

円筒状拡散火炎の消炎*

末永陽介*¹, 北野三千雄*², 柳岡英樹*³

Extinction of Cylindrical Diffusion Flame

Yosuke SUENAGA*⁴, Michio KITANO and Hideki YANAOKA⁴Department of Mechanical Engineering, Hachinohe National College of Technology,
16-1 Uwanotai, Tamonoki, Hachinohe-shi, Aomori, 039-1192 Japan

An experimental study was performed on the behavior and extinction characteristics of the cylindrical diffusion flame affected by both factors of stretch and curvature. The cylindrical diffusion flame treated here has the convex curvature toward the air stream. The fuels used were propane and methane, and they were diluted with two kinds of inert gas, nitrogen and helium. The obtained results are described as follows. (1) The burner used in this study can form the cylindrical flame with good circularity. The minimum flame diameter is approximately 2.5 mm. (2) The flame radius increases (decreases) with the increase in the fuel (air) flow velocity. (3) Flame luminosity has a maximum value when the air flow velocity is varied. On the other hand, the luminosity decreases monotonously with the increase in the fuel flow velocity. (4) Extinction stretch rate of counterflow propane 20%/nitrogen 80% vs. air flame is lower than that of counterflow methane 50%/nitrogen 50% vs. air flame. However, this extinction stretch rate relation is reversed in the case of cylindrical diffusion flame owing to the Lewis number effect caused by the flame curvature. (5) When the Lewis number of fuel flow is considerably larger than unity, the cylindrical diffusion flame can be formed even at the dilution rate with which the counterflow diffusion flame cannot be formed.

Key Words: Diffusion Flame, Extinction, Cylindrical Flame, Flame Stretch, Curvature

1. 緒言

一般に、高負荷燃焼器には乱流火炎が用いられているが、安全性などの観点から自己伝播性のない拡散燃焼方式が多く用いられている。乱流拡散火炎の構造は伸長・収縮を受ける曲率を持った層流火炎子の集合体として考えられており⁽¹⁾、伸長や曲率が層流拡散火炎に及ぼす影響について多くの研究が行われている⁽²⁾⁻⁽¹⁶⁾。

速度勾配に起因する伸長のみの効果を受ける火炎に関する研究として、Tsuji Burner や対向流ノズルバーナを用いた研究があり、対向流拡散火炎の構造と消炎に関する基本特性や希釈剤が消炎特性に及ぼす影響について調査されている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。また、乱流火炎の非定常性を考慮して、速度の正弦波的振動が対向流拡散火炎

に及ぼす影響について調査されている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。これらの研究から速度変動周波数がある値を超えると、ある瞬間において定常火炎の消炎伸長率を超えても完全消炎に至らないことが報告されている。対向流拡散火炎に曲率の効果を与えた研究も幾つかある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。その一つに、対向流平面拡散火炎の中心にマイクロジェットを噴射したときの、火炎凸部の構造に関する研究がある⁽¹⁰⁾。この研究によると、燃料に水素、酸化剤に空気を用いた場合、酸化剤側からジェットを噴射したときの燃料側に凸部の火炎強度は、燃料側からジェットを与えた場合よりも、選択拡散効果のために強められることが報告されている。ごく最近の研究として、円筒座標系において、中心軸から周囲へ燃料(酸化剤)を、周囲から中心軸方向へ酸化剤(燃料)をそれぞれ供給して形成される軸方向に伸長する円筒状拡散火炎に関する研究がある⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。燃料を不活性ガスで希釈し、燃料流と酸化剤流のレイス数が火炎の様子と消炎に及ぼす影響について調査している。この実験研究において、燃料流のレイス数によっては火炎がしわ状になること、中心軸から周囲へ水素-窒素混合気を吹出した場合、

* 原稿受付 2010年3月23日。

¹ 正員, 八戸工業高等専門学校機械工学科(☎039-1192 八戸市大字田面木字上野平16-1)。² 正員, フェロー, 岩手大学工学部(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5)。³ 正員, 岩手大学工学部。

E-mail: suenaga-m@hachinohe-ct.ac.jp

伸長率の増加につれて、火炎曲率に起因するルイス数効果のために、対向流火炎の温度よりも低くなること、中心軸から空気を吹出した場合はその傾向が逆転すること、燃料に炭化水素を用いた場合、火炎曲率に起因するルイス数効果が非常に小さくなることが示されている。しかしながら、この研究で観察される火炎の直径は、最小でも約 10mm と大きく⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾、火炎曲率が火炎の特性に及ぼす影響を明確に示すには、高い曲率を有する火炎を形成して実験を行う必要があると考える。したがって、本研究では、これまでに報告されている研究で用いられた火炎よりも真円度が良く、高い曲率を有する円筒状拡散火炎を形成させることのできるバーナを用い、燃料流および酸化剤流の流速が火炎の様子と消炎に及ぼす影響について実験的に研究する。本研究では燃料を不活性ガスで希釈するが、不活性ガスの種類が消炎に及ぼす影響についても調査する。

