

# 噴流保炎一次燃焼による燃焼ガスを二次希薄予混合気の燃焼反応に利用した二段燃焼法による超低NO<sub>x</sub>作動範囲拡大

## Extending the operating range of ultra-low NO<sub>x</sub> emissions by enhancing the reactions of the secondary lean mixtures injected into the reverse-jet stabilized primary stage combustion products

中須 崇文<sup>\*1</sup>  
NAKASU Takafumi

齋藤 拓海<sup>\*1</sup>  
SAITO Takumi

山田 秀志<sup>\*2</sup>  
YAMADA Hideshi

林 茂<sup>\*3</sup>  
HAYASHI Shigeru

### ABSTRACT

The lean-lean two stage combustion, characterized by the enhancement of the reactions of ultra-lean to lean mixtures injected into the hot combustion products of the lean-burn primary stage, was investigated to show its potential in achieving low NO<sub>x</sub> emissions while maintaining complete combustion over a wide range of power of gas turbines. For single-digit NO<sub>x</sub> emissions, the stagnation reverse flow combustion was employed as a means of flame stabilization for the primary stage because of its robust flame holding capability at very lean conditions. Methane was used as fuel and emissions measurements and direct flame imaging were conducted at  $T_i = 373$  and  $573$  K and at atmospheric pressure. NO<sub>x</sub> emissions less than 5 ppm (15% O<sub>2</sub>) were achieved for a primary equivalence ratio of 0.5 with combustion efficiency greater than 99.9% over a range of gas temperatures ranging from 1400 to 1900 K.

**Key words :** Lean-lean two stage combustion, Stagnation reverse flow combustion, Robust flame holding, Ultra-low NO<sub>x</sub> emissions, Perfectly premixed methane-air mixtures

### 1. はじめに

ガスタービンの作動ガス温度は、タービンの耐熱性の制約により当量比1付近での火炎温度よりもかなり低く抑えられている。したがって、希薄予混合燃焼はガスタービンに本質的に適したNO<sub>x</sub>排出削減のアプローチといえる。しかし、希薄予混合燃焼によるNO<sub>x</sub>削減は燃焼温度の抑制に基づくものであるため、未燃焼成分の排出が増大しやすいという問題があり、それが妨げとなって希薄予混合燃焼の持つNO<sub>x</sub>抑制能力を十分発揮できない、あるいはNO<sub>x</sub>排出を維持できる出力範囲が狭いという問題がある。この問題は、希薄予混合燃焼を適用する場合の常套手段である、希薄予混合火炎のメイン燃焼領域に加えて始動時から燃料を供給する拡散火炎のパイロット燃焼領域を配設し、作動状態に合わせて両燃焼領域への燃料の配分を適切に制御する燃料ステージングにおいても当然、存在する。希薄予混合燃焼によっ

てNO<sub>x</sub>排出をどこまで減らせるか、どこまで作動範囲を拡大できるかは、希薄側可燃限界に近い予混合気をいかに完全燃焼させるかにかかっているといってもよい。

この課題に対して、林らは直列ステージングの2段階燃焼域において、1段階目の希薄燃焼域からの燃焼生成物中に希薄な予混合気を噴射し、その反応促進に燃焼生成物の熱とラジカルとを利用するlean-lean two-stage combustion (LL2)を提案し、気体燃料および液体燃料を用いた基礎研究<sup>(1)-(4)</sup>でその有効性を示しただけでなく、商用エンジンでの実証にも成功している<sup>(5)</sup>。この方式の特徴は、2段階目に噴射される混合気が単独では点火、あるいは保炎できないくらい希薄でも反応させることができる点で、結果的に広い作動範囲で超NO<sub>x</sub>排出が達成されている。また、一般的な予混合希薄燃焼において問題となる振動燃焼を抑制できることも示唆されている。

メタン焚き実エンジン搭載燃焼器<sup>(1)</sup>では先端が閉じられ、側壁に複数の2次予混合気噴射孔が周方向および軸方向に開けられた多数のパイプを貫通させた円形多孔板を保炎器とする超短縮火炎バーナを用いた。多孔板保炎器上には多数の1次希薄予混合気の短小火炎が保持され、その直下流において燃焼生成物中に希薄な2次予混合気が噴射される。出力は基本的に、2次空気への燃料流量

原稿受付 2016年11月29日

査読完了 2017年6月1日

\*1 法政大学大学院

〒184-8584 小金井市梶野町3-7-2

\*2 宇宙航空研究開発機構

\*3 法政大学

の制御だけで増減できる。希薄予混合燃焼による局所的高温部の発生を抑制させることはもちろん、2次予混合気噴射による高温領域での滞留時間の短縮によるNO生成の抑制も狙っている。

一方、実エンジン搭載液体用燃焼器<sup>2)</sup>では、1次燃焼域においては、予混合管内に逆火が起きないように工夫された旋回空気流れ中に、管入口近傍で圧力スワールノズルを用いて灯油を噴霧し、形成された希薄予混合気の火炎が予混合管出口下流に保炎される。その燃焼ガス塊中に、2次燃焼域では独特な形状のインジェクターから燃料噴霧の予蒸発による希薄から超希薄な予混合気噴射される。この燃焼器を搭載した出力300 kW級再生ガスタービンは、灯油燃焼において50%出力から定格までの作動範囲にわたり高い燃焼効率と10 ppm以下(15%O<sub>2</sub>換算値)の超低NO<sub>x</sub>排出を達成している<sup>5)</sup>。

これら一連の研究において、2段目の混合気の濃度がサーマルNO<sub>x</sub>を生成するほどに高くなければ、その反応によるNO<sub>x</sub>濃度の実質的な増加はないこと、条件によっては、むしろ減少することもあることが見出された。このことは、1段目をより希薄にしても高い燃焼効率を維持できさえすれば、さらなるNO<sub>x</sub>の排出削減が実現できることを示唆している。

