

多噴孔ノズルバーナの燃焼特性と燃焼排出物の評価*

山本和弘^{*1}, 鈴木祐夢^{*2}, 商海^{*2}

Combustion Characteristics of a Multiple Port Nozzle Burner and Evaluation on Combustion Products

Kazuhiro YAMAMOTO^{*1}, Hiromu SUZUKI, Hai SHANG

^{*4}Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, we investigated combustion characteristics and flame structure of a multiple port nozzle burner. We measured combustion products of soot and NO_x. The multiple port nozzle burner has 4 fuel nozzles and 9 air nozzles, where one air nozzle is located at the center (inner) of the burner, surrounded by four fuel nozzles and eight air nozzles outside of the fuel nozzles. Several diffusion flames are formed in the boundary of fuel and air flows. Fuel was methane or propane. A laser-induced incandescence (LII) technique was used to detect soot regions in the luminous flame zone. For comparison, a so-called jet diffusion flame in a co-axial burner was also examined. Results show that, as inner or outer air flow velocity is increased with fixed fuel flow velocity, the flame height becomes smaller. At the critical air flow velocity, the inner and outer flames are lifted. There are three flame configurations. Namely, attached flames, inner lifted/outer attached flames, and twin lifted flames. When the flame is lifted, the maximum soot concentration and NO_x emission are decreased. Interestingly, the soot concentration of the multiple port nozzle burner is much smaller than that of the co-axial burner, although the NO_x emission of both burners is almost the same.

Key Words : Burner, Combustion Products, Gaseous Fuel, Lifted Flame, Soot, NO_x

1. 緒 論

近年、地球温暖化や大気汚染などの環境問題が深刻化している。燃焼場からはすすや NO_x などの有害な物質が発生するため、その対策が必要である⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、ディーゼル車から排出されるナノ粒子は、喘息や肺がんを引き起こすことが知られている⁽³⁾。通常、ディーゼルエンジンや業務用バーナなどの実用燃焼器には拡散燃焼が広く利用されている。燃料と酸化剤を別々に供給する燃焼形態の拡散燃焼では、燃料流量と空気流量から与えられる総括当量比を小さくしても、火炎が量論の位置で形成されるため火炎温度や局所の当量比を制御できず、すすや NO_x の低減が困難である。

これまでに様々な低減方法が検討されてきた。例えば、濃淡燃焼⁽⁴⁾、炉内循環渦を利用した燃焼⁽⁵⁾、振動燃焼⁽⁶⁾が挙げられる。最近では、小泉らが同軸噴流クラスタバーナを利用した研究を行っており、燃料と酸化剤の予混合距離と NO_x 排出特性に関する検討を行っている⁽⁷⁾。今枝らはマイクロ波照射が拡散火炎中のすす分布に与える影響を検討している⁽⁸⁾、また、我々の研究グループでは、三重管バーナを用いた研究を行ってきた⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。三重管バーナでは、燃料ノズルの内側と外側に空気ノズルを同軸で配置している。燃料流の内側に酸化剤を供給することにより、いわゆる同軸流バーナとは異なる燃焼特性を示すことが明らかとなっている⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾。三重管バーナでは、燃料と酸化剤の接触面積が大きいと、両者の混合と反応が促進されてすすや NO_x の排出量を抑制できる。

三重管バーナでは、燃料ノズルと2つの空気ノズルを同軸に配置した構造になっているが、実用燃焼器への拡張性を考えた場合には、燃料と酸化剤のノズルを多数配置できるほうがよいと思われる。そこで、三重管バーナと同様、バーナの中央に空気ノズルを1つ配置し、その周囲に4つの燃料ノズルを、さらにその周囲に空気ノズル

* 原稿受付 2013 年月日

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科

E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

ルを配置することで、多数の燃料と空気のノズルからなる多噴孔ノズルバーナを新たに製作した。燃料と酸化剤のノズルを多数配置すると流れや混合が複雑になることが予想されるが、このような燃焼場の火炎構造や燃焼特性を調べた研究はほとんどない。そこで本研究では、多噴孔ノズルバーナを用いて燃焼特性と燃焼排出物の計測を行った。今回は、内側と外側の空気流速を変化させて火炎長さや火炎の浮き上がり高さを調べた。また、燃焼場におけるNOxとすすの排出特性を検討した。火炎中におけるすす濃度を調べるために、レーザ誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence, LII)を用いた^{(9),(18)-(23)}。燃料流量の異なる燃焼条件において排出されるNOxを評価するため、EINOx(NOx排出指数; Emission Index of NOx)⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を求めた。比較のため、燃料と空気のノズル出口面積が多噴孔ノズルバーナと同じ同軸バーナを作製し、すすとNOxを計測して多噴孔ノズルバーナの排出特性を明らかにした。

2. 実験装置

2・1 多噴孔ノズルバーナ

実験に用いた多噴孔ノズルバーナの概略を図1に示す。多噴孔ノズルバーナでは、中央に空気ノズル(内側空気ノズル)、その周りに4つの燃料ノズル、さらに外側に8つの空気ノズル(外側空気ノズル)を配置している。各ノズルの噴出し口は同じ形状をしており、それぞれ一辺が3.2mmの正方形である。各ノズル間のリム厚は0.5mmとした。燃料にはメタンおよびプロパンを用いた。それぞれの流速を内側空気流速 U_{1A} 、燃料流速 U_{2F} 、外側空気流速 U_{3A} とする。実験では U_{2F} を一定とし、 U_{1A} と U_{3A} を変化させた。座標は、内側空気ノズルの出口中心を原点とし、半径方向に r 軸、高さ方向に z 軸とした。

比較のため同軸バーナを使用した。同軸バーナは中央に出口が円形の燃料ノズル、そのまわりに周囲流として空気ノズルが同軸で配置されている。それぞれの内径は7mm、14mmであり、リム厚は1mmである。燃料と空気のそれぞれに対し、同軸バーナのノズル出口面積が多噴孔ノズルバーナのノズル出口面積の合計とほぼ同じ値を持つように設計した。したがって、同軸バーナと多噴孔ノズルバーナの燃料と空気の流量を同じ値に設定すれば、流速も両バーナで同じにすることができる。同軸バーナでは燃料流速を U_F 、空気流速を U_A としたが、多噴孔ノズルバーナと比較するときは、燃料流速を多噴孔ノズルバーナと同じ値($U_F=U_{2F}$)にした。また空気流速についても、多噴孔ノズルバーナの内側と外側の空気流速をどちらも同軸バーナと同じ値($U_A=U_{1A}=U_{3A}$)にした。

2・2 燃焼排出物の計測

すす濃度の測定は、レーザ誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence, LII法)により行った。図2にLII法の光学系の概略図を示す。光源にはNd:YAGレーザ(Spectra Physics製PRO-230)の第2高調波(波長 $\lambda=532$ nm)を用いた。レーザの出力は260mJ/pulseとした。2枚のシリンドリカルレンズによりレーザをシート状にしてバーナ中心軸上に照射し、2次元の計測を行った。検出系にはイメージインテンシファイア付きCCDカメラ(浜松ホトニクス製C8484)を用いた。CCDカメラの画素数は1024×1024、画像の大きさは46mm×46mmである。信号はパソコンに取り込み、データの解析を行った。レンズにはバンドパスフィルター(透過中心波長400nm、半値幅10nm^{(12),(23)})を取り付けた。イメージインテンシファイアのゲート幅は、火炎からの自発光等のノイズを除去するため50nsに設定した。計測範囲は半径方向に $-23\leq r\leq 23$ mmとし、高さ方向には $0\leq z\leq 46$ mmと $46\leq z\leq 92$ mmの2つの範囲で計測した。

