

周囲流を伴う水素噴流拡散火炎の安定限界と火炎構造

影山 朋久* 谷川涼一* 吉本 隆光**

Flame structure and Stability Limit of Hydrogen Diffusion Flame with Co-flow

Tomohisa KAGEYAMA* Ryouichi TANIGAWA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The characteristics and properties of the hydrogen diffusion flame have been investigated as a clean energy in the future. The objective of the present study is to get further understanding lifting/blow-off in the hydrogen diffusion flame and present clearer understandings of the processes for flame holding. The species of the fuels are pure hydrogen and dilute hydrogen which is formed with putting nitrogen gas into the fuel. The parameters of the experiment are selected as fuel velocity, air velocity, equivalent ratio, nozzle inner diameter, concentration of the fuel and so on. The experiments were conducted to investigate the stability limits and flame behaviors with increasing the spout velocity or the co-flow velocity. The inside temperature of the flame is measured for researching the structure of the flame. The flame base and the flame configuration are observed in detail. It is found that the stability limit depends on the co-flow velocity.

Keywords; hydrogen flame, co-flow, lifting, blow-off, stability limit

1. はじめに

エネルギーの有効利用と燃料消費量低減の燃焼技術に関して、安定な燃焼形態の保持は重要である。しかし、その火炎基部の構造、消炎現象などの不明な点も多い。そこで、安定な拡散火炎の挙動を観察し、火炎の安定限界（浮き上がり・吹き飛び）や火炎形状⁽¹⁾などを調べる必要がある。本研究では、燃料として純水素および窒素を混合して希釈した水素燃料を用いる。また、ノズルには2重管を使用する。内側のノズル（内管ノズル）に燃料を噴出させ、外側のノズル（外管ノズル）から空気を周囲流とし噴出させ、周囲流を伴う噴流拡散火炎⁽²⁾⁽³⁾を形成する。これとは反対に燃料と空気を入れ換えて燃焼させ、内側に形成される火炎を逆拡散火炎⁽⁴⁾⁽⁵⁾という。なお2重管の両先端ノズルの噴出口は同一水平平面である。

ノズル寸法や周囲速度をパラメータとして、浮き上がり・吹き飛び現象に至る過程を、詳細に観察及び測定する。また火炎基部と火炎形状、火炎安定限界などを調べ、周囲流や各噴出速度が火炎の安定限界⁽⁶⁾⁽⁷⁾にどのように影響するのかを調べる。

2. 実験方法・装置

燃料（水素）と希釈ガス（窒素）を流量計で流量を調整し所定の割合で混合させる。周囲流を伴う拡散火炎では内管から、逆拡散火炎では外管から燃料を噴出させ噴

流拡散火炎を形成する。燃焼用空気は圧縮空気を減圧させ流量計で流量を調整してノズルから噴出させる。

2重管の外管の内径はすべて同一口径のものを用いる（ $d_a=17.9\text{ mm}$ ）。火炎の挙動を観察する方法として、直接写真、シュリーレン法、シャドウグラフ法を用いた。温度測定には熱電対を用いた。

Fig.1にシュリーレン装置を示す。シャドウグラフ法はFig.1においてKnife edgeで屈折光を切断せずに撮影したものである。Fig.2に実験装置フロー図を示す。

