液体燃料の予蒸発・予混合燃焼における NO_x 排出特性

檜 戸 清^{*1}, 小林 啓 信^{*1}, 村上 忠 孝^{*2}
小豆 畑 茂^{*3}, 桐 上 清 一^{*4}

NO_x Emission of Lean Premixed-Prevaporized Combustion for Liquid Fuels

Kiyoshi NARATO, Hironobu KOBAYASHI, Tadayoshi MURAKAMI,
Sigeru AZUHATA and Seiichi KIRIGAMI

An experimental study was conducted to examine NO_x emission of a premixing-prevaporizing flame stabilized with a bluff body. The liquid fuels, such as kerosene and light oil, were sprayed into the premixing-prevaporizing chamber with an air-atomizing nozzle. The size distribution of fuel spray, vaporizing time and heterogeneity of the mixtures were varied by varying the degrees of atomization and the length of the premixing-prevaporizing chamber. Velocity, concentration and Sauter mean diameter of the fuel spray in the vaporizing process were measured by means of a particle dynamics analyzer (PDA). The NO_x emissions from premixed -prevaporized flames decreased with decreasing size of sprayed fuel droplets and increasing vaporizing rate. It was possible to reduce the NO_x emissions from kerosene flames to the same level as methane-air premixed flames. While light oil has the lowest vaporizing rate, the temperature profile of its flame became similar to that of the methane flame and its NO_x emission level also approached that of the methane flame with the promotion of vaporization.

Key Words: Premixed Combustion, Premixing-Prevaporizing Flame, Atomization, Combustion Products, NO_x Emission, Liquid Fuel, Spray

1. ま え が き

近年, 環境保全の立場からガスタービン燃焼器からの NO_x の排出規制が厳しくなっている。

ガスタービン燃焼器では従来拡散燃焼法が採用されていたが, 拡散火炎は局所的に高温部が形成されるため NO_x 抑制に限界があった。そのために最近では希薄予混合燃焼が低 NO_x 燃焼法の主流になりつつある⁽¹⁾。気体燃料を用いたガスタービン燃焼器ではすでに希薄予混合燃焼法が一部実施されている⁽²⁾。

液体燃料についても予混合燃焼法が有望視され, 現在検討が進められている⁽³⁾。液体燃料の場合には, 燃料を蒸発させる必要があることから気体燃料に比べて予混合気の形成が難しく, 液体燃料の予混合火炎からの NO_x 排出量はこの燃料の蒸発度合いに大きく影響される^{(4)~(6)}。しかしながら, 噴霧粒子の蒸発過程については定量的な検討は極めて少なく, 蒸発の度合いと NO_x 排出量の関係を定量的に評価するまでには至っていない。したがって, 液体燃料の予混合火炎からの

NO_x 排出特性を明らかにするには噴霧の蒸発過程を評価することが重要と考える。

本報では, 灯油と軽油の2種類の液体燃料を用い, 蒸発過程にある噴霧粒子の濃度、粒径および速度と, 各燃料の予混合火炎内のガス温度を計測し, これらの因子が NO_x 排出濃度に及ぼす影響について検討した。また, メタンを用いた予混合燃焼実験を行い, 気体と液体燃料の予混合火炎の特徴を比較した。

2. 記 号

C_P : $1\ \mu\text{m}$ に換算した噴霧粒子の濃度 個/ cm^3
 d_P : 噴霧粒子の粒径 μm
 d_{32} : ザウタ平均粒径 μm
 L : アトマイザから保炎器までの距離 m
 l : アトマイザから計測位置までの距離 m
 R_o : 予蒸発・予混合室半径 m
 r : 燃焼室中心からの半径方向距離 m
 T : 温度 K
 T' : 温度の変動成分 K
 T_a : 空気温度 K
 T_{mean} : ガスの平均温度 K
 T_{max} : ガスの最高温度 K
 U_P : 粒子の主流方向平均速度 m/s

* 原稿受付 平成4年10月7日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所日立研究所(〒312 勝田市堀口832-2)。

