

Emissions in lean-lean two-stage combustion using premixed tubular flames

Hideyuki TAKAGI¹, Shigeru HAYASHI², Hideshi YAMADA² and Tadashige KAWAKAMI¹

¹Faculty of Engineering, Hosei University, Tokyo, Japan

²Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

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

Aeronautical Environment Technology Center

i03r1124@k.hosei.ac.jp

Key Words: Lean-lean two stage combustion, Tubular flame

Abstract

In gas turbines, excess air for combustion is available and therefore lean premixed combustion is the most promising approach to the significant reduction of thermal NO_x emissions. At lean conditions, however, flame stability is inherently worse and hence combustion tends to be incomplete. Efforts have been devoted toward extending the operating range of complete combustion at leaner conditions.

One of them is the lean-lean two-stage combustion where lean to ultra-lean secondary mixtures are mixed with the hot burned gas from the primary stage. Conventional flame combustion or flameless reaction are initiated depending on the conditions of the secondary zone. In the first part of the present study, the effects of fuel injection on the emissions and flame stability were investigated for a single tubular flame. In the second part, the emissions and flame stability were studied for a two-stage combustor with secondary mixture injected through the tangential slots on a cylindrical combustor wall. The effects of the ratio of air flow rates to the primary and secondary zones on the emissions and combustion characteristics were investigated.

1. まえがき

NO_x は、酸性雨や光化学スモッグを引き起こす原因となっており、高空での航空機からの NO_x 排出はオゾン層破壊の原因となっている。ガスタービンは、熱効率向上のため高温高圧下での燃焼が必要であり、必然的に NO_x 生成が促進される。脱硝装置との組み合わせや、純水を噴射して燃焼温度を低下させる方法もあるが、脱硝装置や純水装置の設備の付設によるコスト、水噴射による効率低下の問題がある。そのため低 NO_x ガスタービンの普及には DRY 低 NO_x 燃焼技術が必要となる。

ガスタービンから排出される NO_x の大部分は Thermal NO_x である。Thermal NO_x は主に 1800K 以上の高温で急速に生成され、燃焼領域内にこうした高温部分があると、NO_x が生成される。そのため、NO_x 排出を抑制するには、混合気の希薄化、均質化によって燃焼ガス温度を平均的に低くできる希薄予混合燃焼が有効である。しかし、希薄予混合燃焼は当量比が低いと火炎が不安定となり未燃焼成分を排出して燃焼効率の低下を招く。また、当量比が高いと燃焼ガス温度が高くなり、NO_x 排出が急激に増加する。このように希薄予混合燃焼では、低 NO_x、高い燃焼効率の両立ができる範囲が狭い範囲に限られ

てしまう。低 NOx 排出の下で作動範囲を拡大するため、高温の既燃ガス中に予混合気を噴射する 2 段希薄予混合燃焼法が研究されている¹⁾。超希薄な混合気でもその温度が十分に高ければ反応して熱を発生する。したがって、高温の既燃ガス中に予混合気を噴射し混合することにより、通常では燃焼できないような希薄な状態でも反応させることができる。混合がうまく行えれば、予混合気濃度が極めて小さいときでも完全燃焼が可能であり、予混合気が希薄であれば当然 NOx の生成も小さいはずである。

2 段希薄予混合燃焼は 1 段目の既燃ガス中に予混合気を噴射するため、1 段目の保炎が重要となる。予混合気をスリットから接線方向に噴射すると、円筒の形状をもった筒状火炎が形成される²⁾。この筒状火炎は、中心部に存在する温度の高い既燃ガスと混合気が大きな面積で接触し、火炎面に垂直な混合気の流れが極めて小さいために、静止混合気の場合の可燃限界に近い当量比まで保炎が可能である。旋回流場の内側に密度の小さい既燃ガスが存在し、その外側に密度の大きな混合気が存在するこの火炎の構造は、極めて安定している。

本実験では、この筒状火炎を用いた燃焼における燃料噴射形態の影響、およびこの筒状火炎を保炎に用いた 2 段希薄予混合燃焼の NOx 排出特性を調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本実験では筒状火炎を用いた燃焼における燃料噴射形態の影響、およびこの筒状火炎を保炎に用いた 2 段希薄予混合燃焼の排出特性を調べるため 2 つの燃焼器を用いた。

