

# 高速水素噴流拡散火炎の保炎メカニズム

志田 聖悟\* 八代 洋二\*\* 鄭 秉國\*\*\*  
矢野 利明\*\*\*\* 鳥居 修一\*\*\*\*

## FLAME HOLDING MECHANISM OF HYDROGEN JET DIFFUSION FLAMES

Seigo SHIDA, Youji YATSUSHIRO, Byong-koog JUNG,  
Toshiaki YANO and Shuichi TORII

The holding mechanism of hydrogen jet diffusion flames can be well resembled by their liftoff and blowout phenomena. There exists a region prior to the occurrence of flame blowout where the flames depict their unstable morphologies. The flames are found to lift off gradually and blowout suddenly. Combustion emerges again at the nozzle exit follows by the occurrence of blowout phenomenon of the main flames. The re-ignition occurs only when there exists a spherical flamelet remains on the nozzle rim. This phenomenon disappears when there is no longer any presence of flamelet on the nozzle rim. It is found that the mass flow rates of flamelet extinction tends to increase gradually with an increase in the thickness of the nozzle rim and the flamelet on the nozzle rim is related to the re-ignition occurrence. Furthermore, the period of re-ignition phenomenon is longer with an increase of mass flow rates and there is a characteristic of reappearance in the re-ignition phenomenon.

**Keywords :** hydrogen jet, diffusion flames, liftoff, blowout, re-ignition phenomenon

### 1. 緒論

現在、エネルギー消費が急激に増加し、主な燃料である化石燃料の枯渇化が大きな問題となっている。また、化石燃料の利用により発生するCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>などは環境汚染を引き起こす要因となっている。したがって、安定したエネルギー供給や環境に対する負荷の低減を考慮した将来性のある代替燃料を見出すことが必要不可欠である。

水素は原料が水であり、豊富に存在し、電気分解によって容易に得られることから安定したエネルギー源であると言える。また、燃焼生成物は再び水となり、比較的クリーンなエネルギーである。さらに水素燃料を用いた燃焼において、噴出速度が1000 (m/s)を越えると浮き上がるが、燃焼は安定してい

る<sup>(1)</sup>。このことは高負荷燃焼を要する燃焼器内での火炎保持に関して大きな意味を持つ。水素の主な特徴として、燃焼速度が非常に大きいこと、可燃範囲が広いことなどが挙げられ、逆火を引き起こす危険性がある。このことを考慮し、ノズルからの燃料を静止空気中へ噴出し、拡散火炎を形成させることは逆火防止だけでなく、燃焼の際生じるNO<sub>x</sub>を抑制するという利点もある。水素噴流拡散火炎の特徴として、再着火現象が挙げられる。これは火炎が一旦吹き消えた後、新たに火炎が形成され、燃焼を再開する現象である。この現象が見られるときには、ノズルリム上に球状の小さな火炎(火種)が存在しており<sup>(2)~(4)</sup>、火種が吹き消えると再着火も起こらなくなる。本研究では、再着火現象に焦点を置き、シュリーレン法を用いて不輝炎である水素火炎を可視化することによって火炎挙動を解析し、また熱電対による温度測定を行うことで再着火現象の発生する原因や火種形成のメカニズムを明らかにすることを目的としている。

2001年8月31日受理

\*博士前期課程機械工学専攻

\*\*株式会社ケーヒン

\*\*\*博士後期課程システム情報工学専攻

\*\*\*\*機械工学科

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。本実験で使用した燃焼器は薄肉のストレートノズルと貯気室からなり、燃料はボンベから供給され、バルブにより調整を行った。貯気室内ゲージ圧は貯気室底面に設けられた半導体圧力トランスデューサにより計測を行い、計測した圧力をもとに燃料流量を計算した。ノズル上に形成された噴流拡散火炎は高速度ビデオカメラにより撮影し、シュリーレン映像としてビデオテープに記録した。また、ノズル出口近傍の拡大画像を得るためにビデオカメラには望遠レンズを取り付けた。また、本実験における撮影は、シャッタースピードを OPEN、絞りを 2.8、コマ送り速度 250(コマ/s)の条件のもとで行った。撮影されたシュリーレン映像は画像解析を行うためにコンピュータに取り込まれ、その解析のソフトには Win ROOF を用いた。また、表1に本実験で使用したノズルの条件を示す。ノズル内径  $d=0.41$ (mm)、ノズル長さ  $L=80$ (mm)で、ノズルリム厚  $\delta$ を表1のように変化させた。なお、 $\delta=\infty$ はノズルに直径 100(mm)の円板を取り付けたため、他のノズルリム厚に比べ、十分大きいことからこのように表現した。