^{*2} (株)日立製作所日立研究所。

^{*3} 正員, (株)日立製作所日立工場(〒317 日立市幸町3-1)。

^{*4} (株)日立製作所日立工場。

V_a : 予混合気の噴出速度 m/s

W_a : 噴霧媒体(空気)の質量流量 kg/h

W_l : 液体の質量流量 kg/h

SR: 空気比

3. 実験方法

3・1 燃焼装置 本報の燃焼実験では、図1および図2に示す二つの実験装置を使用した。図1と図2の実験装置は予蒸発・予混合室の構造が異なる。図1の実験装置は予蒸発・予混合距離を変化させ、蒸発過程にある噴霧粒子の計測と NO_x 排出量の関係を検討するために使用した。噴霧粒子の蒸発と燃料-空気の混合を行う予蒸発・予混合室は、内径が50 mm、長さはダクトの接続により任意に変化できる。予蒸発・予混合距離(アトマイザからブラフボデー間の距離)はダクトの長さでアトマイザの位置を変えることで変化した。燃焼室は内径が200 mm、長さが1300 mmであり、二重管で構成し外側を水冷した。予蒸発・予混合室および燃焼室には観測窓(計測窓)を設けた。加熱された燃焼用空気はガラスビーズの充てん層に導入され、ここで整流された後、予蒸発・予混合室に流入する。液体燃料の噴霧に使用するアトマイザは、予蒸発・予混合室の中心軸上に設置した。液体燃料は高圧ポンプに

よりアトマイザへ供給し、ポンプより供給した高圧の空気により液体燃料を微粒化し予蒸発・予混合室内を流れる加熱空気中に噴霧した。予蒸発・予混合室では噴霧した燃料の蒸発と燃料-燃料用空気の混合が進み、燃料-空気の予混合気として燃焼室に噴出され火炎を形成する。予混合火炎は谷口らの実験と同様に予蒸発・予混合室出口に設置した直径30 mmの円板状のブラフボデーにより保持した。

図2の実験装置は、ガラスビーズの充てん層をアトマイザの後流に設置し、噴霧粒子が加熱されたガラスビーズに衝突することで燃料の蒸発と燃料-空気の混合を促進し、気体燃料と同様の均質な予混合気が得られるようにした。

また、メタンを使用した燃焼実験は、メタンを燃焼装置上流側で燃焼用空気中に混入し、予蒸発・予混合室に導入されるときには均質な予混合気が形成されるようにしてブラフボデーにより火炎を保持させた。

3・2 アトマイザの微粒化特性 本実験で使用したアトマイザは内部混合形の2流体アトマイザである。燃料は約20°の角度で噴霧し、燃料が予蒸発・予混合室の内壁に付着しないようにした。

図3および図4に水を噴霧したときのアトマイザの微粒化特性を示す。常温、常圧のダクト内に水を噴霧

図1 実験装置(その1)

図2 実験装置(その2)

し、粒径はレーザ光の粒子表面でのフランホーヘル回折を利用した非接触計測器(MALVERN 社)を用いアトマイザから 100 mm 下流の位置で測定した。図 3 は気液質量比(W_a/W_l)と噴霧粒子のザウタ平均径 d_{32} の関係、図 4 は代表的な W_a/W_l に設定したときの噴霧粒径の質量頻度分布を示す。 W_a/W_l を大きくすると d_{32} は小さくなる。特に、 W_a/W_l が 0.8 以下のときには、 W_a/W_l のわずかな変化により d_{32} は大きく変化する。一方、 W_a/W_l が 1.0 以上のときには W_a/W_l を変化しても d_{32} はあまり変化しない。また、 W_a/W_l を変

図 3 気液質量比と平均粒径の関係

図 4 噴霧粒子の粒径分布

えることで粒径分布も変化し、 W_a/W_l を小さくすると粒径の大きな液滴の割合が増加する。たとえば、 W_a/W_l が 1.27 のときに測定される液滴の最大粒径は $45 \mu\text{m}$ であるが、 W_a/W_l を 0.39 にするとその 4.4 倍の $200 \mu\text{m}$ の液滴まで存在する。以上の微粒化特性を利用して、 W_a/W_l を変えることにより噴霧粒子の粒径を変化させ実験を行った。なお、実験に使用した灯油、軽油については噴霧粒子の粒径を直接測定していないが、水に比べて表面張力が小さいので図 3 および図 4 に示した水を噴霧したときの粒径に比べ細かいと考えられる。