2.1.1 燃料噴射形態の影響

図 1 は燃料噴射形態の影響を調べるのに用いた燃焼器の概念図である。また燃焼器の写真を図 2 に示す。図 1 の燃焼器には、円周上から接線方向に 4 箇所等に等配に長方形のスリット

ットが取り付けられている。図 1 の燃焼器のスリットの大きさは軸方向 50mm、高さ 6mm で、燃焼器の出口は直径が 80mm である。燃焼実験の際には、燃焼器の下流側に内径 120mm の燃焼筒をフランジを介して取り付け、出口において直径を 80mm に絞った。この燃焼器の燃料噴射形態は、Premixed、Slot Injection、Wall Injection の 3 種類である。Premixed は燃料と空気を予め混合した予混合気をスリットから供給する形態である。Slot Injection はスリットの入口に燃料供給管を挿入して、そこから燃料を噴射し、スリットから流入する空気と急速に混合させる形態である。Wall Injection は燃焼器最上流の面に取り付けられた燃料供給管から燃料を燃焼器内に直接噴射し、スリットからの空気と燃焼させる形態である。

図 1 の燃焼用の空気は、ブローより供給され、マスフローコントローラで流量制御され、電気ヒーターによって加熱される。燃料はメタンを使用し、空気と同様にマスフローコントローラで測定した。燃焼器の入口に取り付けた熱電対、差圧計から燃焼器入口温度 T_{in} 、圧力損失 ΔP_{in} 、スリット断面平均流速 V_j 、燃焼器断面平均流速 U 、設定当量比 ϕ_m を求めた。

2.1.2 2 段燃焼の排出特性

図 3 は 2 段燃焼の排出特性を調べるのに用いた燃焼器である。図 4 に燃焼器の写真、図 5 に燃焼器内部に取り付けられている内管を示す。図 1 の燃焼器と同様に図 3 の燃焼器にもスリットが取り付けられている。1 次側のスリットの大きさは軸方向 25mm、高さ 3mm、2 次側のスリットは軸方向 50mm、高さ 6mm である。燃焼器の 1 次側の出口は直径 41.5mm、2 次側の出口は直径 65mm、燃焼筒の直径は 100mm となっていて、出口において内径が 80mm に絞られている。燃焼筒の外周部は熱損失を防ぐため断熱材で被ってある。燃焼器背面にはガラス窓が取り付けられてい

て、燃焼器内部の火炎の様子を観察できるようになっている。

図3の燃焼器の1次側の空気はコンプレッサー、2次側の空気はブロアより供給される。1次側空気は2台のマスフローコントローラ、2次側空気は体積流量計で計測され、それぞれ電気ヒーターで加熱される。1次、2次燃料のメタンは、加熱された空気とスタティックミキサへ入り混合する。それぞれの予混合気の温度は燃焼器入口でK熱電対により測定する。各計測器から出力された空気流量、燃料流量、温度の電気信号はデータロガーに集められ、そこから空気流量 WA1、WA2、燃料流量 WF1、WF2、燃焼器断面平均流速 U1、U2、当量比 ϕ_1 、 ϕ_2 、温度 Tin1、Tin2 を求めた。

