

渦巻き火炎燃焼方式低 NO<sub>x</sub> バーナの開発Development of Low NO<sub>x</sub> Burner Applying Spiral Flame Combustion

廣 光 永 兆	航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部	博士（工学）
細 井 潤	航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部	課長
藤 秀 実	航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部	部長 博士（工学）

拡散燃焼でありながら低 NO<sub>x</sub> 燃焼が可能で、希薄側安定燃焼範囲の広い渦巻き火炎燃焼方式をガスタービン用燃焼器のバーナに適用することを試みた。渦巻き火炎燃焼方式を実際のガスタービン燃焼器に適用するために高負荷型に発展、改良したバーナの燃焼試験を行い、従来型拡散燃焼器に比べ 50% NO<sub>x</sub> 低減を実現した。さらに、NO<sub>x</sub> 性能は強旋回流の火炎伸長率と関係していることが分かった。

A spiral flame burner was tested for adapting to gas turbines. In spite of being the diffusive type, this burner is distinguished by low NO<sub>x</sub> performance and wide combustion stability. For application to industrial gas turbines, the new burner has been modified for high intensity combustion and the design improved to achieve lower NO<sub>x</sub> combustion compared to conventional diffusive burners. Low NO<sub>x</sub> performance was confirmed by combustion tests. Comparison of the results with conventional non-premixed combustors reveals that the NO<sub>x</sub> emissions from the spiral flame burner are 50% lower. Furthermore, the low NO<sub>x</sub> performance is related to the intensity of local strain rate in strong swirl flow.

## 1. 緒 言

ガスタービン燃焼器の高効率・高負荷化に伴って、燃焼器入口空気条件も高温・高圧化する一方、エンジンからのエミッションは逆にクリーン化が求められている。この相反する二つの条件、すなわち燃焼器の高温・高圧化とエミッション、特に NO<sub>x</sub> 排出量の低減を両立させるため、これまでもさまざまな燃焼器の開発がなされてきた。有効な NO<sub>x</sub> 低減方法として希薄予混合燃焼が挙げられるが、燃焼安定範囲・逆火、振動燃焼制御など多くの問題を抱えており、現状では適用範囲がかなり限定されている。これらの問題は、燃焼器入口条件の高温・高圧化に伴ってさらに起こりやすくなることから、入口条件の高温・高圧化が要求される航空用ガスタービンなどへの希薄予混合燃焼の適用はより困難になると思われる。

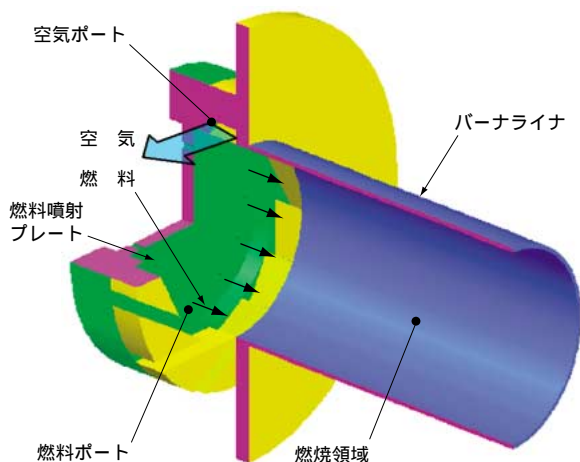
希薄予混合燃焼に代わる方法として、いろいろな燃焼方式の研究が行われている<sup>(1),(2)</sup>。本研究開発では、低 NO<sub>x</sub> でありながら自己着火や振動燃焼を起こさない燃焼安定性の高い渦巻き火炎燃焼方式に着目した。渦巻き火炎燃焼方式に関し、常温・大気圧条件下での低 NO<sub>x</sub> 性および安定燃焼性についてはシングルポートバーナを用いた基礎研究で確認されている<sup>(3)</sup>。そこで、この渦巻き火炎燃焼方式を実機ガスタービン燃焼器に適用するため、高燃焼負荷に対応

して空気および燃料の燃焼器への導入をマルチポート化した渦巻き火炎低 NO<sub>x</sub> 拡散バーナを考案、開発し、NO<sub>x</sub> 性能データや吹消え特性を取得することによって、その実機燃焼器への適用の可能性を調査した。なお今回供試した火炎バーナはガス燃料仕様であり、適用対象として陸船用ガスタービン低 NO<sub>x</sub> 燃焼器が考えられるが、液体燃料微粒化機構を付加することによる航空用低 NO<sub>x</sub> 燃焼器への搭載も視野に入れている。