### 2.2 温度測定

火種の温度測定には、素線径  $\phi=0.3$ (mm)の K 型(クロメル-アルメル)熱電対を用いた。熱電対からの信号は温度測定器を用いて Excel のデータとして得られるようにし、サンプリング時間は 100(ms)に設定した。なお、熱電対のふく射損失に対する補正は行わなかった。

### 2.3 燃料流量の算出

計測した貯気室内ゲージ圧  $P_g$ と大気圧  $P_a$ から貯気室内絶対圧  $P_t$ を求め、さらに大気温度  $T_a$ を用いて次式から燃料流量  $m$ (kg/s)を求めた。なお、本実験において、貯気室からノズル出口までの距離が短いため断熱流れとして取り扱った<sup>(5)</sup>。

$$m = \frac{AP_t}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (1)$$

ここで、 $A$ はノズル断面積( $m^2$ )、 $R$ はガス定数(kJ/kg·K)、 $\gamma$ は比熱比である。

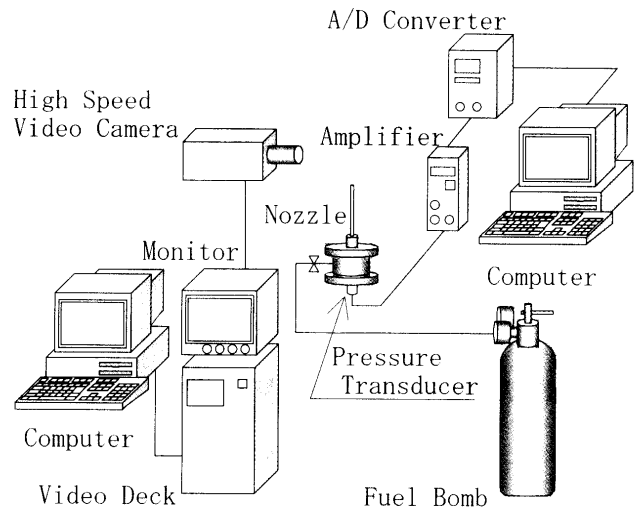


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Table.1 Specification of nozzle

$d$ (mm)	$L$ (mm)	$\delta$ (mm)
0.41	80	0.15
		0.45
		1.10
		2.30
		$\infty$

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ノズルリム厚変化による再着火現象

図2に  $\delta=0.15$ (mm)、 $m=1.83 \times 10^{-5}$ (kg/s)における再着火の連続画像を示す。図2から火炎は徐々に浮き上がり、60(ms)後に吹き消え間近になり、約84(ms)後に新たに火炎が形成され、再着火の様子がわかる。

図3には、各ノズルリム厚による再着火開始時、終了時、火種吹き消え時の燃料流量の変化を示す。ここで、図3中のAは完全に乱流に遷移した火炎が定常燃焼している領域、Bは再着火が頻繁に生じる領域、Cは再着火が起らずノズル上に火種のみ存在している領域、Dは火種が吹き消え、主火炎も存在しない領域である。図3から、再着火開始時と再着火終了時の燃料流量はノズルリム厚によらずほぼ一定であることがわかる。しかし、火種吹き消え時の燃料流量は徐々に増加する傾向にあり、 $\delta=1.1$ (mm)を境にその変化の割合も変わっている。これは、リム厚が小さいとき、誘引空気がリムの影響を受けず、火種と接する時間が短いため十分な空気が供給されず、すぐ吹き消えてしまうと考えられる。