3・3 噴霧粒子および火炎内ガス温度の計測 蒸発過程にある液滴の粒径、速度および濃度の同時計測は、粒子流動装置(Particle Dynamics Analyzer DANTEC 社)を用いて非接触で行った。図 5 に計測装置の構成を示す。計測装置は、レーザ発振器、投光光学系、受光光学系、フォトマル、信号処理器およびデータ処理を行う計算機より構成される。レーザ発振器は 4 W の出力のアルゴンイオンレーザであり、緑(514.5 nm)と青(488 nm)のレーザ光を出力する。投光光学系では各出力光を 2 本の平行光に分割し、プラグセルを用いて一方の周波数を 40 MHz 偏移させた後、収束レンズで焦点に収束させる。ビームの交差点は測定点で干渉じまが形成され、この間隔はレーザ光の交差点と波長で定まる。噴霧粒子が測定点を通過すると、散乱光の強度は干渉じまの明暗に対応して変化する。受光光学系は散乱光の強度変化を電圧変化に変換し信号処理器へ出力する。この電圧信号の周波数は噴霧粒子の速度に比例しており、速度は信号処理器で測定し

図 5 PDA 構成図

た周波数から計測される。また、複数個のフォトマルを配して、噴霧粒子の散乱光を複数の位置から検出すると、電圧信号間に粒径に比例した位相差が生じる⁽⁸⁾。噴霧の粒子径はこの特性を利用して測定される。信号処理器は噴霧粒子の到達時間を計測するため、測定点の体積を見積もることで粒子の濃度も同時に測定できる。本測定の測定点は $300 \times 300 \times 300 \mu\text{m}$ である。

火炎内のガス温度の計測は線径が $50 \mu\text{m}$ の白金-白金ロジウム(13%)熱電対を用い、熱電対の応答遅れを電気回路により補償した⁽⁹⁾。

3・4 燃料性状 本報では、表1に示す灯油、軽油およびメタンの3種類の燃料を使用した。灯油、軽油は沸点、引火点、発熱量のほか炭素(C)および水素(H)の比率が異なる。これらの特性および組成は液滴の蒸発や火炎温度に影響し NO_x 排出量が異なってくるものと予想される。

3・5 ガス分析 燃焼ガスの分析は燃焼装置出口で行った。燃焼ガス中の NO_x 濃度は化学発光法の NO_x 計(Beckman 951形)、 O_2 および CO は赤外分析計(堀場 PMA-200 形, VIA-300 形)で測定した。

3・6 実験条件 燃焼用空気の燃焼室入口温度は $573 \sim 623 \text{ K}$ 、空気流量は $61 \sim 200 \text{ m}^3 \cdot \text{N/h}$ 、噴出速度は $10 \sim 65 \text{ m/s}$ 、液体燃料の供給量は灯油および軽油とも $5 \sim 15 \text{ L/h}$ 、 W_a/W_i は $0.395 \sim 1.41$ に設定し大気圧下で実験を行った。

4. 実験結果と考察

4・1 蒸発過程の相違が NO_x 排出濃度に与える影響 図6は、灯油と軽油の噴霧条件(W_a/W_i)を変化したときの NO_x 排出濃度を示す。実験は、図1の装置を用い、アトマイザから保炎器までの距離を 245 mm に設定し、比較的蒸発、混合距離が短い条件で行った。なお、図6中に示す空気比 SR は、実際に供給した空気量と理論空気量との比で求めた。灯油、軽油ともに NO_x 排出濃度は同程度あり、 W_a/W_i のわずかな変化でも NO_x 排出濃度は大きく異なる。蒸発、混合距離が

短い条件では、 NO_x 排出濃度は噴霧粒子の粒径により大きく影響され噴霧粒子の粒径を小さくしないと NO_x 排出濃度は低減されない。また、灯油、軽油ともに W_a/W_i が 1.1 以上の条件になると NO_x 排出濃度はほぼ一定となる。これは、 W_a/W_i が 1.1 以上になると噴霧粒子の粒径が変わらないためである。

