

各種噴流火炎におけるプラズマ支援燃焼特性

鍛冶勇至* 吉本隆光**

Characteristics on Plasma Assisted Combustion of Various Jet Flame

Yuhshi KAJI* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

Combustion of biomass gas has been noted, but there is a problem that heating value is low as a main component methane biomass gas. Therefore the effective combustion technology has been studied for useful energy. We have researched on jet diffusion flame and jet premixed flame. But there is a problem that the flame lifting leading to blow-off from the nozzle base occurs for low-grade fuels such as biomass fuel. Stable combustion methods have been studied to suppress lifting flame. Moreover, plasma-assisted combustion has been studied in recent years. The fuel before combustion is introduced into Atmospheric pressure low-temperature plasma. Fuel is excited to the chemical active state by plasma. And it promotes the combustion reaction by activated fuel burning. We investigate flame behavior and combustion characteristics with plasma-assisted combustion in this study.

Keywords : Diffusion flame, Premixed flame, Plasma assisted combustion, CH radical

1. 緒言

現在、再生可能資源であるバイオマスガス燃料が化石燃料の代替燃料として期待されており、燃焼技術⁽¹⁾が注目されているが、バイオマスガスはメタンを主成分として低カロリー、低濃度な燃料であり燃焼性が低いといった問題があげられる。そのため有効的な燃焼技術の開発⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が進められている。

近年、大気圧低温プラズマの応用研究⁽⁵⁾が盛んであり、燃焼分野においてもプラズマを応用するプラズマ支援燃焼の研究が行われている。大気圧低温プラズマは大気圧下においてパルス放電により生成でき、電子温度のみが高く、イオン、中性粒子の温度が低いという特徴を持つ⁽³⁾。本研究では燃焼前のメタンを大気圧低温プラズマに導入することで生じた化学的活性種が火炎の燃焼特性に与える影響を調べる。

2. 実験装置

2.1 実験装置概要 Fig.1 に拡散燃焼，予混合燃焼，プ

ラズマ支援燃焼における実験装置の系統図を示す。ポンベより圧力調整器で減圧した燃料，空気をそれぞれフロート式流量計に流し流量調整する。拡散火炎ではノズルより燃料ガスであるメタンのみを噴出させ火炎を形成する。予混合火炎では燃料としてメタンを，酸化剤として空気を使用し，これらをノズル手前で予混合し，ノズル先端より噴出させ鉛直噴流予混合火炎を形成する。プラズマ支援燃焼ではノズル先端に設置した電極間で放電することで大気圧プラズマを発生させる。流量を調整した燃料ガスをノズル内で発生させたプラズマに導入し，化学的に活性な状態に励起した後，着火し火炎を形成する。なお，本実験で

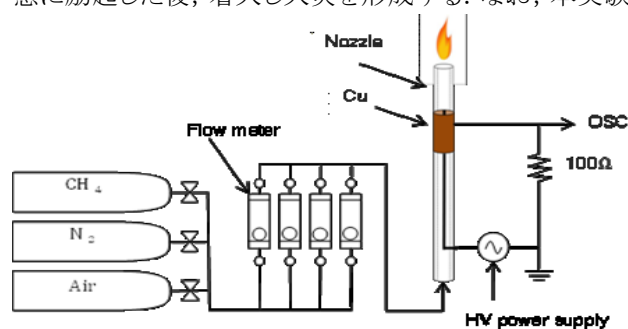


Fig.1 Flow diagram of experimental equipment

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 特任教授

の高電圧電極への印加電圧は最大値 10kV および周波数 17 kHz の正弦波とした. Fig.2 に実験で使用したノズルの詳細を示す.

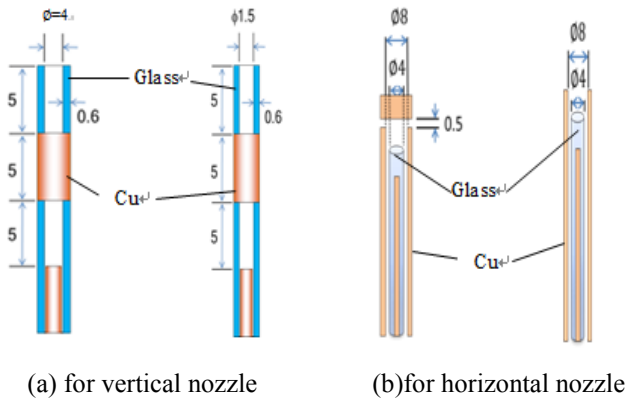


Fig.2 Method of plasma charge

2.2 分光測定装置 Fig.3 にファイバームルチチャンネル分光計 (SEC2000, BAS) を示す. 大気圧プラズマによるラジカルの生成を観察するため, プラズマ支援燃焼用ノズルで生成したプラズマの発光を同軸上に平行に設置した分光計で計測した. これにより, プラズマ中の活性種の種類を特定した.