また、NOxの排出量も調べた。NOxの計測を行う場合は、パイレックスガラス管を用いて燃焼ガスを集め、排気口でガスサンプリングを行ってNOx濃度を求めた⁽²⁶⁾。燃料流量の異なる燃焼条件においても排出されるNOxを評価できるよう、EINOx(NOx排出指数; Emission Index of NOx)⁽²⁴⁾を求めて検討した。ただし、メタンとプロパンの2種類の燃料を用いているため、燃料と空気の全供給量から求めた総括当量比が同じになる燃料流量を選んで測定を行い、燃料による違いを比較した。

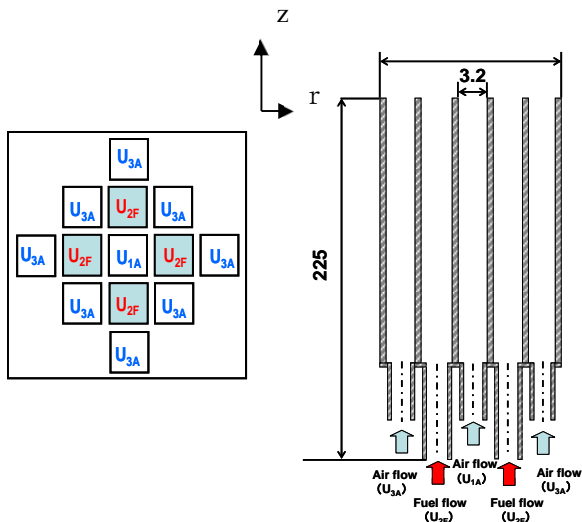


Fig.1 Multipleport nozzle burner

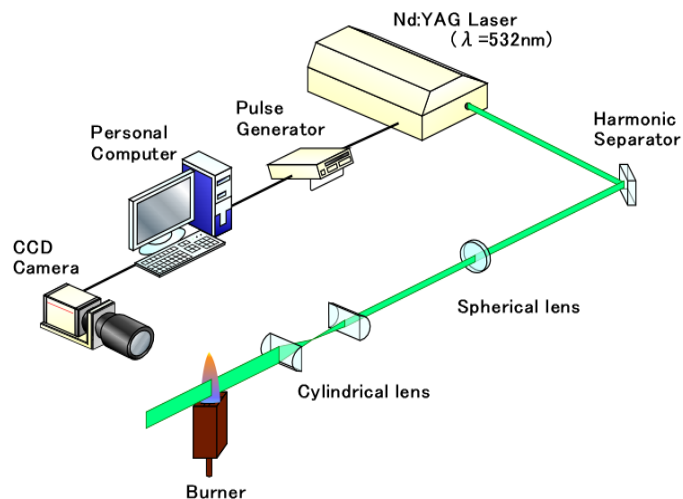


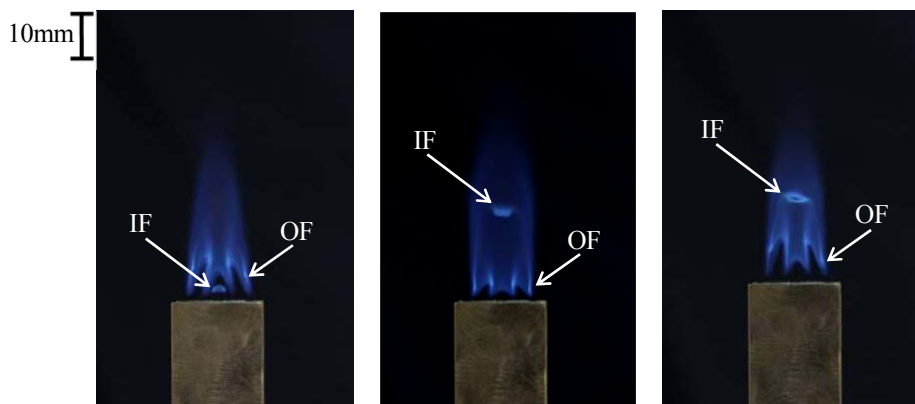
Fig.2 Schematic of LII system

3. 実験結果および考察

3・1 火炎概観

多噴孔ノズルバーナでは中央のノズルから空気を、その周囲の4つのノズルから燃料を、さらにその外にある8つのノズルから空気（外側空気）を供給する構造になっている。この場合、燃料と空気の境界が多数存在するため、バーナの上部に火炎が多数形成される。燃料がメタンとプロパンの場合の直接写真を図3と図4にそれぞれ示す。今回は燃料にメタンとプロパンの2種類の燃料を用いており、同じ空気の量を用いたと仮定すると燃料と空気の流量から計算した総括当量比が等しくなる条件で比較するためには、メタンとプロパンの燃料流速の比を5:2にすればよい。そこで、図3と図4では、燃料にメタンを用いた場合は10 cm/s、プロパンを用いた場合は4 cm/sとした。

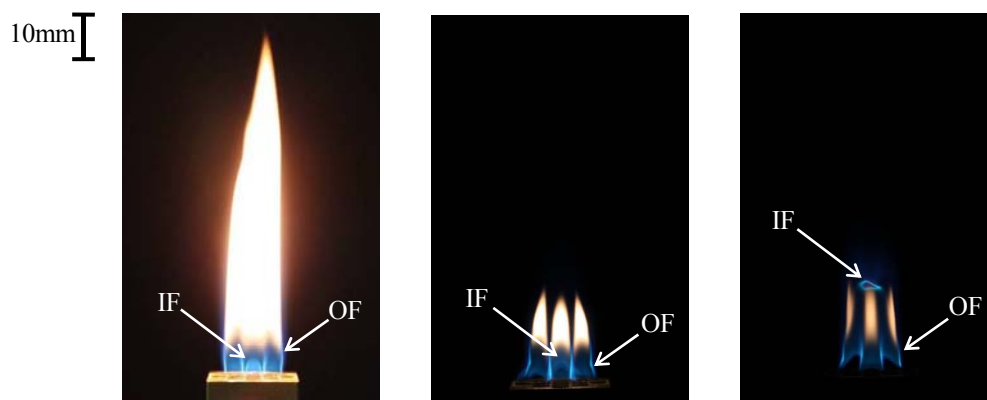
図3によれば、 $U_{1A}=20$ cm/s, $U_{3A}=100$ cm/s とすると、すべての火炎がノズル出口に付着した付着火炎(図3(a))ができた。一方、 $U_{1A}=40$ cm/s, $U_{3A}=50$ cm/s とすると、内側の火炎 (Inner Flame, IF) のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎(図3(b))となった。さらに、外側の空気を増加させて $U_{3A}=90$ cm/s とすると、内側の火炎 (IF) と外側の火炎 (Outer Flame, OF) がともに浮き上がる二重浮き上がり火炎(図3(c))が観察された。ただし、外側の浮き上がり火炎は非常に不安定であり、火炎の一部が振動しながら浮き上がるものの、三重管バーナ⁽¹²⁾のときに見られたように内側と外側の火炎全体が完全に浮き上がることはなかった。