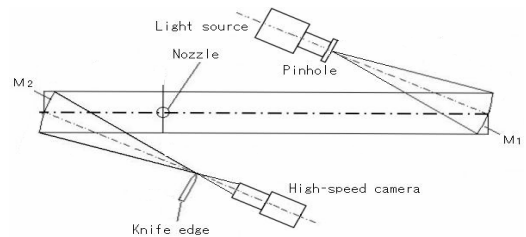


Fig.1 Experimental apparatuses of Schlieren photography

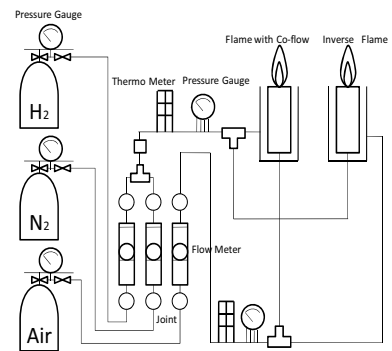


Fig.2 Flow Diagram

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

3. 実験結果

3.1 周囲流を伴う拡散火炎

3.1.1 周囲流による火炎の変遷

周囲流を伴う拡散火炎で燃料に $H_2:N_2=100:0$ の純水素を用いる。Fig.3に示す。Fig.3(a)に燃料噴出速度 $V_h=96$ m/s, Fig.3(b)に $V_h=120$ m/s, Fig.3(c)に $V_h=240$ m/s と一定にして, 周囲流の空気速度を増加させた場合の火炎の変遷を直接写真で撮影したものを示す。また, Fig.4 に $H_2:N_2=70:30$ の希釈された水素を用いて, 燃料噴出速度 $V_h=96$ m/s 一定, Fig.5 に $H_2:N_2=50:50$ の希釈された燃料の噴出速度 $V_h=72$ m/s 一定の場合での火炎の変遷を示す。内管ノズルの口径は外径 $D=1.2$ mm, 内径 $d=0.94$ mm のものを使用した。

$H_2:N_2=100:0$ の純水素を用いた場合, 周囲流がない大気中での自由噴流拡散火炎状態では赤色炎であるが, 周囲流(空気)速度を増加させるにつれて, 火炎基部が青色炎となる。また燃え切りが早くなり, 火炎形状は細長く薄火炎となる。燃料噴出速度が 96 m/s (Fig.3(a))では周囲流速度を上げるとくびれが確認できた。また燃料噴出速度が 120 m/s (Fig.3(b))においては, 拡散火炎でくびれが鮮明になり, 短炎となり, 全体的に圧縮されたような形状になる。また 240 m/s (Fig.3(c))では周囲流を流すと浮き上がりが発生した。また, 周囲流速度を上げることにより, 燃焼が促進され, 火炎は短くなっていく。

$H_2:N_2=70:30$, $H_2:N_2=50:50$ の希釈された水素を用いた場合は, 周囲流がない大気中での自由噴流拡散火炎状態では, かすかに赤色炎であるが, 周囲流を伴うと青色炎となる。

また, 希釈された燃料は自由噴流拡散火炎においても吹飛びやすい

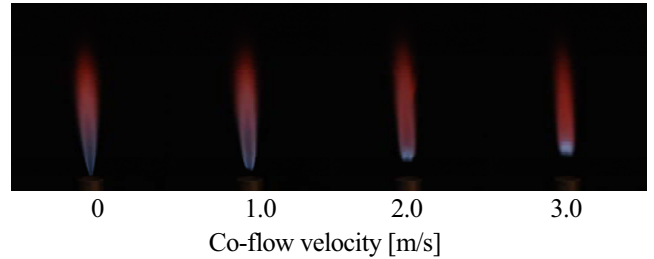


Fig.3(c) Behavior of normal diffusion flame
($H_2:N_2=100:0$, $V_h=240$ m/s)

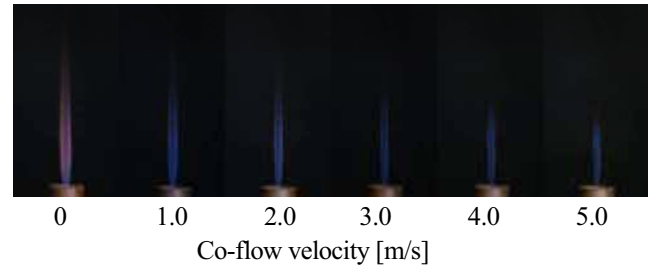


Fig.4 Behavior of normal diffusion flame
($H_2:N_2=70:30$, $V_h=96$ m/s)

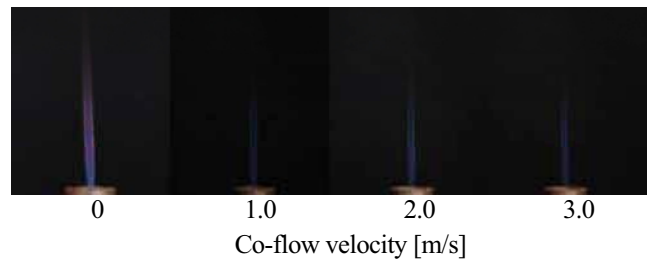


Fig.5 Behavior of normal diffusion flame
($H_2:N_2=50:50$, $V_h=72$ m/s)

