

水素高速噴流拡散火炎の再着火現象

鄭 秉 國*・福 重 修 一**・八 代 洋 二***
矢 野 利 明****・鳥 居 修 一****

Flame Reattachment Phenomenon of Hydrogen Jet Diffusion Flames

Byong-koog JUNG, Shuichi FUKUSIGE, Youji YATSUSHIRO,
Toshiaki YANO, Shuichi TORII

The flame reattachment period of free jet diffusion flames has been studied by using hydrogen fuel injected out into atmospheric pressure. The phenomenon of flame reattachment after blow-out has not been subtly explained, so far, in numerous contemporary studies. Schlieren technique was employed to visualize the hydrogen flame, with focus on the region near a vertical circular straight nozzle exit. It has been found out that (1) the period of flame reattachment increases with an increase in mass rate of gas flow. (2) when the mass rate of gas flow reaches a critical point, a small-sized flamelet is found in the vicinity of the nozzle exit. When the mass flow rate is increased to a certain rate, the flamelet extinguishes and no reattachment can be found any more.

Key Words : free jet diffusion flame, flame reattachment, blow-out, hydrogen fuel

1. 緒 論

環境に対する社会的な関心が高まるにつれて、最近、地球規模でのCO₂削減が叫ばれている。平成9年12月には「地球温暖化防止京都会議(COP3)」が開かれ、日本の当面のCO₂の排出量を2010年までに1990年の水準に比べて6%以上削減するという目標が定められた。地球温暖化とは、二酸化炭素を初めとする温室効果ガス(メタン、亜酸化窒素等を含む)が過剰に放出・蓄積されることにより、大気中の温室効果ガスの濃度バランスが崩れ、地球上の気温が上昇する現象である。地球規模で気温が上昇すると、海水の膨張や氷河などの融解により海面が上昇したり、気候メカニズムの変化により異常気象が頻発するおそれがあり、ひいては自然生態系や生活環境、農業などへの影響が懸念されている。

水素は水の電気分解によって容易に再生できる上に燃焼しても地球温暖化の物質である二酸化炭素を排出しな

いクリーンな燃料として注目されている。それゆえ将来の石油資源の確保に対する不安や地球環境保護に対応できる燃料である。本研究で取り扱う、燃料としての水素は極めて広い可燃範囲を有し、燃焼速度が速いことから内燃機関や工業窯炉といった工業用燃焼装置での高負荷で高い安定性を持つ燃焼器の設計が可能だと考えられる。工業用燃焼装置などに多く使用されている拡散火炎では、これまで火炎の長さに関する相似性についての研究が盛んであり、Wohlら⁽¹⁾やHottelら⁽²⁾により乱流拡散火炎の火炎長さは、燃料が決まればレイノルズ数に関係なく、ノズル直径と比例関係にあることが報告されている。しかしこれらの事実が、浮き上がり火炎すなわち燃料噴出ノズルから下流に離れた位置の火炎の形状や噴流速度が非常に速いために燃焼を保持できない吹き消え寸前の現象についても妥当であるかについては不明である。

メタンやプロパンなどの炭化水素燃料は、ノズル径によって異なるが、燃料噴出速度が20~60 m/sでバーナから浮き上がり、吹き消えることが知られている。⁽³⁾これに対して、水素は噴出速度が1000 m/sを越えても、火炎がバーナに浮き上がるが安定して燃えるという特異な現象を示すことが確認されている。⁽⁴⁾さらに、吹き消え近くの火炎挙動をみると、いったん吹き消えた火炎が再着火するという、今までの燃焼学的常識では考えられな