## 2. 高燃焼負荷型渦巻き火炎バーナおよび試験装置

高燃焼負荷型渦巻き火炎バーナのイメージを第 1 図に示す。供試体バーナは円筒形バーナライナと円筒上流部の円周上に均等に配置された空気噴流ポート（以下、空気ポート）、円筒部上流端面に設置された燃料噴射プレートから構成される。燃焼用空気は空気ポートからライナ壁面に対して接線方向に導入される。また燃料噴射ポート（以下、燃料ポート）は、形成される強旋回流フローパターンに対して任意の位置に燃料を噴射できるよう燃料噴射プレート上に配置されている。

第 2 図に試験装置を示す。バーナライナは、別系統から供給される希釈空気によって冷却可能な構造になっている。バーナへの着火は、ライナ下流のケーシング側面に設置したトーチグナイタを用いて行った。トーチグナイタは



第 1 図 高燃焼負荷型渦巻き火炎バーナのイメージ  
Fig. 1 Image of high load type spiral flame combustion burner

基準条件と、試験条件を次に示す。

#### 設計形状パラメータ

空気ポート数 $N_{aref}$	8
空気ポート高さ $h_{ref}$	9 mm
燃料ポート数 $N_{fref}$	8
燃料噴射位置	
ライナ半径比 $r/R$	0.67

#### 試験条件

入口空気圧力 $P_3$	0.3 ~ 0.7 MPa
入口空気温度 $T_3$	318 ~ 673 K

### 3. 試験結果

供試体バーナ形状パラメータおよび入口空気条件を変えた燃焼試験を行い、本バーナの実機燃焼器への適合性について検討した。

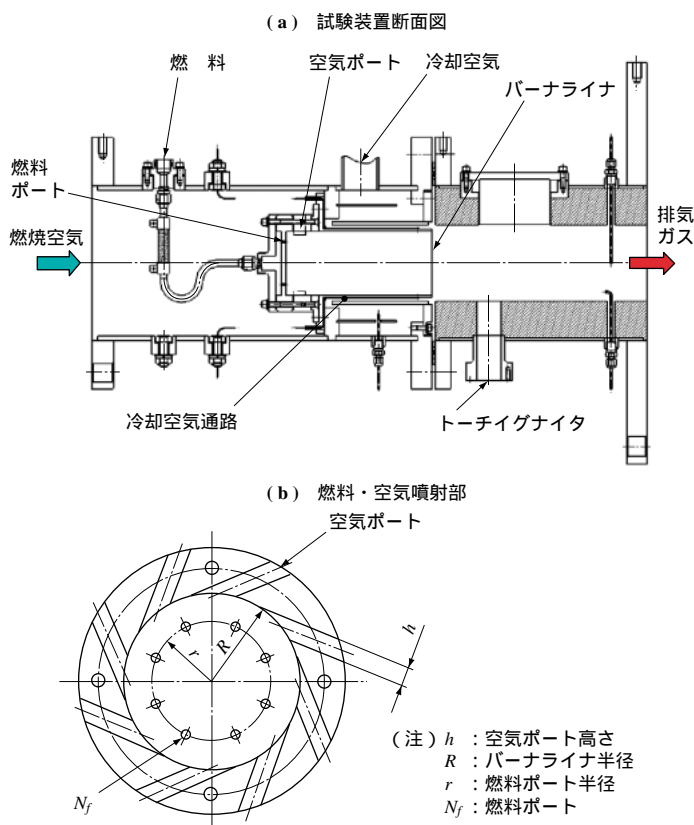
#### (1) 流速の影響 (NO<sub>x</sub> 低減効果の変化)

第 3 図に、空気ポートの平均出口流速 ( $V_p$ ) に対する排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度の変化について示す。空気ポート流速を増加させると NO<sub>x</sub> の排出量は減少する。これは、空気ポート流速増加に伴って速度せん断部分の火炎伸長率が大きくなり、部分的な消炎を起こして火炎温度が低下するためと考えられる。