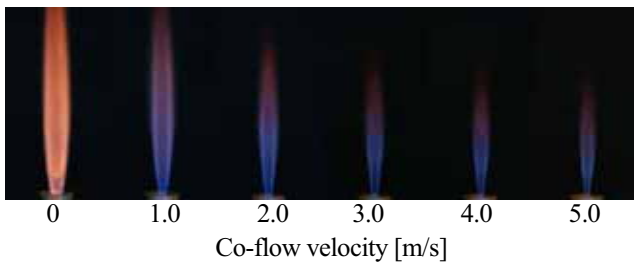


Fig.3(a) Behavior of normal diffusion flame
($H_2:N_2=100:0$, $V_h=96$ m/s)

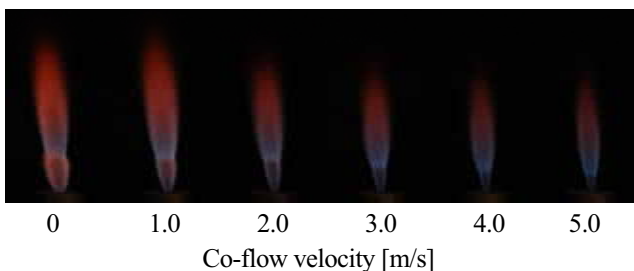


Fig.3(b) Behavior of normal diffusion flame
($H_2:N_2=100:0$, $V_h=120$ m/s)

3.1.2 火炎の挙動

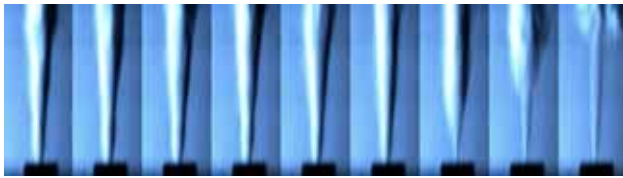
Fig.6(a),(b),(c)に $H_2:N_2=100:0$ の純水素, Fig.7(a),(b),(c)に $H_2:N_2=70:30$, Fig.8(a),(b)に $H_2:N_2=50:50$, Fig.9 に $H_2:N_2=30:70$ の希釈された水素を燃料に用い, 前項 3.1.1 と同一条件で, シュリーレン法で撮影した火炎の挙動を示す。

$H_2:N_2=100:0$ の燃料を用いた場合の火炎挙動では層流状態, 遷移領域からの吹き飛び (Fig.6(a),(b)) では浮き上がり現象は発生せず, それぞれ基部まで乱流に遷移後, 浮き上がる。しかし, 自由噴流拡散火炎の状態では乱流状態からの吹き飛び (Fig.6(c)) では浮き上がりが発生し, その後吹き飛ぶ。

希釈された水素を燃料に用いた場合, 周囲流を伴わせると, 火炎基部が層流状態であるとき (Fig.7(a),(b), Fig.8(a),(b), Fig.9), $H_2:N_2=100:0$ の燃料を用いた場合と異なり, 火炎基部まで乱流状態に遷移するまえに吹き飛んでしまう。さらに, 火炎基部が乱流状態 (Fig.7(c)) であっても, 浮き上がり現象は発生せず吹き飛び現象に至る。また, $H_2:N_2=50:50$, $H_2:N_2=30:70$ の場合は, 自由噴流拡散火炎の状態において火炎の基部から乱流状態になることはなく, $H_2:N_2=30:70$ の燃料を用いた場合 (Fig.9) では, 火炎下流部すら乱流状態に遷移せずに吹き飛ぶ。



Low ← Co-flow velocity → High
Fig.6(a) Behavior of flame ($H_2:N_2=100:0$, $V_h=96m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 6(b) Behavior of flame ($H_2:N_2=100:0$, $V_h=120m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 6(c) Behavior of flame ($H_2:N_2=100:0$, $V_h=240m/s$)



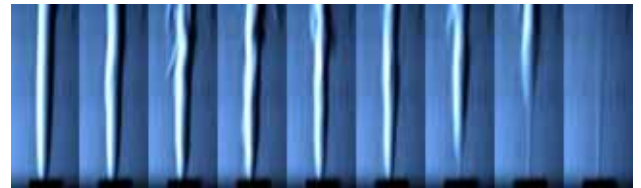
Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 7(a) Behavior of flame ($H_2:N_2=70:30$, $V_h=48m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 7(b) Behavior of flame ($H_2:N_2=70:30$, $V_h=132m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 7(c) Behavior of flame ($H_2:N_2=70:30$, $V_h=192m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 8(a) Behavior of flame ($H_2:N_2=50:50$, $V_h=96m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig. 8(b) Behavior of flame ($H_2:N_2=50:50$, $V_h=168m/s$)



