

各種燃焼方式によるマイクロフレームの燃焼特性

高寺健太郎* 吉本隆光**

Combustion Characteristics of Micro Flame for Various Species of Combustion Method

Kentaro TAKATERA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The burning techniques are used in numerous regions from the heating furnace, the gas turbine and the boiler to the small burning receptacles. Retaining stable combustion is an important burning technique for using effective energy. Recently, a small flame (which is called micro flame) is formed on the tip of nozzle at atmospheric pressure. This flame has some characteristics of combustion that are different from ones of normal diffusion flame. On the other hand, the combustion method with using the plasma attracts attention has been studied. It is reported that the optical emission profile at the discharge area between the electrodes shows that the plasma had fuel make CH^* radical. It is possible to enhance plasma-assisted combustion with these radicals. In this study the micro flame for methane, hydrogen and fuel gas diluted with nitrogen is formed by using the burner nozzle whose various inner diameters are less than 1mm. There are diffusion combustion, premixed combustion and plasma-assisted combustion as the combustion methods. The flame configuration and the stability limit of diffusion combustion are compared with that of plasma-assisted combustion in the case of micro flame.

Keywords: micro flame, diffusion combustion, premixed combustion, plasma-assisted combustion

1. 緒言

現在膨大に消費されるエネルギーの効率的使用は重要であり、また、機器の小型化に対して有効的な燃焼技術の進展が求められている。

燃焼技術に関して、ガス燃料を用いた燃焼に注目が集められ、その中でもバイオマスガス⁽¹⁾は新エネルギー源として注目されている。しかしバイオマスガスは低カロリーガス燃料であるため、火炎を安定に保つことが困難である。また、気体燃料の燃焼は、拡散燃焼、予混合燃焼、部分予混合燃焼^{(2),(3)}に分けられる。火炎を安定に保つ燃焼形態は、燃焼技術において重要な要素である。また、ノズル口径が 1mm 以下で形成される火炎（マイクロフレーム）では球状の火炎を形成することや、燃料噴出角度に火炎形状が依存しない等のノズル口径 1mm 以上で形成される火炎とは異なる形状、特性が報告されている^{(4),(5),(6),(7),(8)}。

一方、近年は燃焼技術へのプラズマを利用するプラズマ支援燃焼技術⁽⁹⁾が注目されている。

本報では燃料にメタンを用い拡散燃焼、予混合燃焼においてノズル口径 1mm 以下で形成されるマイクロフレームの燃料噴出速度による火炎形状の遷移の観察、火炎内温度分布、火炎安定限界について調べマイクロ

フレームの燃焼特性を明らかにすることを目的とする。

また、燃料にメタンを用いて燃料ガスを大気圧低温プラズマにさらすことで燃料ガスをラジカル状態にし、プラズマ支援燃焼を行う。さらにバイオマスガスなどの低カロリー燃料に対して有効的な燃焼技術であるか検討する。

2. 実験装置

2.1 実験装置の構成 Fig.1 に実験装置の概略図を示す。Table 1 にノズル寸法を示す。拡散燃焼では燃料にメタンを用い、また、予混合燃焼では燃料にメタン、酸化剤として空気を用いる。これらの燃料はフロート式流量計で流量調整し、ノズルから噴出させて火炎を形成する。ノズル先端に設置した電極間で放電することでプラズマを発生させ、プラズマ支援燃焼を行う。

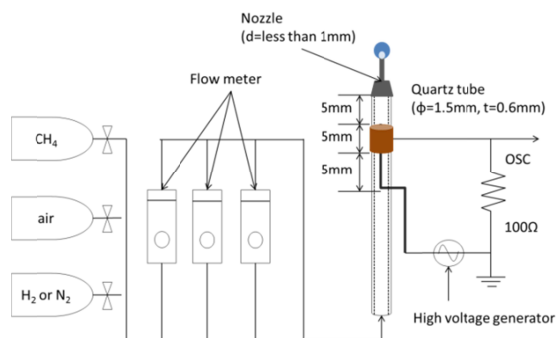


Fig.1 Schematic drawing of experimental equipment

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

Table1 Nozzle dimension

Inner diameter (d)	Outer diameter (D)
0.41mm	0.72mm
0.51mm	0.81mm
0.59mm	0.89mm
0.69mm	1.08mm
0.82mm	1.25mm

