

# NOx Emissions in Flameless Combustion of Kerosene-Air Mixture Jets Injected into Hot Burned Gas Stream from Combustion Wall

Naoki AIDA<sup>1</sup>, Shigeru HAYASHI<sup>2</sup>, Hideshi YAMADA<sup>2</sup>, Tadashige KAWAKAMI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Hosei University

<sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaijihigashi, Chofu-shi, Tokyo 182-8522, Japan

Aeronautical Environment Technology Center

i02r1101@k.hosei.ac.jp (N. AIDA)

hayashi.shigeru@jaxa.jp (S. HAYASHI)

**Keywords:** Low-NOx Gas Turbine Combustion, Flameless Combustion, Lean-Lean Two-Stage Combustion

## Abstract

“Flameless combustion” of lean to ultra lean mixtures, supported by high-temperature burned gas, can resolve the dilemma between complete combustion versus ultra-low NOx emissions in gas turbine combustors. The characteristics of NOx emissions and combustion in “lean-lean” two-stage combustion were investigated for fuel vapor and droplets / air mixture jets injected from the main injection tube that was placed perpendicular to the combustor wall into the primary hot burned gas prepared by combustion of lean mixtures on a perforated flame holder.

The present results clearly show that the ultra-low NOx combustion supported by the reaction of lean mixtures well mixed with the hot burned gas from the primary stage is much more advantageous in achieving ultra-low NOx emissions while maintaining high combustion efficiency.

## まえがき

希薄予混合燃焼は NOx の低減に極めて有効な方法である。しかし、一般的な希薄予混合燃焼では完全燃焼と低 NOx を同時に実現できる当量比の範囲が極めて狭いという問題がある。この問題に対して従来は、複数のバーナーを用い出力に応じて作動バーナーの本数を変えるという方法が採られている。しかし、この方法ではバーナーの切り換え時に燃焼効率の低下を招くため、連続的に高い燃焼効率を保つことが困難である。

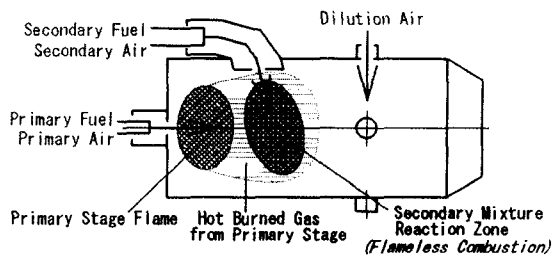


Fig. 1 Schematic of “lean-lean” two-stage combustion concept.

著者らは図1に示すコンセプトの革新的燃焼方法、“lean-lean two-stage combustion”を提言している。これは、一段目で希薄予混合気を燃焼させ、その高温の燃焼ガス流中に二段目として超希薄、もしくは希薄な予混合気を噴射する二段燃焼である。この燃焼方法では、二段目の予混合気は超希薄な場合において“flameless combustion”が実現でき、完全燃焼と低 NOx 排出に極めて効果的である。<sup>1)</sup>

著者らの気体燃料を用いた研究では、一段目の燃焼ガス中に複数のチューブから予混合気を噴射する準一次元のモデルを用いて実験を行ない、“lean-lean two-stage combustion”の有用性を実証した。<sup>2)</sup> しかし、このモデルでは液体燃料を燃焼させるには適していなかった。そこで、液体燃料を用いた研究の第一段階として、筒状燃焼器において、一段目で多孔板保炎器により灯油-空気の希薄予混合気を燃焼させ、その燃焼ガス流中に燃焼器中心軸上に配置された円管から二段目の希薄予混合気を噴射する実験を行った。<sup>3)</sup> その結果から、液体燃料を用いた場合でも、“lean-lean two-stage combustion”が完全燃焼と低 NOx 作動範囲の拡大に非常に効果的であることが示された。<sup>3)</sup>

今回の研究では、より広い応用性を目的として、一段目燃焼ガス流に対して垂直にメイン予混合気が噴射するモデルを用いて実験を行った。この研究から、燃焼ガス流に対して垂直にメイン予混合気を噴射する二段燃焼においても、広い作動範囲で低 NOx と完全燃焼を実現できることが示されたので報告する。