NO_x 排出濃度に及ぼす W_a/W_i の影響は、噴霧の蒸発過程に起因することが考えられるので次に蒸発過程にある噴霧粒子の挙動を検討した。

図7は灯油を空気中に噴霧したときにアトマイザから 135 mm 下流の位置で予蒸発・予混合室の中心軸上の噴霧粒子の主流方向平均速度 U_p 、濃度 C_p およびザウタ平均粒径 d_{32} を計測した結果である。 W_a/W_i を変えるときは燃料流量 W_i を一定にして噴霧媒体量 W_a のみを変化させた。アトマイザから 135 mm 下流の位置における粒子の速度は W_a/W_i が大きいほど速い。噴霧粒子の速度の速い条件ほど計測位置までの滞留時間は短くなっているが、 W_a/W_i が小さく粒子の滞留時間の長いときよりも粒子の濃度は減衰している。たとえば、 W_a/W_i が 0.4 のときには約 7000 個/ cm^3 の粒子が計測されるが、 W_a/W_i が 1.27 のときの粒子は約 250 個/ cm^3 と約 $1/30$ 減衰している。また、 W_a/W_i の大きい条件では、蒸発過程にある噴霧粒子の粒径も小さく、このことから噴霧粒子の蒸発は粒径の依存性が高いことがわかる。したがって、噴霧粒子の粒径を小さくするほど蒸発が促進され、均質な予混合気が形成された結果、 NO_x 排出濃度が低減されたものと考えられる。

図8は、灯油を空気中に噴霧して予蒸発・予混合室内の計測位置を変え、時間経過に伴う噴霧粒子の挙動を追跡した結果である。アトマイザから計測位置までの距離を長くすると噴霧粒子の速度は減衰し予蒸発・予混合室内の空気の噴出速度である 45 m/s に近づ

表 1 燃料性状

		Kerosene	Light oil	Methane
Boiling point	K	443-523	463-623	-
Flash point	K	317.5	333-343	-
Specific gravity	-	0.7929	0.8350	-
Carbon number	-	$\text{C}_{12} \sim \text{C}_{15}$	$\text{C}_{13} \sim \text{C}_{15}$	C_1
Carbon (C)	%	88.1	88.1	-
Hydrogen(H)	%	13.0	11.5	-
Higher heating value kJ/kg		4.68×10^4	4.43×10^4	5.56×10^4

図 6 気液質量比と NO_x 濃度の関係

く、粒子の濃度も時間経過とともに減衰しており、粒子の蒸発が進行している。これは予蒸発・予混合距離を長くすれば均質な予混合気の形成が容易になることを示している。また、噴霧粒子の粒径は、蒸発時間の経過とともに大きくなる傾向を示す。このような蒸発過程にある液滴の平均粒径の変化は田端ら⁽⁹⁾のディーゼル噴霧の実験でも確認されており、微細な粒子から蒸発が進み、粗い粒径の蒸発が遅れるため大きな液滴の割合が増加するためである。

4.2 空気比および火炎温度の NO_x 排出濃度に及ぼす影響 図9は液体燃料とメタンの予混合火炎からの NO_x 排出濃度を比較したものである。実験は、 L が 245 mm, V_a は 30~34 m/s, T_a は 573 K, また、液体燃料の噴霧条件は NO_x 排出濃度が一定となる W_a/W_i が 1.27 の条件に設定して行った。均質な予混合気を形成させて火炎を形成したメタンと燃料の蒸発と燃料-空気の混合を 245 mm の長さの室内で行った灯油の火炎からの NO_x 排出濃度を比較すると、灯油はメタンの予混合火炎からの NO_x 排出濃度とほぼ同

