高温空気流中における浮上がり噴流火炎の予混合化燃焼と NO_x 低減*上 島 光 浩^{*1}, 岩 木 亮^{*2}, 脇 村 誠^{*3}
野 田 進^{*4}, 小 沼 義 昭^{*4}Premixing Combustion of a Lifted Non-Premixed Flame in Hot Airstreams
and NO_x ReductionMitsuhiro UEJIMA^{*5}, Ryo IWAKI, Makoto WAKIMURA,
Susumu NODA and Yoshiaki ONUMA^{*5} Tokyo Metropolitan College of Technology, Department of Mechanical Engineering,
1-10-40 Higashiohi, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011 Japan

In general, it is difficult for the low NO_x combustion to occur in non-premixed flames. It was assumed that the premixing combustion by the spouting of fuel and air brought about the remarkable NO_x reduction in non-premixed flames. In the present study, experiments on non-premixed, lift-off jet flames in a high-temperature air stream were carried out. The premixing occurs in the lift-off region. The air temperature was 1073 K, and the mixture of ethylene and nitrogen were used for fuels. With the lift-off height changed, the effect of the premixing on NO_x formation was examined. It was shown that the increase of the lift-off height reduces NO_x emission. The results suggest that the premixing after the process of the injection of fuel becomes a very effective method for NO_x reduction in non-premixed combustion.

Key Words: Diffusion Combustion, Pollutant, Gaseous Fuel, Lifted Flame, Partial 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かつ確実に NO_x 排出を低減することが可能であるが、非予混合火炎においては、一般にその火炎構造からこのような希薄低 NO_x 燃焼を行うことは困難である。近年著者らは、旋回噴流燃焼器と名付けた燃焼器を開発しているが、この燃焼器を用いることによって、非予混合燃焼においても急速混合により予混合燃焼と変わりのない NO_x 低減が可能になることを示した⁽¹⁾。また、この NO_x 低減は、燃焼器入口では非予混合の燃料がノズルから噴射された後、着火までの時間に周囲空気と混合する予混合化によってもたらされることが示唆された。予混合化現象は、上記の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⁾⁽⁴⁾ その他多くの一般燃焼場においても存在する工学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。そこで本研究においては、着火温度より高温の空気流中に流れと平行にエチレングスを噴出して、浮上がり火炎および付着火炎を作り、実験条件が正確に把握できる単純な燃焼場で両火炎を比較することによって、浮上がり部における予混合化が NO_x 生成にいかなる影響を与えるかについて検討した。一方、本実験における浮上がり燃焼は、ディーゼル燃焼における燃料噴射から着火・燃焼へのプロセスと対応していると考えられることから、ディーゼル燃焼に関する基本的情報を得ることをも期待している。

2. 実験装置および方法

実験装置は図1のごとく二つの空気予熱器と燃焼器から構成されている。コンプレッサから供給された圧縮空気が予熱器によって加熱され、燃料の着火点以上の高温空気となり燃焼器に供給される。予熱器の発熱体としてシリコニットヒータ(出力4.2 kW)を使用した。実験中は常時、燃焼器入口から上流155 mmの主流空気温度を監視し、これを予熱空気温度 T_a とした。空気温度測定には素線径0.32 mmのクロメル-アルメル熱電対を使用した。空気温度の制御は温度調

* 原稿受付 2004年3月5日。

^{*1} 正員、東京都立工業高等専門学校(〒140-0011 東京都品川区東大井1-10-40)。^{*2} 豊橋技術科学大学院機械システム工学専攻(〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。^{*3} スズキ(株)(〒432-8611 浜松市高塚町300)。^{*4} 正員、豊橋技術科学大学工学部。

E-mail: uejima@tokyo-tmct.ac.jp

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

節器により行い、 ± 1 K の精度で温度を設定した。

燃焼器本体は、外径 165 mm 長さ 540 mm の鋼管の内側に挿入された断熱材と内径 31 mm の石英ガラス管から構成されている。燃焼器側面には幅 6 mm 長さ 500 mm の火炎観測用スリットを設けた。C-C 断面には多孔板(孔径 7 mm, 孔数 14 個)が設置されており、燃焼器に流入する空気乱れを与えている。燃焼実験に先立ち、燃焼器内のノズル先端部付近の水平断面温度分布を測定した。その結果、実験範囲内において空気流量を変化させても噴流が形成される主流部の温度分布は一樣(偏差は 1% 以内)であることを確認した。また、この測定断面の温度と予熱空気温度との差は 1~2% 程度であり、空気流軸方向に対する温度降下は小さいこともわかった。