ガスタービン燃焼器において、燃焼領域の下流において追加で燃料、あるいは燃料と空気を噴射することで低NO<sub>x</sub>作動範囲を拡大できることが実機で示されており、今後、この方式の普及が進むと考えられる。

これまでの保炎方式よりもより希薄な条件において、混合気の流速や燃料濃度の変動を受けても吹き飛びが起きにくいロバストな保炎手段として、混合気を燃焼室のドーム壁面に向けて噴射する噴流保炎に着目した。この方式では、噴流の外周と燃焼室壁との間の空間に形成される高温燃焼ガスの再循環領域が噴流の着火を担っており、多孔板による保炎はもちろん、旋回による保炎よりも格段に保炎性能に優れている。

噴流による保炎は、航空エンジンでは蒸発管型燃焼器に相当古くから利用されてきた。液体燃料は燃焼室内に突起した蒸発管の中で蒸発し、空気と混合してできた燃料大過剰な混合気がドーム壁に向けて噴射され、対向して流入する空気噴流と衝突して拡散火炎を形成する。

一方、オゾン層保全の観点から超低NO<sub>x</sub>排出が要求される超音速機用エンジンの燃焼器においては、ジェット燃料の希薄予混合予蒸発燃焼の保炎手段として研究された<sup>6)</sup>。また、噴流保炎燃焼器の排出特性に関しジェット燃料蒸気をプロパンで模擬した基礎的な研究も行われた。一方、比較的最近、Zinnらは、Stagnation Point Reverse Flow Combustorと呼ぶ燃焼器の排出特性を報告している<sup>7)</sup>。これは、噴射ノズル先端からドーム壁面までの距離が300 mmもあり、天然ガス燃焼試験の結果として、非予混合噴射においてもNO<sub>x</sub>レベルは予混合気噴射のレベルに近いことを示しており、液体燃料につ

いても実験を行っている。

しかし、上記のいずれの研究も基礎研究で、1段燃焼領域に噴流保炎方式を採用したLL2方式燃焼器の排出に関したものではない。

そのため我々はLL2燃焼器の1段目に適用することを目的として噴流保炎方式に関する研究を行った。その第一段階としてメタンを用いて予混合気と非予混合気について実験を行い、灯油について実験を行った。これらの試験結果において、保炎性能が良好なことから、超低NO<sub>x</sub>のポテンシャルを確認している<sup>(8),(9)</sup>。本論では、これらの試験結果をもとに設計した気体燃料用LL2方式2段燃焼器の大気圧下における排出性能について報告する。

## 2. 試験装置

燃焼器の概略図を図1に示す。燃焼筒は縦置きの内径80 mm、長さ300 mm、厚さ2 mmの石英管で形成され、燃焼室ドーム壁に相当する底面は厚さ50 mmのセラミックファイバー製円板で形成されている。ガス分析の際には、火炎および燃焼ガスからの放射による熱損失を抑制するため、燃焼筒を断熱材製円筒内に納めている。火炎撮影の際には、この円筒を取り外し、また、燃焼筒はより透明性の高い石英管(長さ250 mm)に取り換えた。

表1、表2はそれぞれ、1段目および2段目のインジェクターの要部寸法、噴射孔の径、個数および総開口面積を示す。両者の総開口面積は実質的に同じである。1段目インジェクターは、二重円管構造になっており、予混合気は二重円管内を通り、先端部において外周壁に周方向等配で取り付けられた4本の逆L字管(内径10 mm、厚さ1 mm)の出口から底面に向けて噴射される。2段目インジェクターは、1段目インジェクターの内管内に同軸に配置された、先端が閉じた円筒で、その先端部の側壁には噴射孔が軸方向に10 mm間隔で4段、その各段に4個ずつ周方向等配で配置され、それらから2段目予混合気が半径外向きに噴射される。噴射孔の周方向位置は、底面側から数えて1段目と2段目、3段目と4段目が、それぞれ同一で、相互に45度ずれている。2段目のインジェクターの噴射孔の直径は上流ほど小さくなっている。これは2段目の予混合気をより多く、1段目の燃焼領域に供給させるねらいがある。

1段目と2段目のインジェクターの燃焼筒内への突出長さは、独立に変えられる。以後の説明において、燃焼室底面を基準とした1段目の噴射孔の端面の位置を $Z_{in1}$ 、2段目の最も底面寄りの噴射孔の中心位置を $Z_{in2}$ 、ガス採取位置を $Z_p$ と表す。

先行研究<sup>10)</sup>において、2段目の予混合気噴射位置を1段目の予混合気噴射位置に近づけると燃焼効率が向上することが確認されている。この結果を設計に反映し、1段目のインジェクターの上端部に周方向4か所の切欠きを設け、そこに2段目の最も上流側の噴射孔が位置する

ようにした。その結果、それらの孔は軸方向で1段目の噴射孔に5 mmまで近づけられた。

燃料にはメタンを使用し、ヒーターで予熱した空気をスタティックミキサーで混合させ、均質な予混合気を形成し、1段目と2段目のインジェクターに供給した。1段目および2段目空気流量 ( $m_{a1}$ ,  $m_{a2}$ ) は、ともに5.4 g/sに固定した。

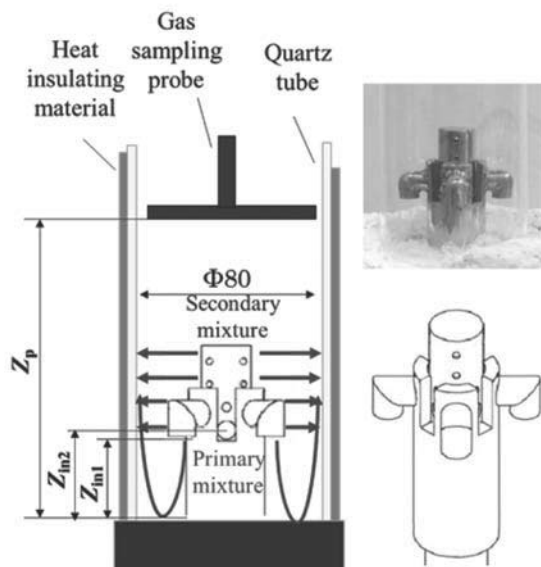


Fig. 1 Photographs and drawings of injectors used.