(a) $U_{1A}=20$ cm/s, $U_{3A}=100$ cm/s, (b) $U_{1A}=40$ cm/s, $U_{3A}=50$ cm/s, (c) $U_{1A}=40$ cm/s, $U_{3A}=90$ cm/s

Fig.3 Photographs of flame in multiple port nozzle burner (CH_4 , $U_{2F}=10$ cm/s)

一方、燃料にプロパンを用いた場合の火炎写真を図4に示す。これによると燃料がプロパンの場合は、全体の大部分が輝炎であった。特に、燃料ノズルが4つあるため、4つの別々の火炎ができる場合と、合体して大きな火炎になる場合があった。図4(a)に一つの火炎が形成される写真を、図4(b)に4つの別々の火炎ができるときの写真を、図4(c)に内側の火炎のみが浮き上がっている写真を示す。プロパン火炎の場合は、中心空気流速 $U_{1A}=40$ cm/s、外側空気流速 $U_{3A}=80$ cm/s 前後に設定すると図4(b)のような火炎が形成される。それ以外では、 $U_{1A}=40$ cm/s 以下の条件では下流において合体した火炎が形成され、 $U_{1A}=50$ cm/s 以上の条件では内側の火炎のみが浮き上がることがわかった。



(a) $U_{1A}=20$ cm/s, $U_{3A}=40$ cm/s, (b) $U_{1A}=40$ cm/s, $U_{3A}=80$ cm/s, (c) $U_{1A}=50$ cm/s, $U_{3A}=90$ cm/s

Fig.4 Photographs of flame in multiple port nozzle burner (C_3H_8 , $U_{2F}=4$ cm/s)

3・2 火炎長さ

内側と外側の空気流速を変化させて火炎写真を撮影し、火炎長さについて調べた。ここでは、 U_{2F} をメタンの場合には 10 cm/s、プロパンの場合には 4 cm/s とした。燃料がメタンとプロパンのそれぞれに対し、内側と外側の空気流速を同じように変化させることで、異なる燃料に対しても総括当量比が同じ条件での比較が可能となる。そこで、外側空気流速を $U_{3A}=20, 50, 80, 100$ cm/s に設定し、内側空気流速 U_{1A} を 20 cm/s から 120 cm/s まで増加させたときの U_{1A} の変化に対する火炎長さ(H_f)の変化を調べた。2種類の燃料において得られた結果を図5に示す。火炎長さは一条件につき10枚の直接写真を撮り、それらの平均値で比較した。燃料がメタンの場合には、 $U_{3A}=20, 50, 80$ cm/s では、 U_{1A} を大きくすると火炎長さは短くなった。ただし、 $U_{3A}=100$ cm/s のときに U_{1A} を 30 cm/s とすると火炎長さが一時的に大きく減少した。さらに U_{1A} を増加させると火炎長さはほぼ一定になった。この一時的に火炎長さが減少したときの火炎を観察したところ、外側に形成された4つの火炎が連結した火炎から独立した火炎に変化していることがわかった。

一方、燃料がプロパンの場合、 $U_{3A}=20, 50$ cm/s のときは U_{1A} を大きくすると輝炎の領域が非常に小さくなって火炎長さは大きく減少した。これは空気が多くなり燃料の反応が促進されたためと考えられる。 U_{3A} が大きいほど火炎長さが減少している。また $U_{3A}=80, 100$ cm/s の場合は、 $U_{1A}=30\sim 50$ cm/s の条件で火炎長さは大きく減少した。このときの火炎の様子を観察したところ、輝炎の領域が大きく減少していることがわかった。したがって、空気の流速を増加させることによりすすが減少し、火炎長さが短くなったものと思われる。また、メタンとプロパンの火炎高さを比較したところ、図4(a)で示した輝炎の領域が非常に大きな場合を除くと両者の火炎長さは比較的近い値となった。

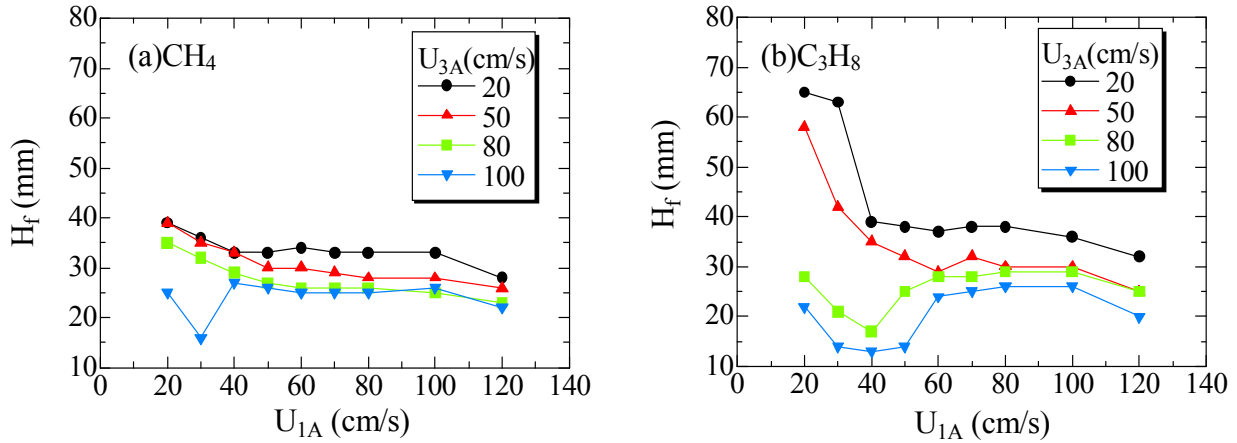


Fig.5 Flame length; (a) CH₄, U_{2F}=10 cm/s, (b) C₃H₈, U_{2F}=4 cm/s

3・3 浮き上がり高さ

燃料にメタンを用いて U_{2F}=10 cm/s 一定とし、U_{1A}をそれぞれ 40, 50, 60, 70 cm/s、U_{3A}を 10 cm/s から 120 cm/s まで増加させたときの U_{3A} の変化に対する火炎の浮き上がり高さ(L_f)の変化を図 6 に示す。これによると、U_{1A}を一定にして外側の空気流速を増加させると内側火炎の浮き上がり高さは減少するが、あるところで最小値をとり、その後はやや増加した。また、U_{1A}が大きいほど、浮き上がり高さが大きくなった。

また、外側火炎について調べたところ、U_{3A}が 80 cm/s より小さいと火炎は浮き上がらず、付着火炎が形成された。U_{3A}を 80 cm/s 以上とすると、外側の火炎も浮き上がり、二重浮き上がり火炎となった。ただし、火炎の浮き上がり高さは、U_{1A}が大きいほど小さいことがわかった。したがって、外側の空気流速を増加させると内側火炎の浮き上がり高さは減少するが、外側火炎の浮き上がり高さは逆に増加することがわかった。ただし、拡散火炎の火炎長さや浮き上がり高さは流れ場に強く依存するため、より詳細な議論を行うには速度測定が必要である。