燃料は内径 2 mm の噴射ノズル(ステンレス鋼管)から空気流に対して平行に噴出され、石英ガラス管内に同軸噴流火炎が形成される。燃料にはエチレン/窒素混合気を使用した。

本研究では、大きく分けて付着火炎と浮上り火炎の 2 種類の火炎が使用された。付着火炎は火炎前縁がノズルリム付近に保持された輝炎であるのに対し、浮上り火炎は火炎前縁がノズルリムから離れ、激しい振動を伴った不輝炎であった。炭化水素系燃料を対象として、浮上り火炎の前縁位置を測定する場合に、一般に火炎の直接写真を用いるが、火炎輝度が微弱な青炎であり、さらに火炎が変動していることが多いため火炎前縁を精度よく測定することは困難となる。

Fig. 2 Schematic of detector for OH radical

特に、本研究のように電気炉を用いた実験装置ではヒータからの放射光に火炎発光が埋もれる問題も生じる。そこで本研究においてはヒータから発する背景光の影響を極力少なくする手段として、火炎内に生成する OH ラジカルからの紫外域発光を検出する方法を用いた。

図 2 に OH 発光検出装置の概略図を示す。燃焼器内で発生した火炎からの発光は、石英製レンズ(焦点距離 $f=130$ mm)で集光された後、スリット、フィルタを透過して OH 発光のみを光電子増倍管(浜松ホトニクス, R 446, 最高感度波長 330 nm)によって検出する。レンズに対し燃料ノズル中心とスリットを $2f$ の距離をとって設置することにより、スリット面(0.5 mm $\times$ 15 mm)には等倍率で結像される。フィルタは金属干渉膜フィルタ(日本真空光学, MIF-W 形, 中心波長 310 nm, 半値幅 25 nm)を用いた。光電子増倍管

からの出力はA-D変換器を経てパーソナルコンピュータに記録され、さらに時間平均処理された。なお、以後プロットされたデータは周期 $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}$ で測定され、サンプリング数3000の平均値である。

火炎の浮上がり高さの測定は、OH発光検出装置をノズル先端から軸方向下流へ移動させて行った。図3は浮上がり高さ H_f の測定結果の一例であり、横軸はノズル先端からの軸方向距離 z 、縦軸は発光検出器からの出力電圧(時間平均値) E である。実験条件は予熱空気温度 $T_a = 1093 \text{ K}$ 、空気流量 $Q_a = 135.8 \text{ L/min}$ 、エチレン噴出流量 $Q_f = 1.0 \text{ L/min}$ であり、燃料は窒素で希釈していない。 $z = 0 \sim 35 \text{ mm}$ の範囲においては火炎が存在しない際にも検出される出力電圧(以後ベース電圧と呼ぶ)を示しているが、 $z = 40 \text{ mm}$ 付近から徐々に電圧は増加し始め、 $z = 100 \text{ mm}$ 付近で最大値に達している。図3に示すように、火炎

が存在している領域の各測定点を曲線で近似し、ベース電圧に対して出力電圧が10%増加した電圧値を基準に最大値の半値を示す位置を浮上がり高さ $H_f [\text{mm}]$ と定義した。

排気ガス中の化学種濃度の測定は、燃焼器出口中心部に外径10 mmのガスサンプリングプローブを挿入して行った。出口断面でガス組成が一樣であることを確認している。サンプリングパイプは内径2 mmのステンレス製で、温水で冷却することにより採取したガスの反応を凍結させた。サンプリングラインには内径4 mmのテフロンチューブを使用し、排気ガス中の水蒸気がライン内で凝縮し NO_2 が水に溶解することを防ぐためにチューブをニクロム線ヒータで加熱した。 NO_x 濃度は化学発光法、 CO 濃度は非分散形赤外線吸光法により測定を行った。