平成11年5月31日受理

*博士後期課程システム制御工学専攻

**日野自動車工業(株)

***博士前期課程機械工学専攻

****機械工学科

いような挙動を示すことが明らかになった。そこで、本研究ではシュリーレン法を用いることによって、不輝炎である水素噴流拡散火炎の可視化を行ない、その映像を高速カメラを用いて撮影し、水素拡散火炎の再着火現象の解析を行なった。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究において用いた燃焼器とその計測機器の概略を Fig.1 に示す。燃焼器は薄肉のストレートノズルと貯気室からなっており、そのよどもみ圧力は貯気室底面に接続した半導体トランスデューサ（豊田工機株式会社製 PMS-500k）で計測する。水素ボンベより燃料を流し、減圧弁により二次圧を最大20kgf/cm²とした。流量はボンベの燃料流量調整弁により調節を行った。燃料ボンベより流出した水素ガスは耐圧チューブを通り貯気室に入り、燃料噴出ノズルから静止空气中へ垂直上方へ噴出し、着火され、噴流拡散火炎を形成する。トランスデューサの設置位置は、燃料の流れによる貯気室内の圧力誤差を最小限にするため貯気室底面にした。貯気室内の圧力の測定方法を Fig.2 に示す。本実験で使用したノズルは、薄肉のノズルで先端にはテーパをかけていない内径0.41mm、長さ120mmの円管ストレートノズルである。

2.2 火炎の撮影条件

噴流拡散火炎の撮影は燃料ノズルからの噴流速度を増加させながら、シュリーレン法を用いることにより、高速ビデオカメラ（株式会社 NAC 製 HSV-500）で行った。シュリーレン法に関しては現在最も一般的に行われている2枚の凹面鏡（φ300mm）を用いる方法（二面対向法）を採用した。点光源には水銀灯を使用した。高速ビデオカメラの撮影条件は、絞り2.8、シャッタースピードを開放状態にし、1秒間に250コマの火炎画像を撮影した。高速ビデオカメラにより撮影された画像は、ビデオカセットレコーダ（VCR）本体に取り込まれ、VCR 本体内の S-VHS のビデオテープに入力された。この際、撮影中の画像はカラーモニターで確認できる。

本研究は静止空气中の火炎を観察する目的で行う実験であるため、火炎の揺らぎをできるだけ避けるようにして実験を行った。さらに不輝炎である水素炎の可視化のため撮影は夜間に行った。実験中、発生した熱を逃がすために排気ダクトを運転させたが、火炎現象に支障をきたす程の空気の乱れは生じなかった。