Low ← Co-flow velocity → High
Fig.9 Behavior of flame ($H_2:N_2=30:70$, $V_h=48m/s$)

3.1.3 火炎内温度分布

以下の図は内管ノズル口径が $D=8.0\text{ mm}$, $d=5.0\text{ mm}$ のものを用いた場合の希釈水素火炎の各断面での半径方向温度分布である。Fig.10(a)は $H_2:N_2=50:50$ の燃料を用いて、燃料噴出速度 $V_h=1.7\text{ m/s}$ として、Fig.10(b)は周囲流速 $V_a=0.8\text{ m/s}$ で一定とした場合の温度分布を示している。Fig.11(a),(b)は $H_2:N_2=30:70$ を用いて、燃料噴流速度を $V_h=1.7\text{ m/s}$ 、Fig.11(b)は周囲流速を $V_a=0.8\text{ m/s}$ で一定とする。Fig.12(a)は $H_2:N_2=30:70$ を用いて、燃料噴流速度を $V_h=8.5\text{ m/s}$ 、Fig.12(b)は周囲流速 $V_a=3.3\text{ m/s}$ での温度分布を示している。

希釈割合が高いほど全体的に温度が低下している。また、周囲流を流すことでも全体的に温度が低下し、最高温度点（火炎面）が火炎中心に近付き、火炎が細くなっている。

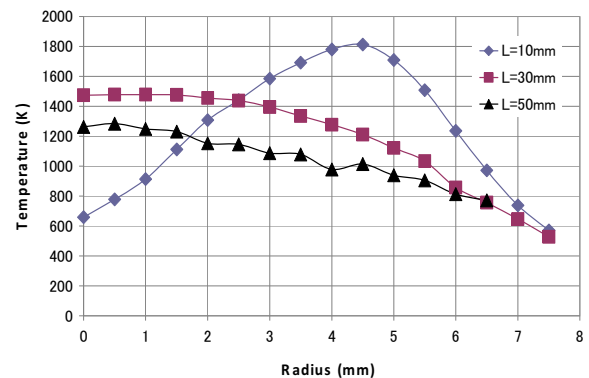


Fig. 10(a) Profiles of Flame Temperature ($H_2:N_2=50:50$)

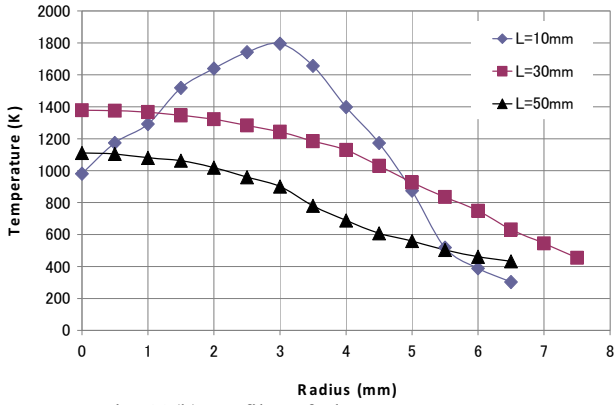


Fig. 10(b) Profiles of Flame Temperature
($H_2:N_2=50:50$ with air co-flow)

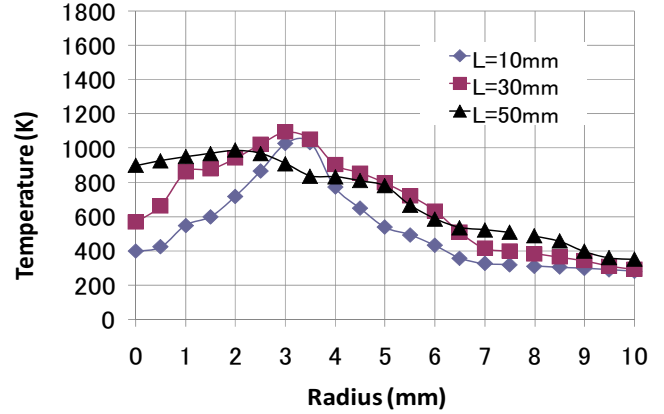


Fig. 12(b) Profiles of Flame Temperature
($H_2:N_2=30:70$ with air co-flow)