3. 実験結果および検討

3.1 付着火炎および浮上がり火炎の比較 燃料中の窒素とエチレンの体積混合比 R を変化させた場合に火炎形態、排気ガス中の化学種濃度および浮上がり高さがどのような挙動を示すか調べた。体積混合比 R は次式で定義した。

$$R = Q_{N_2}/Q_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_{N_2} および Q_f は窒素とエチレンの体積流量を示し、これらの流量と空気流量 Q_a はすべて標準状態換算値である。なお、燃焼器へ流入する空気流量および予熱空気温度、さらにエチレン流量を一定に保った。したがって、混合比 R を変えても総括当量比は一定、すなわち燃焼負荷は同じ条件下で実験が行わ

Fig. 3 Definition of lift-off height

Fig. 4 Influence of mixing ratio on $EINO_x$, lift-off height and CO

れたことになる。

図 4(a) に混合比 R が NO_x 排出指数 $EINO_x$ (エチレン 1 kg の燃焼によって排出される NO_x のグラム数) および浮上がり高さ H_f に及ぼす影響を示す。実験条件は、予熱空気温度 $T_a=1\,073\text{ K}$ 、空気流量 $Q_a=90.5\text{ L/min}$ 、エチレン噴出流量 $Q_f=1.0\text{ L/min}$ であり、総括当量比 $\phi=0.153$ である。図中の黒塗りのプロットは混合比を増加させていった場合、白抜きのプロットは減少させていった場合を示す。混合比を 0 から 1.4 まで増加させ、ついで 1.4 から 0 まで減少させると、浮上がり高さおよび $EINO_x$ の挙動がヒステリシス現象を示すことがわかる。以下に、これらの現象について詳細に検討する。なお、本実験における噴流レイノルズ数は、 $R=0, 1.5$ に対してそれぞれ 1 199, 2 237 である。

混合比 R が 0 から 1.1 まで増加する場合には、だいたい色の付着火炎が形成されており、その形態は拡散火炎の様相を呈している。一方、本研究で対象とした火炎は燃焼器内壁に段差がない場に形成された同軸噴流火炎であり、また使用した燃料ノズルのリム厚さは 0.2 mm と非常に薄いため、燃焼器壁面あるいはノズルリムの近傍において火炎を安定化させるような循環流の発生はないものと考えられる。

$R=1.2$ になると突然、火炎前縁がノズルリムから離れ青色を呈した浮上がり火炎に変化し、浮上がり高さ H_f は 177 mm となる。さらに、混合比を増加すると浮上がり高さは高くなる傾向を示した。この付着火炎から浮上がり火炎に遷移するメカニズムは以下のように考えられる。

一般に、低速の常温空気流に対して平行にノズルから燃料ガスを噴出した場合、燃料流速が遅い場合はノズルリム付近に付着した火炎が形成される。燃料流速を増加させると火炎はリムを離れて浮上がり火炎を形成する。また、火炎前縁は燃焼速度と混合気流速がバランスした点に位置し、さらに燃料流速を増加させるとその位置において保持することができなくなり、混合気流速の遅い下流へ火炎前縁が移動し、最終的には吹飛びを起こす。一方、本実験のような燃料の着火点以上の高温空気を周囲流として用いた場合には、燃焼速度より速い高速気流中においても浮上がり火炎が形成される。ただし、この場合の火炎前縁は上述の機構によって安定されるのではなく、低温燃料と高温空気が混合され同時に反応が進行すると、ある時間遅れ後に自発着火を起こし火炎が出現したのと考えられる。また、着火遅れによる機構によって形成された火炎である根拠として、図 5(b) で後述するように空気

温度をわずか 20 K 程度変化させただけで浮上がり高さは大きく変化した本研究の実験事実が挙げられる。空気温度と着火遅れの関係については、著者らが以前に行ったエチレングス噴流の着火実験⁽⁶⁾において調べており、着火遅れは空気温度に対して非常に敏感であり、5 K 程度の変化が着火遅れの値に対して大きな影響力をもつことを明らかにしている。