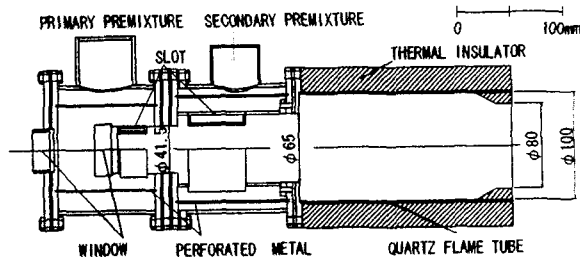


Fig.3 Schematic of combustor



Fig.4 Photograph of combustor

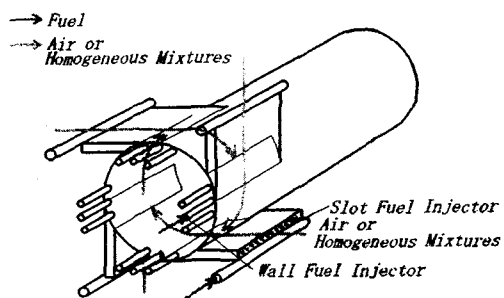


Fig.1 Schematic of combustor

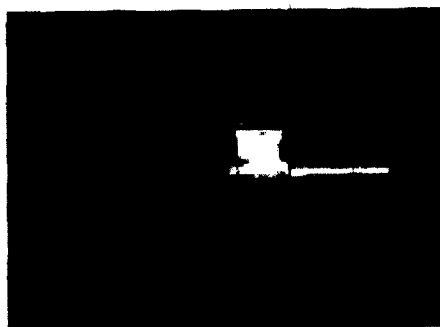
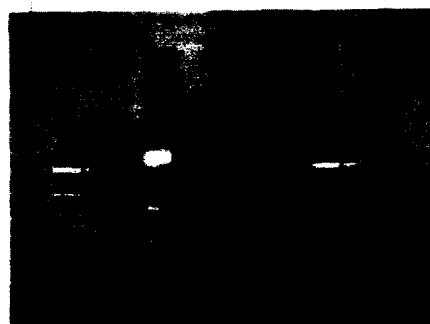


Fig.2 Photograph of combustor



primary stage secondary stage

Fig.5 Photograph of swirl generator

2.2 実験方法

燃焼器出口において、温水冷却式十字プローブ(12孔の集合プローブ)を用いて燃焼ガスを採取して、連続ガス分析装置で NO_x、NO、THC、CO、CO₂、O₂ の各成分の濃度を測定した。分析ガスの組成から NO_x 排出(15%O₂ 換算濃度)、燃焼効率、分析当量比 ϕ_g 、全体当量比 ϕ_T を算出した。なお、U2 は1次、2次の空気流量 WA1 と WA2 の合計から計算した値である。

3. 実験結果および考察

3.1 筒状火炎を用いた燃焼における燃料噴射形態の影響

Wall Injection、Slot Injection の代表的な火炎で炎色反応させた写真を図 6 に示す。この写真から、Wall Injection の方が Slot Injection よりも直径が細い火炎になっており、また強い逆流を示していることが分かる。図 7 は、分析当量比と NOx 排出量・燃焼効率との関係を示したものである。Slot/Wall Injection ($\phi_w=0.1$ or 0.3) は Slot と Wall の両方から燃料を供給した場合で、Wall Injection からの燃料を全体当量比の 0.1 or 0.3 に固定して、残りの燃料を Slot Injection させた。これらの結果から Slot Injection と Premixed の場合で、NOx 排出量・燃焼効率ともに類似した。Wall Injection は、他のどの燃料噴射形態よりも NOx 排出量が多い。また、Slot Injection と Wall Injection の両方用いた時の Slot/Wall Injection は、Wall Injection からの燃料流量を多くした時、NOx 排出量も増加している。どの燃料噴射形態のときでも当量比 0.5 付近から燃焼効率が 100% に達している。Wall Injection を用いた場合、当量比 0.2 まで NOx 排出量が増え、その後は、減少していく。燃焼効率に関しても当量比 0.2 付近で一度高くなっている。

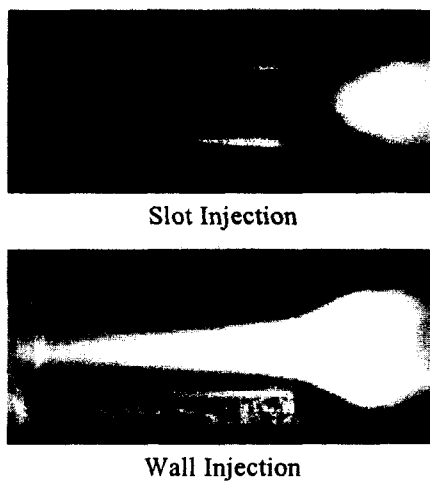


Fig.6 Photographs of flames
($\phi_m=0.8, T_{in}=200^\circ\text{C}, \Delta P_{in}=50\text{mmAq}$)

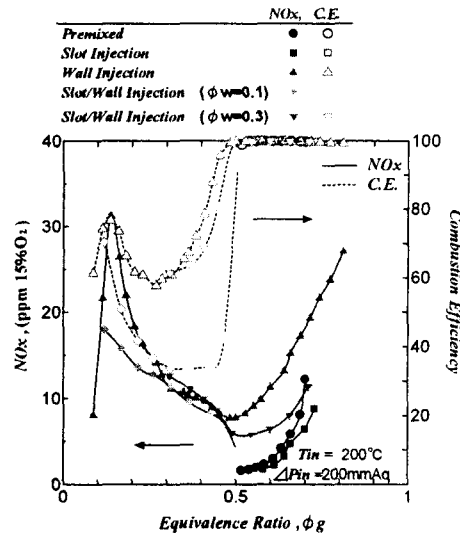


Fig.7 NOx emissions and combustion efficiency vs. equivalence ratios.