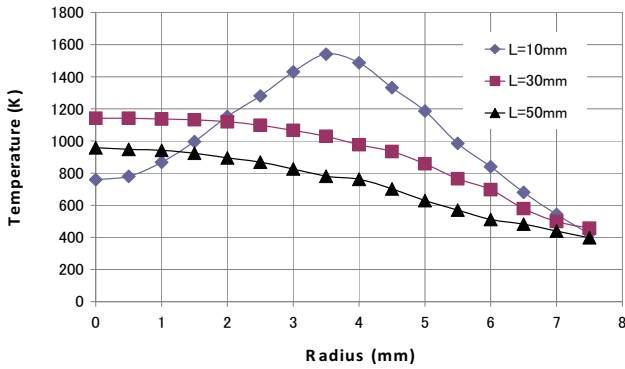


Fig. 11(a) Profiles of Flame Temperature ($H_2:N_2=30:70$)

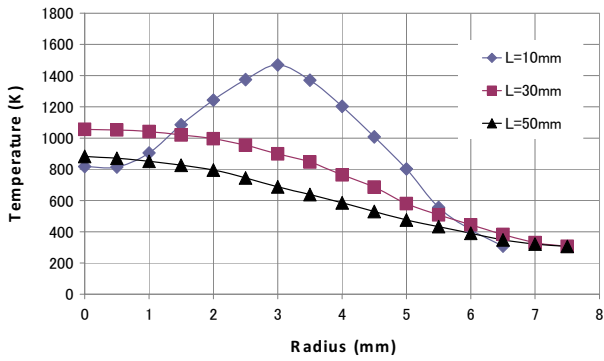


Fig. 11(b) Profiles of Flame Temperature
($H_2:N_2=30:70$ with air co-flow)

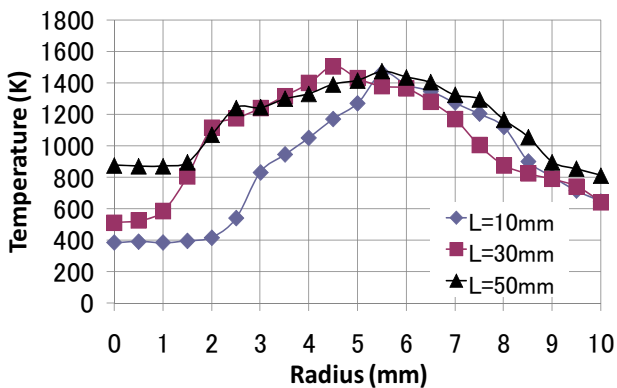


Fig. 12(a) Profiles of Flame Temperature ($H_2:N_2=30:70$)

3.1.4 周囲流を伴う安定限界 Fig.13 に内管ノズル口径が $D=1.2$ mm, $d=0.94$ mm のものを用いた場合の、吹き飛び現象に至る燃料噴出速度と周囲流速を示す。 $H_2:N_2=100:0$ では火炎基部が層流燃焼状態(0-200 m/s)と乱流燃焼状態(230-360 m/s)では吹き飛び周囲流速がはっきりとした違いが見られた。また乱流状態であるときは周囲流を伴うことにより、浮上りが発生し、吹き飛びに至る周囲流速はほぼ一定となった。

また、 $H_2:N_2=70:30$, $H_2:N_2=50:50$, $H_2:N_2=30:70$ の希釈された水素を燃料に用いた場合でも同様に火炎基部が層流状態である場合と乱流状態である場合で周囲流による吹き飛び速度に変化がみられた。さらに、燃料の水素濃度が低くなるにつれて全体的に吹き飛び周囲流速は小さくなる。

さらに各水素濃度における火炎基部が乱流状態に移した後の、速度の増加量と吹き飛びに至る周囲流速の関係は、水素濃度が高いほど吹き飛びにくい。純水素($H_2:N_2=100:0$)を用いた場合の浮上り現象発生する。