図 4(a) の NO_x 排出挙動を見ると、付着火炎形成時における $EINO_x$ は高い値を示し、混合比の増加に対してほとんど変化していないことがわかる。一方、浮上がり火炎に変化したと同時に $EINO_x$ は激減し、その後浮上がり高さの増加とともに NO_x 排出量がさらに減少している。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ほうが排出される NO_x が少ないことが知られている⁽⁶⁾。これは Thermal NO_x 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 NO_x 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 NO_x 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 4(a) に現れた付着火炎から浮上がり火炎への遷移は、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 NO_x の排出が激減したと考えられる。そして浮上がり高さが増加することにより、さらに予混合化が進行したため NO_x 排出量が減少したと考えられる。なお、この現象は常温空気流中においてパイロット火炎によって任意の位置に保持された非予混合浮上がり火炎を対象にした著者らの実験⁽⁷⁾でも観測されている。この実験により、浮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 NO_x 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。

次に混合比を 1.4 から 0 に下げてゆくと、浮上がり高さはしだいに小さくなり、 $R=0.4$ になると付着火炎 ($H_f=0$) が形成される。一方、NO_x 排出挙動は、 $R=1.4$ から 0.5 の範囲では急激に増加しており、再付着すると混合比を増加したときの排出挙動と一致している。つまり図 4(a) 中の $R=1.4$ 付近においては希薄予混合燃焼、 $R=1.4$ から 0.5 の範囲では部分予混合燃焼、 $R=0.4$ から 0 までは拡散燃焼の形態をとっ

ていることが推察できる。

以上の結果より、 R が 0.5 から 1.2 までの範囲においては付着火炎と浮上がり火炎の二つの火炎形態が存在することとなり、両者は同じ条件でありながら NO_x 排出量に大きな相違が見られる。例えば $R=1$ で $E\text{INO}_x$ を比較すると、 R を増加させていった場合の付着火炎では 18.7 g/kg fuel であるのに対し、 R を減少させた浮上がり火炎では 0.73 g/kg fuel となり、 $E\text{INO}_x$ は 1/25 に減少している。

図 4(b) は上記実験における排気中の一酸化炭素濃度 CO を $E\text{INO}_x$ とともに示したものである。この結果において CO と $E\text{INO}_x$ の間にトレードオフの関係があることがわかる。すなわち付着火炎では一酸化炭素の排出はほとんどないが、浮上がり火炎に遷移すると排出が認められる。しかし、その排出濃度は最高でも 200 ppm 程度と非常に低く、本実験範囲内では良好な燃焼が行われていると考えられる。

3.2 空気温度および空気流量の影響 高温に予熱された空気を用いることにより噴流拡散火炎の燃焼安定範囲は拡大するが、前述のごとく Thermal NO_x は混合気温度の上昇によって増大するので、空気の予熱温度を上げると NO_x 排出量は増加することが予想される。そこで、予熱空気温度が $E\text{INO}_x$ および浮上がり高さにどのような影響を与えるか調べた。

図 5(a) は予熱空気温度 T_a を 1073 K から 1093 K へ上昇させた場合の混合比 R と $E\text{INO}_x$ の関係を示したものである。空気流量 $Q_a=113.2$ L/min, エチレン噴出流量 $Q_f=1.0$ L/min である。図 5(a) 中の R が増加する場合で付着火炎が存在している領域、つ

まり 1073 K における $0 < R < 0.9$ と 1093 K における $0 < R < 1.1$ の範囲において両者の NO_x 排出量にはほとんど違いがないことがわかる。この実験事実は、予熱空気温度を 20 K 程度上昇させても Thermal NO_x の排出に対しては影響力をもたないことを示している。一方、浮上がり火炎に遷移した後の NO_x 排出量を比較すると、予熱空気温度の高いほうが全領域にわたって高い排出量を示している。

図 5(b) は図 5(a) における浮上がり火炎に対する浮上がり高さ H_f と $E\text{INO}_x$ を示したものである。図 5(b) を見ると、浮上がり高さ H_f と $E\text{INO}_x$ とには明らかな対応関係が認められ、空気温度の上昇によって浮上がり高さが小さくなり、その結果予混合化の程度が低くなって $E\text{INO}_x$ が増大しているのがわかる。 $R=1.0$ における浮上がり高さを比較すると、 $T_a=1073$ K においては 182 mm であるのに対し、 $T_a=1093$ K では 101 mm となり、その結果 $E\text{INO}_x$ は 0.3 から 6.2 へと 20 倍に増加している。ここで予熱空気温度を上げることによって浮上がり高さが低くなっているが、これは空気温度の上昇により着火遅れ時間が短縮されたことがおもな原因である。前述のごとく、着火遅れと空気温度の関係については、著者らのエチレン噴流の着火実験⁵⁾ において確認している。