3.2 入口空気温度による排出特性の比較

図 8 は 2 段燃焼器を用いて、1 段燃焼させたときの入口空気温度による NOx 排出および燃焼効率を比較した結果である。1 次と 2 次の空気量の比が 1:1 のとき入口温度 400°C で逆火したため、1:2 の条件で実験を行った。また、温度が異なっても流速が一定となるように空気量を調整した。NOx 排出のピークは $200, 300, 400^\circ\text{C}$ で 27, 46, 85ppm となり、入口温度が高いほど NOx 排出のピークは大きくなっている。これは入口温度が上昇したことによって火炎温度が高くなり NOx の生成が促進されたためである。NOx のピーク時の当量比は、理論燃空比に近い値で NOx 排出はピークとなり、それよりも $\phi=1$ が過濃側になると NOx 排出は減少していった。

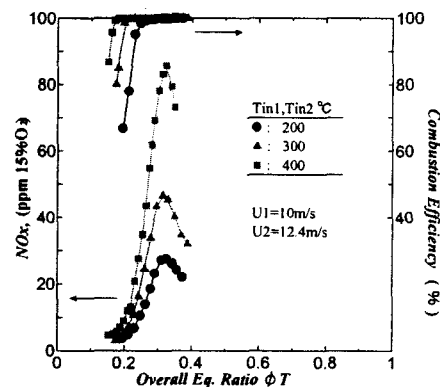


Fig.8 NOx emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratios for different inlet temperatures.

3.3 1段燃焼と2段燃焼の比較

図9は1段燃焼と2段燃焼のNO_x排出、燃焼効率をWA1:WA2=1:1, Tin1=Tin2=200°Cの条件で比較したものである。

●は1段燃焼だけの結果で、保炎限界付近の $\phi_1=0.6$ から $\phi_1=1.1$ まで変化させた。WA1:WA2=1:2のときと同様に、急激にNO_x排出が増大し、ピークをもって減少した。2段燃焼は、1段目の燃焼ガスが完全燃焼する当量比に達した後に、2次の燃料を供給し、排出特性を調べた。2次予混合気の当量比 ϕ_2 が増加するにつれてNO_xの排出が徐々に減っていき、全体当量比 ϕ_T が1次の当量比 $\phi_1=0.75$ とほぼ同じ $\phi_T=0.7$ になったところでNO_x排出が同レベルになり、さらに ϕ_T が増すと1段燃焼と同じような傾きで増加する。2次予混合気を噴射して燃焼ガス温度が上昇しているにも関わらず、NO_x排出量が減少しているのは2段目の燃焼のNO_x生成割合が小さいためと考えられる。燃焼効率は ϕ_2 が常温では反応できない極めて希薄な条件でもほぼ100%となった。また、 ϕ_T が高い領域で燃焼効率が低下しているのは、熱解離によって生じたCOのためである。

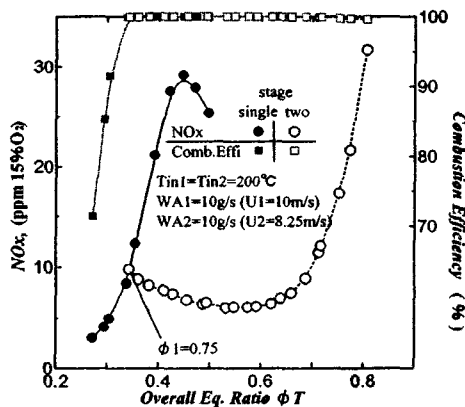


Fig.9 NO_x emissions and combustion efficiency vs. equivalence ratios for single-stage and two-stage combustion.