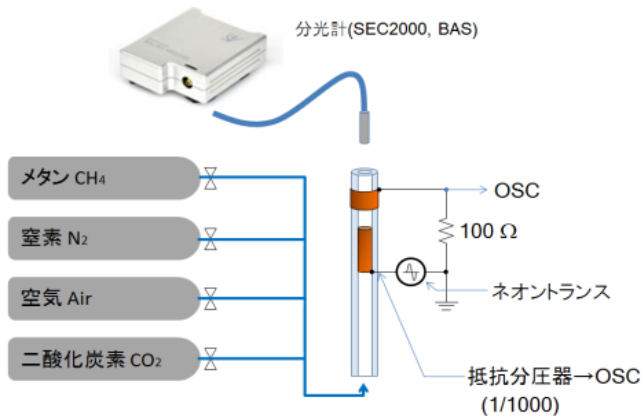


Fig.3 Spectroscopic Measurement

2.3 温度測定装置 Fig.4 に火炎の温度測定に用いる 0.1mm の R 型熱電対 (Pt-PtRh13%) を示す. 熱電対を 2 本の円筒状絶縁体に通し, 熱接点を直線に伸ばした簡易温度測定器である. なお, 火炎内の温度分布を重視したため測定値に輻射損失等の温度補正は行っていない.

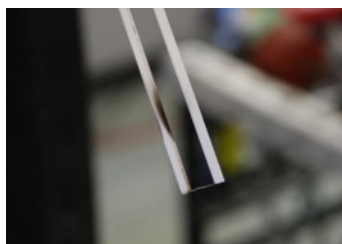


Fig.4 Probe of Thermocouple

2.4 サンプリグプローブ サンプリグプローブは採取管である内径 0.5mm のピトー管の周囲を銅管で覆う構造になっており, 銅管内に水を循環させることによりプローブ全体を冷却する. 火炎内 NO_x の測定においてはポンプによりサンプリグプローブを介して排ガスを吸入しサンプリグバッグに収集した後, 測定器により NO_x 成分を測定する

3. 実験結果

3.1 メタンの基礎放電特性 Fig.5 に分光計により計測したメタンの発光プロファイルを示す. 高電圧電極への印加電圧は最大値 10kV および周波数 17 kHz の正弦波とした.

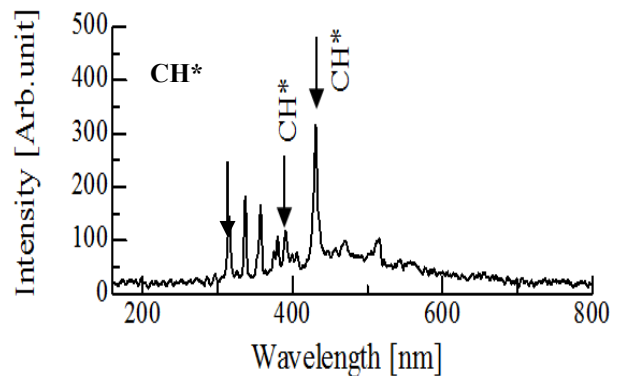


Fig.5 Optical emission spectra of plasma with CH*

波長 314 nm および 389 nm, 431 nm において CH ラジカルのピークが確認できる. CH ラジカルが存在することにより燃焼が促進される可能性がある.

3.2 火炎挙動

3.2.1 拡散火炎 Fig.6 に鉛直ノズル (φ=1.5mm) 内でプラズマを発生させたときの火炎と, 通常の火炎の直接写真とシュリーレン写真による火炎の形状比較を示す. 燃料流量 50ml/min のメタンを用いた拡散燃焼においてプラズマが火炎の形状に与える影響を検証した. なお印加電圧は 8kV の周波数 17kHz の正弦波である.

