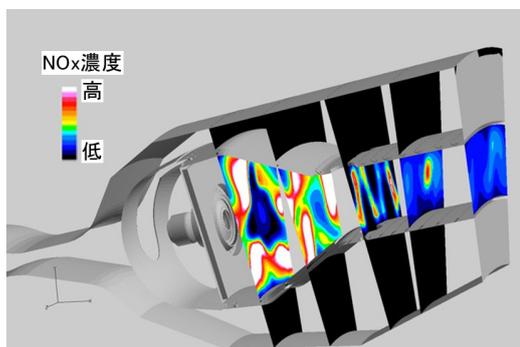


# 航空エンジン用燃焼器における希釈流配分 及び二重壁ライナの NO<sub>x</sub> 低減効果

Effects of Dilution Flow Balance and Double-wall Liner on NO<sub>x</sub> Emission  
in an Aircraft Gas Turbine Engine Combustor



森合 秀樹  
Hideki Moriai

近年航空機に対するNO<sub>x</sub>を初めとした環境規制は厳しくなっており、その排出源である燃焼器におけるNO<sub>x</sub>排出量を正確に予測するための技術は非常に重要である。本研究では、燃焼器のアウタライナ/インナライナ間の希釈空気流量のバランス、及び一重壁/二重壁ライナの違いがNO<sub>x</sub>排出特性に及ぼす影響をCFDにより予測し、実験による検証を行った。その結果、CFD適用により燃焼器内部の流れやNO<sub>x</sub>排出性能の定性的な予測が可能であること、希釈空気流量をアウタライナ/インナライナ間で同程度の流量にバランスさせて二重壁ライナを適用することがNO<sub>x</sub>低減に有効であることが明らかとなった。

## 1. はじめに

世界的な環境意識の高まりを受け、航空機に対するNO<sub>x</sub>、CO、PM(Particulate Matter, 粒子状物質)といった微量生成物の排ガス規制が近年ますます厳しくなっている。こうした背景から、航空エンジンの開発においては、エンジンのコアコンポーネントであり、これら微量生成物の発生源である燃焼器のウエートが今後さらに高まる状況にある。

航空エンジン用の燃焼器開発においては、通常、既存開発品やデータをもとに要求仕様に適合する燃焼器ハードウェアを多数製作し、実験と改良設計の繰り返しを主体とした試行錯誤により性能仕様を満足させていくというプロセスを踏むため、開発には長い期間と莫大なコストがかかるのが一般的である。したがって、このプロセスを数値解析により代用できれば、燃焼器開発に関わる期間・コストを大幅に削減することが可能となる。

しかしながら、航空エンジン用燃焼器の内部流れは、液体燃料の噴霧、微粒化、旋回流を伴う乱流混合や、無数の化学反応メカニズムを含む複雑な現象より構成されるため、数値解析による再現は非常に難しく、現在でも予測精度が高いツールはほとんど存在しないのが実情である。近年、計算の調整パラメータの数が少なく、非定常乱流を模擬可能なLES(Large-Eddy Simulation)が特に注目されている。しかし、LESの噴霧燃焼場に対する微粒化モデルや乱流燃焼モデルがまだ研究段階にある上、その計算負荷が高い(多くの計算リソース、CPUを必要とする)ために、現状では実燃焼器の設計ツールとして実用化されているとは言えない<sup>(1)</sup>。したがって、現在、実用の分野では、乱流現象を平均化した定常平均場を求めるRANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)シミュレーションが主流である。RANSシミュレーションは、LESより精度は劣るものの、計算負荷が低いため、その結果の解釈次第では、設計ツールとして十分に利用可能と考えられる。

\*1 防衛・宇宙ドメイン 誘導・推進事業部 エンジン・機器技術部 主席技師 博士(工学) 技術士(機械部門)

本研究では、航空エンジン用低 NO<sub>x</sub> 燃焼器内部噴霧燃焼流れに RANS シミュレーションを適用してその有効性を検討した。特に、希釈空気流のアウタライナ/インナライナ間の流量バランスを変化させた場合、一重壁ライナと二重壁ライナの2種類の設計によりライナ冷却空気流の流出位置を変化させた場合の NO<sub>x</sub> 排出量への影響に着目し、燃焼試験データにより検証を行った。