程度まで低減されている。しかし、軽油は灯油に比べて約 5 ppm 高い。灯油と軽油の NO_x 排出濃度の差は、燃料の沸点が異なるために蒸発の度合いが異なったことに起因すると考えられる。また、液体燃料と気体燃料の予混合火炎から排出される NO_x は、Thermal NO と Prompt NO であり、その生成比率は明らかではないが、空気比が 1.0 以上の本報の実験範囲では大半が Thermal NO と考えられる⁽¹¹⁾。Thermal NO は温度依存性があることを考えると、燃料により火炎温度が異なり、火炎温度も NO_x 排出度に影響を及ぼしていると考えられる。

次に火炎温度について検討した。最初に断熱火炎温度との関係を検討する。断熱火炎温度はギブス自由エネルギーの極小化による計算手法で求めた。灯油は C₁₂ から C₁₅ が主成分であり、炭素が 88.1%, 水素が 13.0% 含まれることから C₁₃H_{23.3} で代表した。軽油は

図7 噴霧条件の蒸発過程に及ぼす影響(灯油)

図8 噴霧粒子の経時変化(灯油)

C_{12} から C_{15} が主成分で、炭素が 88.1%, 水素が 11.6% 含まれるため $\text{C}_{14.7}\text{H}_{23.2}$ で代表させた。計算に用いた各燃料の生成エンタルピーはメタンが -75.3 kJ/mol , 灯油が -55.4 kJ/mol , 軽油が -253.0 kJ/mol である。また T_a は 573 K とした。計算結果を図 10 に示す。断熱火炎温度は、灯油、軽油、メタンの順に高い。前記した図 9 の NO_x 排出濃度は、軽油が最も高く、灯油とメタンは同程度である。したがって、断熱火炎温度で NO_x 排出濃度を説明することはできない。この理由として二つの原因が考えられる。一つは断熱系で実験を行っていないこと、他は谷口ら⁽⁷⁾の報告にみられるようにブラフボデーにより火炎を保持する場合には、ブラフボデー後流に燃焼気体の循環流が形成され、未燃気体とこの循環流が混合して未燃気体を稀釈するためである。すなわち、実際の火炎温度は断熱火炎温度と異なることが考えられる。

次に実際の火炎温度を計測し、 NO_x 排出濃度の考察を行った。図 11 は、各燃料を燃焼したときの燃焼ガスの最高温度 $T_{\max}$ と SR の関係を示す。図 11 から明らかにように実際の火炎温度は、メタン、軽油、灯油の順に高く、断熱火炎温度の傾向とは異なることが確

認された。図 12 に、図 9 と図 11 の結果をもとに燃焼ガスの最高温度と NO_x 排出濃度の関係を整理した結果を示す。実測した火炎温度を基準に NO_x 排出濃度を比較すると、 NO_x 排出濃度の燃料による差異は空気比を基準に整理した傾向とは異なる。メタンは均質な予混合気形成された後火炎を形成している。これに比べて灯油と軽油火炎からの NO_x 排出濃度は高い。これは、アトマイザから保炎器までの距離が本実験のように 245 mm 程度では灯油、軽油の蒸発が終了せず、液滴のまま燃焼器に噴出されるため部分的に拡散燃焼になることが原因と考えられる。

次に燃焼器内の代表的な位置における半径方向の温度分布を検討した。メタンは図 1 の実験装置を使用し、軽油については図 1 と図 2 に示した実験装置を使用した。図 13 に SR が 1.5, V_a が 30 m/s の条件で、均質な予混合気を形成させたメタンと蒸発の最も遅い軽油について燃焼室内のブラフボデーより 20 mm ($Z/R_o = 0.8$) 後流で測定したガスの平均温度 T_{mean} と温度変動の二乗平均値 T_{rms} の燃焼炉半径方向の分布を示す。 T_{rms} は、以下の式から求めた。測定温度は T を時間平均成分 T_{mean} と変動成分 T' に分けて考える。

図 9 空気比と NO_x 排出濃度の関係

図 11 火炎温度比較

図 10 断熱火炎温度の比較(計算値)

図 12 火炎の最高温度と NO_x 排出濃度の関係(その 1)

図 13 火炎温度分布の比較

$$T = T_{\text{mean}} + T' \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{\text{rms}} = (\sum T'^2/n)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで n は温度の測定数である。