Table 1 Dimensions of primary injector.

Outer tube and wall thickness, mm	32 ID*1-1
Inner tube and wall thickness, mm	25 OD*2-1
Cross-sectional area of mixture passage, mm <sup>2</sup>	313
Number and diameter, mm of holes	4 × $\phi$ 10
Total opening area of holes, mm <sup>2</sup>	314

\*1InnInner diameter, \*2OutOuter diameterer

Table 2 Dimensions of secondary injector.

Inner diameter and wall thickness, mm	19.7-1
Cross-sectional area of mixture passage, mm <sup>2</sup>	305
Number and diameter of holes*3, mm (From top to bottom rows)	4 × $\phi$ 3
	4 × $\phi$ 3
	4 × $\phi$ 4
	4 × $\phi$ 8
Total opening area of holes, mm <sup>2</sup>	308

\*310mm interval

### 3. 排ガス測定および火炎撮影

排ガス採取には直径0.7 mmの吸入孔がアーム部にそれぞれ8か所開けられている水冷式の十字プローブを用い、測定にはHORIBA製MEXA-9110Hを使用した。排ガス分析の際には、ガス分析計の表示の値が定常な状態を示すことを確認してからデータを取得している。排ガ

ス測定を予め定めた当量比で行うため、分析計の酸素濃度の表示を見ながら燃料流量を調節した。

火炎撮影にはCANON製EOS 50Dを使用し、輝度の比較ができるように、撮影条件はシャッタースピード1/6 s, 絞り値6.3, ISO感度2000とした。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 1段目および2段目予混合気噴射位置の影響

最初にNOx排出と燃焼効率に対する1段目と2段目予混合気噴射位置の影響について調査した。予混合気温度 $T_1$ は373 Kとし、この温度において余裕をもって1段目予混合気を完全燃焼できる条件にするため、1段目当量比 $\phi_1$ は0.7とし、2段目当量比 $\phi_2$ は0から0.7まで変化させた。

#### (1) 1段目予混合気噴射位置の影響

2段目予混合気噴射位置 $Z_{in2}$ を55 mmに固定し、1段目噴射予混合気位置 $Z_{in1}$ を10 mm, 30 mm, 50 mmと変化させ、火炎写真を図2に、ガス採取位置 $Z_p$ が300 mmにおけるNOx排出と燃焼効率のグラフを図3に示す。1段目のインジェクターの位置が燃焼室の底部から離れるほど1段目燃焼領域の輝度が高くなっている。 $Z_{in1}=10$  mmにおける1段目の予混合気は、燃焼室底部に衝突し、燃焼室出口方向に戻っており、2段目の最も上流側の噴射孔付近にまで反応領域が伸びていることが示唆される。 $Z_{in1}=30$  mm, 50 mmにおいては1段目の噴射孔の下に再循環領域が形成された。

2段目に燃料を供給すると、 $\phi_2=0.1$ において燃焼効率は99%よりさらに低く落ち込む。燃焼効率の落ち込みは $Z_{in1}$ が低いほうが小さくなっている。この条件における2段目の燃焼領域において写真では確認できないが肉眼で極めて弱い発光がとらえられている。 $\phi_2=0.3$ において青みがかった反応領域が明確に見えるようになり、このときの燃焼効率は99.9%よりも高くなっていることが分かった。 $\phi_2$ をさらに増加させると、さらに出口ガス温度が上昇し、 $\phi_2$ が0.7における出口ガス温度は約1900 Kであった。燃焼効率が99.9%を達成できる最も低い出口ガス温度 $T_b$ は $Z_{in1}$ が10 mmのときに1420 K, 50 mmのとき1460 Kと推定される。

NOx濃度は $Z_{in1}$ に大きく依存していることが確認された。 $Z_{in1}=10$  mmのNOx濃度は $Z_{in1}=50$  mmに比べて半分になっている。この傾向は、1段目でのNO生成機構における滞留時間の影響であることが推測される。1段目の予混合気噴射位置を低くすることによって、輝度が高い領域での滞留時間が短くなり、NOxの生成を抑制し、1段目で生成されたOH等のラジカルを多く含む燃焼ガスが2次領域に供給されることによって反応が促進された結果、燃焼効率の落ち込みを抑制できることが示唆される。

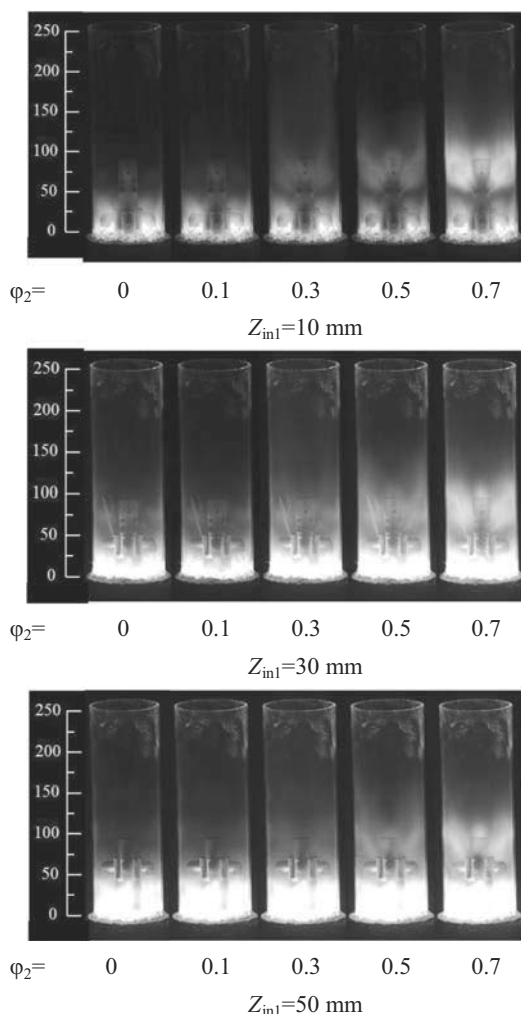


Fig. 2 Photographs of flames showing effects of primary mixture injection position,  $Z_{in1}$ , on flame structure for  $Z_{in2}=55$  mm and  $\phi_1 = 0.7$ .