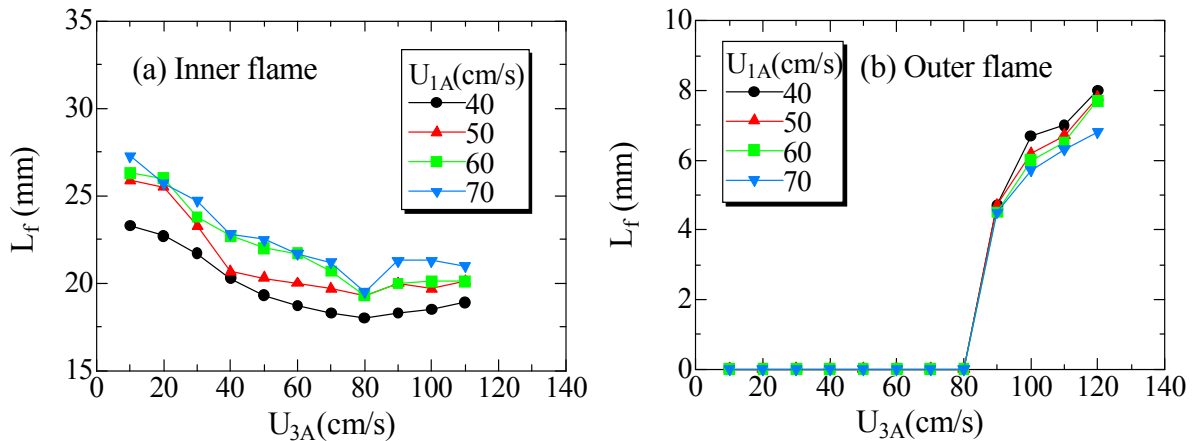


Fig.6 Lift-off height (CH₄, U_{2F}=10cm/s)

3・4 すず濃度

図 4 の火炎写真から明らかになったように、燃料がプロパンの場合は空気の供給量により明確な輝炎が観察された。そこで、空気の流速を変化させて LII 計測を行い、すず濃度について調べた。測定は半径方向に $-23 \text{ mm} \leq r \leq 23 \text{ mm}$ 固定とし、高さ方向には $0 \text{ mm} \leq z \leq 46 \text{ mm}$ と $46 \text{ mm} \leq z \leq 92 \text{ mm}$ の 2 個所で行った。

U_{1A}=40 cm/s, U_{3A}=30 cm/s (Case 1), U_{1A}=40 cm/s, U_{3A}=80 cm/s (Case 2), U_{1A}=80 cm/s, U_{3A}=30 cm/s (Case 3) の 3 つの流速条件において得られた LII 信号の強度分布を図 7 に示す。いずれの場合も、燃料にプロパンを用いた結果であり、燃料の流速は 12 cm/s とした。Case 1 と Case 2 を比較すると Case 2 のほうが LII 信号の最大値が小さいのですず濃度は低いことになる。一方、Case 1 と Case 3 を比較すると Case 3 のほうがすず濃度の最大値が

小さく、Case 2 と Case 3 を比較すると Case 3 のほうがすす濃度の最大値が小さい。以上により、内側空気および外側空気のどちらの量を増やしてもすすの最大値が減少することがわかった。

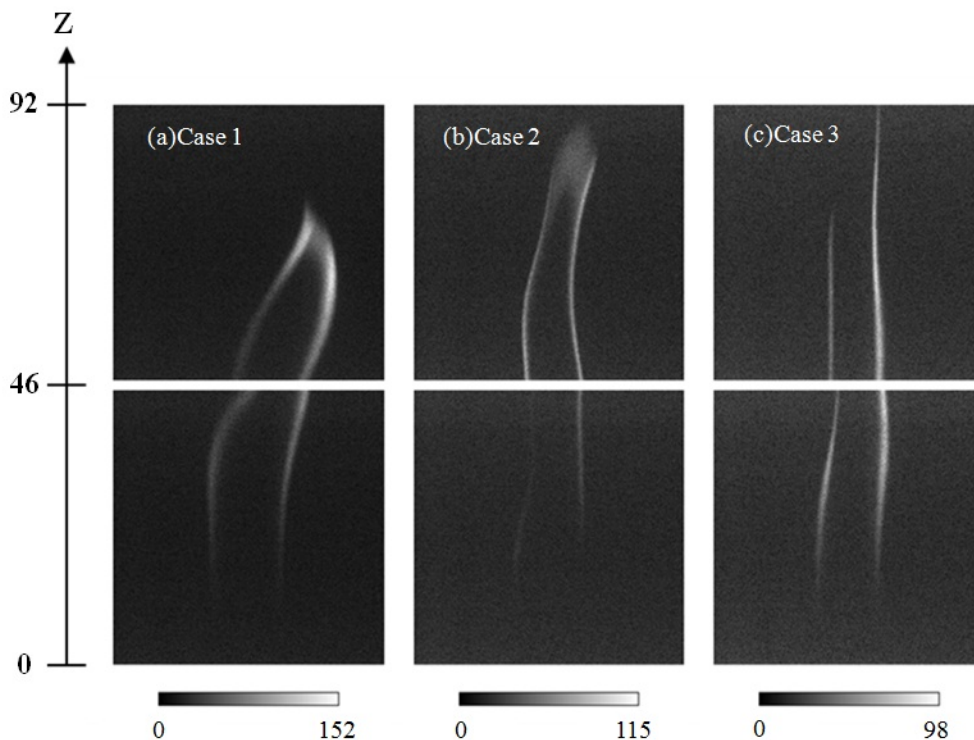


Fig.7 Soot volume fraction obtained from LII the image (C_3H_8 , $U_{2F}=12\text{cm/s}$)

次に、すす濃度と火炎の浮き上がり高さの関係について検討した。燃料にメタンを用い、 U_{3A} を変化させた時の火炎中のすす濃度の最大値を図 8 に示す。 $0\text{ mm} \leq z \leq 46\text{ mm}$ と $46\text{ mm} \leq z \leq 92\text{ mm}$ の 2 つの範囲で行った計測結果をもとに、それぞれの画像における LII 信号の最大値を求め、100 回の計測結果の平均値を算出して燃焼場におけるすす濃度の最大値の変化を調べた。流速条件は、 $U_{2F}=40\text{ cm/s}$ 、 $U_{1A}=30\text{ cm/s}$ それぞれ一定とし、 U_{3A} を変化させた。図には、外側火炎の浮き上がり高さも示している。図 3 に示したように、燃料流速 $U_{2F}=10\text{ cm/s}$ では輝炎がほとんど観察されないが、 $U_{2F}=30\text{ cm/s}$ では外側火炎が付着しており微量のすすが存在した。また、外側空気流速 U_{3A} を 70 cm/s より大きくすると、外側火炎が浮き上がり、LII 信号の最大値は大きく減少した。ただし、 U_{3A} をさらに増加させてもすす濃度の最大値はほとんど変化しなかった。したがって、外側の火炎が浮き上がるとすす濃度が大きく減少することがわかった。

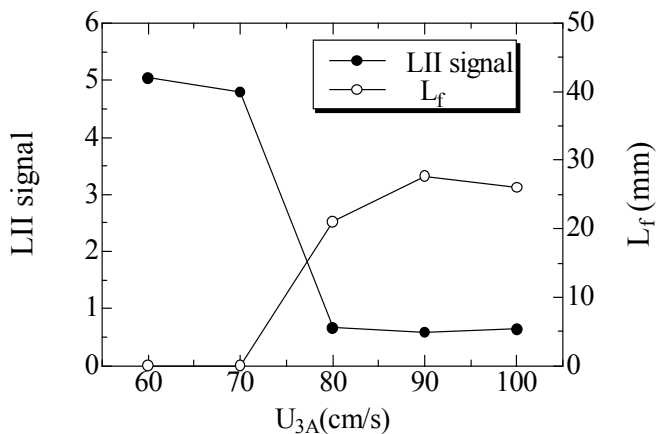


Fig.8 Comparison of LII signal and liftoff height (CH_4 , $U_{1A}=40\text{ cm/s}$, $U_{2F}=30\text{ cm/s}$)