2.2 火炎温度分布測定装置 温度測定には素線0.1mmのR型熱電対(Pt-PtRh13%)を用いた。2本の絶縁管内に2それぞれ熱電対の素線を通し、接合させた接合点で温度測定を行う。なお、温度分布について各種火炎における傾向を見るため測定した温度の値に輻射などの補正は行っていない。

2.3 火炎NO_x濃度分布測定器 Fig.2にサンプリングプローブの形状を示す。NO_x濃度の測定にはサンプリングプローブを用いてサンプリングバッグに吸引しNO_x分析計を使用し測定を行った。

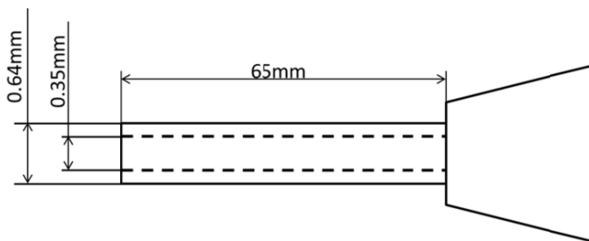


Fig.2 Configuration sampling probe

3. 実験結果

3.1 火炎形状 Fig.3にノズル口径0.82mmを用いた拡散燃焼における火炎形状の変遷, Fig.4にプラズマ支援燃焼における火炎形状の変遷, Fig.5に予混合燃焼における火炎形状の変遷を示す。Fig.5(a)に燃料流量10mL/min一定で空気流量を増加させた予混合燃焼, Fig.5(b)に総流量70mL/min一定で燃料と空気の割合を変化させた予混合燃焼での火炎形状を示す。

Fig.3およびFig.4より、燃料流量0.4から0.5L/min付近までは火炎下流部の閉じた層流火炎を形成し、0.6L/min以上の燃料流量では火炎下流部が開いた乱流火炎へと変化する遷移域での火炎を形成していることがわかる。燃料流量が増加するにつれて火炎長さも増加する傾向が見られた。

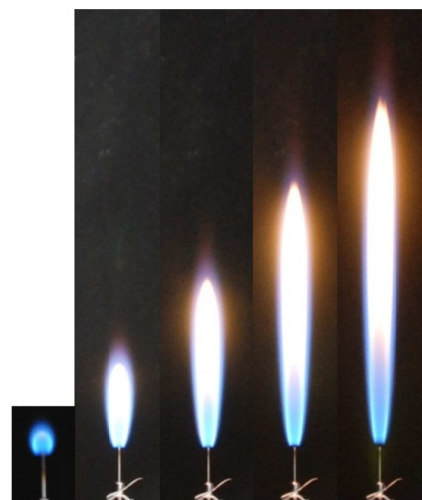
また、プラズマを用いることで通常の拡散燃焼では火炎が吹き飛びに至る燃料流量域で火炎を形成していることがわかる。したがって、プラズマを燃料中に発生させることでラジカル状態になった活性種(CHラジカル)が燃料の酸化反応を促進させることで、燃焼性が向上し、より火炎を安定に保つことができたと考えられる。

Fig.5(a)より、予混合燃焼では当量比が減少すると火

炎形状は縦長に変化する。つまり燃料中の空気の量が増加すると火炎形状は球状から縦長へ変化することがわかる。また、総流量は増加しても火炎長さはどの当量比の場合でも一定であった。この原因として、当量比1のところには火炎面が形成されるため、予め酸化剤を燃料中に混合した予混合火炎では火炎の燃え切りが速くなる。したがって総流量が増加しても火炎長さは増加しなかったと考えられる。