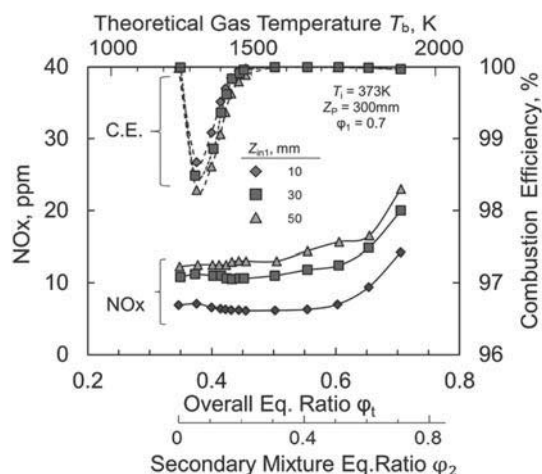


Fig. 3 NO<sub>x</sub> emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratio,  $\phi$ , for different primary mixture injection positions,  $Z_{in1}$ .

## (2) 2 段目予混合気噴射位置の影響

1 段目予混合気噴射位置  $Z_{in1}$  を 10 mm に固定し、2 段目予混合気噴射位置  $Z_{in2}$  を 15 mm, 35 mm, 55 mm と変

化させた。前節に記したように  $Z_{in1}=10$  mm にしたのは、 $Z_{in1}=30$  mm, 50 mm と比較して NO<sub>x</sub> 濃度が最も低く、燃焼効率の落ち込みが最も低かったからである。

火炎写真を図 4 に、 $Z_p=300$  mm において NO<sub>x</sub> 濃度と燃焼効率を表したグラフを図 5(a) に示す。前節の図 3 に示すのと同じように、2 段目に燃料を供給すると、 $\phi_2=0.1$  において燃焼効率は 99% より低く落ち込む。燃焼効率の落ち込みは 2 段目予混合気噴射位置  $Z_{in2}$  が低いほうが小さくなっている。このとき 2 段目の燃焼領域では、写真では確認できないが肉眼で極めて弱い発光がみとめられる。燃料をさらに増やした  $\phi_2=0.3$  になると青みがかかった反応領域が明確になり、2 段目の燃焼領域に占める割合が大きくなる。それらは噴射孔の周方向位置に対応して石英管内壁に沿って筋状に伸びている。 $\phi_2$  をさらに増加させると、反応領域が短くなり、より強く発光するようになる。

$Z_{in2}$  を低い場合は  $Z_{in2}$  から  $Z_p$  までの距離が離れ、2 段目予混合気の滞留時間が長くなる。そこで、2 段目予混合気の滞留時間を合わせるために、ガス採取位置  $Z_p$  から 2 段目予混合気噴射位置  $Z_{in2}$  までの距離、すなわち  $Z_p-Z_{in2}$  を 245 mm にして実験を行った。この条件における NO<sub>x</sub> 濃度と燃焼効率のグラフを図 5(b) に示す。2 段目予混合気の滞留時間を等しくした場合においても、 $Z_{in2}$  が低いほうが燃焼効率の落ち込みは小さくなっていることがわかる。この場合においても 2 段目予混合気噴射位置によって燃焼効率の落ち込みに差があることから、1 段目で生成された OH 等のラジカル濃度がより高い燃焼ガスが 2 次領域に供給されることで反応が促進されることが示されている。

NO<sub>x</sub> 濃度は燃焼室出口において  $Z_{in2}$  に依存しないことが確認された。全体当量比  $\phi_t$  が 0.6 以下の範囲では 10 ppm 以下という超低 NO<sub>x</sub> 燃焼が達成された。2 段目の燃料を増加させると、NO<sub>x</sub> 濃度が 1 段燃焼時と比較すると  $\phi_t < 0.6$  の範囲まで減少している。図 3 では NO<sub>x</sub> 濃度の縦軸のスケールが図 5 の 2 倍で目盛られているためにみえるが、同じスケールでプロットすると図 5 の結果は図 3 の結果とほぼ一致する。高温既燃ガス中に希薄な予混合気を噴射すると NO<sub>x</sub> が減少するという現象はこれまでの実験においてもみとめられている<sup>(1)</sup>。このことから 2 段目に希薄な予混合気を供給すると 1 段目で生成された NO<sub>x</sub> の一部が 2 段目予混合気中の HC によってシアン等に還元<sup>(1)</sup>される Reburning<sup>(2)</sup>と類似することが起きていることを示唆している。