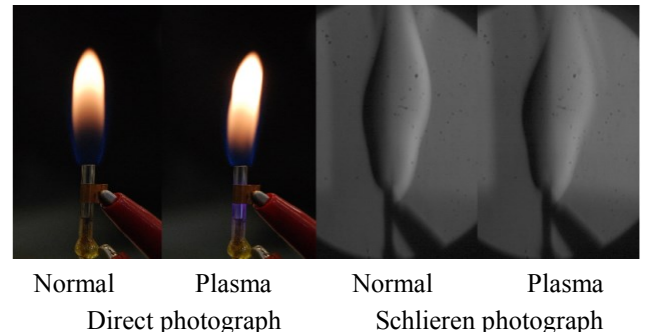
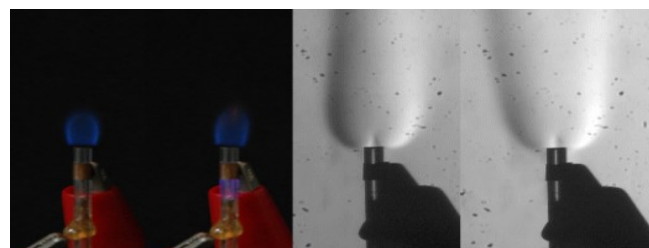


Fig.6 comparison of diffusion flame behavior with/without plasma

ノズル内でプラズマを発生させたとき, 通常の火炎と比較

して青色火炎の部分が短くなる傾向がみられた。また火炎先端で揺れて見えるように火炎に乱れが生じる。

3.2.2 窒素で希釈した火炎 燃料にメタンを使用し窒素で希釈した火炎においてプラズマが形状に与える影響を調査した。Fig.7 に鉛直ノズル($\phi=1.5\text{mm}$) 内でプラズマを発生させたときの火炎と、通常の火炎の直接写真とシュリーレン写真による火炎形状の比較を示す。希釈剤に窒素(流量 50ml/min)を用いる。他は 3.2.1 と同条件で実験を行った。



Normal Plasma Normal Plasma
Direct photograph Schlieren photograph

Fig.7 Comparison of flame configuration with diffusion flame

ノズル内で青色のプラズマが電極部に発生していることが観察させる。また、直接写真とシュリーレン写真よりプラズマ発生時には火炎先端が開き気味となる傾向が得られた。この他にノズルから噴出される燃料に一定の周期をもって層流と乱流を繰り返す様子が見られた。これは印加電圧が周期性を持つことによる影響と考えられる。

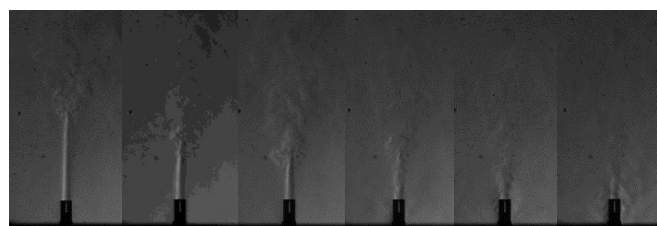
3.2.3 電圧による火炎の変遷 Fig.8 に燃料メタンを流量一定で燃焼させ印加電圧を徐々に大きくしたときの火炎形状の変遷を示す。電圧が 8kV , 9kV 付近で火炎先端が開き気味になり乱流状態になっていることが確認できる。また火炎長が短くなり燃えきりが早くなっていることも確認できた。



Normal 3.8kV 5kV 6kV 7kV 8kV 9kV

Fig.8 Translation of the flame with the applied voltage

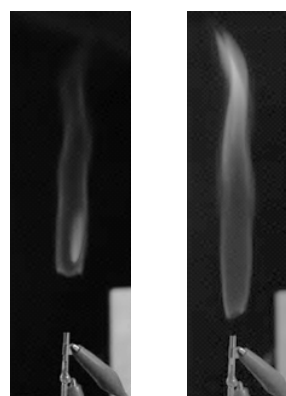
3.2.4 非燃焼場における噴流挙動 Fig.9 にプラズマ支援時に燃料メタンを同流量(1L/min)で流し印加電圧を変化させたときの非燃焼場において燃料噴流をシュリーレン撮影したものを示す。



Normal 3.8k 5kV 8kV 9kV 11kV
Fig.9 The jet behavior in non-combustion field with plasma

プラズマ支援無しの状態ではある程度の高さまで層流域が保たれていたがプラズマ支援時には印加電圧が大きくなるに連れて流れ下流部で乱流への遷移が早くなることが確認できた。また、プラズマの重畳時に噴流に周期的に振動が起こっている。この振動は印加電圧が周期性を持つことが原因であると考えられる。