2. 実験装置および方法

図 1 に燃焼器の概略を示す。燃焼器は円筒状予混合火炎に関する研究で用いられた半径流ノズルバーナ⁽¹⁶⁾とその中心軸上に設置された外径 1.2mm のステンレス管からなる。半径流ノズルバーナの出口は幅 10mm、直径 12mm であり、酸化剤が中心軸へ向かって流出する。一方、その中心軸上に設置したステンレス管(以降、燃料管と呼ぶ)の側面には直径 0.3mm の穴が周方向に 8 個放射状にあげられており、これが軸方向に 1mm 間隔で 11 列並んでいる。この穴から放射状に燃料流が流出する。燃料流と酸化剤流の間によみ面が形成され、これに着火することで円筒状拡散火炎が形成される。なお、周囲空気と火炎とを隔離するために、酸化剤供給口の両側から窒素流を供給している。また、この燃料管の過熱を抑えるため、燃料吹出し口の上流側に水冷装置とエアーカーテンを設置している。燃料にはプロパンとメタンの 2 種類を、酸化剤には空気を使用した。なお燃料の希釈剤には窒素とヘリウムを用いた。希釈率 x_f の定義は $x_f = Q_d / (Q_f + Q_d) \times 100 [\%]$ である。ここで、 Q_d と Q_f はそれぞれ不活性ガスと燃料の供給流量である。表 1 は本実験条件について、燃料・不活性ガス混合気の希釈率 x_f とその燃料流のルイス数 Le_f (=燃料流の熱拡散率/不活性ガスに対する燃料の拡散係数)を示しており、 Le_f は文献(6)と(15)の結果を近似して求めた。なお、本研究では浮力の影響を考え、バーナの中心軸が重力と同じ方向になるよう設置した。

各燃料流速および酸化剤流速における火炎は燃焼器の下方からビデオカメラ(撮影速度:60FPS)で撮影し、画像解析から火炎半径 r_f を求めた。また、燃焼強度を

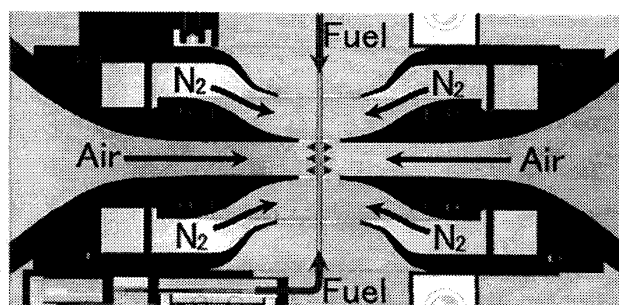


Fig. 1 Schematic of cylindrical diffusion flame burner

Table 1 Lewis number of fuel-diluent mixture

Dilution rate, x_f [%]	50	70	80	85	90
Le_f of $\text{CH}_4\text{-N}_2$	1.05	1.03	/	/	/
Le_f of $\text{CH}_4\text{-He}$	/	1.27	/	/	/
Le_f of $\text{C}_3\text{H}_8\text{-N}_2$	/	/	1.39	1.48	/
Le_f of $\text{C}_3\text{H}_8\text{-He}$	/	/	/	1.84	2.32

表す一つの尺度として考えられる火炎輝度 L_f (明るさ 256 階調)も求めた。消炎実験は次の方法で行った。火炎は燃料吹出し速度 v_f を一定とし、半径流ノズルバーナ出口における空気流速 v_a を徐々に増加させることで消炎させ、このときの v_a を消炎時空気流速 $v_{a,ext}$ とした。ここで、 v_f は供給する燃料-不活性ガス混合気の流量を燃料吹出し用の小穴を含む長さ 10mm にわたる燃料管の表面積で除した値とした。消炎時火炎半径 $r_{f,ext}$ は、消炎前の各 v_f における v_a と r_f の結果を外挿して求めた。伸長率は次のように定義した。本研究で対象とする火炎は、流れの速度勾配と火炎曲率による伸長を受けるが、中心から半径方向を r とし、流れ場をポテンシャル流れで近似したとき、半径方向速度 v_r は次式のように表される。