燃料にプロパンを用いて同様の計測を行った。内側空気流速 $U_{1A}=40, 60$ cm/s, 燃料流速 $U_{2F}=12$ cm/s に設定し, 外側空気流速 U_{3A} を 40 から 100 cm/s まで増加させたときの U_{3A} の変化に対する LII 信号の変化を図 9 に示す。これによると, いずれの内側空気流速でも外側空気流速を増加させることにより LII の最大値が単調に減少することがわかった。ただし, 内側空気流速が大きい 60 cm/s のほうが, わずかに LII 信号の最大値が高い。また LII 信号の値は, メタン火炎よりもプロパン火炎のほうがかなり大きいことがわかった。

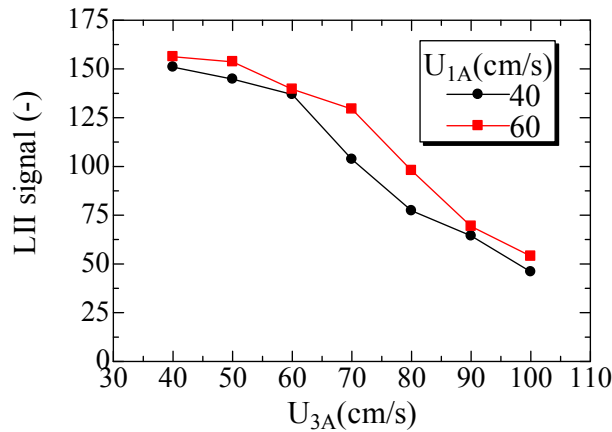


Fig.9 Result of LII signal of propane flame

3・5 NOx 排出量

ここでは, 多噴孔ノズルバーナの NOx 排出量について調べた。燃料にメタンを用いて燃料流速 U_{2F} をそれぞれ 10 cm/s と 30 cm/s, 内側空気流速 $U_{1A}=50\sim 80$ cm/s, 外側空気流速 $U_{3A}=40\sim 100$ cm/s と変化させた。ただし, 周囲空気により燃焼ガスが希釈されるため, パイレックス管で周囲を覆い, 燃焼排ガス中の NOx 濃度を求めて EINOx を算出した⁽²⁵⁾。図 10(a)に燃料流速 $U_{2F}=10$ cm/s の結果を示す。これによると, EINOx は U_{3A} が大きくなると単調に減少した。また, EINOx の値は U_{1A} が大きいほど低下することがわかった。

次に, 燃料流速 U_{2F} を 30 cm/s にして EINOx を求め, 比較した。この結果を図 10(b)に示す。これによると EINOx は U_{3A} を大きくするといったん増加するものの, $U_{3A}=80$ cm/s 以上の条件では減少した。この条件では外側火炎が浮き上がるため, 火炎の上流部で燃料と空気の予混合化が進み, NOx が低下したものと思われる⁽¹²⁾⁽²⁴⁾。

一方, 燃料にプロパンを用いて同様の測定を行った。 $U_{2F}=12$ cm/s としたときの結果を図 11 に示す。図 10 と同様, 内側空気流速を一定にして外側空気流速 U_{3A} を増加させたときの結果であるが, メタンの場合とは逆に U_{3A} を増加させると EINOx は増加することがわかった。また, U_{1A} が大きいほど EINOx は増加した。このときの火炎を観察したところ, 内側の火炎が浮き上がっており, 外側の火炎は常に付着していた。

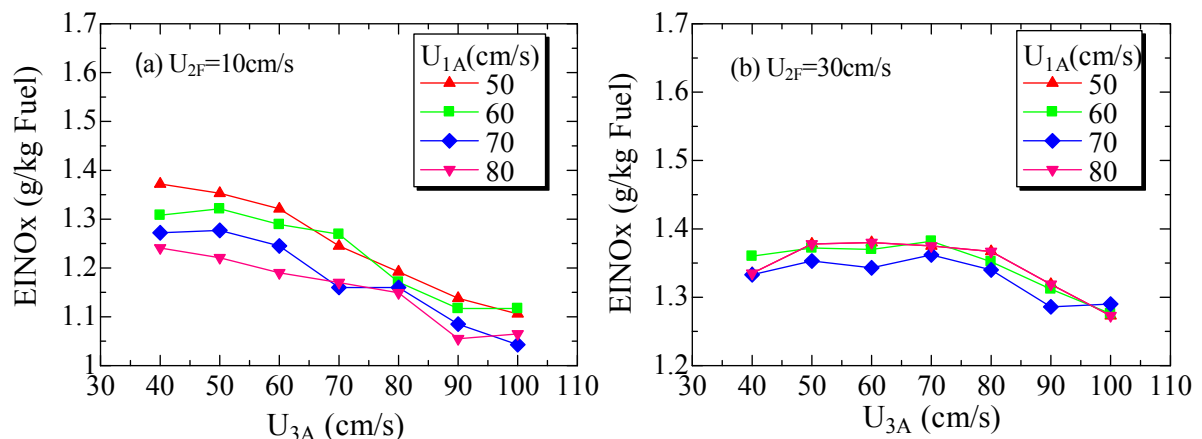


Fig.10 Relationship between U_{3A} and EINOx (CH_4 , $U_{2F}=10$ and 30 cm/s)

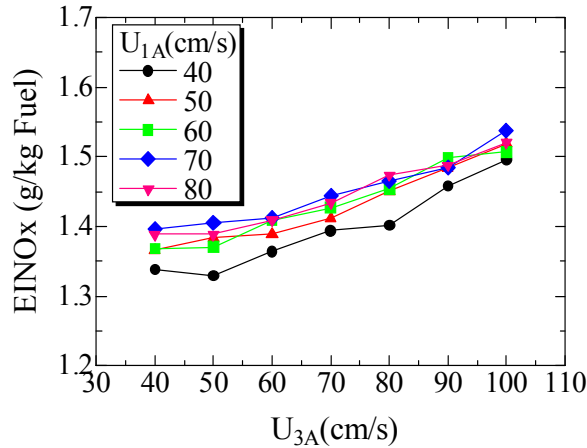


Fig. 11 Relationship between U_{3A} and $EINO_x$ (C_3H_8 , $U_{2F}=12$ cm/s)

燃料の違いについて考察するため、総括当量比を調べた。図 10 および図 11 における総括当量比の結果を図 12 および図 13 に示す。これによると燃料がメタンの場合、いずれの条件でも、 $U_{2F}=10$ cm/s の場合は総括当量比が 1 より小さく、 U_{3A} を大きくすると総括当量比がさらに低下することがわかった。したがって、いずれの U_{1A} においても U_{3A} を増加させることでより希薄な燃焼になり、火炎温度が下がって $EINO_x$ が低下したと思われる。一方、 $U_{2F}=30$ cm/s の場合は、 U_{3A} を大きくすると総括当量比が次第に 1 に近づくため、火炎温度が上がり燃焼が促進されて NO_x の排出量が増えたものと思われる。ただし、 $U_{3A}=80$ cm/s 以上では外側火炎が浮き上がるため、予混合化が進み、 NO_x の排出量が減少したと考えられる。