3.4 2次空気流量を変化させることによる排出特性への影響

2次の空気量を1次の空気量に対して1~3倍変化させたときの結果を図10に示す。1段燃焼させた場合の特性は、2次の空気量が増すにしたがって ϕ_T が小さくなる側に移行している。ピークの高さは2次の空気量が多いほど低くなっている。これは2次の空気が多いほどクエンチング効果が大きく、さらに燃焼器内の滞留時間が短くなったためと考えられる。 ϕ_1 を0.75に固定して2次の燃料を供給した場合で2次空気が多いときには燃焼効率の低下を招くが徐々に回復して100%に達する。これは、図10に示した ϕ_T に対する断熱火炎温度からガス温度が低くなっているためである。2次燃料が増すにつれて火炎温度が上昇しWA2=20g/sでは1520K、WA2=30g/sでは1690Kで完全燃焼した。NO_x排出はいずれの場合でも1800Kを超えるあたりで急激に上昇している。

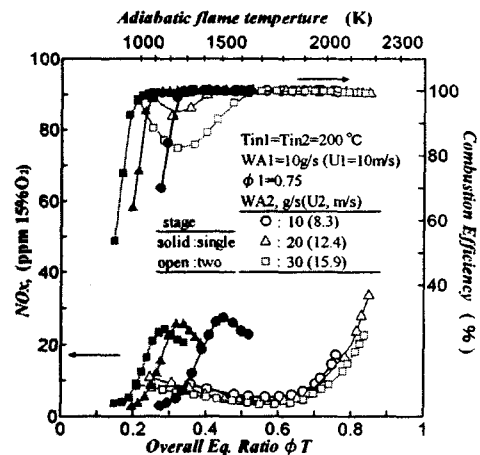


Fig.10 NO_x emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratios for different secondary airflow rate for single-stage and two-stage combustion.

2 段希薄予混合燃焼において 2 次燃料が噴射された直後から完全燃焼する当量比までは、未燃焼成分が排出され燃焼効率が低下してしまう問題がある。この問題の解決法として、1 次当量比を高め設定しておき、負荷の上昇に合わせて 1 次当量比を減少させる方法が考えられる。また、別の方法としては例えば 1 次と 2 次空気流量の比が 10:20(g/s)の時には空気を 10:10:10(g/s)というようにさらに多段階に分けて供給すれば上流からの既燃ガスと下流の空気が混合したときの温度の低下を小さくでき、燃焼効率の低下を防げる可能性がある。

3.5 1 次当量比を変化させることによる排出特性への影響

図 11 は 2 段燃焼において 1 次側の当量比を変化させた場合の NO_x 排出、燃焼効率への影響を示したものである。WA1 と WA2 の比については、1:3 の条件で実験を行った。 $\phi_1=0.65$ の時に比べて $\phi_1=0.55$ の時には燃焼効率の低下はあるが、NO_x が急激に増加するまでの全当量比範囲で NO_x 排出量は少なくなっている。WF2=0 の状態から全体当量比が 0.6 付近まで NO_x 排出量が 5ppm 以下と極めて低い値となっている。この結果から 2 段希薄予混合燃焼において 1 次の当量比を低くすると、2 次空気流量を増加させた場合と同様に、より NO_x 排出量を少なくできることがわかる。したがって 1 次の当量比は NO_x 排出量が少なく、かつ 2 次の予混合気完全燃焼できる可能な限り希薄な状態が望ましい。

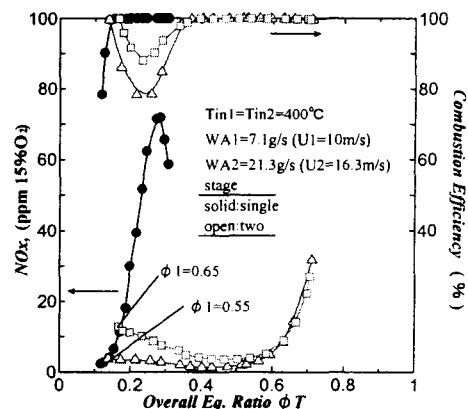


Fig.11 NO_x emissions and combustion efficiency vs. overall equivalence ratios for different primary equivalence ratios.

4. 結論

この研究の主な結果は次の通りである。

- (1) NO_x 排出の少ない Slot Injection と希薄側まで保炎できる Wall Injection を組み合わせることによって、燃焼効率が高く、低 NO_x 排出の燃焼が実現できる範囲を広げることができる。
- (2) 筒状火炎を用いた 2 段希薄予混合燃焼を用いることによって、広い当量比の範囲にわたって高い燃焼効率と低 NO_x 排出が可能である。

参考文献

- 1) Hayashi.S, Yamada.H: NO_x Emissions in Combustion of Lean Premixed Mixtures Injected into Hot Burned gas, 28th International Symposium on Combustion 2443-2449(2000)
- 2) Ishizuka S.: An Experimental Study on Extinction and Stability of Tubular Flames, *Combustion and Flame*, 75: 367-379 (1989).