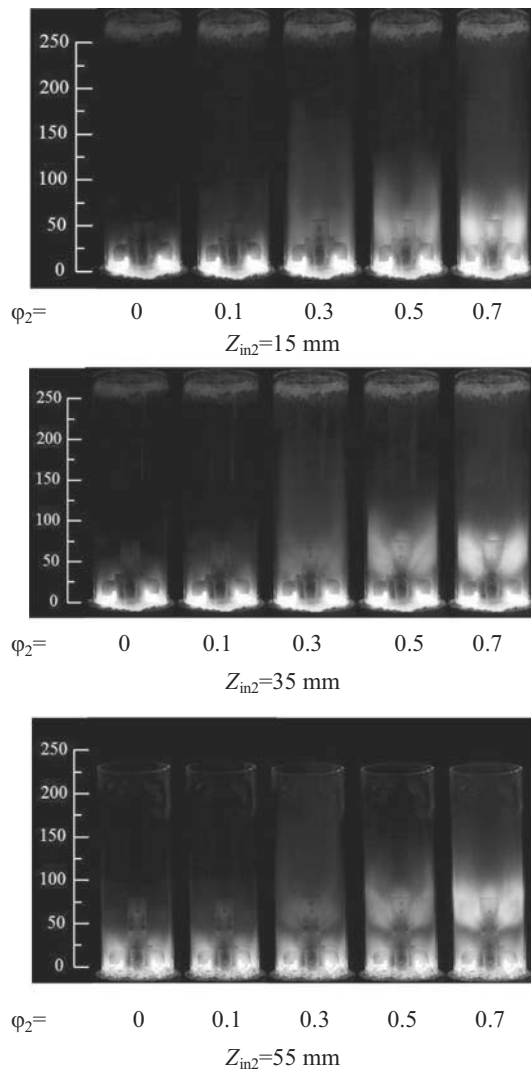


Fig. 4 Photographs of flames showing effects of secondary mixture injection position,  $Z_{in2}$ , on flame structure for  $Z_{in1}=10$  mm and  $\phi_1=0.7$ .

#### 4.2 予混合気温度および1段目当量比の影響

予混合気温度の影響を調べるために前節に記した  $T_i=373$  Kでの実験に加え,  $T_i=573$  KにおいてNO<sub>x</sub>をさらに低減させるために1段目の当量比がより低い  $\phi_1=0.5, 0.6$ で1段目の当量比の影響について調査した。なお, 1段目予混合気噴射位置 $Z_{in1}$ は10 mm, 2段目予混合気噴射位置 $Z_{in2}$ は15 mm, ガス採取位置 $Z_p$ は300 mmとした。

2段目当量比 $\phi_2$ を0から0.7と変化させたときの火炎写真を図6に, NO<sub>x</sub>濃度と燃焼効率を表したグラフを図7に, NO<sub>x</sub>濃度の15%O<sub>2</sub>換算値を図8に示す。1段燃焼時( $\phi_2=0$ )には,  $\phi_1=0.5$ で青みを帯びた火炎が形成され,  $\phi_1=0.6$ に増加させると1段目燃焼領域の輝度が高くなる。2段目に燃料を供給すると,  $\phi_2=0.1$ においては, 2段目の燃焼領域において, 写真では確認できないが肉眼で極めて弱い発光がとらえられている。 $\phi_2=0.3$ では青みがかった反応領域が明確に見え, 石英管内壁を沿うように細長い火炎が形成される。 $\phi_2=0.5$ 以上の範囲では, 反応領域は2段目のインジェクター周辺

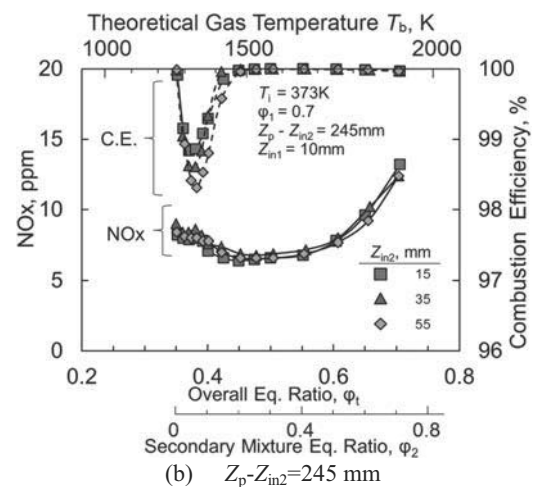
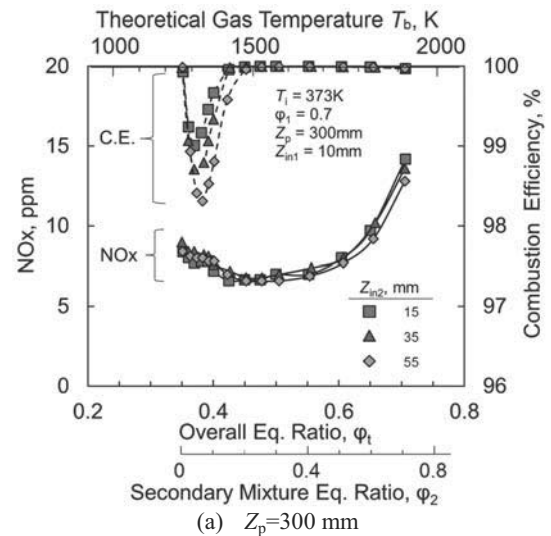


Fig. 5 NO<sub>x</sub> emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratio,  $\phi_1$ , for different secondary mixture injection positions,  $Z_{in2}$ .

部まで短くなっている。同一条件での $\phi_2$ を比較した場合, 1段目の当量比 $\phi_1$ が大きい方が2段目の反応領域が短くなることが分かる。

$\phi_1=0.6$ において, この試験における全ての範囲で, 燃焼効率は99.9%以上であった。一方,  $\phi_1=0.5$ において2段目に空気のみが噴射される場合( $\phi_2=0$ )の燃焼効率は99.2%であるが, 燃焼ガス温度が1400 K以上になると完全燃焼(99.9%)が実現できる。

NO<sub>x</sub>濃度は1段目の当量比に大きく依存し,  $\phi_1=0.5$ においては, この試験の全ての範囲で5 ppm(15%O<sub>2</sub>換算値)以下を達成し,  $\phi_1=0.6$ においては10 ppm前後となった。

この実験では,  $\phi_1$ を固定して $\phi_2$ を変化させているが, 完全燃焼と超低NO<sub>x</sub>燃焼を両立できるように $\phi_1$ と $\phi_2$ の両方を変化させることで, より広い作動範囲でNO<sub>x</sub>濃度を5 ppm(15%O<sub>2</sub>換算値)以下に抑制することが可能である。 $\phi_1=0.5$ においては, 前節に記載した結果と比較してNO<sub>x</sub>濃度が低いことから, 予混合気温度が高い