#### (2) マルチポート化が燃焼特性に及ぼす影響

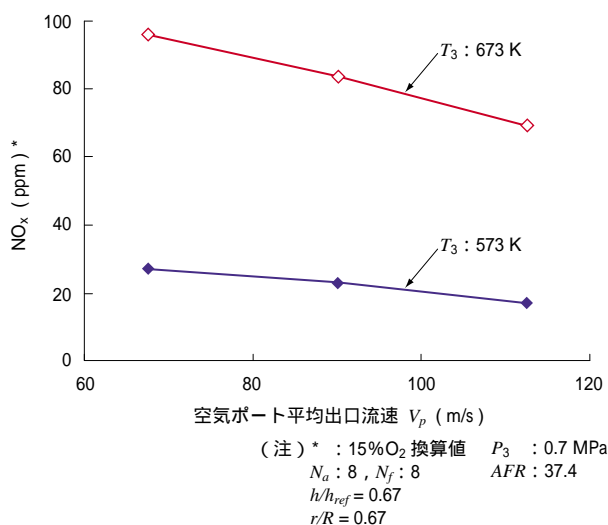
##### (a) 空気ポート数の変化が NO<sub>x</sub> に与える影響

第 4 図は、入口常温条件での空気ポート数に対する NO<sub>x</sub> を示したものである。ここでは、同じ負荷基準での比較が困難なため、空気ポート出口の流速を基準として、同じ条件で比較した。また第 5 図

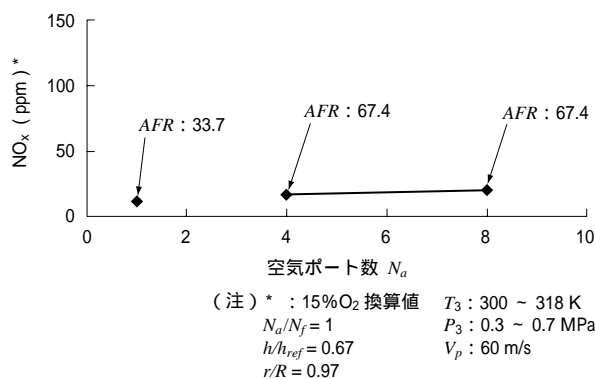


第 2 図 高燃焼負荷型渦巻き火炎バーナの試験装置  
Fig. 2 Test rig of high load type spiral flame combustion burner

バーナ着火・安定燃焼確認後、消火する。図中に示した空気ポートの高さ・数や燃料ポートの位置・数はそれぞれのプレートを交換することで変更できる。燃焼試験は、供試体バーナの空気ポート高さ： $h$ 、空気ポート数  $N_a$  および燃料ポートの位置  $r$ 、燃料ポート数  $N_f$  を基準条件に対し変化させた各形態に対し、入口空気条件（圧力： $P_3$ 、温度： $T_3$ ）および燃焼負荷（空燃比： $AFR$ ）を変化させて燃焼特性・排出特性を調査した。供試体形状パラメータの



第 3 図 空気ポート流速と NO<sub>x</sub> の関係  
Fig. 3 Relationship between air inlet velocity and NO<sub>x</sub> emission



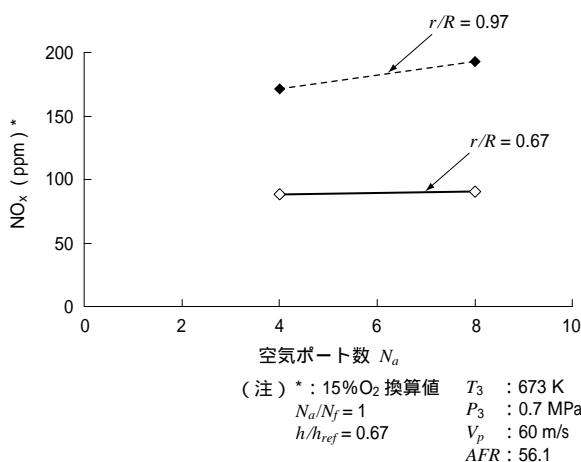
第4図 空気ポート数とNO<sub>x</sub>の関係 (常温時)

Fig. 4 Relationship between number of air ports and NO<sub>x</sub> emission (at ambient inlet temperature conditions)

に、入口空気条件を昇温・昇圧した条件での、空気ポート数とNO<sub>x</sub>の関係を示す。各燃焼器入口条件において、空気ポート数の増加に伴って若干NO<sub>x</sub>が増加している。これはヒートロスなどによる火災温度低下の影響の割合が燃焼負荷率が高くなるほど小さいことによる。この結果からは、空気ポート数で表される燃焼器の幾何的形狀がNO<sub>x</sub>生成に与える影響はほとんどないと考えることができる。