2.3 燃料質量流量の測定

本研究に使用したノズルは長さを約120mmにした薄肉のストレートのステンレスチューブである。貯気室出口

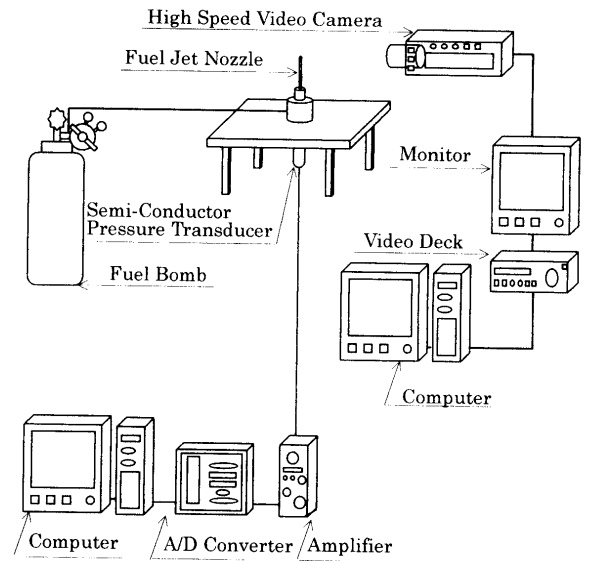


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

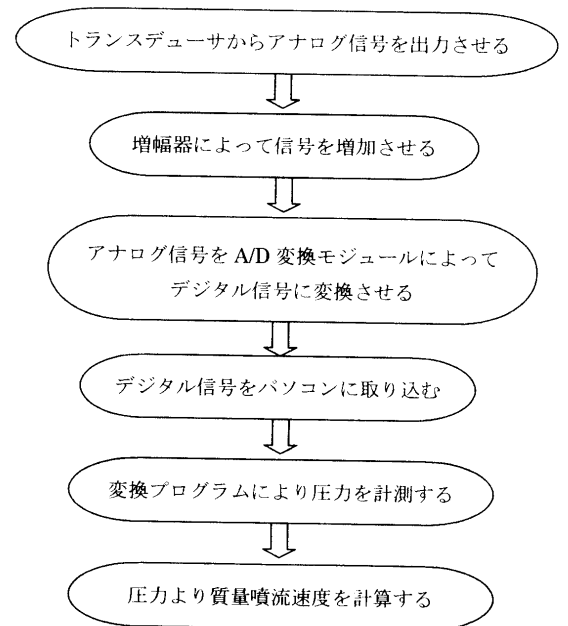


Fig.2 Method to obtain the mass flow rate of fuel jet from the vessel pressure

からノズル先端までの距離が約165mmと短いことから、貯気室からノズル出口までの流れを断熱流れとして取り扱い、燃料流量の算出⁽⁵⁾を行なった。

燃焼実験の際に測定したゲージ圧 p_g で得られた貯気室内の圧力 p_f と大気圧 p_∞ 、大気温度 T_∞ を用いて次式より質量流量 m (kg/s) を求めた。ただし、本研究の燃料噴流はすべて音速噴流である。

$$m = \frac{A p_f}{\sqrt{R T_\infty}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{(k-1)}}}$$

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

2.4 実験条件

Table 1 に本実験で行なった燃料流量、撮影時間および取り込んだデータ数を示す。

3. 実験結果および考察

本研究では、ポンベの燃料流量調整弁により流量を変化させながら再着火の周期について検討した。Fig.3 は $m=19.65 \times 10^{-6}$ (kg/s) における再着火現象時の連続

貯気室内圧 (MPa)	燃料流量 (kg/s)	撮影時間 (ms)	データ数
0.234	19.33×10^{-6}	10,052	72
0.235	19.41×10^{-6}	18,464	73
0.237	19.57×10^{-6}	9,788	26
0.238	19.65×10^{-6}	20,880	16
0.239	19.72×10^{-6}	17,888	6

Table 1 Mass flow rate of fuel and duration of video shooting

火炎画像を示す。0 (ms) は再着火が開始した瞬間の映像であり、水素噴流拡散火炎は徐々に浮き上り (12ms→60ms)、一旦吹き消えた火炎 (128ms) が燃焼を再開し (584ms)、その後また吹き消える現象を示す。

Fig.4 は燃料流量 ($19.33 \times 10^{-6} \sim 19.72 \times 10^{-6}$ (kg/s)) による再着火周期 (T_p) を示す。 $\phi = 0.41mm$ のノズルにおいて再着火現象は $m=19.33 \times 10^{-6}$ から始まり、 $m=19.72 \times 10^{-6}$ を超えた流量では再着火現象は起こらない。 $m=19.57 \times 10^{-6}$ までの再着火周期は1000msec 前後の値