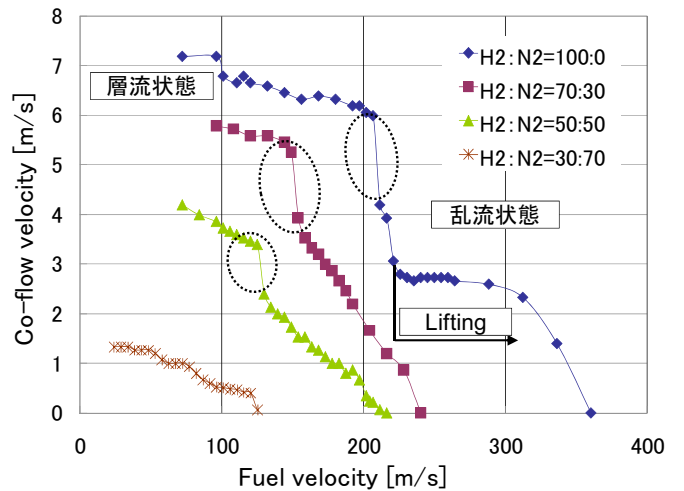


Fig.13 Blow-off velocity
(Diffusion flame with Co-flow)

3.2 逆拡散火炎

3.2.1 逆拡散火炎の変遷と挙動 Fig.14(a),(b),(c),(d),(e)(f)は逆拡散火炎で燃料に各一定の割合で希釈した水素を用いて、周囲流（燃料）速度 $V_h=0.33$ m/s 一定とし、内管ノズルから空気速度を増加させた場合の火炎の変遷を上段に直接写真，下段にシャドウグラフ法で撮影したものを示す。空気速度は写真の左から 0m/s から 17.63 m/s まで 1.18 m/s 間隔で撮影した。

直接写真では、水素濃度が低下するにつれて火炎色は薄くなっていく。空気速度を増加させると、火炎長さが増加していき、浮き上がりに至る。さらに空気速度を増加させると、外側の火炎の影響を受け、吹飛びには至らない。しかし、目視では水素濃度が低い $H_2:N_2=50:50$ を用いた場合には、空気速度を増加させると火炎色がさらに薄くなり、消炎に至るように見える。逆拡散火炎は先端が尖った閉じた火炎が空気速度とともに伸びている。また、空気速度が小さい場合には、希釈された水素を周囲流に用いたほうが火炎長さは長くなっている。