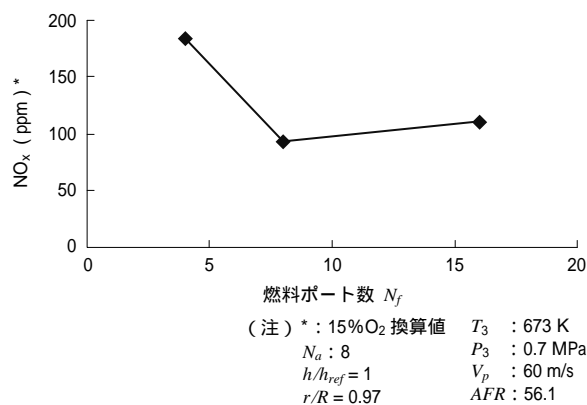
(b) 燃料ポート数の変化によるNO<sub>x</sub>の変化

空気ポート数、各ポートの出口面積、空気ポート出口流速および空燃比を固定し、燃料ポート数の増減を行うと、1ポート当たりの燃料流量が燃料ポート数に反比例して増減し、噴射運動量が変化する。この効果を調査するため、ポート数を基準に対して2倍および1/2の条件で変化させた結果、燃料ポート数の増減によって燃焼特性およびNO<sub>x</sub>が第6図のように変化した。この結果では、基準条件に対し



第5図 空気ポート数とNO<sub>x</sub>の関係 (昇温時)

Fig. 5 Relationship between number of air ports and NO<sub>x</sub> emission (at high inlet temperature conditions)



第6図 燃料ポート数とNO<sub>x</sub>の関係

Fig. 6 Relationship between number of fuel ports and NO<sub>x</sub> emission

て燃料ポート数を減らしても、逆に増やしてもNO<sub>x</sub>排出濃度は増加した。火災の可視状態も、ポート数の増減で変化している。特に燃料ポート数を2倍にした条件では、ほかの条件に比べ火災の安定性が低下し、条件によっては火災基部が移動する状態が観察された。

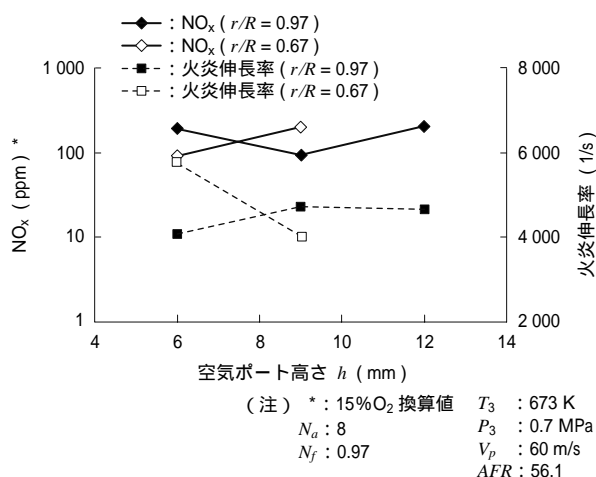
(c) 空気噴流ポート高さが低NO<sub>x</sub>効果へ及ぼす影響

渦巻き燃焼方式の原理では、火災伸長によって消炎を生じさせて火災温度を低下させることでNO<sub>x</sub>低減を実現する。空気ポート高さを変えると、流速が同じであっても強旋回流内部の速度勾配の大きさおよび速度分布が形成される領域が変化すると考えられ、火災伸長率の高い領域とその強さが変化する。例えば、空気ポート高さを増加させると、噴流の速度勾配、すなわち速度せん断が緩やかになり、火災伸長率の絶対値は低くなる。また勾配のピーク位置もライナ中心方向に移動する。火災伸長によるNO<sub>x</sub>低減効果は、火災伸長率の高い領域と燃料と空気の混合領域との相対的な関係に大きく影響を受けると想定される。このため、空気ポートと燃料ポートの相対的な位置関係が重要なポイントであると考えられる。第7図に、空気ポート高さとの関係について、二通りの燃料噴射位置それぞれについて比較した結果を示す。また、強旋回流中の燃料到達位置を燃料噴射位置と仮定して、CFDによる数値計算によって求めた速度分布から、次式を使って相当する局所火災伸長率をそれぞれ計算した。