$$v_r = -g \cdot r + \frac{m}{2\pi\rho r} \quad (1)$$

ここで、 m は中心軸からの単位長さあたりの線吹出し量、 g は火炎面に垂直方向の速度勾配、 ρ は密度である。式(1)に燃料管吹出し部半径 $r=R_i$ における速度 $v_r=v_f$ 、空気側吹出し部半径 $r=R_o$ における速度 $v_r=-v_a$ をそれぞれ代入し整理すると、

$$g = \frac{(R_o \cdot v_a + R_i \cdot v_f)}{(R_o^2 - R_i^2)} \quad (2)$$

が得られ、全伸長率 ϵ は、速度勾配に起因する伸長の効果と曲率に起因する伸長の効果を受けるので、

$$\varepsilon = 2 \cdot g \quad (3)$$

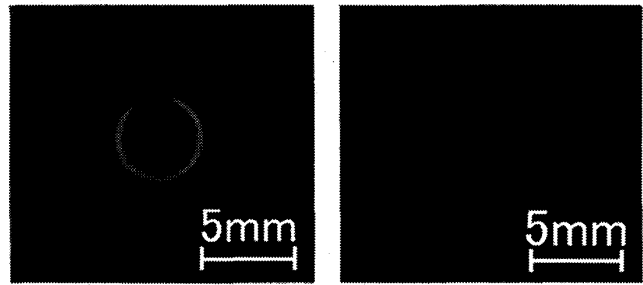
となる。なお、本研究における x_f の範囲においては、火炎は酸化剤側に形成される。消炎伸長率 ε_{ca} は消炎時における v_a と v_f を式(2), (3)に代入して算出した。

3. 結果および考察

3-1 火炎の様子 図2に本研究で得られた火炎の一例を示す。図2(a)は燃料にプロパンを用い、燃料の希釈率 x_f は80%, 燃料吹出し速度 v_f は20cm/s, 空気流速 v_a は10cm/sである。図2(b)は燃料にメタンを用いた、 $x_f=50\%$, $v_f=80\text{cm/s}$, $v_a=60\text{cm/s}$ の火炎である。なお、希釈剤には窒素を用いている。いずれの火炎も上部が切れているようにみえるが、これは燃料管が重なっているためである。図より燃料の種類によらず火炎の真円度が良いことがわかる。本実験条件で得られる火炎は全て、写真のように真円度が高く、一様性に優れており、Hu et al.の研究¹³⁾⁽¹⁵⁾で示されたセル状の火炎は観測されない。また、本研究で観察された火炎の最小直径は約2.5mmであり、先の研究¹³⁾⁽¹⁵⁾で観察された火炎直径の約1/4である。消炎実験においては、火炎は局所消炎することはなく、火炎全体が瞬時に消炎する。

3-2 火炎半径と火炎輝度 図3は、希釈率 $x_f=80\%$ のプロパン-窒素/空気火炎について、図3(a)は燃料吹出し速度 $v_f=20\text{cm/s}$ と 50cm/s における空気流速 v_a に対する火炎半径 r_f と火炎輝度 L_f を示しており、図3(b)は $v_a=30, 50, 80\text{cm/s}$ における v_f に対する r_f と L_f を示している。 v_a と v_f が r_f に及ぼす影響について比較すると、図3(a)より、 v_a の増加につれて、 r_f ははじめ大きく減少し、さらに v_a が増加するにつれてその変化は緩やかになる。一方、図3(b)では v_f の増加につれて、 r_f は増加しているが、同じ流速範囲の v_a に対する r_f と比較したとき、 v_f に対する r_f の変化の方が小さい。この流速域におけるよどみ面位置 r_s を式(1)と(2)から評価したとき、 v_f に対する r_s の変化は、 v_a に対するものより小さく、図3の結果と定性的に一致している。次に、 v_a と v_f が L_f に及ぼす影響について比較する。図3(a)の v_a に対する L_f の変化は、 v_a の増加につれて r_f は減少するので、火炎は燃料管に近づき、熱損失のために火炎は弱くなることが予想されたが、 v_a の増加につれて L_f は一度増加しており、燃焼強度が強くなっているようにみえる。しかしながら、ある v_a に達すると L_f は減少しており燃焼強度が弱まるようにみえる。一方、図3(b)において、 v_f が増加するにつれて L_f は単調に減少している。

この原因についてルイス数 $Le_i (=a/D_i)$ (a : 混合気の熱拡散率, D_i : 反応物質 i の物質拡散係数) を用いて考察する。一般に、ルイス数がよどみ流火炎に及ぼす