Fig.5(b)より、総流量を一定にすると当量比が減少すると火炎長さは短くなることわかる。

Fig.5(a)および(b)より、予混合燃焼における火炎長さは当量比、総流量に依存せず、燃料流量に依存すると考えられる。



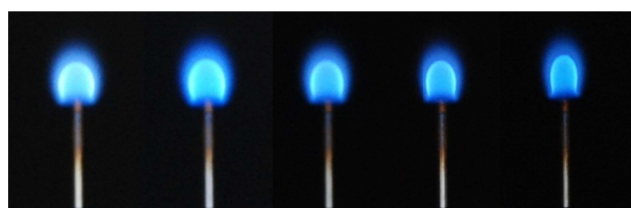
Q = 0.01 0.1 0.2 0.3 0.4 L/min

Fig.3 Flame configuration on diffusion combustion

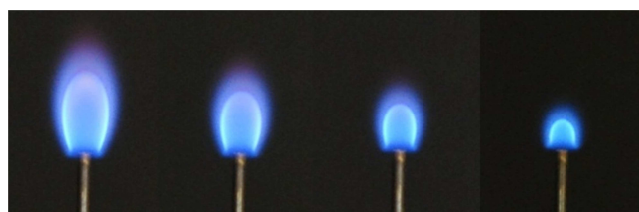


Q = 0.01 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 L/min

Fig.4 Flame configuration on plasma-assisted combustion



$\Phi = 10.58 \quad 8.65 \quad 6.35 \quad 4.76 \quad 3.17$
 (a) Premixed combustion
 (Fuel flow rate = 10 mL/min, constant)



$\Phi = 12.69 \quad 7.14 \quad 3.81 \quad 1.59$
 (b) Premixed combustion
 (Total flow rate = 70 mL/min, constant)

Fig.5 Flame configurations on premixed combustion

3.2 火炎吹き飛び速度 Fig.6 に燃料にメタン，各種ノズル口径を用いて拡散燃焼，プラズマ支援燃焼させた火炎の吹き飛び速度を示す。

拡散燃焼ではノズル口径が増加するにつれて火炎の吹き飛び速度は増加しより安定した火炎を形成することができた。また，プラズマを用いることで全体的にどのノズル口径においても火炎の吹き飛び速度の増加は見られた。したがって，火炎を安定に保つ燃焼技術の一つとしてプラズマ支援燃焼は有効的であると考えられる。

Fig.7 に燃料にメタン，酸化剤に空気，0.82mm，0.69 mm のノズル口径を用いて予混合燃焼させた火炎の各当量比における吹き飛び速度を示す。

予混合燃焼では当量比が増加するにつれて火炎の吹き飛び速度が増加し，どのノズル口径においても火炎の吹き飛び速度は一定の値をとることがわかる。つまり，燃料中の空気の量が減少するにつれて火炎は安定する傾向にある。

また，Fig.4 および Fig.5 より火炎の安定という観点からみると予混合燃焼よりも拡散燃焼の方がより安定に火炎を保つことができると考えられる。

Fig.8 にメタンを窒素で 5 : 5，3 : 7 にそれぞれ希釈して拡散燃焼，プラズマ支援燃焼での各種ノズル口径における火炎の吹き飛び速度を示す。

拡散燃焼では各種ノズル口径においてそれぞれの希釈割合で火炎の吹き飛び速度は一定の値を取ることがわかる。また，拡散燃焼，プラズマ支援燃焼共に燃料の窒素希釈割合が増加するにつれて火炎の吹き飛び速度は減少する傾向が見られた。また，プラズマを用い