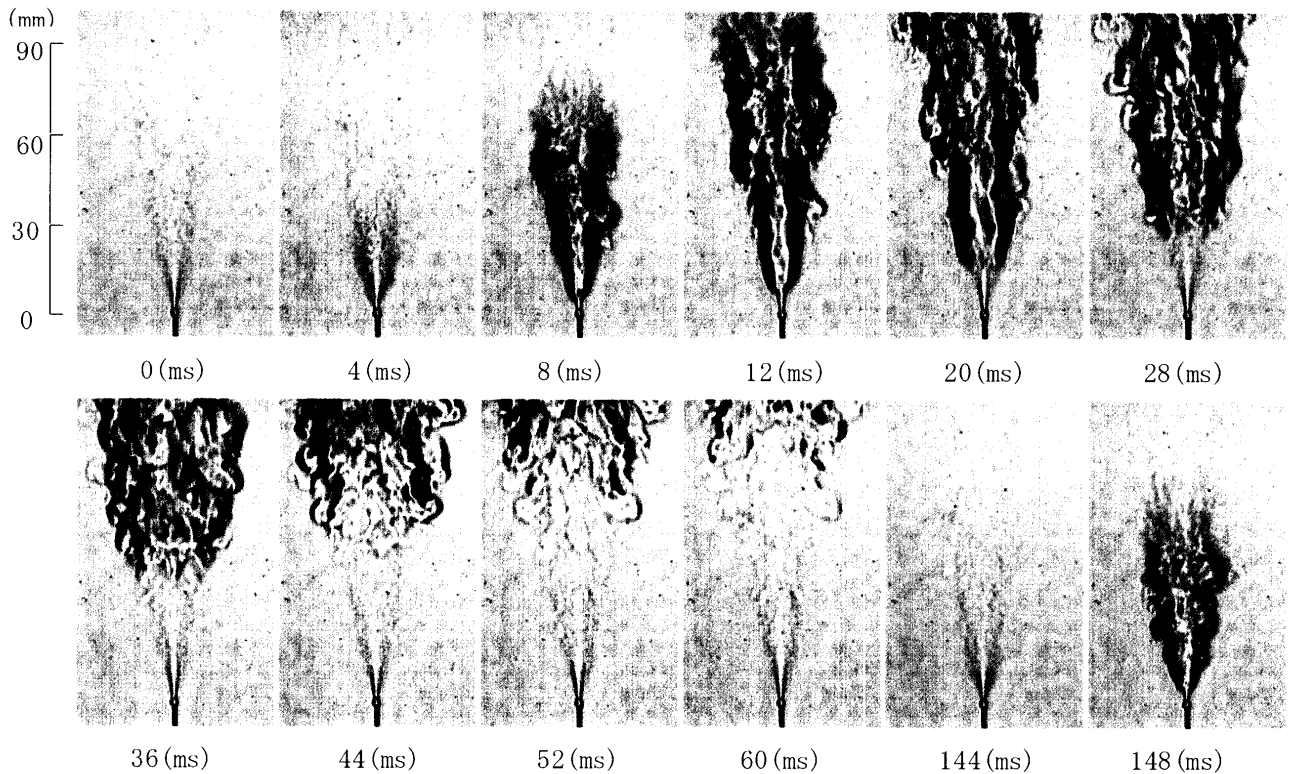


Fig.2 A series of flame re-ignition images at  $\alpha=0.41(\text{mm})$ ,  $L=80(\text{mm})$ ,  $\delta=0.15(\text{mm})$ ,  $m=1.83 \times 10^{-5}(\text{kg/s})$

リム厚が大きくなるにつれて、誘引空気がリム表面に沿った流れとなり、エントレインメントの影響が弱まると考えられる。したがって、火種と空気の接する時間が長くなり、空気がより多く供給されるため、火種が長くリム上に保持されているのではないと思われる。

### 3.2 火種と再着火の関連性

図4に火種温度の測定結果を示す。図4から、火種温度は平均して約  $970(^{\circ}\text{C})$  であり、測定した範囲においてほぼ一定である。

水素噴流拡散火炎では、主火炎が燃料流量の増加に伴い、層流から乱流へ遷移する。その際生じるくびれ（遷移点）が上流へ移動し、リム上に球形の火炎が残る。これが、火種の形成される過程であり、さらに燃料流量を大きくすると再着火が起こり、形成された火種はノズル上に維持されている。つまり、再着火が見られるのはこの火種が存在している間のみであり、火種が吹き消えると再着火は完全に起こらなくなる。このことから、再着火現象はこの火種から水素噴流への熱の移動により水素の自己着火温度に達することが考えられる。したがって、ノズルリム上に形成された火種が再着火現象の熱源として大きな役割を果たしているものと考えられる。

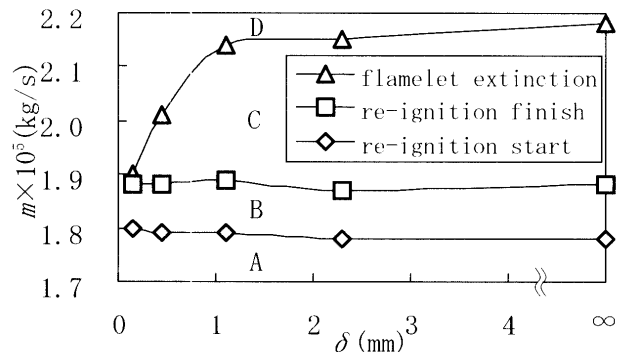


Fig.3 Mass flow rates of re-ignition start, re-ignition finish and flamelet extinction to nozzle rim thickness at  $\alpha=0.41(\text{mm})$ ,  $L=80(\text{mm})$

