

旋回噴流燃焼器を用いた非予混合気の予混合化燃焼と NOx 低減

Premixed Combustion of Non-Premixed Gases and NOx Reduction using the Cyclone-Jet Combustor

上島 光浩¹⁾

Mitsuhiro Uejima¹⁾

Abstract: As means for a stable premixed combustion, there is a so-called cyclone combustor, which consists of a cylindrical chamber and fuel nozzles installed tangentially on the side wall. In this combustor an extremely stable flame can be obtained in the swirl flow, formed along the inner wall of the combustor. We utilized this combustor as a flame holder, to burn a high velocity jet flowing axially in the central part, and named this combustor a cyclone-jet combustor. In general, it is difficult for the low NOx combustion to occur in diffusion flame. In the present study, experiments on the diffusion combustion by the cyclone-jet combustor were carried out. The mixtures of nitrogen and propane or methane were used for fuel. With the turbulence in the air flow changed, the effects on the NOx formation were examined in diffusion flame. It was shown that the increase of the flame temperature the NOx emission, while the increase of the turbulence reduces the NOx emission. The results suggest that the mixture of nitrogen with the fuel using this combustor becomes very effective for the NOx reduction, particularly under the strong turbulence.

Key Words: Burner, Swirl, Gaseous Fuel, Diffusion Combustion, Premixed Combustion, Nitrogen Oxides

1. まえがき

予混合火炎においては、燃料希薄な燃焼を行うことによって容易に NOx 排出を低減することが可能であるが、拡散火炎においては、一般にその火炎構造が故に低 NOx 燃焼を行うことは困難であった。近年、著者の所属する研究グループは、旋回噴流燃焼器と名付けた燃焼器の開発を行っており、気体燃焼において混合速度を速くすることによって、拡散火炎でも予混合火炎と変わらない低 NOx 燃焼が可能であることを示した[1]。

この低 NOx 燃焼は、図 1 に示すような旋回噴流燃焼器における火炎構造によってもたらされるものと推測された。燃焼器底部の旋回流ノズルにより形成されたリング状のパイロット火炎は、中心部を貫通する主噴流に対して火種を供給する。主噴流周辺部にエンタインされた火炎片は、下流に輸送されながら燃焼領域を噴流中心部へ拡大させる。したがって、燃焼器底部から噴出された燃料は着火までの間に時間遅れをもつことになり、この時間遅れの間に予混合化が進むことになる。乱れが大きく、混合速度が速いほど、この予混合化は促進されるものと考えられ、上述の旋回噴流燃焼器による NOx 低減は、この予混合化により希薄予混合燃焼に近い燃焼形態が得られた結果であると推測された。

このように着火前に燃料が周囲気体と混合する予混合化は、旋回噴流燃焼器内の燃焼に限らず、ディーゼル燃焼[2]、浮上がり噴流燃焼[3]~[5]、工業炉用バーナ燃

焼[6]、その他多くの一般燃焼場においても存在する工學上重要な現象であると考えられる。しかしながら、この現象は多くの作用因子が複雑に関与しているため、排気特性と諸因子の関係については不明な点が多い。

本研究においては、予混合化燃焼に対するより詳細な知見を得るために、非予混合の同軸噴流火炎において混合速度を変化させ、混合領域における予混合化が NOx 生成挙動に与える効果について検討を行った。また、燃料に窒素を混合することにより燃料の発熱量を変化させ、その際の NOx 生成挙動に及ぼす影響について調べた。