## 実験装置及び方法

### 実験装置

実験に使用した燃焼器の概略を図2に示す。燃焼室は縦、横それぞれ 80 mm、長さ 300 mm の直方形で、向かい合っている一組の壁には断熱材を使用し、残りの壁は内部の状態が観察でき

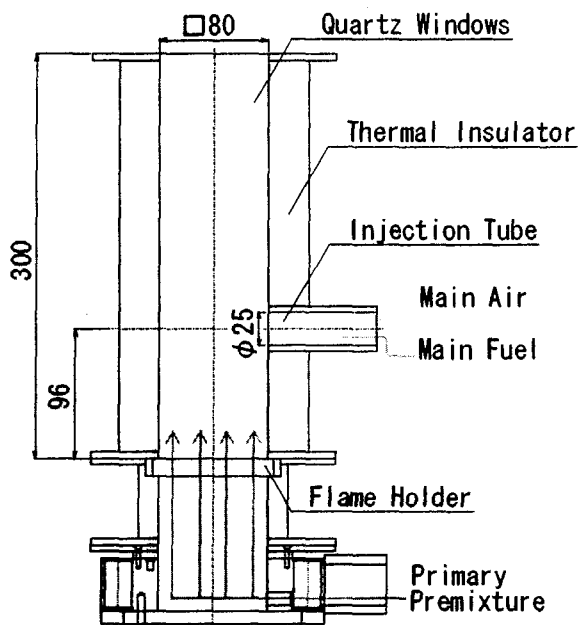
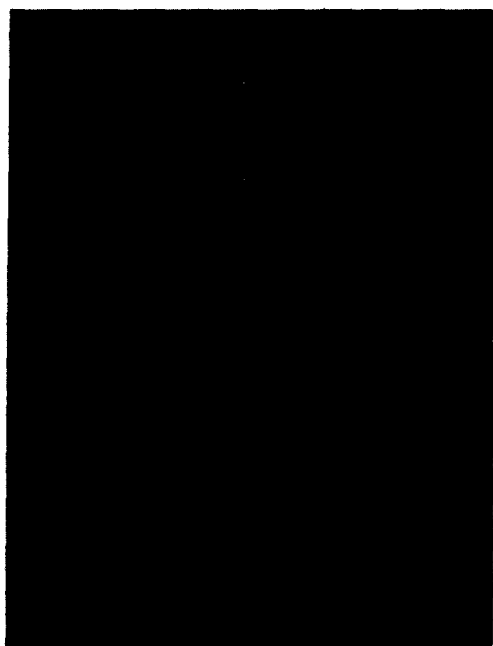


Fig.2 Photograph and schematic drawing of experimental combustor.

るように厚さ 3 mm の石英板を取り付けた。断熱材で作られた燃焼室の壁の片面には、メイン予混合気を噴射するためのインジェクションチューブ（内径 25 mm）が垂直に取り付けられている。

一段目に供給される灯油-空気の予蒸発予混合気は一辺 80 mm の正方形多孔板保炎器で燃焼させる。二段目（メイン）の灯油-空気予混合気は、一段目の高温燃焼ガス流中に燃焼室の壁に垂直に取り付けられたインジェクションチューブから噴射される。

インジェクションチューブの中心は保炎器表面からの高さ 96 mm にあり、その中にはメイン燃料を噴射するための気流微粒化燃料ノズルが取り付けられている。またインジェクションチューブ出口とメインノズル先端との距離  $L$  を変えることで、予混合気の蒸発度合いを変化させることができる。

一段目の灯油-空気の予蒸発予混合気は、燃焼器の上流にある蒸発管内で、高温空気流中に圧力噴射ノズルで灯油を噴射することで生成され、蒸発管と燃焼器の間にあるスタティックミキサによって均質にされる。