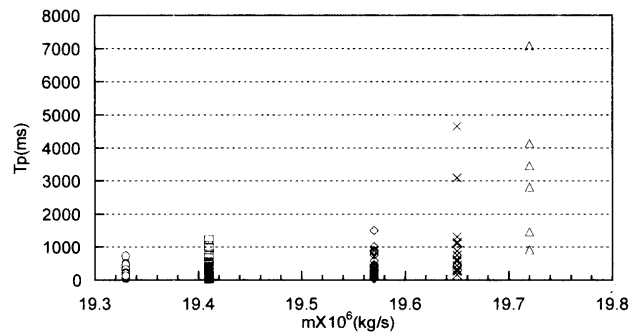


Fig.4 Flame reattachment period to mass flow rate

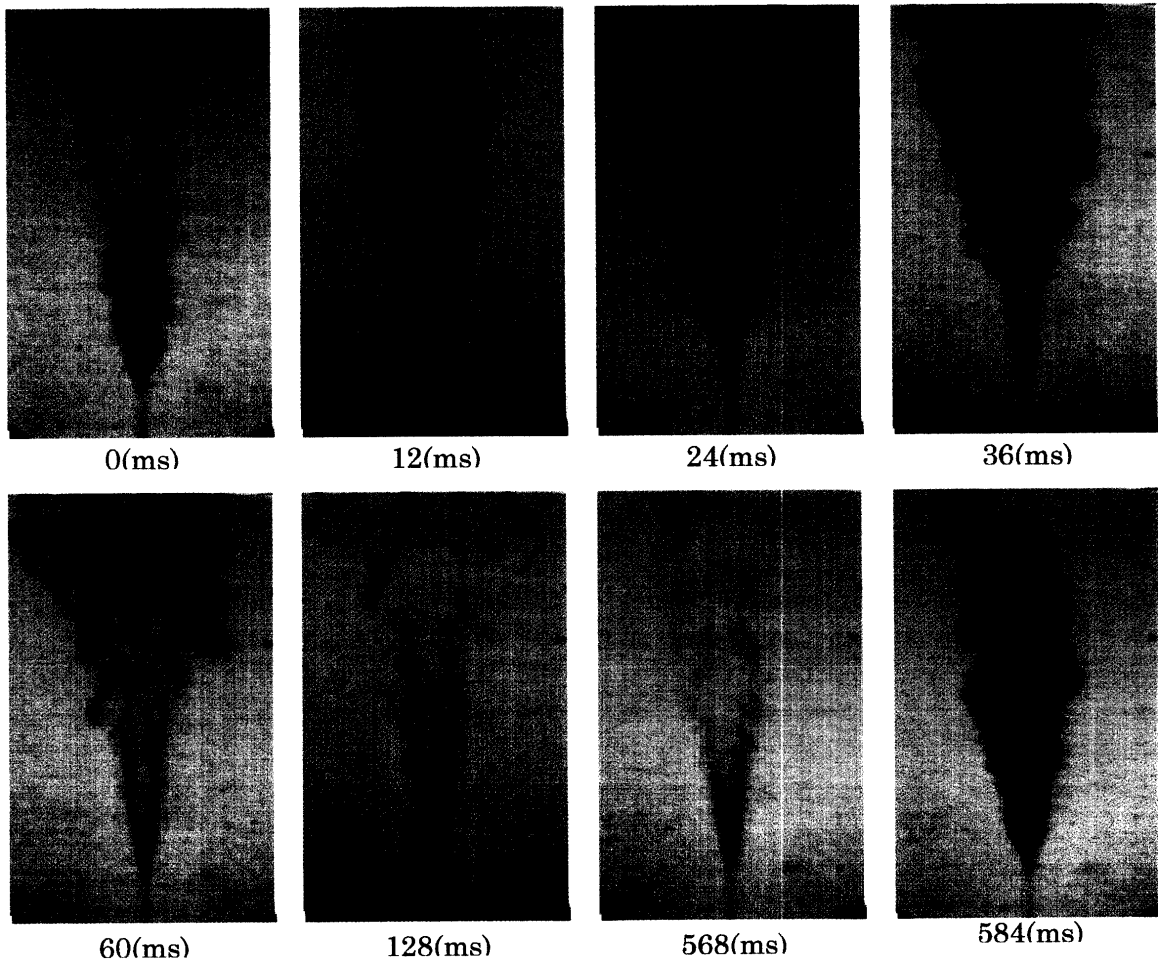


Fig.3 A series of timewise flame reattachment images at mass flow rate $m=19.65 \times 10^{-6}$ (kg/s)

を示しており、ばらつきは類似しているがその後急激に異なる傾向を示す。全般的に再着火周期は燃料噴流速度が大きくなると長くなる。 $m=19.72 \times 10^{-6}$ では 7 sec 以上消えた火炎が再着火する現象も見られる。

各流量において再着火周期のバラツキの分布を Fig.5 に示す。 $m=19.33 \times 10^{-6}$ では 25~100msec の値が最も多く、流量が増加するに従って周期が長い所で分布が集まっているのが分かる。 $m=19.57 \times 10^{-6}$ 以上ではデータ数が不足しており、詳細については今後さらに検討しなければならないが、着目すべき点は、再着火開始時の流量ではノズル基部に長さ 2~3 mm 程度の火炎が残っており、流量が増加してこの火炎がなくなると再着火は完全に起こらなくなる。