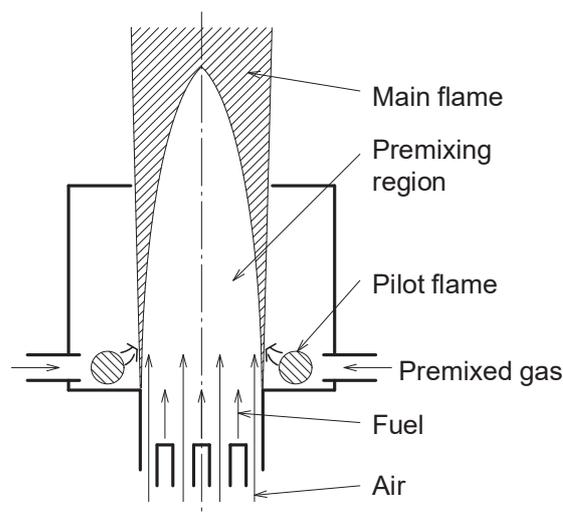


Fig.1 Combustion mechanism for cyclone-jet combustor

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科
生産システム工学コース

2. 実験装置および方法

図2に実験装置の概略を示す。実験装置は、燃焼室、旋回噴流燃焼器および三重噴流バーナで構成されている。燃焼室は内径100mm、高さ750mm、厚さ2mmのピアレックスガラス管である。燃焼室底部中心には、旋回噴流燃焼器が設置されており、上部中心の排気口は内径

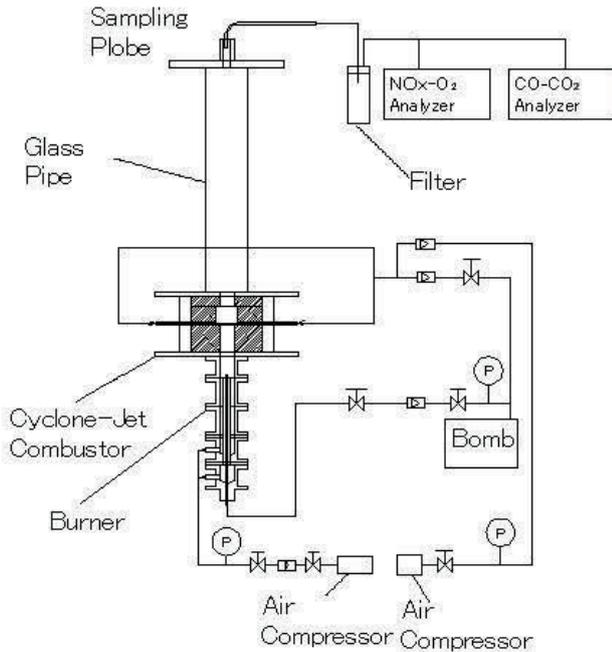


Fig.2 Experimental apparatus

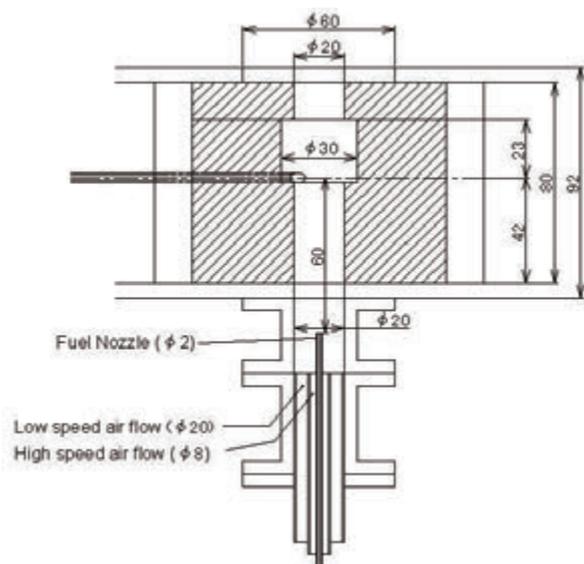


Fig.3 Cyclone-jet combustor and burner

Table 1 Experimental conditions

ΔU [m/s]	U_H [m/s]	U_L [m/s]
0	1.7	1.7
10	11.2	1.2

30mmの絞りを設けた。図3に旋回噴流燃焼器と三重噴流バーナを示す。旋回噴流燃焼器の構造は耐火レンガ製の円筒形で、くぼみ部は内径30mm、高さ25mm、出入口径が20mmである。くぼみ部底部側面の接線方向に設置された2本の旋回流ノズル（内径2mmステンレス製パイプ）によって、燃焼器内にリング状のパイロット火炎を形成する。この火炎は、空気流量20L/min、当量比0.85の希薄予混合火炎であり、NOx排出はほとんど認められない。