ることで各希釈割合においても火炎の吹き飛び速度の増加していることがわかる。

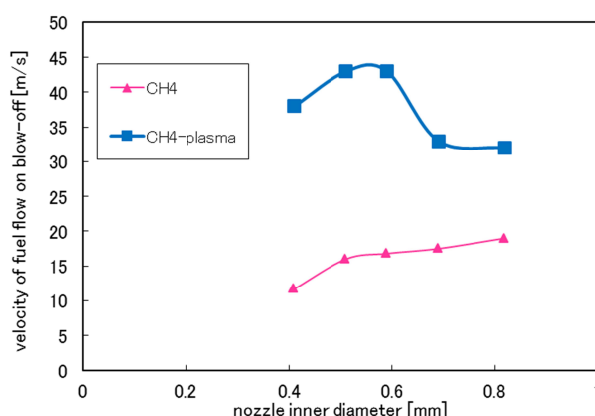


Fig.6 Blow-off velocity for nozzle inner diameter w/o plasma

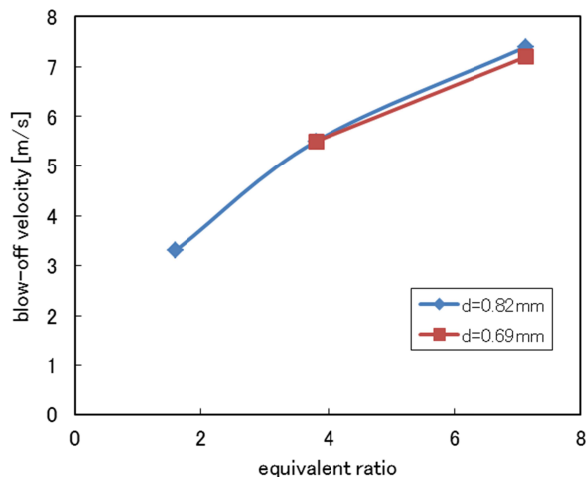


Fig.7 Blow-off velocity for equivalent ratio

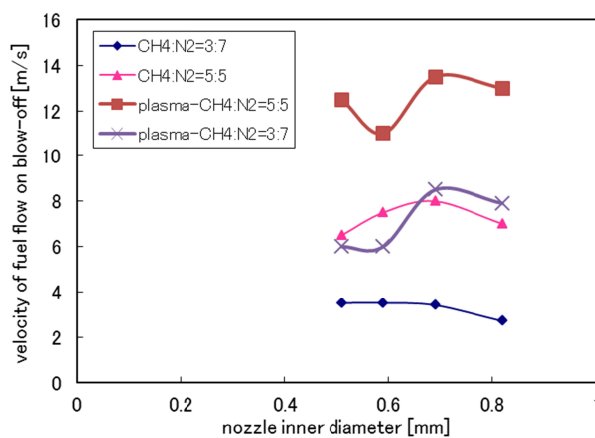


Fig.8 Blow-off velocity for nozzle inner diameter in methane diluting with nitrogen

3.3 最小流量及び燃料希釈割合 Fig.9 に燃料にメタンを用いて各ノズル口径における火炎形成可能な最小燃料流量及び最小燃料噴出速度を示す。

Fig.9 よりノズル口径が増加するにしたがって最小燃料噴出速度は減少していることがわかる。また、最小燃料流量について着目するとノズル口径に関わらず、およそ4mL/minで一定の値を取っていることがわかる。したがって、メタン火炎の安定限界の下限はノズル口径に関わらず燃料流量に依存すると考えられる。

Fig.10 に燃料メタンを用いて拡散燃焼，プラズマ支援燃焼での各種ノズル口径における火炎形成可能な最小流量を示す。

また，Fig.10 よりプラズマを用いることで全体的にどのノズル口径においても最小流量が増加している。プラズマ発生時に生じるイオン風の影響を受けて火炎基部に気流の乱れが生じて火炎が不安定になったと考えられる。

Fig.11 に燃料に窒素で希釈したメタンを用いて総流量70mL/min一定で拡散燃焼，プラズマ支援燃焼での各ノズル口径における火炎形成可能な燃料割合を示す。

拡散燃焼，プラズマ支援燃焼共にノズル口径が増加するにつれて燃料割合はより低い割合でも火炎を形成した。また，拡散燃焼では燃料割合20%が限界で，プラズマを用いることで通常の燃焼よりも低い燃料割合でも火炎を形成することができた。