この再着火の原因として、高速噴流によりバーナ先端に発生する衝撃波が火炎の保持にある役割を持っていることが予想されるが、その保炎メカニズムについては目下のところまだ不明である。そこで、今後高速噴流時に発生する衝撃波の挙動をシュリーレン法を用いて詳細に検討し、消炎から再着火に至る時のバーナリームの温度、ガス濃度およびイオン電流の測定等を行い、水素の超高速噴流時の再着火のメカニズムを明らかにする予定である。

4. 結 論

シュリーレン装置を用いて水素噴流拡散火炎の再着火現象について実験を行った結果、以下のようなことが分かった。

- (1) 再着火現象はある限られた質量噴流速度の範囲で起こる。
- (2) 再着火周期は噴流速度が大きくなると長くなる。
- (3) 再着火開始時の流量ではノズル基部に長さ 2~3 m 程度の火炎が残っており、流量が増加してこの火炎がなくなると再着火は完全に起こらなくなる。

参考文献

- (1) Wohl, K., Gazley, C., and Kapp, N., Third Symposium (International) on Combustion, pp 288, The Combustion Institute, (1949)

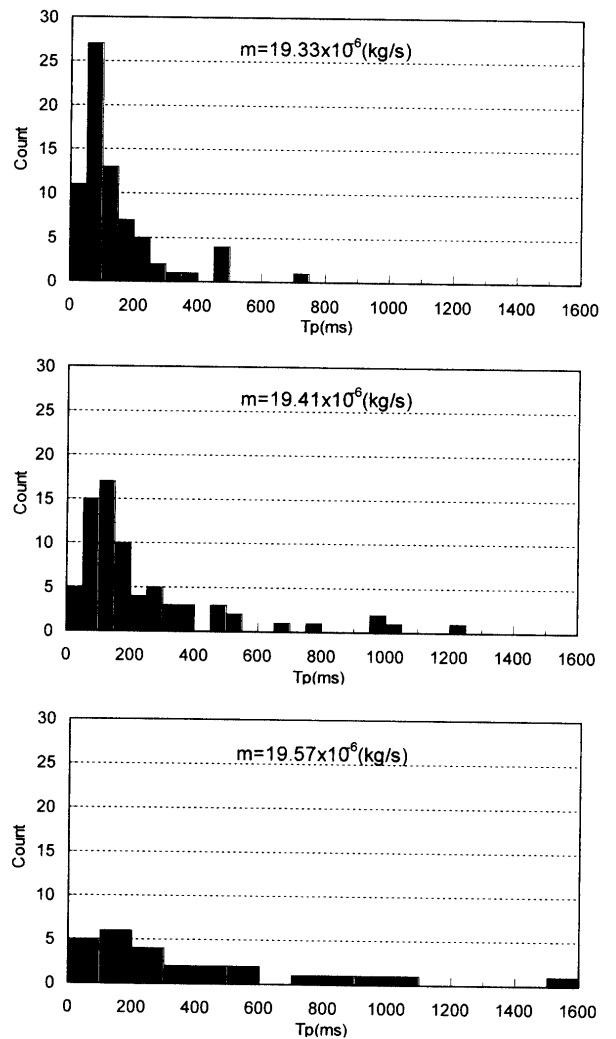


Fig.5 The distribution of flame reattachment period at each mass flow

- (2) Hottel, H.C., and Hawthorne, W.R., Third Symposium (International) on Combustion, pp 288, The Combustion Institute, (1949)
- (3) Youngbin, Y., Jeffrey, M., and James, F., AIAA Paper 93-0446, (1993)
- (4) 福重・立石・矢野・望月・鳥居, 鹿児島大学工学部研究報告, 第39号, 15 (1997)
- (5) 生井・末尾, 圧縮性流体の力学, 理工学社, (1977)