3.3 火炎の安定 Fig.10(a)に燃料にメタンを使用しプラズマ支援を行わない拡散火炎, Fig.10(b)にプラズマ支援を行った火炎の浮き上がり時の比較写真を示す。



(a) Normal (b) Plasma

Fig.10 Comparison of lifting flame with plasma

燃料にメタンを使用してプラズマ支援を行った場合、プラズマ支援を行わなかった場合と比較すると写真より浮き上がり高さが短くなった。プラズマを燃料中に発生させると、化学反応性の高い活性種(CH ラジカル)が生成される。燃焼反応過程で生成される CH ラジカルをあらかじめプラズマによって生成しておくことで、燃焼反応が促進されたと考えられる。

3.4 火炎内温度分布

3.4.1 水平拡散火炎 Fig.11 に水平ノズルにメタンを流量 3L/min 流したときの水平拡散火炎の温度分布のグラフを示す。 $\text{CH}_4:3\text{L/min}$ の拡散火炎においてプラズマの有無が火炎の温度分布に与える影響を調査するため、R 型熱電対によりノズルのスリットからの高さ 0mm , 5mm , 10mm においてノズル先端から半径方向に温度測定を行った。プラズマ支援時の印加電圧は 6kV 、周波数は 17kHz の正弦波である。大気圧化におけるパルス放電によるプラズマ支援を行っても形成される火炎温度に大きな差は見られない。

最高温度は全ての高さでは、ほとんど変わらない。プラズマを発生させたときの火炎は温度分布が半径方向外側に広がる傾向にある。

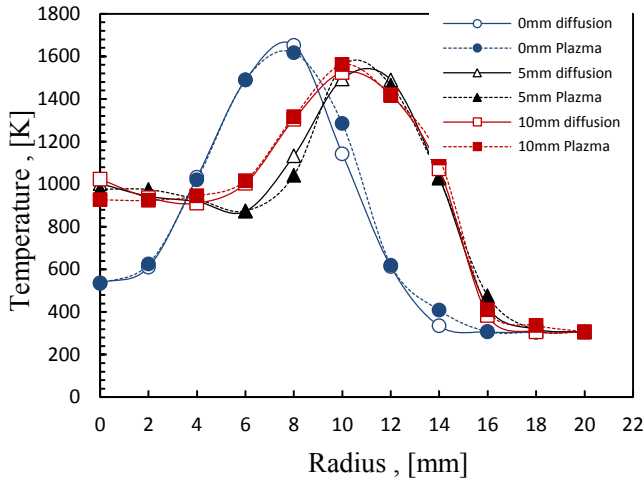


Fig.11 Temperature profiles of horizontal diffusion flame

3.4.2 水平予混合火炎 Fig.12 に水平予混合火炎(当量比 $\phi=28.6$)の温度分布のグラフを示す。燃料はメタン 3L/min に酸化剤として空気 1L/min を燃焼前に予め混合している。水平予混合火炎においてプラズマの有無が火炎温度に与える影響を調査するため、3.4.1 と同様に各高さにおいてスリットより半径方向に温度分布を測定した。グラフよりプラズマの有無が火炎の温度分布に影響はほとんどみられない。

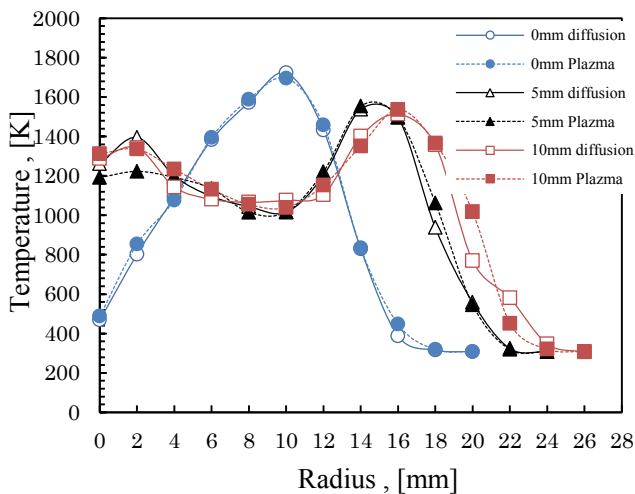
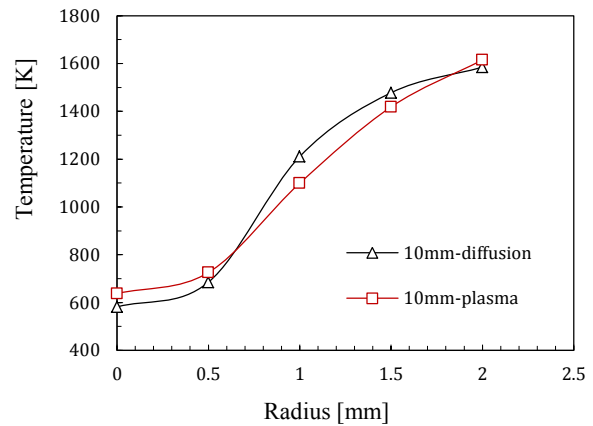