(a) $\text{C}_3\text{H}_8\text{-N}_2$ vs. air flame

(b) $\text{CH}_4\text{-N}_2$ vs. air flame

Fig.2 Images of cylindrical diffusion flame (Experimental conditions, (a): $x_f=80\%$, $v_f=20\text{cm/s}$, $v_a=10\text{cm/s}$. (b): $x_f=50\%$, $v_f=80\text{cm/s}$, $v_a=60\text{cm/s}$)

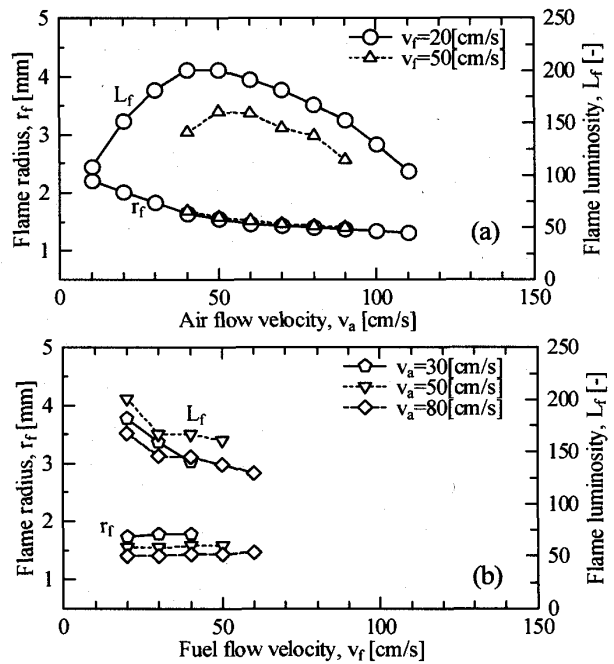


Fig.3 Effect of air and fuel flow velocity on flame radius and luminosity ($\text{C}_3\text{H}_8\text{-N}_2$ vs. air flame, $x_f=80\%$)

影響を議論する際、流管壁を介しての熱の流出と物質の流入を考える。すなわち、 $Le_i > 1$ のとき、熱の流出量は物質の流入量よりも大きいので火炎は弱められる。 $Le_i < 1$ のときはその逆となる。しかしながら、円筒状火炎の場合、火炎の内側と外側とでは熱および物質の輸送形態が平面火炎と異なる。すなわち、火炎より内側では熱は反応物質に対して集中的に供給されるのに対し、物質は火炎へ発散的に供給される。本研究で用いた空気流中の酸素のルイス数 Le_o はほぼ1であり、燃料流のルイス数 Le_f は1よりも大きい。したがって、火炎から燃料側への熱の集中による予熱の効果が大きく作用する。この予熱効果は r_f が小さいほど顕著になる。したがって、 v_a が小さい領域において、 v_a の増加

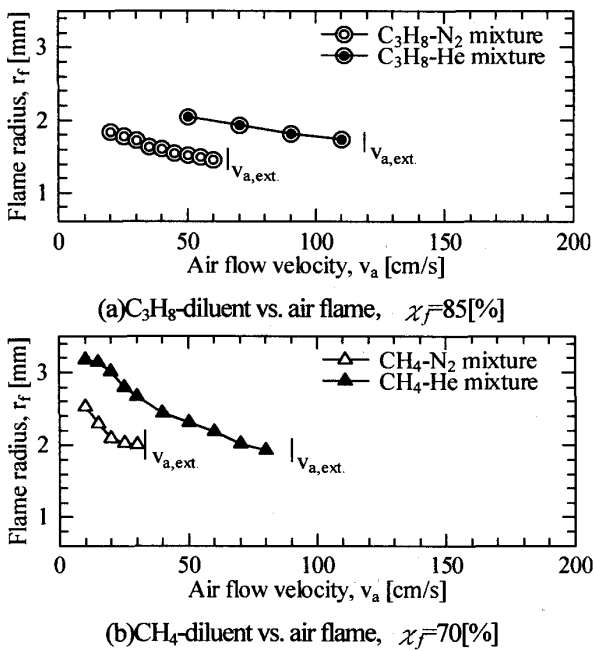


Fig.4 Influence of diluents on flame radius ($v_f=30\text{cm/s}$)