また，Fig.8 および Fig.11 よりプラズマを用いることで可燃性ガスの割合が少ない火炎でもより安定に火炎を保つことがわかる。これは，プラズマにより生成されたCHラジカルが酸化反応を促進したことで燃焼性が向上したためだと考えられる。したがって，バイオマスガスなどの火炎を安定に保つことが困難な低カロリーガス燃料にプラズマを用いることは，有効的な燃焼技術の一つとして考えられる。

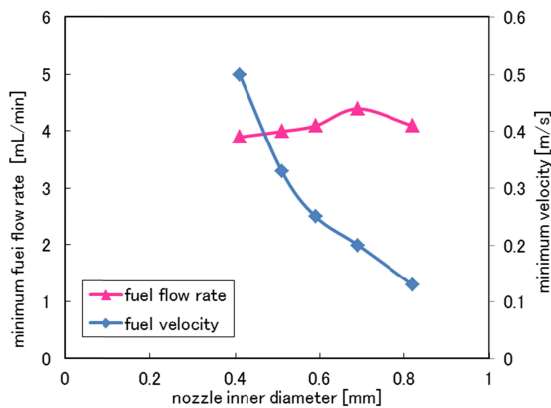


Fig.9 Minimum fuel flow rate and fuel velocity for nozzle inner diameter

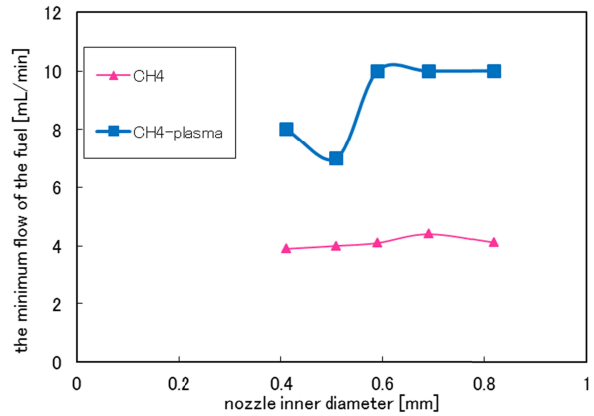


Fig.10 Minimum fuel flow rate for nozzle inner diameter

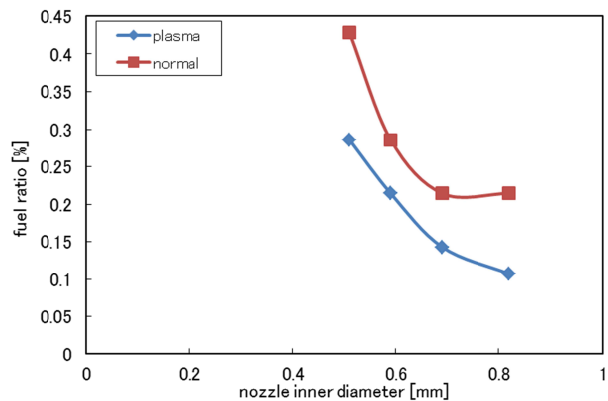


Fig.11 Fuel ratio for nozzle inner diameter

3.4 火炎内温度分布 Fig.12 に燃料にメタンを用いてノズル口径0.82mm，燃料流量20mL/minでのマイクロフレームの火炎内の温度分布を示す。

Fig.13 に燃料にメタン，ノズル口径3.4mmを用いた拡散燃焼での火炎の温度分布を示す。

Fig.12 および Fig.13 より一般的に使用される拡散火炎では火炎の温度分布が火炎の中心部分から離れた燃焼反応が起こっている火炎面近傍に高温点が分布するのに対して，マイクロフレームでは火炎の中心付近に高温点が分布していることがわかる。また，マイクロフレームの方がより均一な温度分布を持つことがわかる。