次に、図 4 および図 5 のデータを構成し直して空気流量の影響について調べた。空気流量を増加させると、当然燃焼器内における空気流速の時間平均値は増加するが、それに加えて、図 1 で示した燃焼器入口に多孔板を設置しているため、燃焼器内主流部の乱れも強くなる。したがって、空気流量の増大により空気と

Fig. 5 Influence of air temperature on $E\text{INO}_x$ and lift-off height

Fig. 6 Influence of airflow rate on EINO_x and lift-off height

燃料の混合が促進され则认为される。

図6(a)は、予熱空気温度 $T_a=1073\text{ K}$ 、エチレン噴出流量 $Q_f=1.0\text{ L/min}$ を一定にして、空気流量 Q_a を 90.5 L/min (総括当量比 $\phi=0.153$) から 113.2 L/min ($\phi=0.122$) へと増加したときの混合比 R と EINO_x の関係を示したものである。図5(a)に示す予熱空気温度を変化させたときの結果と同様、付着火炎の存在する領域での EINO_x は、両火炎においてほとんど違いがないことが確認できる。一方、図6(b)は図6(a)における浮上り火炎に対する浮上り高さ H_f と EINO_x を示したものである。空気流量を大きくして混合気流速を上げると、浮上り高さが増加して NO_x 排出量が減少していることがわかる。

また、3・1節で述べた常温空気中における浮上り火炎を対象にした著者らの実験⁽⁷⁾において、浮上り高さは同一で周囲空気の流れを増加させた場合に NO_x 排出量が低減する現象を観測している。この実験事実と図5(b)および図6(b)に示した本実験結果は、非予混合火炎において浮上り高さが大きく、かつ空気流の流れが強いほど浮上り領域の予混合化が促進し NO_x 低減効果が大きくなることを示唆している。

4. ま と め

一般に、非予混合火炎において NO_x 排出量を低減することは容易でないが、予混合化を利用して部分予混合燃焼させることにより大幅な NO_x 低減の可能性が考えられる。そこで本研究では、着火温度より高温の空気流中に形成された浮上り火炎および付着火炎

を実験対象とし、浮上り領域における予混合化が NO_x 生成に与える影響について検討した。燃料にはエチレン・窒素混合気を用い、燃料流量は 1.0 L/min 一定とした。以下に結論を示す。

(1) 同一条件下でも付着火炎と浮上り火炎とでその NO_x 生成挙動は大きく異なり、浮上り火炎にすることによって NO_x 排出量を激減させることができる。

(2) 付着火炎においては NO_x 排出量に変化が見られないわずか 20 K 程度の空気温度の低下でも浮上り高さは大きくなり、これにより NO_x 排出量は低減する。

(3) 空気流量の増加は、空気流中の乱れの増加によって空気と燃料の混合を促進させるとともに、浮上り高さを大きくし NO_x 排出量を低下させる。

(4) 浮上り火炎における NO_x 低減は、浮上り領域における予混合化および部分予混合化によってもたらされるものと推察される。

文 献

- (1) 小沼義昭・ほか4名, 機論, **66**-642, B (2000), 579-584.
- (2) 柳原弘道, 機論, **63**-606, B (1997), 724-729.
- (3) Katsuki, M. and Hasegawa, T., *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, (1998), 3135-3146.
- (4) Fujimori, T., ほか2名, *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, (1998), 1149-1155.
- (5) 上島光浩・小沼義昭, 機論, **58**-556, B (1992), 3773-3778.
- (6) 新井紀男, 燃焼生成物の発生と抑制技術, (1997), 63, テクノシステム.
- (7) 小沼義昭・ほか4名, 第39回燃焼シンポジウム講義集, (2001), 27-28.