につれて r_f は減少するので、火炎は強められる。しかしながら、 v_a がある値を超えると、反応速度の限界値のために、反応物質は火炎面で完全反応しないまま火炎面を通過するようになり、不完全燃焼が起こる⁽³⁾。したがって、燃焼強度は弱くなる。また、 v_a の増加は火炎面と燃料管との距離を減少させるので、燃料管による熱損失の効果も予想される。これらの効果が、 v_a の大きい領域において強く現れ、燃焼強度を低下させる。一方、 v_f の増加は r_f を増加させ、燃料管による熱損失の効果小さくするが、予熱効果も小さくする。したがって、 v_f の増加につれて L_f は単調に減少したと考えられる。なお、図 3(a)において、 v_f が大きい方が r_f も大きい、その違いは v_f が L_f に及ぼす影響に比べてかなり小さい。この原因について、更なる調査が必要である。

3・3 希釈剤が火炎半径に及ぼす影響 図 4(a),

(b) はそれぞれ、燃料にプロパンとメタンを用い、希釈剤に窒素とヘリウムを用いたときの、空気流速 v_a が火炎半径 r_f に及ぼす影響について示している。いずれも燃料吹出し速度 v_f は 30cm/s である。なお、図中には $v_{a,ext}$ も示している。 v_f と v_a が同じ場合、ヘリウムで希釈した燃料流の運動量は、窒素で希釈したものより小さいので、よどみ面位置は燃料管側に接近し、 r_f も小さくなると予想されたが、本実験結果はこれと逆の傾向を示している。この原因について、理論混合分率 Z_{st} を用いて考察する。 Z_{st} は次式で定義される⁽¹⁷⁾。

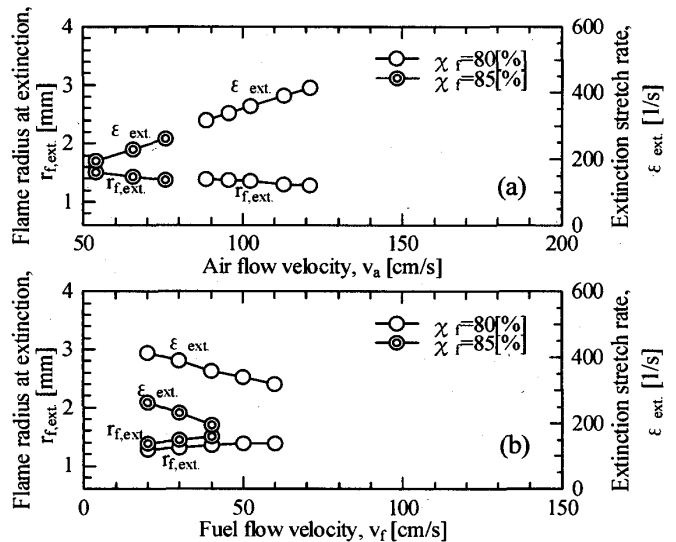


Fig.5 Effect of fuel and air flow velocity on extinction stretch rate and flame radius of $C_3H_8-N_2$ vs. air flame

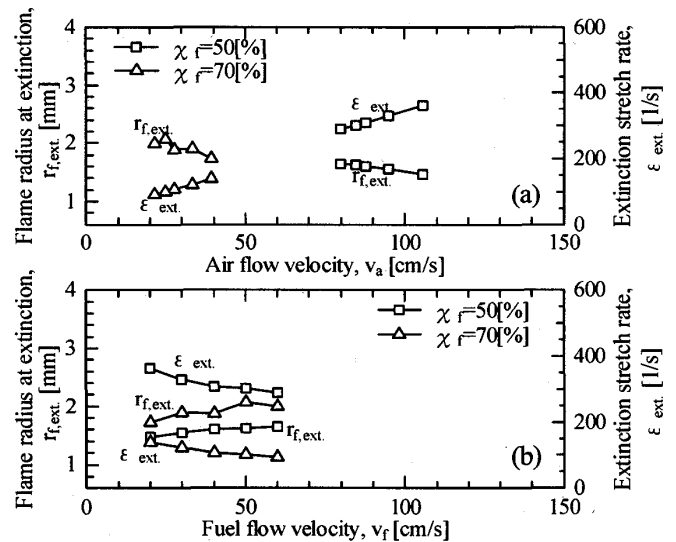


Fig.6 Effect of fuel and air flow velocity on extinction stretch rate and flame radius of CH_4-N_2 vs. air flame

$$Z_{st} = \left[1 + \frac{Y_{f,\infty} W_o v_o}{Y_{o,-\infty} W_f v_f} \right]^{-1} \quad (4)$$