これに対し燃料がプロパンの場合、 U_{3A} を大きくすると総括当量比が低下し、燃料過濃の条件から当量比が 1 に近づくことがわかった。このため、 U_{3A} を増加させると全体の燃焼が促進されて NO_x の排出量が増えたものと思われる。したがって、いずれの燃料でも火炎が浮き上がらない場合は、 U_{1A} あるいは U_{3A} を変化させて総括当量比が 1 に近づくと、燃焼が促進されて NO_x の排出量が増えることがわかった。

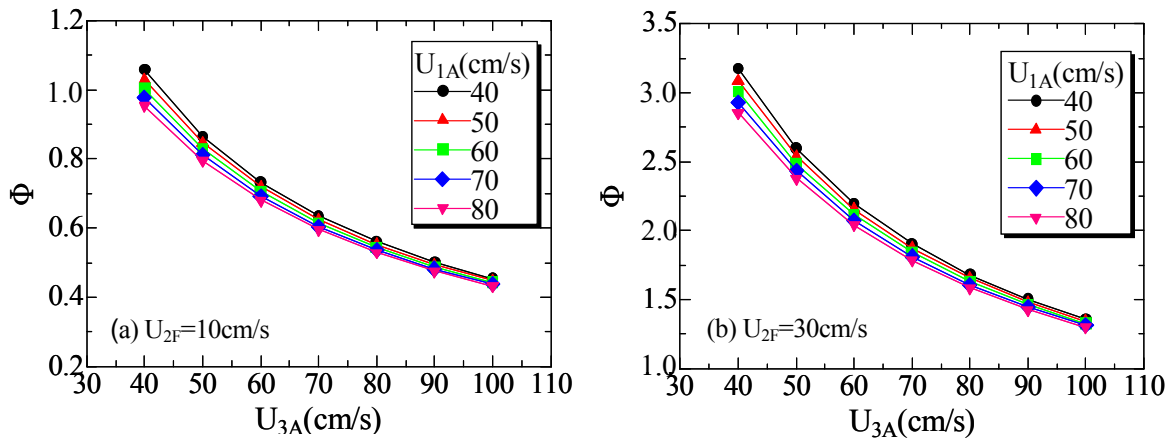


Fig. 12 Overall equivalence ratio (CH_4 , $U_{2F}=10$ and 30 cm/s)

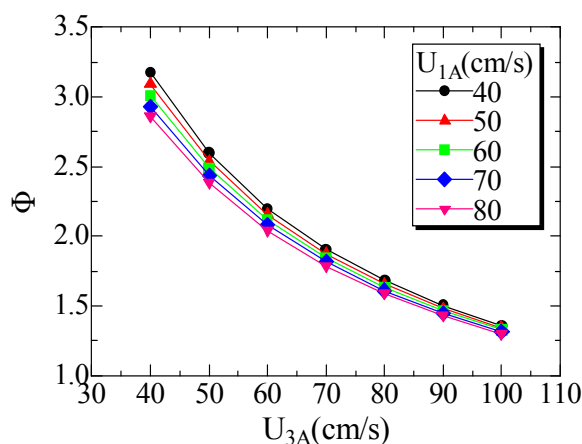


Fig.13 Overall equivalence ratio (C_3H_8 , $U_{2f}=12$ cm/s)

3・6 同軸バーナとの比較

最後に多噴孔ノズルバーナと同軸バーナの比較を行った。燃料（ここではプロパン）と空気の流速条件を同じにして比較した。まず火炎写真を撮影し、火炎形状を観察した。今回の実験では、多噴孔ノズルバーナと同軸バーナの燃料流速をともに 4 cm/s 一定とし、空気流速を 60 cm/s まで変化させた。ただし、多噴孔ノズルバーナの内側空気と外側空気の条件は、すべて同軸バーナの空気流速と同じ値 ($U_{1A}=U_{3A}=U_A$) にしている。多噴孔ノズルバーナと同軸バーナに形成された火炎の直接写真を図 14 と図 15 に示す。ここでは、空気流速を 40, 60 cm/s とした。これによると、空気流速が 40 cm/s のときはどちらのバーナでも輝炎が観察されたが、多噴孔ノズルバーナの火炎長さはわずかに短いことがわかった。また、空気流速が 60 cm/s では 2 つのバーナで火炎の様子が大きく異なった。多噴孔ノズルバーナでは空気流速を増加させると火炎の大部分が青炎となっており、輝炎は火炎の先端部のごく一部のみであった。一方同軸バーナでは、空気流速を大きくしたことにより火炎長さがわずかに短くなるものの、火炎の大部分は輝炎のままであった。ちなみに、燃料流速を 4 cm/s、空気流速を 60 cm/s 以下の条件では、どちらのバーナでも浮き上がり火炎は形成されない。

そこで、燃料流速を 4 cm/s 一定にし、空気流速を 10 cm/s から 80 cm/s まで変化させたときの空気流速による火炎長さ (H_f) の変化を調べた。その結果を図 16 に示す。火炎長さは一条件につき 10 枚の直接写真を撮り、それらの平均値を求めた。これによると、多噴孔ノズルバーナでは空気流速を増加させると火炎長さが単調に短くなることがわかった。これに対し同軸バーナでは、空気流速を増加させると火炎長さはわずかに短くなるものの、空気流速が 50 cm/s 以下だと火炎長さがほとんど変化していない。また、2 つのバーナで得られた火炎長さを比較すると、多噴孔ノズルバーナのほうが常に火炎長さが短いことがわかった。

次に、多噴孔ノズルバーナと同軸バーナを用いて LII 計測を行い、すす濃度を調べて比較した。空気流速を 20, 40, 60 cm/s としたときの各軸方向高さにおける LII 信号の 100 枚の平均値を求めた結果を図 17 に示す。エラーバーはその高さの LII 信号の最大値と最小値を示している。図 14 と図 15 からわかるように、同軸バーナでは火炎の大部分が輝炎である。火炎は浮力により誘起される流れにより大きく変動するものの、図 16 で求めた火炎先端付近に LII 信号の最大値が存在した。いずれの空気流速でも下流ほどエラーバーの範囲が大きくなっているが、これは浮力により火炎が揺らぐためである。両バーナを比較すると、同軸バーナと比べて多噴孔ノズルバーナのほうがすすの LII 信号の値がどの軸方向高さにおいても常に小さいことがわかった。特に、空気流速が 60 cm/s では LII 信号がほとんど検出されていない。したがって、同軸バーナに比べると多噴孔ノズルバーナでは火炎中のすす濃度が大きく低下することがわかった。これまでの研究⁽²⁷⁾において、三重管バーナでも同軸バーナよりすす濃度が大きく低下することがわかっている。したがって三重管バーナと同様、多噴孔ノズルバーナでも空気と燃料を多数のノズルから排出することで両者の境界面が増え、火炎中のすす濃度を抑制できることが確認できた。

最後に NOx の排出特性を調べた。燃料流速を 4 cm/s とし、空気流速を変化させて検討した。その結果を図 18 に示す。いずれのバーナでも空気流速を増加させると EINOx は増加したが、両者の EINOx の値はほとんど同じ