図3に示すように、旋回噴流燃焼器底面に三重噴流バーナを設置した。燃料ノズルは内径2mm（リム厚さ0.25mm）のステンレスパイプ、高速空気ノズルは内径8mm（リム厚さ1.0mm）のステンレスパイプ、低速空気ノズルは内径20mmの真鍮製である。また、空気流の乱れが燃料噴流に影響するように、燃料ノズルの先端は空気ノズル先端から16mm突き出している。燃料ノズル先端からパイロット火炎の旋回流ノズル中心までの混合距離は60mmである。この三重噴流バーナは、空気流量を一定にした状態で高速流と低速流の空気流速を変化させることにより乱れを変化させることができる。噴流火炎およびパイロット火炎ともに燃料にはプロパンおよびメタンガスを用いた。主噴流空気流量 $Q_a = 30\text{L/min}$ 一定で、空気流の高速側 U_H と低速側 U_L の速度差 ΔU を0 m/s と10 m/s に変化させて実験を行った。実験条件を表1に示す。

燃焼ガス内の化学種（NOx, CO）濃度の測定は、燃焼室排気口中心部に内径3mmのステンレス製ガスサンプリングプローブを挿入して行った。排気口断面でガス組成が均一であることを確認している。燃焼ガスはサンプリングプローブからフィルターを通過し、除湿機によってさらに水分を取り除きガス分析装置へ吸入される。サンプリングパイプの周りには内径11mmの黄銅性水冷ジャケットが覆っており、80°Cの温水で冷却することにより採取した高温ガスの反応を凍結させた。サンプリングラインには、内径6mmのテフロンチューブを使用し、排気ガス内の水蒸気がライン内で凝縮しNO₂が水に融解するのを防ぐために、チューブをバンドヒーターで加熱した。NOx濃度は化学発光法、CO濃度は非分散型赤外線吸収法によって測定した。使用したガス分析装置はNOx濃度に対してはNOA7000（島津製作所製）、CO濃度に対してはCGY-7000（島津製作所製）である。なお、本報においてはCO濃度が300ppm以下で、安定した燃焼が行われている場合のデータのみを採用している。また、本報告で用いている総括当量比 ϕ は、燃料と酸素の質量比を量論混合比で除した値として求めた。

火炎温度の測定には、素線径0.1mmのPt-Rh20%-Pt-Rh40%の熱電対を用いた。なお、校正曲線は放射損失の補正は行っていない。また、空気流速測定には定温度型熱線流速計CTA1011（KANOMAX製）を用いた。熱線プローブは、線径5 μm タングステン0251-5R

（KANOMAX製）である。温度および流速データの記録には、データロガーNR-600（KEYENCE製）を使用した。このデータロガーに高精度温度・電圧測定ユニットNR-TH08（サンプリング周波数10Hz）と高速アナログ測定ユニットNR-HA08（サンプリング周波数100kHz）を接続した。

3. 実験結果および検討

3.1 主噴流空気速度分布

図4に三重噴流バーナ燃料ノズル出口下流5mm断面における非燃焼時の空気流の時間平均速度 U と乱れ成分 u' の半径 r 方向分布を示す。速度差 ΔU が0m/sのときは、均一な流速分布であり、 u' は約0.1m/sと空気流の乱れ強さは弱い。一方、速度差 ΔU を10m/sにすると、火炎が形成される周囲空気中央部の平均流速 U は約11m/sと大きくなり、せん断流場が形成されるため乱れ成分 u' は最大で約1m/sに増加することがわかる。

3.2 空気流の乱れがNOx排出特性に及ぼす影響

図4の速度場に形成させたメタンおよびプロパンガス拡散火炎のNOx排出特性を図5に示す。横軸は総括当量比 ϕ 、縦軸はNOx排出指数 $EINO_x$ (燃料が1kg燃焼した場合のNOx排出量)である。なお、プロットしたデータは安定した燃焼状態が実現し、かつCO濃度が100ppm以下のデータである。この実験範囲より過濃側ではCO濃度が急上昇し、これより希薄側では火炎が不安定になると共にCO濃度が上昇し、さらに燃焼濃度を薄くすると火炎は消滅した。