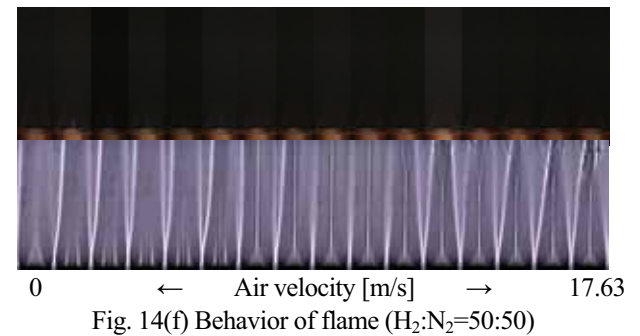
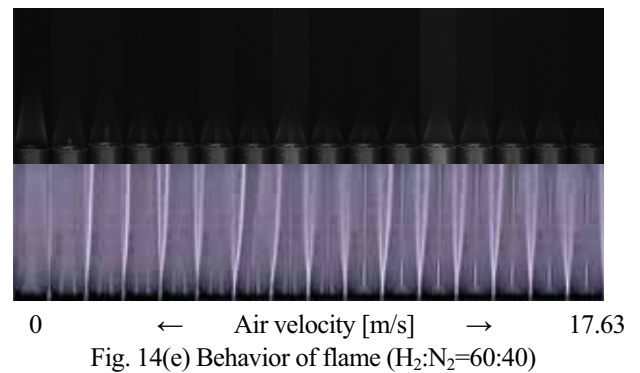
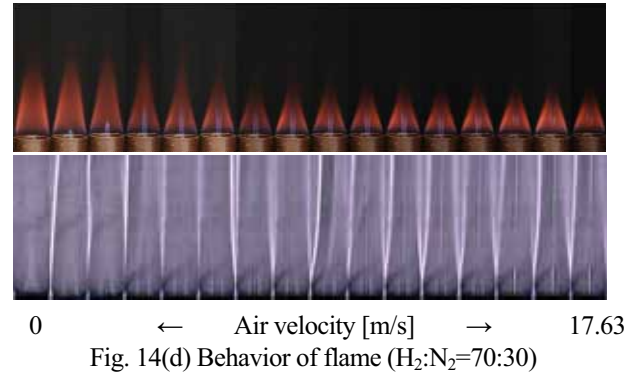
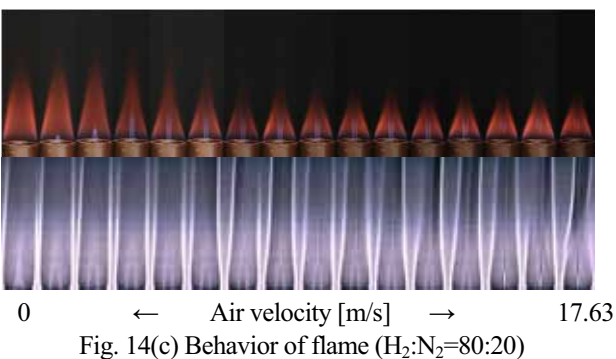
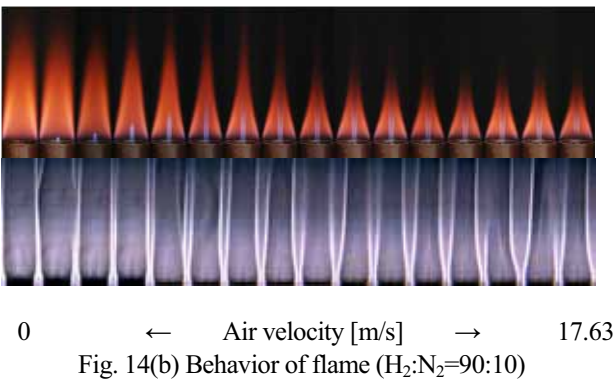
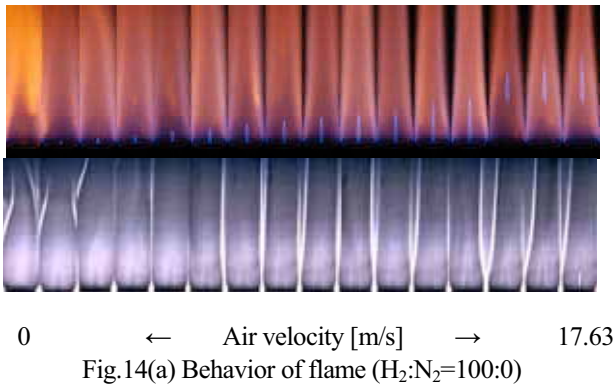
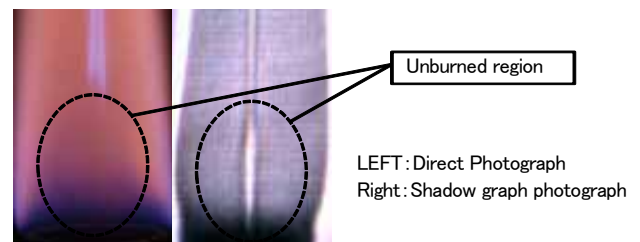


Fig.15は $H_2:N_2=100:0$ の燃料を用いた場合の未燃部分の拡大写真を示す。内管ノズルは外径 $D=3.9$ mm, 内径 $d=1.94$ mm のものを使用した。火炎の基部の未燃部分がシャドウグラフ法の写真では白くなっている。また、水素濃度が変化しても、浮上がりに至る空気速度は異なるが、浮上がりに至る火炎挙動では変化は見られない。



($H_2:N_2=100:0$, $V_h=0.33$ m/s, $V_a=17.63$ m/s)
Fig.15 unburned region

また, Fig.16 に示すように空気速度が小さい場合には, 窒素の混入割合を上げて, 希釈された水素を周囲流に用いたほうが火炎長さは長くなっている。

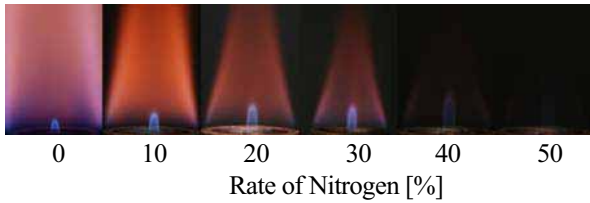


Fig.16 Flame length (Vh=0.33m/s, Va=4.72m/s)

