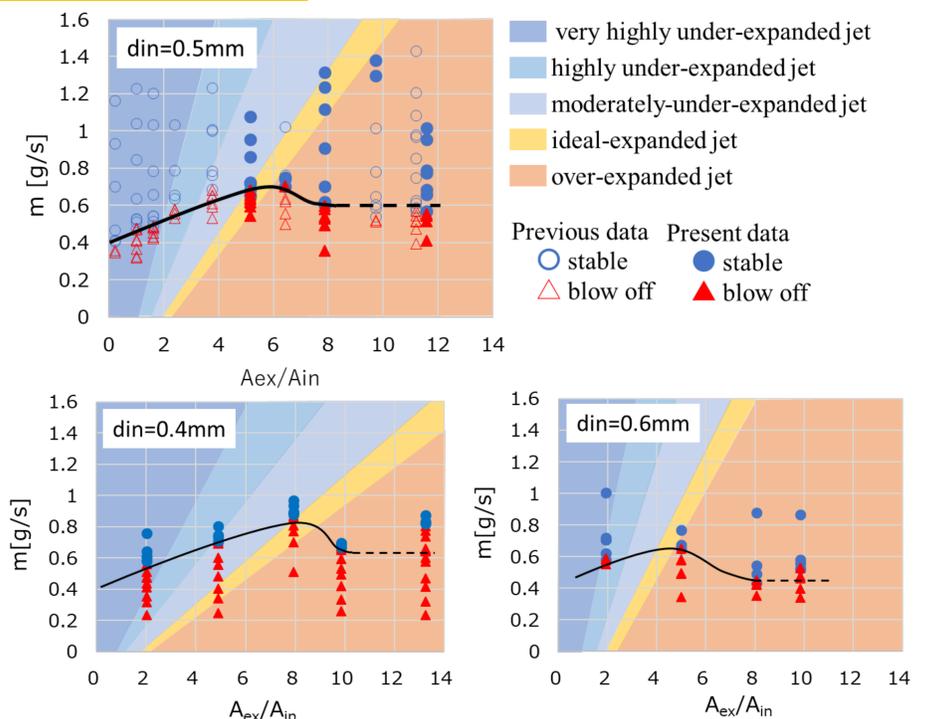


Fig. 8 Relationship between a cross sectional area ratio and a mass flow rate

- 保炎に必要な流量はノズル出口に形成される衝撃波構造と関係がある
- ・不足膨張のとき断面積比の増加に伴いより多くの流量が必要
- ・適正膨張のとき保炎に必要な流量が最大
- ・過膨張のとき保炎に必要な流量は減少

拡散火災の燃焼：化学反応に要する時間 << 燃料と酸化剤の拡散に要する時間

- 不足膨張 出口流速の増加により水素と酸素の混合拡散が抑制
- 適正膨張 出口流速がさらに増加
一様な膨張流のため混合拡散が最も起こりにくい
- 過膨張 ノズル出口に生成される衝撃波構造により混合拡散が促進

浮き上がり火炎距離 (Lf)

画像解析により浮き上がり火炎距離を算出

- ・ストレートノズルと同様、よどみ点圧力に依存しない
- ・出口径が大きいほどLfは長くなる
- ・断面積比が一定以上になるとLfは徐々に短くなる

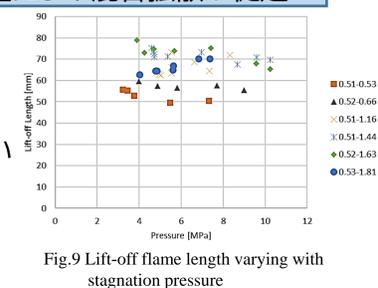


Fig. 9 Lift-off flame length varying with stagnation pressure

今後の課題

- ・Fig. の過膨張領域において正しい流量を計測
- ・各ノズルの流量係数を求め正確な流量を算出 (現在調査中)
- ・適正膨張から過膨張への移行時の限界流量の変化の調査
- ・ノズル($d_{in}=0.5, A_{ex}/A_{in}=7$ 等)を設計し追加実験
- ・着火・保炎条件を解明するため保炎限界付近での火炎の挙動を調査
- ・よどみ点圧力を詳細に変化させることができるバルブを使用
- ・正確な保炎限界流量/浮き上がり火炎距離/マッハディスク径の計測