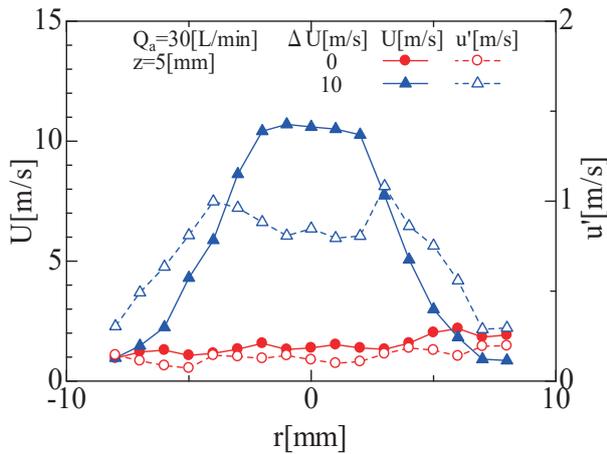


Fig.4 Velocity distribution

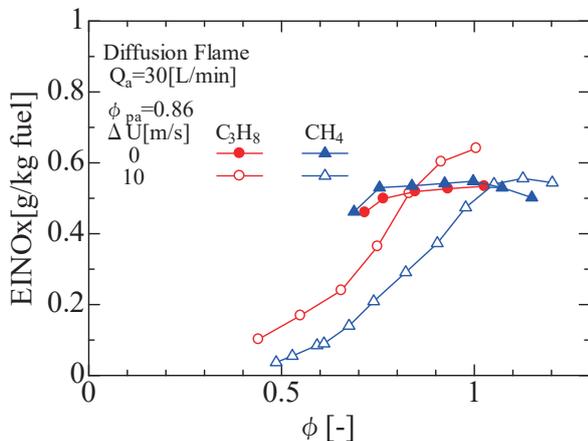


Fig.5 Effect of ϕ on $EINO_x$ for Diffusion flame

プロパンガスの結果を見ると、速度差 ΔU が0m/sのとき総括当量比が変化しても、 $EINO_x$ は高い値であり、さらに総括当量比の変化に対してほとんど影響を受けない一般的な噴流拡散火炎の傾向を示している。速度差 ΔU を10m/sにすると、燃焼範囲が希薄側に広がり、希薄燃焼を実現していることがわかる。また、 $EINO_x$ が総括当量比の低下に伴って減少するという典型的な噴流予混合火炎の傾向が現れている。メタンガスの結果でもプロパンガスと同様の傾向が現れており、加えて速度差 ΔU が0m/sのとき燃料の違いによる $EINO_x$ の差がほとんどない。一方、速度差 ΔU が10m/sのときプロパンよりもメタンのほうが $EINO_x$ は少ない。

この現象の発生理由は以下のように考えられる。一般に、総括当量比一定で予混合火炎と拡散火炎を比較した場合、燃料希薄な状態であるなら予混合火炎の方が排出されるNOxが少ないことが知られている[7]。これはThermal NOxの生成が反応帯の温度に対して敏感で、予混合火炎の場合にこの温度が当量比により強く支配されており、燃料希薄にしてゆくと温度が低くなりNOxは著しく減少することによる。一方乱れの弱い拡散火炎においては、燃料ガス塊と酸化剤ガス塊の界面に存在する反応帯の局所当量比は量論比に近い値をとり、総括当量比を小さくしても反応帯の温度はほとんど低下することはない、したがってNOx排出量はほとんど変化しない。

以上の議論を踏まえると、図5に現れたNOx排出特性の挙動は、拡散燃焼から希薄予混合燃焼への変化を意味し、その結果反応帯での火炎温度が低下したためNOxの排出が激減したと考えられる。そして予混合気中の乱れが増加することにより、さらに予混合化が進行したためNOx排出量が減少したと考えられる。なお、この現象は高温空気流中における非予混合浮き上がり火炎を対象にした著者らの実験[5]でも観測されている。この実験により、浮き上がり高さが大きく、かつ乱れが強いほど予混合化が促進されてNOx排出量は低減し、その値は予混合火炎に近づくことが明らかにされている。

次に、このようなNOx排出挙動の発生機構を調べることを目的として、熱電対によって火炎内の時間平均温度分布の測定を行った。図6はプロパン火炎に対して、総括当量比 $\phi=1.0, 0.8$ としたときの半径方向温度分布を各