マイクロフレームの温度分布で火炎の中心付近に高温点が分布する原因として，マイクロフレームの火炎の形成形態として自然対流に支配されるのではなく，燃料の拡散により強く支配されるため，形状が球体になり，また火炎サイズが小さいため火炎面が通常の火炎よりも火炎中心に位置するため，伝播や輻射の影響を受けて火炎の中心付近に高温点が分布すると考えられる。

Fig.14 に各種燃焼方式における温度分布を示す。Fig.14(a)に高さ3mm，Fig.14(b)に高さ4mm，Fig.14(c)に高さ5mmにおける各断面の温度分布を示す。拡散燃

焼, プラズマ支援燃焼は Fig.10 と同じ条件で温度測定を行い, 予混合燃焼では, 燃料にメタン, 酸化剤に空気, ノズル口径 0.82mm, 当量比 3.81, メタン流量 20mL/min, 空気流量 50mL/min で温度測定を行った.

拡散燃焼にプラズマを用いたことによる温度分布への影響は見られなかった. しかし, 予混合燃焼を行うことで火炎内部の各断面において拡散燃焼よりもフラットな温度分布になったことがわかる. これは, 予混合燃焼を行うことで拡散燃焼に比べて, 未燃域が減少し火炎面が火炎中心に近づくことで燃焼反応が行われる反応域が増加したと考えられる.

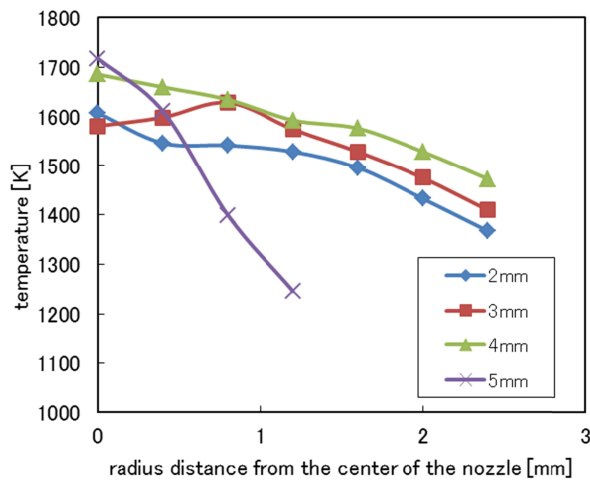


Fig.12 Temperature profiles of micro flame

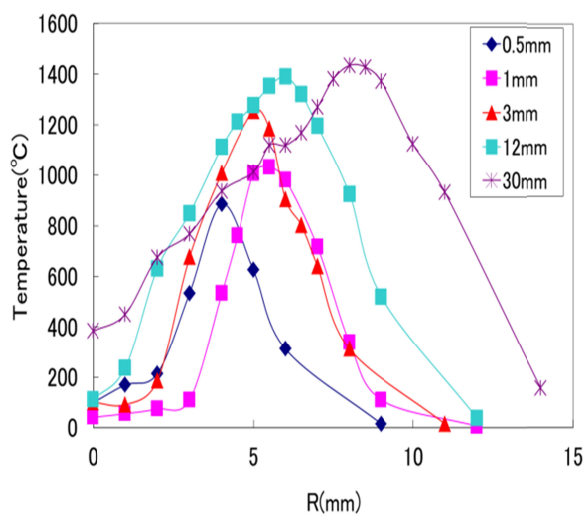
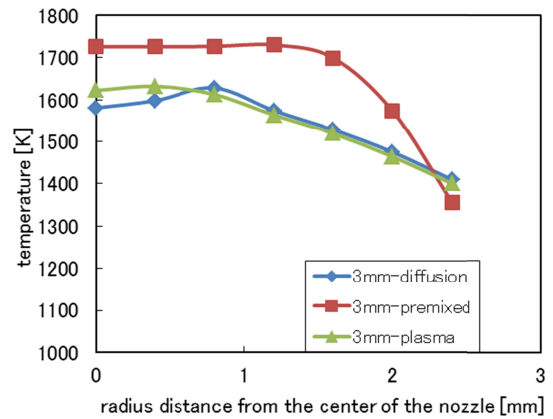
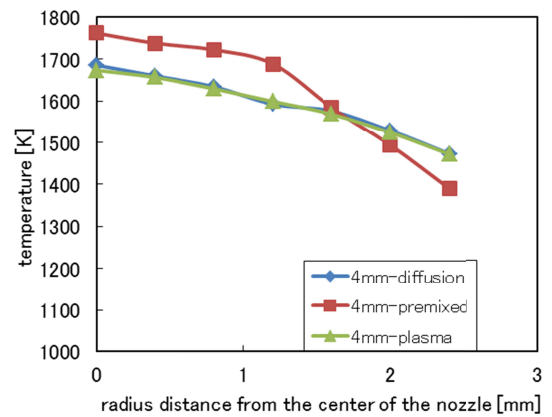