ここで、 Y , W , v はそれぞれ、質量分率、分子量、量論係数であり、添え字の f と o はそれぞれ燃料、酸素を、 ∞ , $-\infty$ は初期条件を表す。対向流平面火炎の場合、 $Z_{st} < 0.5$ のとき、火炎面は酸化剤流中に形成され、 $Z_{st} > 0.5$ のときは、火炎は燃料流中に形成される。式(4)から、 $\chi_f=85\%$ のプロパン-窒素火炎とプロパン-ヘリウム火炎の Z_{st} はそれぞれ、 0.228 と 0.075 あり、 $\chi_f=70\%$ のメタン-窒素火炎とメタン-ヘリウム火炎の Z_{st} はそれぞれ、 0.228 と 0.070 である。したがって、そ

れぞれの燃料における、ヘリウム希釈火炎の Z_w は窒素希釈火炎の Z_w よりかなり小さく、このことが、同じ v_a においてヘリウム希釈火炎の r_f を大きくさせた主な原因である。また、ヘリウム希釈火炎の $v_{a,ext}$ は、窒素希釈火炎よりも大きい。これには火炎曲率と燃料流のレイス数とが関係しており、この考察は後述する。

3.4 燃料および酸化剤の流速が消炎に及ぼす影響

図5, 6はそれぞれ、希釈剤に窒素を用いた場合のプロパンおよびメタン火炎について、希釈率 χ_f を変化させたときの、(a)は空気流速 v_a が、また(b)は燃料吹出し速度 v_f が消炎時火炎半径 $r_{f,ext}$ と消炎伸長率 ε_{ext} に及ぼす影響について示している。図5(a), 6(a)より、 v_a の増加につれて ε_{ext} は増加し、 $r_{f,ext}$ は減少している。一方、図5(b), 6(b)によると v_f の増加につれて ε_{ext} は減少し、 $r_{f,ext}$ は増加している。したがって、 $r_{f,ext}$ が小さいほど消炎しにくいことがわかる。Hu et al.の研究⁽¹³⁾において、メタン火炎の場合、燃料流のレイス数は $Le_f \approx 1$ であり、レイス数効果はほとんど表れないと報告されているが、本研究で対象とする火炎は、真円度が良くかなり細いためか、 Le_f が1よりわずかに大きいメタン火炎でも、火炎から燃料側への熱の集中による予熱の効果が火炎を強め、 $r_{f,ext}$ が小さいほど ε_{ext} は大きくなっている。

3.5 消炎伸長率と消炎時火炎半径 図7は消炎時火炎半径 $r_{f,ext}$ に対する消炎伸長率 ε_{ext} を示している。

図7(a)は希釈剤に窒素を用いたときのプロパン火炎とメタン火炎の χ_f がそれぞれ、80%と50%の結果を示している。なお、 v_f は20cm/s~60cm/sの範囲を10cm/s間隔で変化させている。燃料を窒素で希釈した場合の対向流平面拡散火炎の消炎伸長率 ε_{ext} は、 $\chi_f=80\%$ のプロパン火炎の方が $\chi_f=50\%$ のメタン火炎よりも低い⁽⁶⁾。しかしながら、円筒状拡散火炎の場合、 v_f が同じときの ε_{ext} を比較すると、プロパン火炎の ε_{ext} の方がメタン火炎よりも高い。これらの燃料流のレイス数 Le_f は、 $\chi_f=80\%$ のプロパン火炎で1.39、メタン火炎で1.05である。したがって、燃料の種類が異なっても燃料流のレイス数 Le_f が大きい場合、火炎から燃料側への熱の集中効果に起因する予熱の効果が大きく働き、対向流平面火炎で得られた結果と逆の結果を示すことがある。しかしながら、 $v_f=20\text{cm/s}$ における2つの火炎の ε_{ext} の差は約 50 s^{-1} であるが、 $v_f=60\text{ cm/s}$ において、その差は約 30 s^{-1} と小さくなっている。したがって、 r_f の増加は、火炎から燃料側への熱の集中効果を小さくするので、その特性は対向流平面火炎に近づくことになる。

図7(b)は燃料にプロパンを用いたときの希釈剤が消炎特性に及ぼす影響を示している。窒素希釈火炎は $v_f=20\sim 40\text{cm/s}$ の範囲を10cm/s間隔で、ヘリウム希釈火炎は $v_f=20\sim 45\text{cm/s}$ の範囲を5cm/s間隔で変化させ