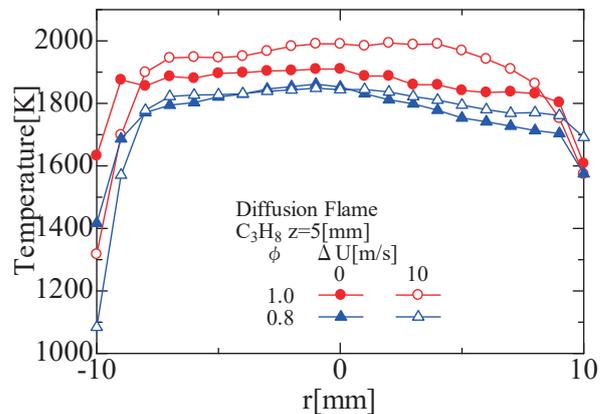


Fig.6 Flame temperature for Propane

実験条件について比較したものである。測定位置は旋回噴流燃焼器の出口下流5mm断面であり、横軸 r は中心軸からの半径方向距離を表す。図5の NO_x 排出挙動および図6の火炎内温度分布を比較することによって、以下の知見が得られる。

- (1) 総括当量比 $\phi=1.0$ のとき、速度差 ΔU が10m/sの場合には火炎温度の最大値は約2000Kであり、 ΔU が0m/sの場合には最大火炎温度は約100K低下している。
- (2) 一方、総括当量比 $\phi=0.8$ にするとときに、火炎温度は低下するが、速度差が高い方がその影響力が大きい。また、速度差の異なる両火炎の最大火炎温度はほとんど違いがない。
- (3) 本実験で発生している NO_x の大部分が火炎温度に依存するThermal NO_x であると考えられる。これらのことから、図6に示した火炎温度のデータと図5に示した EINO_x のデータは良い対応関係を示していることになる。

3.3 窒素混合が NO_x 排出特性に及ぼす影響

燃料の発熱量は、火炎構造に影響を及ぼすことが知られている。そこで、燃料ガス中における窒素ガスの体積混合比を変化させて排気ガス中の NO_x 濃度と温度分布を測定

した。プロパンおよびメタンガスの窒素混合燃料の NO_x 排出特性を図7と図8に示す。横軸は窒素ガスと燃料ガスとの体積混合比、縦軸は EINO_x である。これらの図より、以下の知見が得られる。

- (1) 燃料ガスに窒素ガスを混合すると EINO_x は低減し、 EINO_x の窒素低減効果は最大で単体燃料のその約50%である。
- (2) 当量比が小さいほど混合比は増加するが、窒素混合による EINO_x への低減効果は少ない。
- (3) 窒素を混合した場合には、速度差 ΔU の違いによる EINO_x の差はほとんど見られない。

窒素混合火炎の構造を調べるために火炎温度を測定した。旋回噴流燃焼器の出口下流5mm断面における半径 r 方向の火炎温度分布を図9と図10に示す。総括当量比は $\phi=1.0, 0.8$ それぞれ一定とした。これらの図より、燃料ガスの違いによらず、窒素を混合することによって火炎温度は低下していることがわかる。

前述のように、本実験で発生している NO_x の大部分がThermal NO_x であると考えられる。また図7および図8で示したように、窒素混合によって EINO_x は低減している。これらの実験事実は、火炎温度の低下が NO_x 排出量低減に寄与していることを示している。