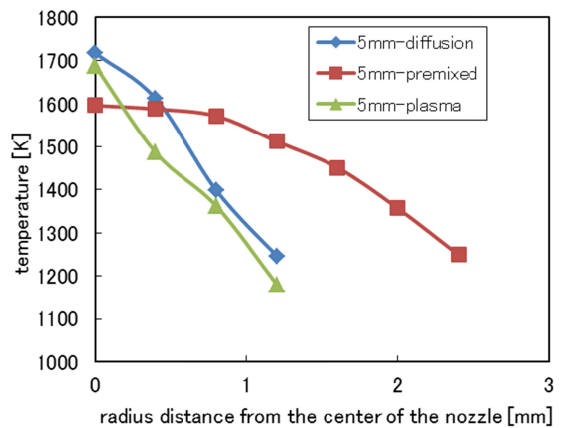
Fig.13 Temperature profiles of normal diffusion flame



(a) H=3mm



(b) H=4mm



(c) H=5mm

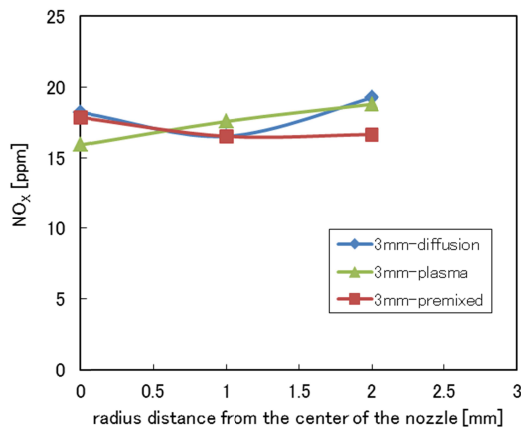
Fig.14 Temperature profile of various combustions flames on various cross sections

3.5 火炎内 NO_x 濃度 Fig.15 に各種燃焼方式における NO_x 濃度を示す. Fig.15(a) に高さ 3mm, Fig.15(b) に高さ 4mm における各断面の NO_x 濃度を示す. 拡散燃焼, プラズマ支援燃焼には燃料にメタン, ノズル口径 0.82mm, 燃料流量 20mL/min を使用して NO_x 測定

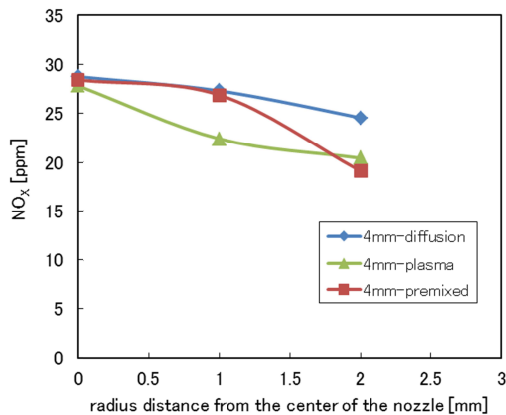
を行い、予混合燃焼では、燃料にメタン、酸化剤に空気、ノズル口径0.82mm、当量比3.81、メタン流量20mL/min、空気流量50mL/minでNO_x測定を行った。