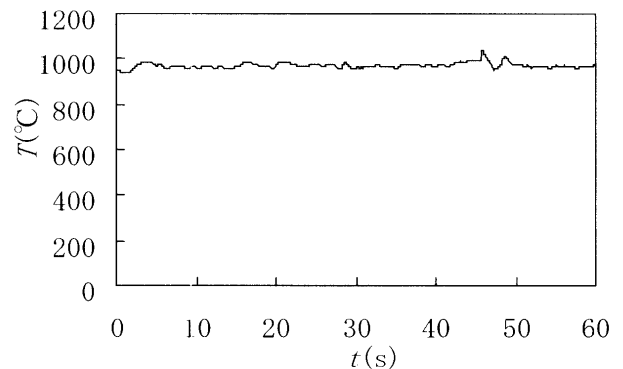


Fig.4 A time series of temperature of flamelet on the nozzle rim at  $m=1.90 \times 10^{-5}(\text{kg/s})$

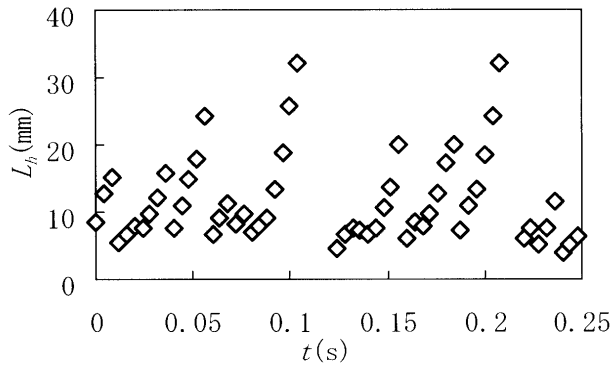


Fig. 5 A time series of flame lift-off height at  $\alpha=0.41$  (mm),  $L=80$  (mm),  $\delta=0.15$  (mm),  $m=1.79 \times 10^{-5}$  (kg/s)

### 3.3 浮き上がり高さとの再着火

図5に  $m=1.79 \times 10^{-5}$  (kg/s)、 $\delta=0.15$  (mm) のノズルにおける浮き上がり高さの時間変化を示す。図5から火炎が形成されてから火炎基部が変動し、それから徐々に浮き上がり、吹き消えるといった挙動を繰り返していることがわかる。このことから再着火現象は周期性を有するものであると考えられる。また再着火には火炎が完全に吹き消えてから新たに火炎が形成される場合と浮き上がりの途中で新たに火炎が形成される場合が確認できる。また、他のリム厚についても同様な火炎挙動が見られた。

### 3.4 再着火現象の周期性

図6に再着火現象の周期特性を示す。燃料流量と燃焼継続時間、燃料流量と吹き消え時間の関係をそれぞれ図6(a)、(b)に示す。ここで、燃焼継続時間とは、火炎が形成されてから変動し、浮き上がり始めるまでの時間で、吹き消え時間とは、火炎が吹き消えてから新たに火炎が形成されるまでの時間をいう。図6(a)から、燃焼継続時間は燃料流量が増加するにつれて時間幅が短くなる傾向にある。つまり、燃料流量の増加に伴い、火炎基部の変動は次第に見られなくなる。また、図6(b)から、吹き消え時間は燃料流量の増加に伴い、その時間幅は長くなる傾向にある。各燃料流量においてそれぞれバラツキがあるが、再着火の発生周期は燃料流量が増加するにつれて長くなる。

### 3.5 再着火現象の再現性

図7に再着火現象の再現性について示す。このとき、 $\alpha=0.41$  (mm)、 $L=80$  (mm)、 $\delta=0.15$  (mm) のノズルのもと、燃料流量を徐々に大きくしていき、再着火現象の開始、終了、および火種吹き消えのそれぞれの挙動が見られる燃料流量(再現性)を調べる実験を繰り返し10回行った。(Nは実験回数) その結果、再着