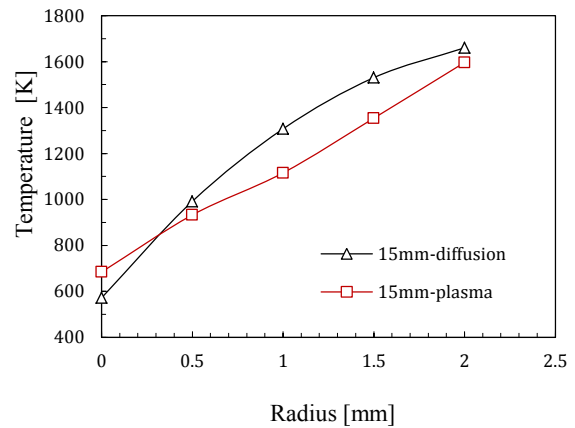
Fig.12 Temperature profiles of horizontal premixed flame

3.4.3 鉛直拡散火炎 Fig.13 に鉛直拡散火炎の温度分布を示す。内径 $\phi=4\text{mm}$ の鉛直ノズルを用い、管先端の中心から半径方向外側に各高さで計測した。全てのグラフで中心付近がプラズマ支援時に温度が上昇し 0.5mm 付近を境に逆転し温度が低下している。また火炎面付近のピーク温度が近い。中心の温度が高いことからプラズマによって励起された CH ラジカルにより、燃焼が促進されたことが温度上昇につながると考えられる。さらに外側では温度低下

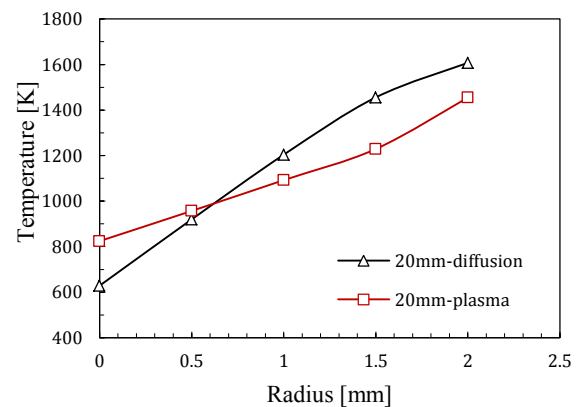
が見られるが、中心での燃焼が促進され燃えきりが早くなったことが考えられる。



(a) Height=10mm



(b) Height=15mm



(c) Height=20mm

Fig.13 Temperature of the vertical diffusion flame

3.5 NO_x 濃度分析

3.5.1 水平火炎 Fig.14 は水平ノズルにメタンを流量 3l/min で流したときの水平拡散火炎の NO_x 濃度を示したものである。燃料にメタンを使用した水平拡散火炎においてノズル中心より半径方向に計測した。プラズマの有無が火炎内の NO_x 生成に与える影響を調査した。プラズマ発生時