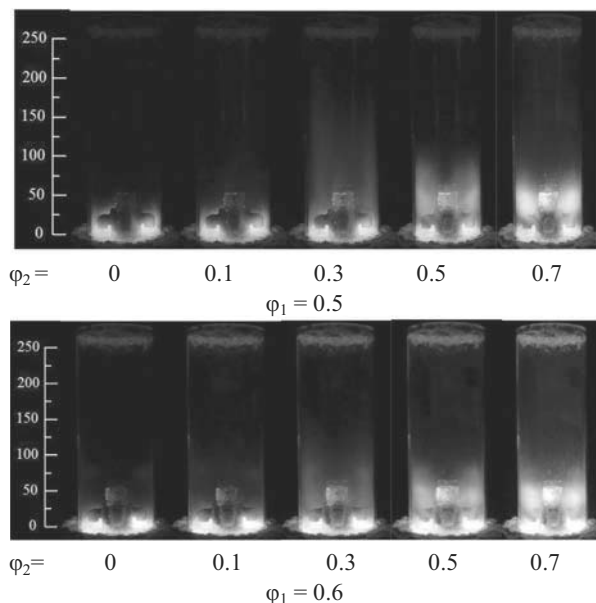


Fig. 6 Photographs of flames showing effects of primary and secondary mixtures equivalence ratios,  $\phi_1$  and  $\phi_2$ , on flame structure for  $Z_{in1}=10$  mm and  $Z_{in2}=15$  mm.

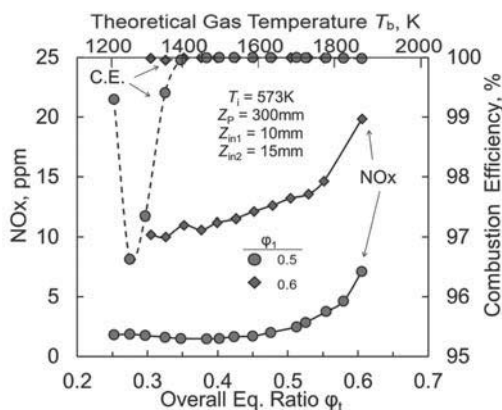


Fig. 7 NOx emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratios,  $\phi_t$ , for primary equivalence ratios,  $\phi_1$ , of 0.5 and 0.6.

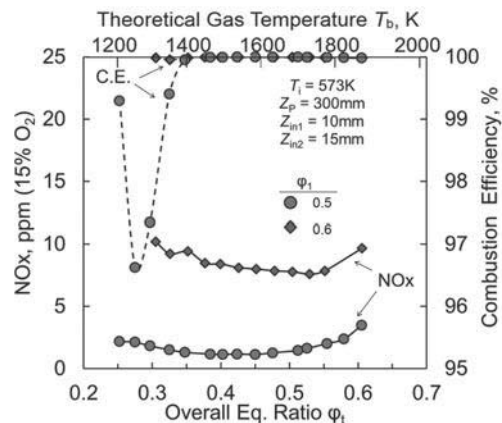


Fig. 8 NOx emissions corrected to 15% O<sub>2</sub> and combustion efficiency vs. overall equivalence ratios,  $\phi_t$ , for primary equivalence ratios,  $\phi_1$ , of 0.5 and 0.6.

方が、1段目の当量比をより低くすることが可能となり、低NOxにできるといえる。したがってこの燃焼方式は、空気入口温度が高い再生サイクルのガスタービンや高圧力比のガスタービンに向いているといえる。

#### 4.3 反応の進捗とNOxの生成

ガス採取位置を軸方向に変化させ、2段目予混合気の反応の進捗とそれに伴うNOxの生成について調査した。また、参考までにNOxの内訳、すなわちNOとNO<sub>2</sub>の軸方向変化についても調べた。1段目および2段目予混合気噴射位置 $Z_{in1}$ 、 $Z_{in2}$ は、それぞれ10 mm、15 mmで、予混合気温度 $T_i$ は573 K、1段目当量比 $\phi_1$ は0.5および0.6とした。

##### (1) 反応の進捗

$\phi_1=0.5$ においてCOおよびHCの濃度とガス採取位置に対する変化を表したグラフを図9(a)に示す。1段燃焼( $\phi_2=0$ )の場合、CO濃度の値は燃焼室出口までほとんど変化しない。これは空気噴射により燃焼ガス温度が低くなったことによって反応が凍結されたためと考えられる。 $\phi_2=0.1$ においては、CO濃度は増大して $Z_p=200$  mmで最大になり、その後減少しているのに対し、HC濃度は単調に減少している。これは、HCが分解しながらCOおよびCO<sub>2</sub>が生成されていることが示唆され、HC→COとCO→CO<sub>2</sub>との競合によって、それらの値が決まっているといえる。 $\phi_2$ が0.2以上では、燃焼室出口に近づくほどCO、HCのいずれの濃度も単調に減少することが分かった。また、2段目の当量比が大きい場合、COおよびHCの濃度は1段燃焼( $\phi_2=0$ )よりも低くなっている。このことから、2段目の燃焼ガス温度が高い方が1段目からのCOの酸化反応がより促進されることが分かる。

$\phi_1=0.6$ においてCOおよびHCの濃度のガス採取位置に対する変化を表したグラフを図9(a)に示す。この場合、 $\phi_1=0.5$ の場合と比較して、COとHCの濃度の値が低くなっている。このことから、1段目の当量比 $\phi_1$ が高い方が、2段目の混合気の反応がより速く進むことが示唆される。なお、1段目の燃焼ガス温度は $\phi_1=0.5$ で1200 K、 $\phi_1=0.6$ で1300 Kである。

##### (2) NOxの生成

$\phi_1=0.5$ においてNOとNO<sub>2</sub>濃度の軸方向変化を表したグラフを図10(a)に示す。出口におけるNOxのほとんどはNO<sub>2</sub>である。1段燃焼( $\phi_2=0$ )の場合、2段目でNOがごくわずかに生成される。1段目の燃焼ガス流中に希釈空気が噴射されることによって1段目で生成されたNOがNO<sub>2</sub>に変換していることが示唆される。このことはSanoらによって明らかにされている<sup>[13]</sup>。 $\phi_2=0.3$ の場合、NOxのすべてがNO<sub>2</sub>でその濃度は燃焼室出口に近づくほどわずかに減ることがわかる。