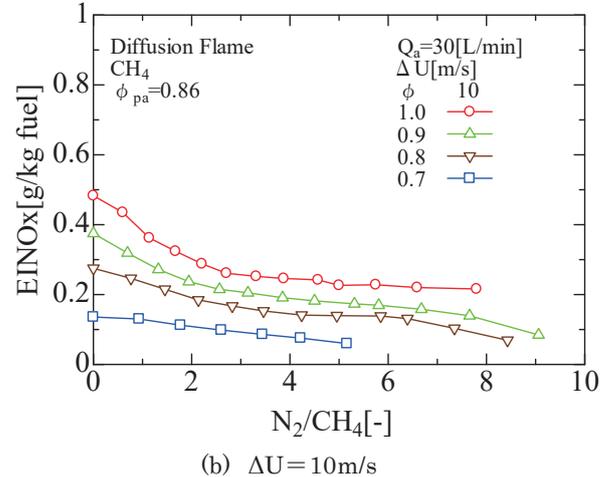
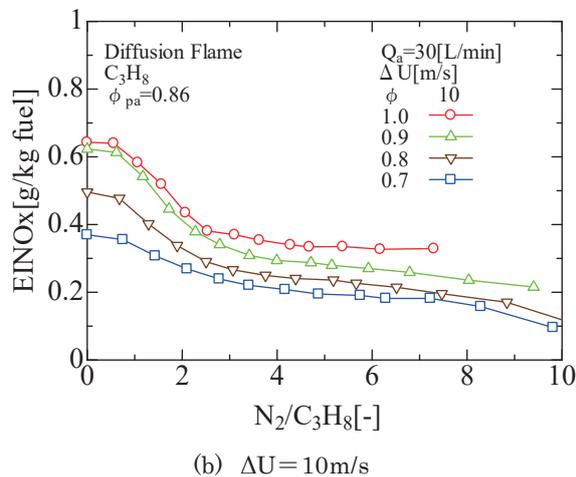
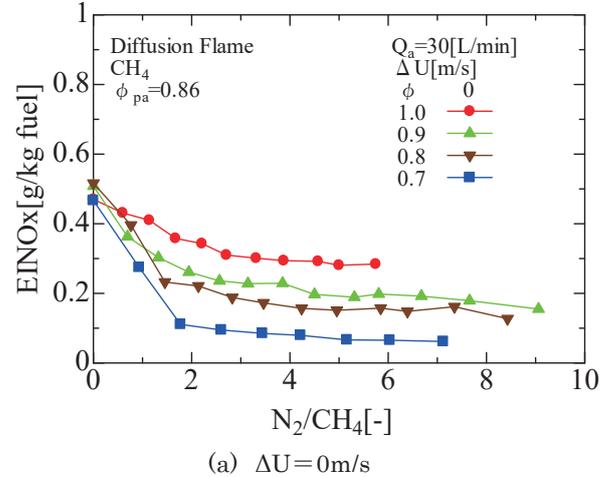
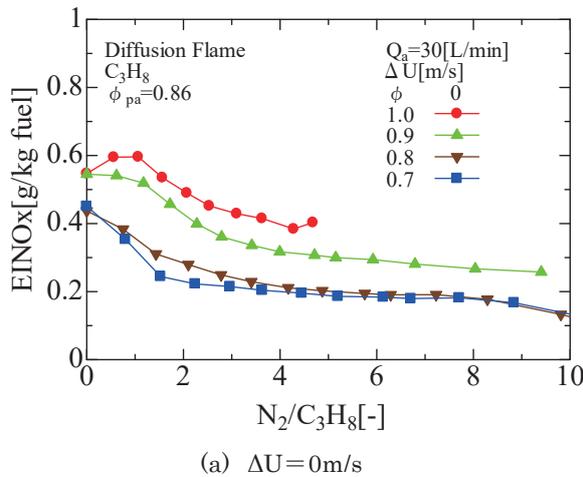
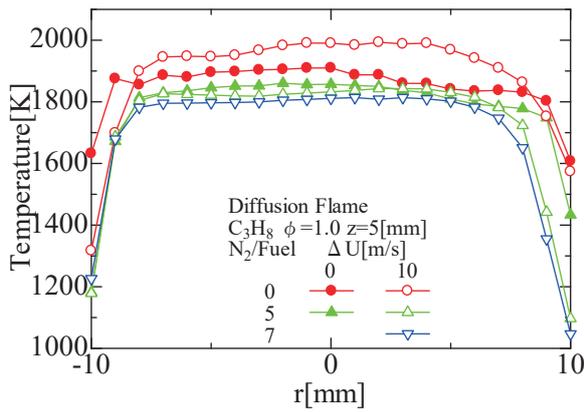
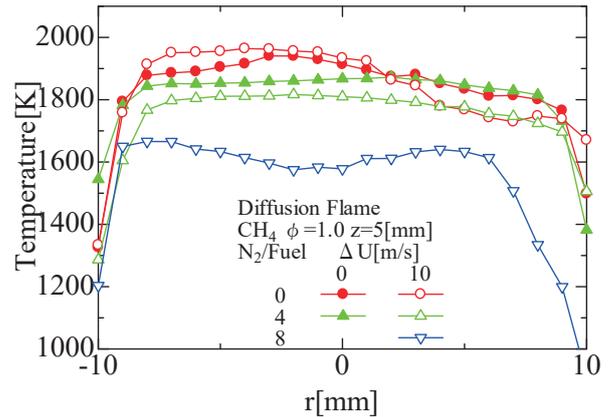