Fig.15よりNO_x分布も火炎の温度分布と同様に、マイクロフレイムでは火炎の中心付近にNO_xのピーク値が分布することがわかる。この原因として、NO_xの生成量に火炎の温度が大きく関係していることから火炎の温度分布と同様の分布になったと考えられる。

また、ノズルから3mmの断面ではNO_x濃度の差違はあまり見られなかったが、4mmの断面においてプラズマによる影響が見られNO_xが低減した。この原因として、プラズマにより生成されたCHラジカルが強い化学反応性を持つため窒素分子よりも先にCHラジカルが酸素と反応するため、窒素分子と反応する酸素の量が減少したためNO_xの生成量が減少したと考えられる。



(a) H=3mm



(b) H=4mm

Fig.15 NO_x profile of various combustions flames on various cross sections

4. まとめ

各種燃焼方式においてマイクロフレイムの火炎形状の観察や火炎の安定限界、火炎内の構造などを測定することで燃焼特性と安定性に関して以下の結論を得た。

- (1) 拡散燃焼，プラズマ支援燃焼において火炎長さは燃料流量が増加するにつれて長くなり，予混合燃焼では火炎長さは燃料流量に依存する。
- (2) 拡散燃焼において火炎の吹き飛び速度はノズル口径が増加すると増加し，希釈割合が増加すると吹き飛び速度は減少する。プラズマを用いると火炎はより安定した。予混合燃焼では当量比が減少し，拡散燃焼に近づくと吹き飛び速度は増加した。
- (3) 火炎の安定限界の下限は各ノズル口径に関係なく，燃料流量が一定の値で存在すると考えられる。
- (4) 火炎の希釈限界はメタン火炎において燃料割合は20%が限界であると考えられる。また，プラズマを用いることでさらに希釈した状態での燃焼を行うことができた。
- (5) 温度分布は火炎の中心付近に高温点が分布する。また，予混合燃焼を行うことでよりフラットな温度分布が見られた。
- (6) NO_x濃度は火炎の中心付近に分布し，プラズマを用いることで測定位置によってはNO_xの減少が見られた。

参考文献

- (1) 水谷幸夫：「燃焼工学」，森北出版株式会社，'2008'
- (2) 新岡嵩・河野道方・佐藤順一：「燃焼現象の基礎」，株式会社オーム社，2001
- (3) 久保田浪之介：「トコトンやさしい燃焼学の本」，日刊工業新聞社，2012
- (4) 吉本・木之下・北村・谷川：「各種ガス燃料のマイクロフレイムの挙動と安定性」，高温学会誌，vol.36，No.5，pp233-239,2010
- (5) 中村・窪田・山下・斎藤：「マイクロフレイムの火炎構造に関する数値解析－火炎小型化に向けた可能性の追求－」，日本機械学会論文集，vol.74，No.739,2008
- (6) 中村：「火炎構造から探るマイクロ燃焼の特徴とこれから」，日本機械学会論文集，vol.55，No.171，2013
- (7) TAKATERA.K：“Stability Limits and Behaviors of Micro Flames for Methane, Hydrogen and Diluted Fuel with Nitrogen”，Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, Summary or Paper-IFHT139, 2012
- (8) TAKATERA.K：“Stability Limits and Behaviors of Micro Flame”，Proceedings of The 4th International Symposium on Micro and Nano Technology, ID-27, 2013
- (9) 赤松浩・金田知大・市川和典：「簡単に始められる大気圧低温プラズマジェットの実験」，神戸市立工業高等専門学校研究紀要第50号，pp.87-92,2012