これは、2段目予混合気中のHCによりNOxがシアン等に還元<sup>[11]</sup>されていることを示唆している。これは、燃焼ガス中にHCを噴射し、NOxを削減するReburning<sup>[12]</sup>によっておきている還元反応である。通常、Reburningを

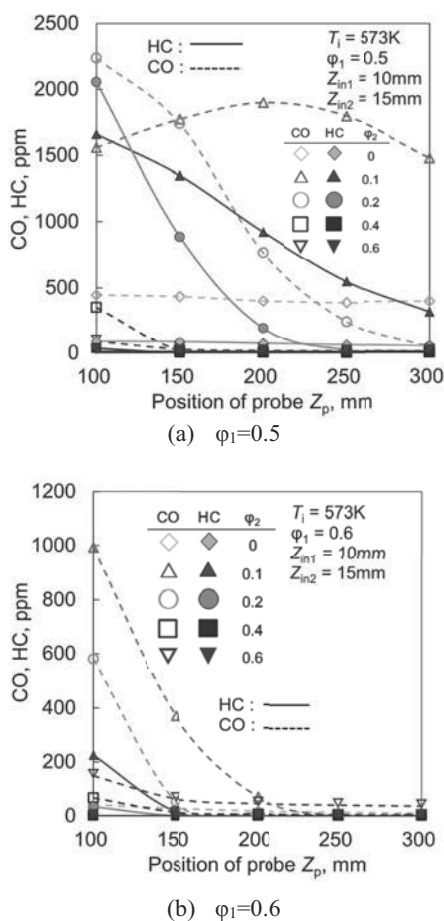


Fig. 9 CO and HC emissions along the combustor axis for secondary mixture of different primary equivalence ratios for  $\phi_1$  of 0.5 and 0.6.

利用するのは残存酸素濃度が非常に低い条件である。しかし、本実験での2段燃焼領域での酸素濃度は相当高いために、還元が起きにくい条件であるが、炭化水素濃度が極めて高いために還元反応が起きていると考えられる。

$\phi_1=0.6$ においてNOとNO<sub>2</sub>濃度の軸方向変化を表したグラフを図10(b)に示す。 $\phi_1=0.6$ では $\phi_1=0.5$ の場合よりもNO濃度が高いが、これは、1段目の火炎温度が高くなったことによってThermal NOも生成されるようになったと考察される。 $\phi_2=0.3$ のとき、1段目で生成されたNOはNO<sub>2</sub>に変換され、 $Z_p=100$  mmにおいては全てNO<sub>2</sub>に変換される。これは、2段目の燃料のHCがNOからNO<sub>2</sub>への変換に関係していることが示唆される。炭化水素によりNO-NO<sub>2</sub>変換が起きることは、Horiらの実験によって明らかにされている<sup>(14)</sup>。燃焼室出口に近づくほどNOが増加していることから、1段目で変換により生成されたNO<sub>2</sub>の一部がNOに戻ることを示唆される。2段目の燃料をさらに増加させた $\phi_2=0.6$ では、 $Z_p=100$  mmにおいてNO濃度が増加することが確認できるが、これもThermal NOによるものと考えられる。

#### 4.4 実用化に向けた課題への対応

この研究では、LL2コンセプトの低NOx排出 (<5 ppm以下) と高効率 (>99.9%) の両立に対する有効性をガス燃焼で検証することと、最良混合条件での排出レベルの確定を目的としていたので、SUS材の板金溶接によるインジェクターを用い、均質予混合気を外部から供給して実験を行った。実用化に際してのインジェクターの耐久性の課題は、耐熱金属の精密鑄造、あるいは最近実用になったAdding Manufacturing により製作することで解決できると考えられる。一方、混合気については、噴射孔の直上流で燃料を気流中に噴射して混合する方式

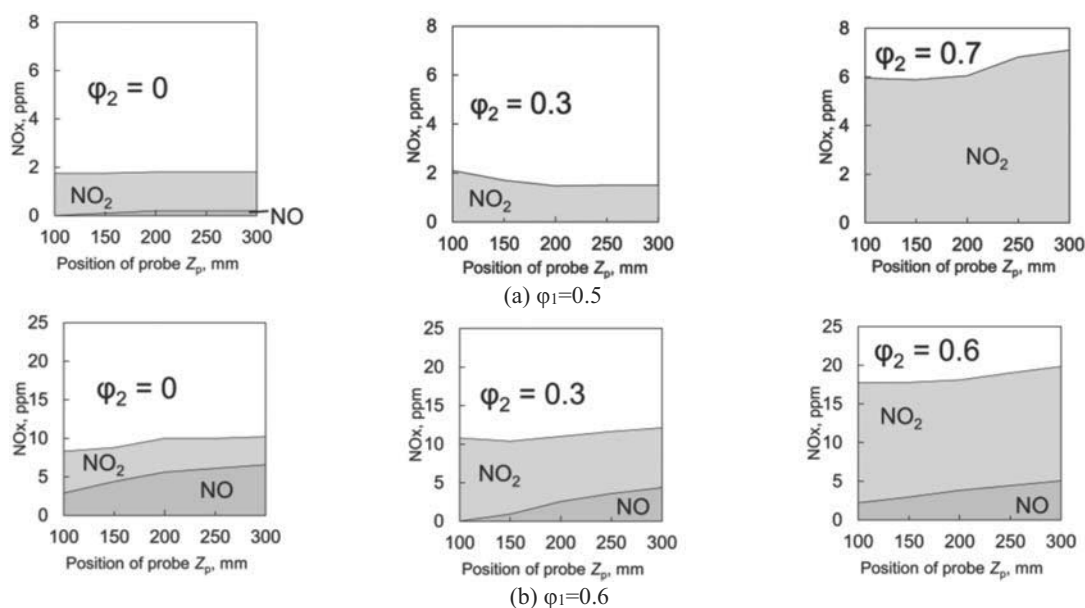


Fig. 10 Concentration of NO and NO<sub>2</sub> along the combustor axis for secondary mixture of different primary equivalence ratios for  $\phi_1$  of 0.5 and 0.6.