T_{mean} の計測結果から火炎内の中心部に高温領域が形成されていることがわかる。メタンは $r/R_o = 1.0$ から $r/R_o = 1.3$ の狭い領域で急激な温度変化が現れるのに対し、軽油火炎では、図 1 の実験装置で L が 245 mm の条件においては $r/R_o = 1.0$ から $r/R_o = 1.6$ の範囲で比較的緩やかな温度変化が現れる。 T_{mean} が変化する領域で T_{rms} も高くなる。 T_{mean} が急激に変化し、 T_{rms} が高い領域は燃焼の活発な領域であり、未燃気体と燃焼後の気体の混合の活発な領域である。図 2 の実験装置を用いたときの軽油火炎の T_{mean} は、ほぼメタンと同様の分布を示し、蒸発が促進されると気体燃料の予混合火炎の温度分布に近づいている。すなわち、液体燃料の蒸発を促進できれば気体燃料の火炎と同様の温度分布になり、その結果、NO_x 排出濃度は低減できることを示唆している。

この考えを検証するために、図 2 に示す実験装置を用い、灯油と軽油の 2 種類の燃料の蒸発と燃料-空気の混合を促進したときの火炎内のガス温度と NO_x 排出濃度を検討した。図 14 に測定結果を示す。図 14 中メタンは図 1 に示す実験装置を用いたときの結果である。図 14 から明らかなように灯油および軽油とも図 1 の実験装置で得られた NO_x 排出濃度に比べさらに低減されており、特に、灯油はメタン火炎の NO_x 排出

図 14 火炎の最高温度と NO_x 排出濃度の関係(その 1)

濃度に近づいている。すなわち、燃料の蒸発の度合いが燃料と空気の混合を大きく左右し、これが NO_x 排出濃度に影響を及ぼしていることがわかる。軽油は灯油と比べると NO_x 排出濃度はまだ高く、これは軽油中に含まれる残さ分の沸点が本実験で行った燃焼用空気温度より高いため完全に残さ分が蒸発できなかったことに起因すると思われる。

上記した結果から、液体燃料の蒸発をさらに促進すれば気体燃料の予混合火炎からの NO_x 排出濃度に近づけることは可能であり、燃料による差異もほとんどなくなるものと考えられる。

5. ま と め

液体燃料の蒸発過程にある噴霧粒子の速度、濃度および粒径の計測と火炎内のガス温度の計測を行い、これらの因子が NO_x 排出濃度に及ぼす影響を検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 液体燃料の噴霧粒子の蒸発は、噴霧粒子の粒径に依存し、粒径が小さいほど蒸発が速く、その結果、NO_x 排出濃度は低減される。

(2) 液体燃料の蒸発を促進して火炎を形成すると、気体燃料の均質な予混合炎と同様の温度分布が得られる。

(3) 火炎内の最高温度で NO_x 排出濃度を整理すると、蒸発の促進された灯油火炎からの NO_x 排出濃度は、メタン火炎からの NO_x 排出濃度とほぼ同程度まで低減できる。

文 献

- (1) Alkadie, H. S. and Andrews, G. E., *ASME Paper*, 89-GT-322 (1989).
- (2) 黒田・石橋, 日本ガスタービン学会誌, **16**-64 (1989), 37-41.
- (3) 木村・大賀, 第 19 回ガスタービン定期講演会論文集, (1991), 169-172.

- (4) 堀内・ほか5名, 日本ガスタービン学会第7回定期講演論文集, (1979), 7, (1986), 1199-1206.
 - (5) Marek, C. J. and Papathakos, L. P., *NASA TMX*, 3383(1976).
 - (6) Roffe, G. and Feeri, A., *NASA CR*, 2657(1976).
 - (7) 谷口・ほか3名, 化工, 5-17(1991), 990-996.
 - (8) Bachalo, W. O., ほか2名, *Opt. Eng.*, 23-5(1984), 583.
 - (9) Yoshida, A. and Tsuji H., *Proc. 17th Symp. (Int.) Combust.*, (1979), 945.
 - (10) 田端・ほか3名, 機論, 56-521, B(1990), 214-220.
 - (11) Miller, J. A. and Bowman, C. T., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 15(1989), 287-338.
-