の印加電圧は 6.8kV で、周波数は 17kHz の正弦波である。

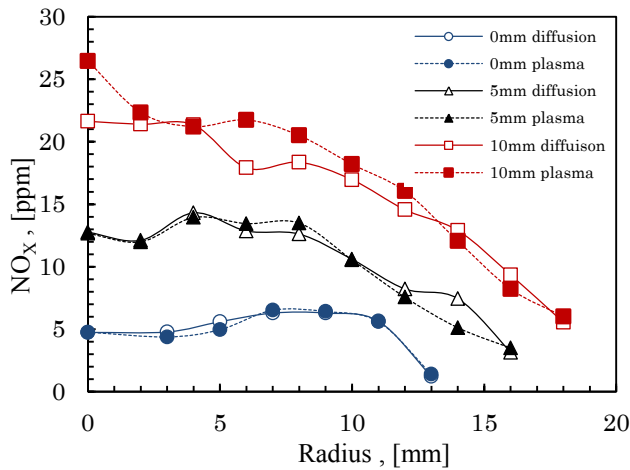


Fig.14 Profiles of NO_x with diffusion flame in horizontal flame

高さ 0mm の断面ではほとんど差は見られない。しかし下流部での高さ 5mm, 10mm の断面ではプラズマ有の場合、NO_x 濃度は火炎面付近に来ると下がる傾向がみられた。Fig.15 は燃料にメタン 3L/min に空気 1L/min を予混合して燃焼させたときの火炎内部の NO_x 濃度を示したものである。燃焼反応が最も行われていると考えられる高さ 5mm で半径方向に測定を行った。

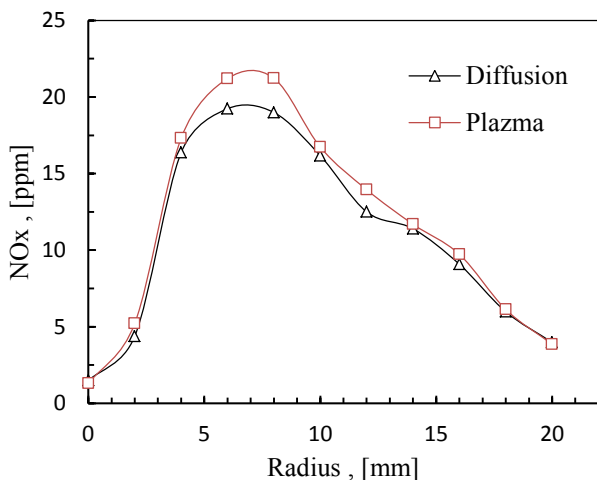


Fig.15 Profiles of NO_x with premixed flame in horizontal flame

予混合火炎では NO_x はプラズマ支援時の方が高くなっている。メタンに混合した空気中の酸素のラジカル化により、燃焼反応中に大気中の窒素との反応が促進された結果、NO_x の生成に至った可能性が考えられる。

3.5.2 鉛直火炎 Fig.16 は管径(φ=4mm)の鉛直ノズルで燃料をメタン(流量 2L/min)とした鉛直拡散火炎による NO_x 測定結果である。なお印加電圧は 6.8kV, 周波数は 17kHz である。

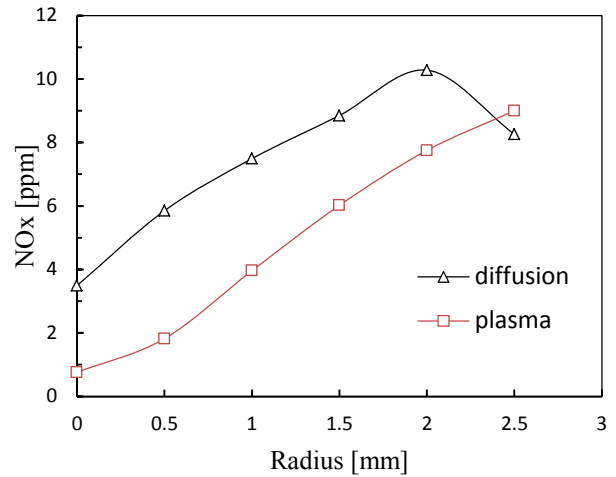


Fig.16 Profiles of NO_x in vertical diffusion flame

半径 2.5mm のあたりが火炎面にあたり、その内側の火炎内部の中心付近ではプラズマ支援により NO_x に減少傾向が見られた。火炎面内側の燃料リッチの付近であるため NO_x の生成過程としてプロンプト NO の減少が起因していると考えられる。燃料中でプラズマにより生成された CH ラジカルが空気中の酸素と反応促進し、窒素と結びつくはずの酸素を奪った可能性がある。

3.5.3 同軸流噴流拡散火炎 鉛直ノズル(φ=4mm)を筒状のガラス管(φ=57.4mm)で覆い、流量 0.15L/min, 印加電圧 7kV, 周波数 17kHz の条件において鉛直拡散火炎を形成し、プラズマ支援を行った場合の NO_x 濃度の測定比較を行った。測定の概略図を Fig.17 に示す。測定はガラス管上部の内壁から半径方向にプローブを移動させた。全体の NO_x 濃度を測定比較した。実験結果を Fig.18 に示す。