3.2.2 逆拡散火炎の安定限界 Fig.17 は逆拡散火炎において, 燃料に各一定の割合で希釈した水素を用い, 周囲流(燃料)速度を Vh=0.33 m/s と一定とし, 内管ノズルから空気速度を増加させた場合の火炎の浮き上がり速度を示している. ノズルの口径は D=3.9 mm, 内径 d=1.94 mm を使用した。

燃料中の水素濃度が増加するにつれて浮き上がりにくくなり, 水素濃度が高いほど安定性が良いと言える. しかし, 水素濃度が 100%になると 90%と比べて浮き上がりやすくなるが, これは水素濃度が低くなると, 外側の火炎が小さくなり, その影響を受けたためだと考えられる。

また, 逆拡散火炎の吹飛びに至る空気速度は従来の拡散火炎での燃料噴出速度の 1/100 程度になっている。

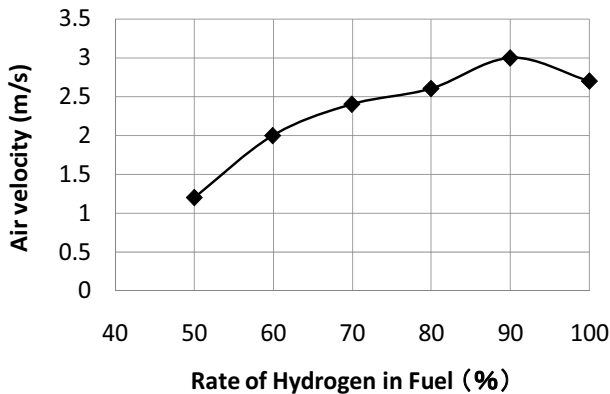


Fig.17 Blow-off velocity for Inverse flame

4. まとめ

4.1 周囲流を伴う拡散火炎

(1)周囲流を伴う水素拡散火炎は, 空気流量を増加させると火炎は小さく細くなり燃え切りが早くなっている. また火炎色は自由噴流拡散火炎では赤色炎だが, 周囲流速が増加すると次第に青色炎になる。

(2)火炎基部で乱流状態になると周囲流速の影響が大きくなり, 周囲流速速度が小さくても吹き飛びが起こる. また, 希釈された水素火炎は吹き飛びやすく, 水素濃度が低いと火炎基部まで乱流状態に遷移せずに吹き飛ぶ。

(3)希釈された水素を用いた場合, 周囲流を伴う火炎は浮

き上がり現象を発生せずに吹き飛びに至る. また, H₂:N₂=30:70 の希釈水素を用いた場合では, 火炎上流部も乱流に遷移せずに吹き飛ぶ傾向が見られる。

(4) 希釈水素では水素濃度が低いほど温度が低下し, 周囲流を伴うことで, 最高温度点が中心軸に近付き, 火炎が細くなる傾向が見られた。

4.2 逆拡散火炎

(1)周囲流の水素濃度が低下すると火炎色が薄くなり, 空気速度が小さいとき水素濃度が高い燃料を用いた場合に比べて火炎長さが長くなる。

(2)周囲流の水素濃度が高いと浮き上がりにくくなる。

参考文献

- (1)B.K.Jung, S.Torii, T.Yano and Y.Yatusiro. Fourth JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol.2, pp65-69, 2000.
- (2) 吉本隆光, 安本祐治, 北村英樹ほか2名, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp170-171, 2006.
- (3) 安本祐治, 吉本隆光, 北村英樹, 塩島史哉, 永田雄一, 日本高専学会誌 Vol.12 NO2, 第1回論文集, pp23-26, 2007.
- (4)T.Yoshimoto,D.Ito,H.Kitamura,H.Shiosima,Y.Yasumoto and T.Takagi, 31st International Symposium on Combustion, WIPP 377, 2006.
- (5) 伊藤大介, 吉本隆光, ほか3名, 日本機械学会関西支部第80期総会一般講演論文集, pp12-53・54, 2005
- (6) 川見唯, 吉本隆光, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究講演論文集, pp19-2, 2008.
- (7) 久保直志, 吉本隆光, ほか3名, 第42回燃焼シンポジウム講演論文集, pp167-168, 2004.