$$\text{火災伸長率} = d(U_t/r)/dr \quad (1/s)$$

$U_t$  : 周方向速度

$r$  : 中心からの半径方向距離



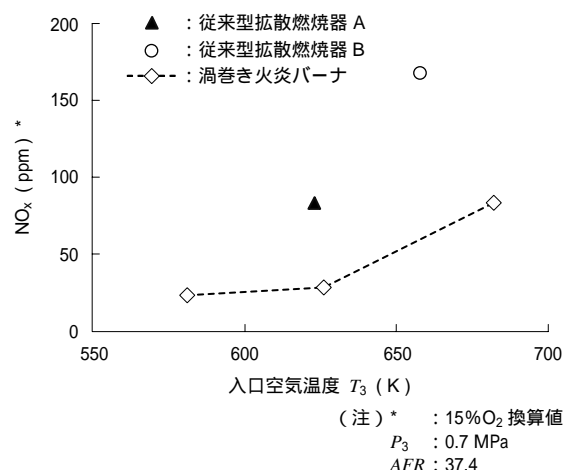
第 7 図 空気ポート高さ と NO<sub>x</sub> , 火炎伸長率 との関係  
 Fig. 7 Relationships between air port height and NO<sub>x</sub> emission, flame strain rate

$r/R = 0.97$  , すなわちライナ壁面近傍で燃料を噴射した条件では , 空気ポート高さを基準条件から基準条件の 2/3 の高さに替えた場合と , 空気ポート高さを基準条件の 1.5 倍に替えた場合の両方で NO<sub>x</sub> が増加し , 火炎伸長率が減少した . また ,  $r/R = 0.67$  の燃料噴射条件では , 空気ポート高さを基準条件の 2/3 の高さに替えた場合に NO<sub>x</sub> が減少し , 火炎伸長率が増加した . 渦巻き火炎燃焼器の NO<sub>x</sub> 低減原理では , 燃料噴射位置の火炎伸長率が大きくなると , 消炎による火炎温度低下が起こりやすくなるため NO<sub>x</sub> 排出濃度は低くなる . 逆に火炎伸長率が小さくなると消炎が起こりにくくなるため火炎温度が下がらず , NO<sub>x</sub> 排出濃度は高くなると考えられ , 試験の結果と一致した .

第 8 図に入口空気温度に対する NO<sub>x</sub> 排出濃度を示す . 623 K 以下の入口空気条件では , 高い燃焼負荷率の条件においても非常に良い低 NO<sub>x</sub> 排出特性を発揮し得る . また 623 K 以上の条件においても , 空気ポートおよび燃料ポートの形態を適性に選定することによって , 本稿の範囲においては従来型拡散燃焼器と比較して 50 % 程度の NO<sub>x</sub> 削減が見込まれる . これらの結果から , 本バーナは拡散燃焼方式の低 NO<sub>x</sub> バーナとして実機へ適用できると考えられる .

#### 4. 結 言

低 NO<sub>x</sub> かつ燃焼安定性の高い渦巻き火炎燃焼方式を適用した拡散火炎バーナは , 実機燃焼器への適用を見込める可能性をもつことが分かった .



第 8 図 従来型燃焼器 との NO<sub>x</sub> 比較  
 Fig. 8 Comparison of NO<sub>x</sub> emission for spiral flame combustor and conventional non-premixed combustors

- (1) 高温・昇圧条件下においても , 基礎研究での結果と同様に従来型拡散燃焼器と比較して低い NO<sub>x</sub> 排出特性を示す . 673 K , 0.7 MPa の燃焼器入口空気条件において , 従来の 50 % 程度の NO<sub>x</sub> 削減が可能である .
- (2) 本バーナの低 NO<sub>x</sub> 性を燃料噴射位置の局所的な火炎伸長率によって整理すると , その NO<sub>x</sub> 低減効果は火炎伸長率の大きさと相関があり , 渦巻き火炎燃焼方式の低 NO<sub>x</sub> 原理と一致する .

本バーナ試験によって渦巻き火炎方式による NO<sub>x</sub> 低減効果は確認されたが , 希薄予混合燃焼方式などに比べると絶対的な NO<sub>x</sub> 排出量はまだまだ高い . しかし , 燃焼器の形態に多くの最適化や改良の余地があり , 低 NO<sub>x</sub> 性のさらなる改善が期待できることから , 燃焼安定性や安全性の長所を併せもつ次世代の低 NO<sub>x</sub> バーナ候補と考えている .

#### 参 考 文 献

- (1) H. C. Gabler et al. : Asymmetric Whirl Combustion – A New Approach for Non-Premixed Low NO<sub>x</sub> Gas Turbine Combustor Design AIAA Paper 98-3530 ( 1998 )
- (2) H. S. Alkabbie : Reduced NO<sub>x</sub> Emissions using Low Radial Swirler Vane Angle ASME Paper 91-GT-363 ( 1991 )
- (3) 矢嶋準他 : 強旋回気流による筒型拡散燃焼器の燃焼特性 第 40 回日本燃焼シンポジウム前刷集 2002 年 pp.443 - 444