一段目空気とメイン燃焼用空気・微粒化用空気の流量はそれぞれ独立にマスフローコントローラで測定、制御される。そのあと微粒化用空気を除く空気はヒータで加熱され、一段目空気は蒸発管へ、メイン燃焼用空気は燃焼器へと供給される。燃料は窒素ガスで加圧された燃料タンクから送られ、それぞれの流量は精密ニードル

弁で制御されたあと、流量計で測定される。

#### 実験方法

空気条件は、一段目予混合気温度  $T_{a_p}$  とメイン空気温度  $T_{a_m}$  を 500 K、一段目空気流量  $W_{a_p}$  を 4.0 g/s に固定した。メイン空気流量  $W_{a_m}$  は 4.0 g/s と 8.0 g/s で、メイン空気流量の一部を微粒化用空気として加熱せずに気流微粒化ノズルに 0.2 g/s 供給した。また、メイン予混合気の蒸発度合いが燃焼特性に及ぼす影響を調べるため、ノズル先端の位置をインジェクションチューブ出口 ( $L=0\text{mm}$ ) と 112 mm 後退させ位置 ( $L=112\text{mm}$ ) に置き燃焼特性を比較した。

一段燃焼は、インジェクションチューブからは空気のみを噴射し、一段目燃料流量  $W_{f_p}$  を変え、一段目当量比  $\phi_p$  を変化させて燃焼特性を調べた。二段燃焼は、一段目予混合気を完全燃焼が得られる当量比 ( $\phi_p=0.68$ ) に固定しておき、その一段目燃焼ガス流中に、燃焼室の壁に垂直に取り付けられたインジェクションチューブからメイン予混合気を噴射し、メイン燃料流量  $W_{f_m}$ 、つまり、メイン当量比  $\phi_m$  を変化させた。

燃焼ガスは、保炎面からの高さ 290 mm の位置でステンレス製温水冷却式十字プローブにより採取される。燃焼ガスの各成分は連続ガス分析器で、NOx (NO, NO<sub>2</sub>) はケミルミネッセンス法（化学発光法）により、CO、CO<sub>2</sub> は非分散型赤外線分析法 (NDIR 法) により、O<sub>2</sub> は磁気圧法により、THC は CH<sub>2</sub> として水素炎イオン化検出法 (FID 法) により測定される。

## 実験結果及び考察

### 火炎の形状

図3に、メイン予混合気の $\phi_m$ を変化させた場合の代表的な火炎の写真を示す。ノズルの噴射位置によらず、どの $L$ でも、 $\phi_m$ が小さいほど、火炎の青色は薄くなる。

$L=112$  mmの場合、メインの火炎は、インジェクションチューブの半径方向に広がり、対向している燃焼室の壁まで達することなく、短い距離で燃焼が完了している。 $Wa_m$ を4.0 g/sから8.0 g/sに増加させると、メインの火炎は半径方向にさらに広がる。

一方、 $L=0$  mmの場合、燃料ノズルから噴射されたメイン燃料は、液滴のまま燃焼ガス流中に噴射され、蒸発してから燃焼にいたる。そのため、メインの火炎は燃焼室の壁にまで達している。燃料が噴射されてから燃焼にいたるまでの距離はメイン空気流量が多い場合のほうが短くなる。このときの火炎は濃い青色をしていることから、空気流量が増加したことによって、メイン燃料も増加したため、局所的に濃い予混合気生成されているためだと考えられる。また、 $Wa_m=8.0$  g/sの場合、 $Wf_m$ を増加させていくと、メインの火炎の下流側は写真(h)に示すように黄色の火炎となる。これは、メインの空気と燃料が多いため、メイン燃料の一部が蒸発する前に燃焼室の壁へと到達してから燃焼し、拡散火炎の形態をとるためだと考えられる。

### NOx 排出と燃焼効率

図4は一段燃焼と二段燃焼におけるNOx排出と燃焼効率を全体当量比 $\phi_t$ に対してプロットしたグラフである。なお、NOx排出の表示には、残存酸素濃度15%での換算値を用いた。 $Wa_m$ は4.0 g/sと8.0 g/s、メイン燃料のノズル位置は $L$ が0 mmと112 mmで行った。