を採用することを検討している。その場合、局所的な燃料濃度の不均一さが残るのは避けられないが、実験結果が示すように、2 段目におけるNO生成は、その当量比が0.6程度までは実質的にないことから、不均一さによるNO<sub>x</sub>の増大はそう大きくないと考えられる。現在、実用に向けたインジェクター設計を行っている。

## 5. 結論

直列希薄-希薄ステージングの2 段目燃焼域において、1 段目の希薄燃焼域からの燃焼生成物中に希薄な予混合気を噴射し、その反応の促進に燃焼生成物の熱とラジカルとを利用するLL2燃焼器の排出特性について調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 1 段目に噴流保炎方式を用いることでより希薄側での安定した保炎が可能となる。この方式により断熱火炎温度が1400 Kから1900 Kまでの広い作動範囲で完全燃焼 (99.9%以上) と 5 ppm (15%O<sub>2</sub>換算値) 以下の超低NO<sub>x</sub>排出を達成できる。
- (2) 1 段目予混合気噴射位置をドーム壁面に近づけることでNO<sub>x</sub>が抑制され、1 段目で生成されたラジカル濃度が高い燃焼生成物中に2 段目予混合気が噴射されることで反応が促進され、高い燃焼効率を達成できる。
- (3) 予混合気温度が高い場合には、1 段目の当量比が低い場合においても燃焼器出口において高い燃焼効率を達成できる。そのため、1 段目の当量比をより低くすることが可能となり、出口ガス温度が等しい場合においてもNO<sub>x</sub>を低減できる。
- (4) 1 段目予混合気が完全燃焼していない場合であっても、出口ガス温度が約1400 K以上になると完全燃焼を実現する。
- (5) 2 段目予混合気中のHCによって1 段目で生成されたNO<sub>x</sub>の一部が還元される場合がある。
- (6) 1 段目で生成されたNOのほとんどは2 段目の燃料が噴射されるとすぐにNO<sub>2</sub>に変換され、NO<sub>2</sub>の一部はNOに戻る場合がある。

## 参考文献

- (1) S. Hayashi, and H. Yamada, 2000, "NO<sub>x</sub> emissions in combustion of lean premixed mixtures injected into hot burned gas," *Proceedings of the Combustion Institute*, 28:2443-2449.
- (2) S. Hayashi, H. Yamada, and M. Makida, 2005, "Extending low-NO<sub>x</sub> operating range of a lean premixed-prevaporized gas turbine combustor by reaction of secondary mixtures injected into primary stage burned gas," *Proceeding of the Combustion Institute*, 30:2903-2911.
- (3) N. Aida, T. Nishijima, S. Hayashi, H. Yamada, and T. Kawakami, 2005, "Combustion of lean prevaporized fuel-air mixtures with hot burned gas for low NO<sub>x</sub> emissions over an extended range of fuel-air ratios," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30:2885-2892.
- (4) S. Adachi, A. Iwamoto, S. Hayashi, H. Yamada, and S. Kaneko, 2007, "Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31:3131-3138.
- (5) H. Fujiwara, M. Koyama, S. Hayashi, and H. Yamada, 2005, "Development of a liquid-fueled dry low emissions combustor for 300kW class recuperated cycle gas turbine engines," *GT2005-68645 Proceedings of GT2005 ASME Turbo Exposition, Nevada, USA*.
- (6) P. B. Roberts, J. R. Shekleton, D. J. White, and H. F. Butze, 1976, "Advanced low NO<sub>x</sub> combustors for supersonic high-altitude aircraft gas turbines," *ASME paper NO. 76-GT-12*.
- (7) M. K. Bobba, P. Gopalakrishnan, J. M. Seitzman, B. T. Zinn, 2006, "Characteristics of Combustion Processes in a Stagnation Point Reverse Flow Combustor," *GT2006-91217, Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Barcelona, Spain*.
- (8) 野崎浩太, 廣井巧, 中村聡志, 山田秀志, 林茂, 2014, 淀み点逆流燃焼における排気性能に及ぼす噴射形態の影響, 第42回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, pp. 249-25
- (9) T. Hiroi, T. Saitoh, T. Nakasu, H. Yamada, S. Hayashi, 2016, "Effects of Atomization on Emissions in Reverse Flow Flame Stabilized Combustion," *Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2016, AJCPP2016-163: Takamatsu, Japan*.
- (10) T. Saitoh, T. Nakasu, T. Hiroi, H. Yamada, S. Hayashi, 2016, "Emissions Characteristics of Combustion of lean secondary premixed gas jets injected into burned gas from primary stage by lean premixed combustion supported by Reverse jet flame holding," *GT2016-56826 ASME Turbo Expo 2016: Seoul, South Korea*.
- (11) Miller, J. A, Klippenstein, J, and Glarborg, P, 2003, "A Kinetic Issue in Reburning: The Fate of HCNO," *Combustion and Flame* 135: 357-62.
- (12) Myerson, A. L., 1974, "The Reduction of Nitric Oxide in Simulated Combustion Effluents by Hydrocarbon-Oxygen Mixtures," *Proceedings of the Combustion Institute* 15:1085-92.
- (13) T. Sano, 1984, "NO<sub>2</sub> Formation in Mixing Region of Hot Burned Gas with Cool Air," *Combustion Science and Technology* 38: 129-44.
- (14) M. Hori, N. Matsunaga, Malte, P. C, and Marinov, N. M, 1992, "The Effect of Low-Concentration Fuels on the Conversion of Nitric Oxide to Nitrogen Dioxide," *Proceedings of the Combustion Institute* 24:909-16.