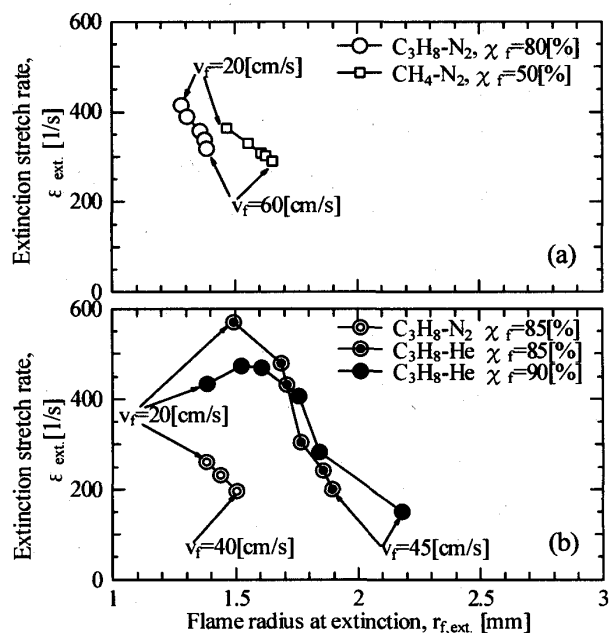


Fig.7 Relationship between flame radius and stretch rate at extinction

ている。同じ $\chi_f=85\%$ で比較すると、 $v_f=20\text{cm/s}$ のヘリウム希釈火炎の ε_{ext} と $r_{f,ext}$ はそれぞれ、 570 s^{-1} 、 1.5mm であり、窒素希釈火炎よりも ε_{ext} が 300 s^{-1} 大きく、 $r_{f,ext}$ は約 0.1mm 大きい。しかしながら、 $v_f=40\text{cm/s}$ のヘリウム希釈火炎の ε_{ext} と $r_{f,ext}$ はそれぞれ、 240 s^{-1} 、 1.85mm となっており、窒素希釈火炎の ε_{ext} との差は約 50 s^{-1} まで減少し、 $r_{f,ext}$ の差は 0.35mm に増加している。このように、火炎曲率が燃焼強度に及ぼす影響は、火炎半径が数 mm の領域において、わずかな変化で大きく現れる。また、燃料流の希釈剤を種々変化させたときの対向流平面拡散火炎の消炎特性に関する研究によると、プロパン燃料をヘリウムで希釈した場合、希釈率の増加につれて消炎伸長率は直線的に減少し、 χ_f が85%を超えると火炎は形成できていない⁽⁶⁾。しかしながら、本研究において、対向流平面火炎が形成できない $\chi_f=90\%$ でも円筒状ヘリウム希釈火炎が形成できている。このときの燃料流のレイス数は $Le_f=2.32$ であり、高い火炎曲率を有する円筒状火炎は、対向流平面火炎の燃焼強度よりも強められることがあることを示す結果といえる。また、ヘリウム希釈火炎において、 $\chi_f=85\%$ と 90% の同じ v_f における ε_{ext} を比較すると、 $v_f=30\sim 40\text{cm/s}$ の範囲において、 $\chi_f=90\%$ の ε_{ext} が $\chi_f=85\%$ よりも大きく、火炎曲率とレイス数の大きさによっては燃焼強度が逆転することも示された。最後に、これまでに観察されている $r_{f,ext}$ に対する ε_{ext} の変化は、 $r_{f,ext}$ の減少につれて ε_{ext} は単調に増加していたが、 $\chi_f=90\%$ の ε_{ext} は $r_{f,ext}$ に対して極大値を

もつ。これは、 v_f が小さい領域において、燃料管による火炎の冷却効果が大きく現れた結果である⁽⁹⁾。なお、 $x_f=85\%$ の窒素希釈火炎は、 $r_{f,ext}$ の減少につれて ε_{ext} が単調増加しており、ヘリウム希釈火炎のように ε_{ext} の極大値が見られない。これは窒素希釈火炎の燃料流の熱拡散率がヘリウム希釈火炎より小さく、 r_f が同じでも燃料管の冷却効果が小さいためである。したがって、燃料管の焼損を避ける観点から実験は行っていないが、窒素希釈火炎は $r_{f,ext}$ がより小さいところで、 ε_{ext} の極大値が現れるものと予想される。

本研究で対象とした円筒状火炎は、速度勾配と火炎曲率に起因する2つの伸長の効果を受け、対向流平面拡散火炎が受ける伸長の効果より大きく、流れ場をポテンシャル流れで近似した場合、円筒状火炎の伸長率は対向流火炎の2倍となる。先の研究においては、燃料にメタンおよびプロパンを用いた場合、火炎曲率に起因するルイス数効果は非常に小さくしか現れないとの報告であった⁽¹⁴⁾。しかしながら、真円度が良く高い曲率を有する円筒状火炎を形成できるバーナを用いることによって、火炎曲率に起因するルイス数効果が、対向流平面火炎の燃焼強度よりも大きく強められることを示すことができた。