であった。したがって、多噴孔ノズルバーナを用いることで NO_x の排出量を増やさずに火炎中のすす濃度を抑制できることがわかった。

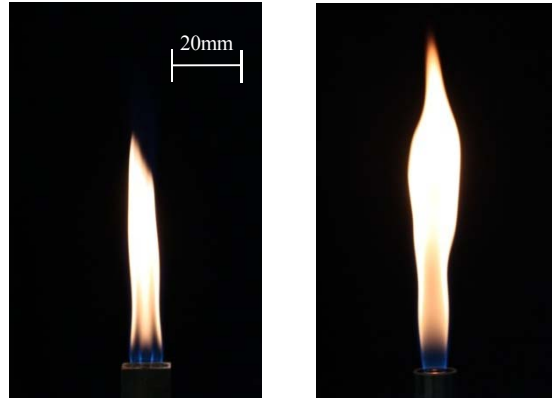


Fig. 14 Photographs of flames at $U_{1A} = U_{3A} = U_A = 40$ cm/s;
left: multiple port nozzle burner, right: co-axial burner

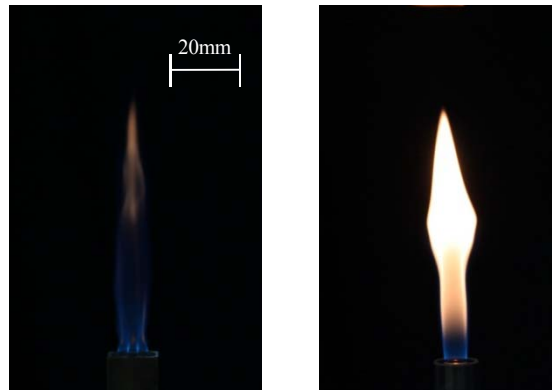


Fig. 15 Photographs of flames at $U_{1A} = U_{3A} = U_A = 60$ cm/s;
left: multiple port nozzle burner, right: co-axial burner

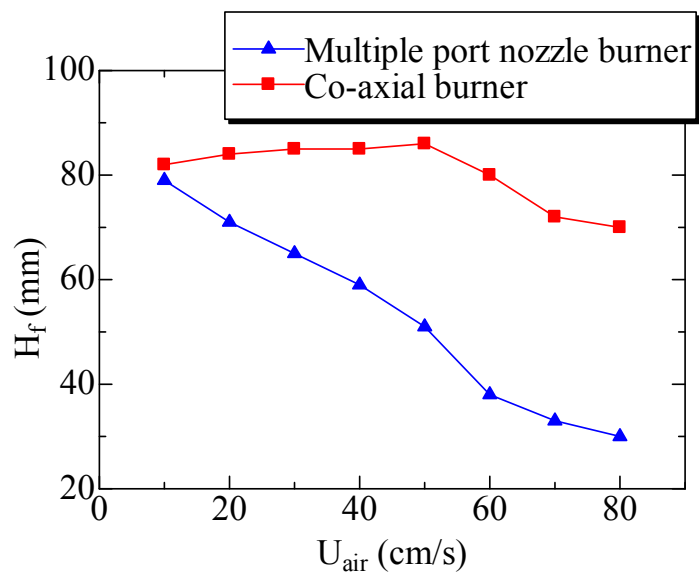


Fig. 16 Variation of flame length with air flow velocity

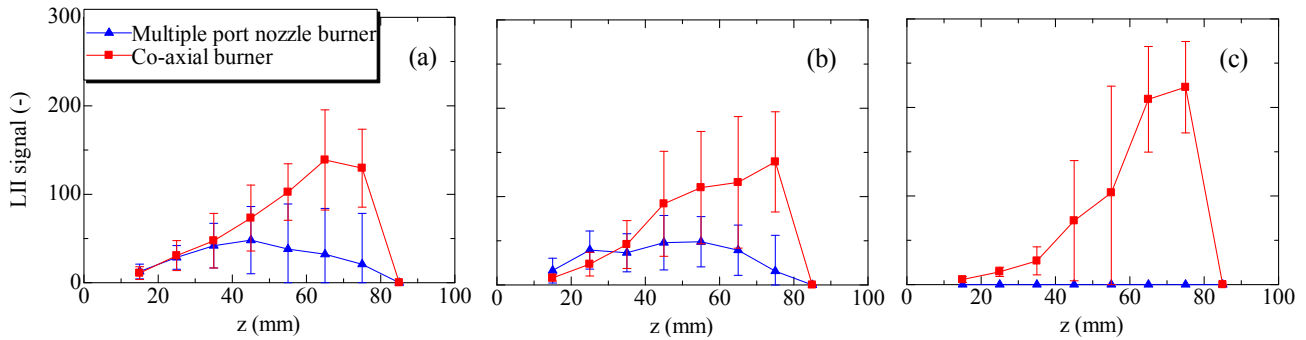


Fig. 17 Axial distribution of LII signal; (a) $U_A=20$ cm/s, (b) $U_A=40$ cm/s, (c) $U_A=60$ cm/s

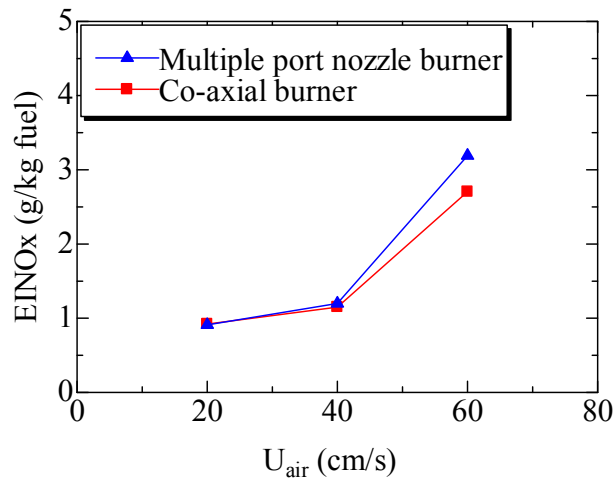


Fig. 18 Variation of EINOx with air flow velocity

4. 結 論

燃料にメタンとプロパンを用い、燃料と空気のノズルを多数配置した多噴孔ノズルバーナの燃焼場を調べた。火炎長さおよび浮き上がり高さを求め、レーザ誘起赤熱法 (LII) により火炎中のすす濃度を計測した。NOx 排出量を EINOx を算出して検討し、燃料による違いを明らかにした。また、同軸バーナでも同様の測定を行い、比較して燃料と空気のノズルを多数配置した影響を調べた。その結果、以下のような知見を得た。

1. 燃料流速を一定にして、内側と外側の空気流速を変化させると異なる火炎形態が観察される。多噴孔ノズルバーナでは、すべての火炎がともにバーナに付着した付着火炎、内側の火炎のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎、両側の火炎がともに浮き上がる二重浮き上がり火炎の3つの火炎が形成される。
2. 内側および外側の空気流速を大きくすると火炎長さは短くなる。ただし、個々の火炎が独立して形成される場合は火炎長さが大きく減少する。輝炎の領域が非常に大きな場合を除くと、総括当量比が同じであれば火炎長さは燃料の種類によらずほぼ同じである。
3. 内側の空気流速と燃料流速を一定のまま外側の空気流速を大きくすると、内側火炎の浮き上がり高さは単調に減少する。ただし、内側の空気流速が大きいほど浮き上がり高さは大きい。一方外側火炎は、内側火炎とは異なり、外側の空気流速を大きくすると浮き上がり高さは増加する。すなわち、内側火炎と外側火炎は逆の挙動を示す。
4. 燃料流速を一定にして、内側と外側の空気流速を大きくすると火炎中のすす濃度は減少する。特に、火炎が浮き上がるにより最大すす濃度は大きく低下する。ただし、メタン火炎よりもプロパン火炎のほうがすす濃度の最大値は大きい。