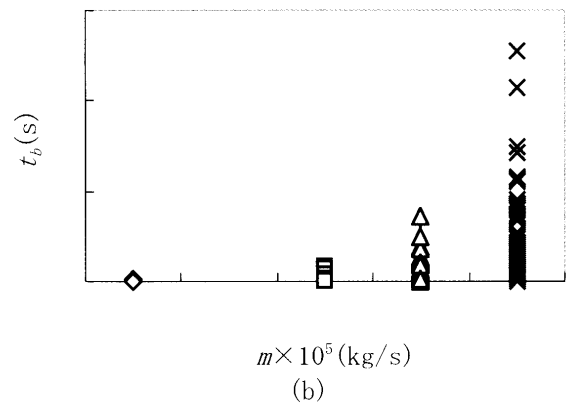
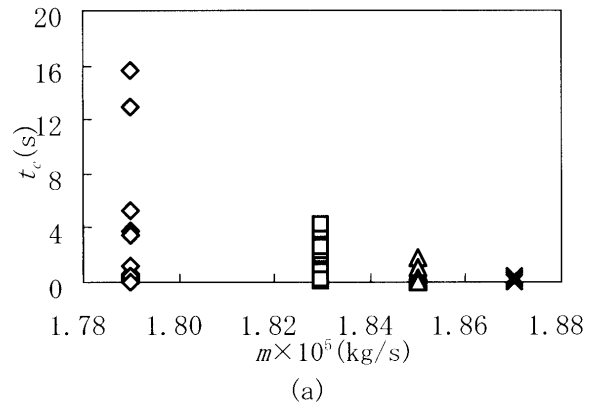


Fig. 6 The distribution of combustion continuing time(a) and blowout time(b) to mass flow rates at  $\alpha=0.41$  (mm),  $L=80$  (mm),  $\delta=0.15$  (mm)

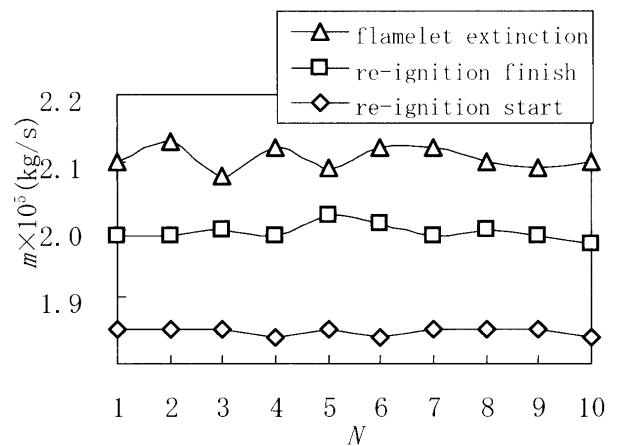


Fig. 7 Mass flow rates of re-ignition start, re-ignition finish, and flamelet extinction to numbers of experiments at  $\alpha=0.41$  (mm),  $L=80$  (mm),  $\delta=0.15$  (mm)

火開始時、終了時、および火種吹き消え時の燃料流量はほぼ一定であることがわかる。このことから、再着火現象とは、突発的または偶然に起こるもので

はなく、同じノズル条件のもとでは、ある決まった燃料流量に達すると見られることから再現性があると考えられる。

#### 4. 結論

本研究において、再着火に関する実験を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 再着火開始時と再着火終了時の燃料流量はリム厚によらずほぼ一定で、吹き消え時の燃料流量のみ変化する。
- (2) 再着火の発生は、火種を熱源とした熱および活性基などの移動と関係している。
- (3) 再着火現象の周期は燃料流量の増加に伴い、長くなる。
- (4) 再着火現象はある燃料流量に達すると見られることから、再現性がある。

#### おもな記号

- $d$  : ノズル内径 (mm)  
 $L$  : ノズル長さ (mm)  
 $\delta$  : ノズルリム厚 (mm)  
 $m$  : 燃料流量 (kg/s)  
 $L_h$  : 浮き上がり高さ (mm)  
 $t_c$  : 燃焼継続時間 (s)  
 $t_b$  : 吹き消え時間 (s)

#### 参考文献

1. Kalghatgi, G.T., Combustion Science and Technology, vol.26, pp.233~239, 1981
2. Takahashi, F. and John Schmoll, W., Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, pp.667 ~ 683, The Combustion Institute, 1990
3. 水谷・矢野、日本機械学会論文集、44 巻 379 号、pp.1036~1052, 1978
4. 服部、日本機械学会論文集、30 巻 210 号、pp.320 ~332, 1964
5. 生井・松尾、圧縮性流体の力学、理工学社(1977)