4. 結 言

円筒状拡散火炎バーナを用いて、中心軸から周囲方向へ燃料を、周囲から中心軸方向へ空気を供給したときの、それぞれの吹出し速度が火炎半径、火炎輝度、消炎伸長率、消炎時火炎半径に及ぼす影響について調査した。燃料はプロパンとメタン、酸化剤は空気をを用いた。燃料は窒素とヘリウムで希釈した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で使用した円筒状拡散火炎バーナは、真円度の良い火炎を形成させることができ、直径約2.5mmの細い火炎が観測された。
- (2) 燃料の吹出し速度が増加すると火炎半径は大きくなり、空気流速が増加すると火炎半径は減少する。
- (3) 空気流速に対する火炎輝度は極大値をとるが、燃料の吹出し速度に対する火炎輝度は単調に減少する。
- (4) 消炎伸長率は空気流速の増加につれて高くなり、逆に、燃料吹出し速度の増加につれて低くなる。
- (5) 燃料を窒素で希釈した希釈率80%の対向流プロパン火炎は、希釈率50%の対向流メタン火炎よりも消炎伸長率が低い。円筒状火炎の場合、火炎曲率に起因するルイス数効果により燃焼強度は逆転する。
- (6) 燃料流のルイス数がかなり大きいとき、対向流平面拡散火炎が形成できない希釈率においても、円筒状拡散火炎を形成することができる。

文 献

- (1) Peters, N., Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.21, (1986), pp.1231-1250.
- (2) Tsuji, H., Yamaoka, I., The Counterflow Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.11, (1967), pp.979-984.
- (3) Tsuji, H., Yamaoka, I., The Structure of Counterflow Diffusion Flames in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.12, (1969), pp.997-1005.
- (4) Otsuka, Y., Niioka, T., The One-Dimensional Diffusion Flame in a Two-Dimensional Counter-Flow Burner, *Combustion and Flame*, Vol.21, (1973), pp.163-176.
- (5) Ishizuka, S., Tsuji, H., An Experimental Study of Effect of Inert Gases on Extinction of Laminar Diffusion Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.18, (1981), pp.695-703.
- (6) Chen, R.-H., Chaos, M., Kothawala, A., Lewis Number Effects in Laminar Diffusion Flames Near and Away from Extinction, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.31, (2007), pp.1231-1237.
- (7) Kister, J.S., Sung, C. J., Nishioka, M., Law, C. K., On Extinction of Counterflow Diffusion Flames under Velocity Oscillations, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.26, (1996), pp.113-120.
- (8) Brown, M. K., Pitz, R. W., Sung, C. J., Oscillatory Stretch Effects on the Structure and Extinction of Counterflow Diffusion Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.27, (1998), pp.703-710.
- (9) Lee, U. D., Shin, H. D., Oh, K. C., Lee, K. H., Lee, E. J., Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flames Affected by Velocity Change, *Combustion and Flame*, Vol.144, (2006), pp.792-808.
- (10) Yoshida, K., Takagi, T., Transient Local Extinction and Reignition Behavior of Diffusion Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.27, (1998), pp.685-692.
- (11) Finke, H., Grunefeld, G., An Experimental Investigation of Extinction of Curved Laminar Hydrogen Diffusion Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.28, (2000), pp.2133-2140.
- (12) Wang, P., Hu, S., Pitz, R. W., Numerical Investigation of the Curvature Effects on Diffusion Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.31, (2007), pp.989-996.
- (13) Hu, S., Wang, P., Pitz, R. W., Smooke, M.D., Experimental and Numerical Investigation of Non-Premixed Tubular Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.31, (2007), pp.1093-1099.
- (14) Hu, S., Pitz, R. W., Structural Study of Non-Premixed Tubular Hydrocarbon Flames, *Combustion and Flame*, Vol.156, (2009), pp.51-61.
- (15) Hu, S., Pitz, R. W., Wang, Y., Extinction and Near Extinction Instability of Non-Premixed Tubular Flames, *Combustion and Flame*, Vol.156, (2009), pp.90-98.
- (16) Kobayashi, H., Kitano, M., Extinction Characteristics of a Stretched Cylindrical Premixed Flame, *Combustion and Flame*, Vol.76, (1989), pp.285-295.
- (17) Du, J., Axelbaum, R. L., The Effects of Flame Structure on Extinction of $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-N}_2$ Diffusion Flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.26, (1996), pp.1137-1142.