5. いずれの燃料でも、火炎が浮き上がらない条件では、内側あるいは外側の空気流速を変化させて総括当量比を 1 に近づけると、燃焼が促進されて NO_x の排出量が増える。ただし、火炎が浮き上がると予混合化が進み、NO_x の排出量は低下する。
6. 火炎が浮き上がらない条件では、同軸バーナに比べて多噴孔ノズルバーナの火炎長さは短く、輝炎の領域も小さい。また、同軸バーナより火炎中のすす濃度は小さくなる。空気流速を増加させると EINO_x は増加するものの、両バーナの EINO_x がほとんど同じ値になったことから、多噴孔ノズルバーナでは NO_x の排出量を増やさずに火炎中のすす濃度を抑えることができる。

文 献

- (1) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, “燃焼現象の基礎”, オーム社 (2001).
- (2) A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, “Formation of Soot and Nitrogen Oxides in Unsteady Counterflow Diffusion Flames”, *Combust. Flame* 156, (2009), pp.2010-2022.
- (3) 平野靖史郎, 大気環境学会誌, 44 巻, 6 号, (2009), pp.382-383.
- (4) 安田裕文, 安里勝雄, 宮坂武志, 土方豊, 宮下高宏, 倉知清悟, 羽木敏, 梅田良人, “濃淡火炎の境界領域を制御した濃淡バーナの燃焼特性(第 1 報, 淡火炎および濃火炎の安定限界に及ぼす境界領域制御用混合気の流速および空気比の効果)”, 日本機械学会論文集, B 編, 72 巻 716 号, (2006), pp.1081-1088.
- (5) T. Terasakia, S. Hayashi, “The Effects of Fuel-air Mixing on NO_x Formation in Non-premixed Swirl Burners”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.26, (1996), pp. 2733-2739
- (6) 毛笠明志, 宮藤章, 辻下正秀, “強制振動燃焼の工業炉用バーナへの適用: NO_x 低減効果の検証”, 日本機械学会論文集, B 編, 68 巻 675 号, (2002), 3219-3224.
- (7) 小泉浩美, 浅井智広, 吉田正平, “同軸噴流クラスタバーナを用いた水素含有燃料の NO_x 排出特性に関する検討”, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, (2008), pp.51-52.
- (8) 今枝宗矩, 堀内隆史, 津江光洋, 今村宰, 江上雅裕 “2 次元 LII 法を用いたマイクロ波照射が拡散火炎中すす分布に与える影響に関する研究”, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2010), pp.602-603.
- (9) 大島久治, 山本和弘, 林直樹, 山下博史, 奥山悟郎, “三重管バーナの燃焼特性と火炎構造の検討”, 日本機械学会論文集, B 編, 74 巻 748 号, (2008), pp.2731-2736.
- (10) G. Okuyama, K. Yamamoto, N. Hayashi, and H. Yamashita, “Combustion Characteristics and Flame Structure in a Triple Port Burner”, *Proc. 6th Int. Conf. Computational Heat and Mass Transfer*, (2009), pp.373-378.
- (11) 奥山悟郎, 山本和弘, 林直樹, 山下博史: “酸素噴流による高温 CO-H₂ 混合ガス燃焼の数値解析”, 日本燃焼学会誌, 第 52 巻 162 号, (2010), pp.322-328.
- (12) K. Yamamoto, S. kato, Y. Isobe, N. Hayashi, and H. Yamashita, “Lifted Flame Structure of Coannular Jet Flames in a Triple Pot Burner”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, (2011), pp.1195-1201.
- (13) L. K. Sze, C. S. Cheung, C. W. Leung, “Appearance, Temperature, and NO_x Emission of Two Inverse Diffusion Flames with Different Port Design”, *Combust. Flame*, Vol.144, (2006), pp.237-248.
- (14) M. A. Mikofski, T. C. Williams, C. R. Shaddix, L. G. Blevins, “Flame Height Measurement of Laminar Inverse Diffusion Flames”, *Combust. Flame*, Vol.146, (2006), pp.63-72.
- (15) E. J. Lee, K. C. Oh, H. D. Shin, “Soot Formation in Inverse Diffusion Flames of Diluted Ethane”, *Fuel* 84 (2005), pp.543-550
- (16) A. Sobiesiak, J. C. Wenzell, “Characteristics and Structure of Inverse Flame of Natural Gas”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, (2005), pp.743-749.
- (17) C. R. Shaddix, T. C. Williams, L. G. Blevins, R. W. Schefer, “Flame Structure of Steady and Pulsed Sooting Inverse Jet Diffusion Flames”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, (2005), pp.1501-1508.
- (18) K. C. Smyth, J. E. Harrington, E. L. Johnson, and W. M. Pitts, “Greatly Enhanced Soot Scattering in Flickering CH₄/Air Diffusion Flames”, *Combust. Flame*, Vol.95, (1993), pp.229-239.
- (19) C. R. Kaplan, C. R. Shaddix, and K. C. Smyth, “Computations of Enhanced Soot Production in Time-Varying CH₄/Air Diffusion Flames”, *Combust. Flame*, Vol.106, (1996), pp. 392-405.

- (20) C. R. Shaddix, and K. C. Smyth, "Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames", *Combust. Flame*, Vol.107, (1996), pp. 418-452.
- (21) K. C. Smyth, C. R. Shaddix, and D. A. Everest, "Aspects of Soot Dynamics as Revealed by Measurements of Broadband Fluorescence", *Combust. Flame*, Vol.111, (1997), pp.185-207.
- (22) 石井一洋, "LIIによるすす粒子計測", 日本燃焼学会誌, Vol.48, No.144, (2006), pp.166-173.
- (23) S. S. Yoon, S. M. Lee, S. H. Chung, "Effect of Mixing Methane, Ethane, Propane, and Propene on the Synergistic Effect of PAH and Soot Formation in Ethylene-base Counterflow Diffusion Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30 (2005), pp.1417-1424.
- (24) 上島光浩, 岩木亮, 脇村誠, 野田進, 小沼義昭, "高温空気流における浮き上がり噴流火炎の予混合化燃焼と NOx 低減", 日本機械学会論文集, B 編, 71 巻 701 号, (2005), pp.310-315.
- (25) 小沼義昭, 山内 拓, 森川正治, 馬渡匡之, 野田進, "旋回噴流燃焼器を用いた低 NOx 燃焼", 日本機械学会論文集, B 編, 66 巻 642 号, (2002), pp.579-584.
- (26) K. H. Lyle, L. K. Tseng, J. P. Gore, N. M. Laurendeau, "A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames", *Combust. Flame*, Vol.116, (1999), pp.627-639.
- (27) K. Yamamoto, M. Takemoto, "Measurement of PAH and Soot of Diffusion Flames in a Triple Port Burner", *Fuel Processing Technology*, Vol.107, (2013), pp.99-106.