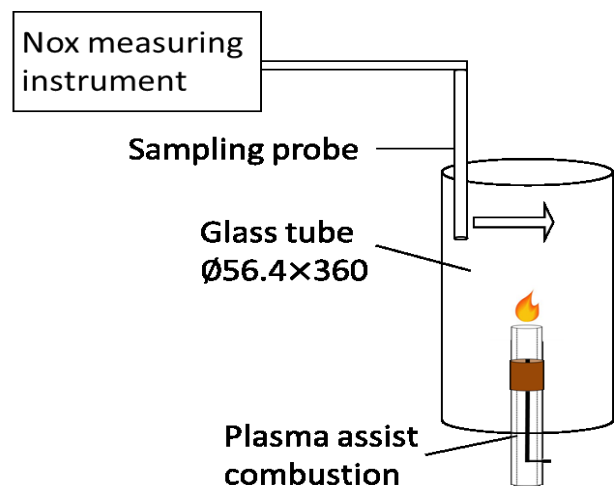
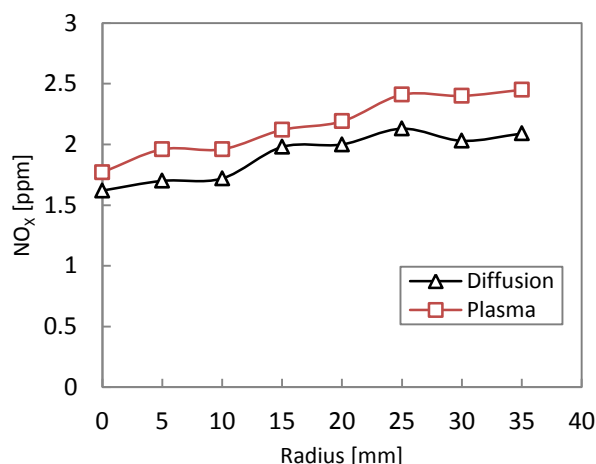


Fig.17 Schematic diagram of the measurement

Fig.18 Profiles of NO_x in coaxial jet diffusion flame

実験結果よりガラス管上部ではNO_x濃度は火炎内に比べて平均化され、ある程度一様に分布している。通常の拡散火炎に比べてプラズマ支援を行った場合、NO_x濃度は約10%上昇した。燃焼反応が促進の起因により上昇したと考えられる。

4. 結言

これらの実験を通して以下の結論を得た。

- (1) 波長 314nm および 389 nm, 431 nm において CH ラジカルが確認できた。プラズマ印加により本来燃焼反応中に現れる CH ラジカルが燃焼前に生成されることにより燃焼が促進される可能性がある。
- (2) 非燃焼場におけるプラズマ発生時の噴流挙動の変化により乱流への遷移が早くなることで通常の火炎に比べて燃焼性がよくなる。
- (3) 水平拡散燃焼、予混合燃焼においてはプラズマ支援時の温度分布への影響はほとんど見られなかったが、鉛直拡散火炎では火炎の中心域で温度上昇の傾向がある。
- (4) 鉛直拡散火炎の中心付近のNO_xがプラズマ支援により減少する可能性がある。
- (5) プラズマ支援で火炎の燃焼性がよくなり燃え切りが早くなる。
- (6) プラズマの重量による燃料流の乱れが火炎に乱れを生じさせ、反応面が増加したことによりサーマル NO が増加したと考えられる。

参考文献

- (1) 水谷幸夫：「燃焼工学」，森北出版株式会社，2008
- (2) 正司悠介：「メタン・水素予混合燃焼における火炎構造と安定限界に関する研究」，第84回定時総会講演会講演論文集，No.094-1，pp.12-6，(2009)

- (3) 出口幸治，吉本隆光，神戸市立工業高等専門学校研究紀要第50号，pp.51-56(2012)
- (4) Hara, H.：“Flame Behavior and Stability Limit on Radial horizontal Jet Premixed Flame of Low Calorie Biomass Gas”，Proceedings of ISME-Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (SPEC 2011), Summary or Paper-ISME520, 2011
- (5) 赤松浩・金田知大・市川和典，神戸市立工業高等専門学校研究紀要第50号，pp.87-92(2012)