メインインジェクションチューブから空気のみを噴射し、 $\phi_p$ を変化させていく一段燃焼では、 $Wf_p$ を増加させていくと、NOxは急激に増加する。これは、一般的な予混合燃焼の特徴である。また、 $Wa_m$ を4.0 g/sから8.0 g/sに増加させた場合、NOx排出の傾きが強まっている。これは希釈空気が増大したことによって、同じ $\phi_p$ の変化でも $\phi_t$ で見ると作動範囲が狭められるためである。

一方、一段目を完全燃焼が得られる当量比( $\phi_p=0.68$ )に固定し、 $\phi_m$ を増加させていく二段燃焼では、 $L=112$  mmの場合、メイン燃料を増加させていくと、NOxは減少し、その後増加して、 $\phi_p$ と $\phi_t$ が同じ値になるあたりで、メイン燃料を噴射する前のNOx排出と同レベルとなる。これは、二段目で燃焼している予混合気は希薄

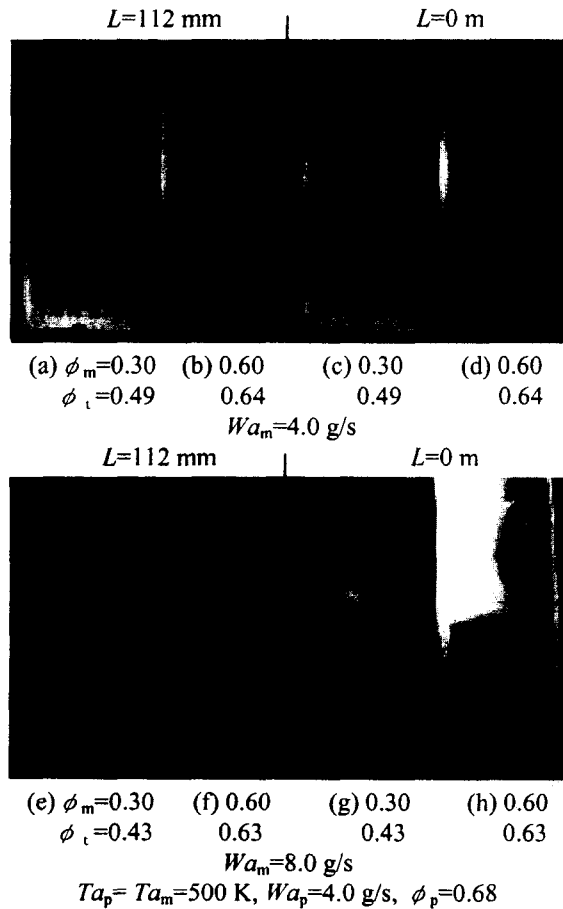


Fig.3 Photographs of flame shapes showing effects of  $Wa_m$ ,  $\phi_m$  and  $L$ .

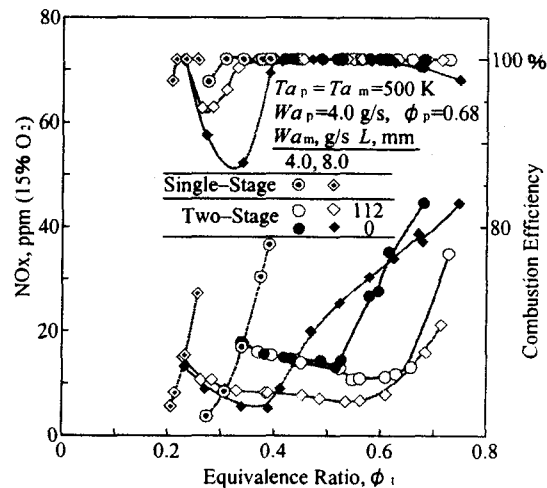


Fig.4 NOx emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratio,  $\phi_t$ , for single-stage and two-stage combustion.