Fig.7 Effect of Nitrogen on EINO_x for Propane

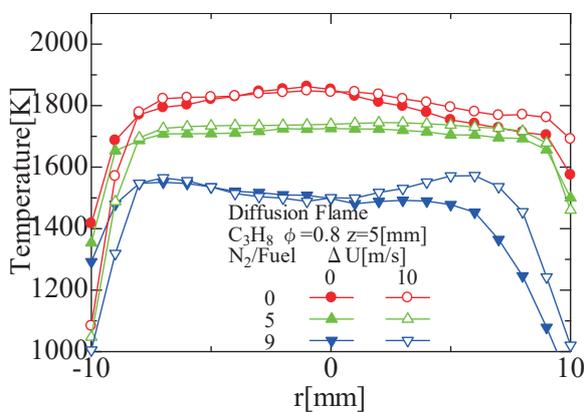
Fig.8 Effect of Nitrogen on EINO_x for Methane



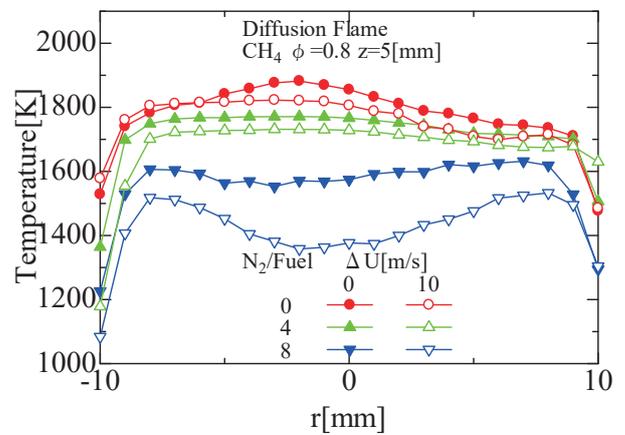
(a) $\phi=1.0$



(a) $\phi=1.0$



(c) $\phi=0.8$



(b) $\phi=0.8$

Fig.9 Flame temperature for Propane flame

Fig.10 Flame temperature for Methane

4. ま と め

旋回噴流燃焼器と三重噴流バーナを用いて、拡散火炎を対象に諸因子と NO_x 排出量の関係について調べ、さらに火炎構造について検討した。なお、燃料としてプロパンおよびメタン、さらにそれらに窒素を加えたものを用いた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 主噴流空気流の乱れが少ない場合に NO_x 排出量は高い値を示し、総括当量比を変えても NO_x がほとんど変化しないという拡散火炎の傾向が現れる。このとき、プロパンとメタンの NO_x 排出量はほぼ同一となる。
- (2) 乱れを増加させた場合に、総括当量比の低下に伴って NO_x 排出量が減少するという予混合火炎の傾向が現れた。また、プロパンよりもメタンの方が NO_x 排出量は少なくなる。
- (3) 燃料ガスに窒素を混合することにより火炎温度は低くなり、 NO_x 排出量が低減する。

以上の実験事実は、旋回噴流燃焼器を用いると拡散火炎の予混合化が進行することを示唆している。

謝 辞

実験に協力した東京都立産業技術高等専門学校品川キャンパス専攻科学生の柿沼純一君、藤本悟君に感謝する。

文 献

- [1] 小沼義昭・山内拓・馬渡正匡之ほか、日本機械学会論文集B編、第66巻642号、pp.579-584、2000
- [2] 柳原弘道、日本機械学会論文集B編、第63巻606号、pp.724-729、1997
- [3] Katsuki, M. and Hasegawa, T., The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air, Proc. Combust. Inst., 27, pp.3135-3146, 1998
- [4] Fujimori, T., et al., Effect of Ltoff on NO_x Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Coflowing Air, Proc. Combust. Inst., 27, pp.1149-1155, 1998
- [5] 上島光浩・岩木亮・脇村誠ほか、日本機械学会論文集B編、第71巻701号、pp.310-315、2005
- [6] 毛笠明志、宮藤章、辻下正秀、日本機械学会論文集B編、第68巻675号、pp.3219-3224、2002
- [7] 新井紀男、燃焼生成物の発生と抑制技術、テクノシステム、p.63、1997