または超希薄であるため、メインからのNOx排出は極めて少ないためだと考えられる。

また、 $W_{a_m}$ を増加させることによって、NOx排出レベルは低くなる。これは、空気流量の増加によって、一段目で生成されるNOx排出へのクエンチングが促進されるためだと考えられる。また、流速の増加による滞留時間の短縮も一つの要因だと考えられる。空気流量を増加させた場合、低NOx作動範囲が希薄側に広がっていることがわかる。しかし、その場合、 $\phi_m$ が小さいときには、燃焼効率に大きな低下を招いてしまう。これは、 $W_{a_m}$ が増加することによって、メイン燃焼領域の温度が低下してしまうためである。

$L=0$  mmにし、メイン燃料が蒸発していない予混合気を二段目から燃焼ガス流中に噴射する場合、 $W_{a_m}$ が4.0 g/sでは、 $\phi_m$ が小さいときにも完全燃焼を実現することができる。これは、一段目燃焼ガスとメイン空気が混合したあとの温度が十分高いため、少ないメイン燃料ならば“flameless combustion”を利用して反応させることができるためだと考えられる。 $L=0$ の場合において、完全燃焼と低NOxが同時に得られている代表的な火炎の写真が図3の(c)である。メインノズルから噴射された燃料は燃焼器の中央付近から燃焼が始まり、燃焼室の壁まで達しているものの、火炎は空間的に広がっていることがわかる。

また、 $W_{a_m}=4.0$  g/sとし $\phi_m$ を増加させていくと、ノズル位置が $L=112$  mmのときに比べて小さい $\phi_1$ でNOx排出が増加する。NOx排出が高い代表的な火炎の写真である図3の(d)を見ると、火炎の空間的な広がり小さくなっている。これは、メイン燃料を増加させたため、メイン空気とメイン燃料が十分に混ざる前に燃焼が始まっているためだと考えられる。そのため、局所的に当量比が高いところできてしまい、NOxの増加を招いている。

$W_{a_m}=8.0$  g/sのとき、燃料噴射位置で燃焼効率を比較してみると、 $L=0$  mmの場合の方が燃焼効率の落ち込みが大きくなっている。これは、

$L=112$  mmの場合ではインジェクションチューブ内でメイン燃料とメイン空気の混合が十分に行われてから燃焼ガス流中に噴射されるのに対して、 $L=0$  mmの場合では、燃料と空気が十分に混合する前に燃焼ガス流中に噴射されるため、メイン空気と一段目燃焼ガスの混合によって、メイン燃料が反応する前に燃焼領域の温度が低下するためである

また、 $W_{a_m}=8.0$  g/sでノズル位置が $L=0$  mmのときでは、完全燃焼が得られる最も小さい $\phi_m$ でNOx排出は一段目のみのNOx排出と同レベルとなっている。この状態の火炎は図3の(g)に示したような火炎であり、またNOx排出レベルが高いことから、メイン予混合気は局所的に当量比が高いところが存在することを示している。さらに $\phi_m$ を増加させていくと、火炎は図3の(h)に示したようになり、NOx排出はさらに高くなる。これは、メイン燃料が拡散火炎として燃焼しているためだと考えられる。

### 結論

- (1) 燃焼ガス流中にメイン予混合気を垂直に噴射する二段燃焼では、メイン予混合気は非常に短い距離で燃焼が完了する。
- (2) 燃焼ガス流中に対して垂直にメイン予混合気噴流を噴射する二段燃焼では、広い作動範囲で完全燃焼と低NOx排出が維持できる。
- (3) メイン予混合の蒸発距離をとらない場合でも、“flameless combustion”を利用することで、完全燃焼と低NOx作動範囲を拡大できる。

### 参考文献

- 1) S. Hayashi, Proc. 30<sup>th</sup> Gas Turbine Conference. Gas Turbine Society of Japan, 2002, pp. 47-52.
- 2) S. Hayashi, H. Yamada, Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 2443-2449.
- 3) N. Aida, T. Nishijima, H. Yamada S. Hayashi and T. Kawakami, 8<sup>th</sup> International Gas Turbine Congress (2003) TS-142.