## 2. 数値解析法

### 2.1 解析対象及び解析条件

図1に解析対象であるセクタ燃焼器(ドーナツ型のフルアニューラ燃焼器をケーキカットした 1/6 セクタ部分)及び燃焼可視化状況(1/18 セクタ燃焼器で、側壁を透明な石英ガラスとして可視化したもの)を示す。本燃焼器は低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の一形態である RQL (Rich-burn, Quick-quick, Lean-burn) 燃焼器である。図2にその概念を示す。サーマル NO<sub>x</sub> が発生しやすい高温領域(当量比が1前後)を避けるため、燃焼器は上流側の当量比が高い主燃焼領域と当量比が低い下流側の希薄燃焼領域に分かれる。両者の間にある希釈孔から大量に流入する空気により、主燃焼域で発生した高い当量比の燃焼ガス(過濃燃焼状態)は急速に希釈混合されて希薄燃焼状態に移行し、NO<sub>x</sub> の発生を抑えるものである。

図3に解析領域及び解析格子を示す。総節点数は約 23 万、総要素数は約 80 万である。流入境界は試験条件に合わせた空気流量固定条件とし、流出境界は圧力境界条件、側壁境界は周期境界条件とした。

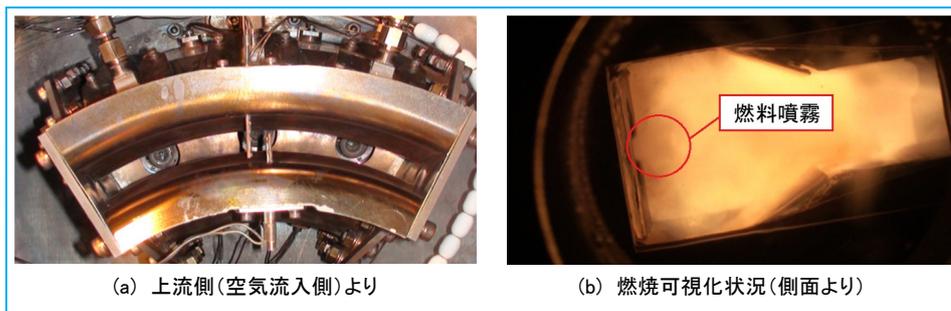


図1 セクタ燃焼器

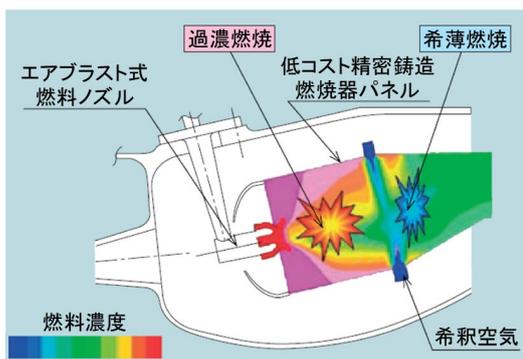


図2 RQL 燃焼器の概念図

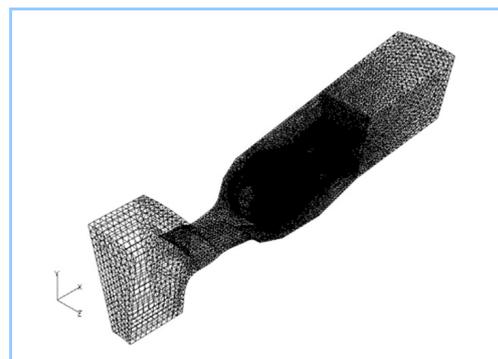


図3 解析モデルのメッシュ図

解析条件としては、規制上 NO<sub>x</sub> 発生量が最も問題となり、かつ前述のセクタ燃焼試験にてデータが得られている機体上昇時(離陸時最大負荷の約 85%相当)とした。図4に、対象とした3ケースの設計条件をまとめる。図中のDは希釈孔の直径である。CASE-1 をベース条件として、CASE-2 は希釈孔総面積を一定にしつつ希釈孔サイズをアウタライナ側で拡大、インナライナ側で縮小してアウタライナ/インナライナ間の希釈空気流量のバランスを変えたもの、CASE-3 は主燃焼域のライナを一重壁から二重壁に変更することによりライナ冷却空気流の流出位置を主燃焼域の下流部に移行させたものである。なお、図4に示す燃料噴霧(燃料噴霧で示された円内)は解析結果であるが、図1の燃焼可視化写真中に示す噴霧状況(燃料噴霧で示された円内)に近い様相を呈していることがわかる。

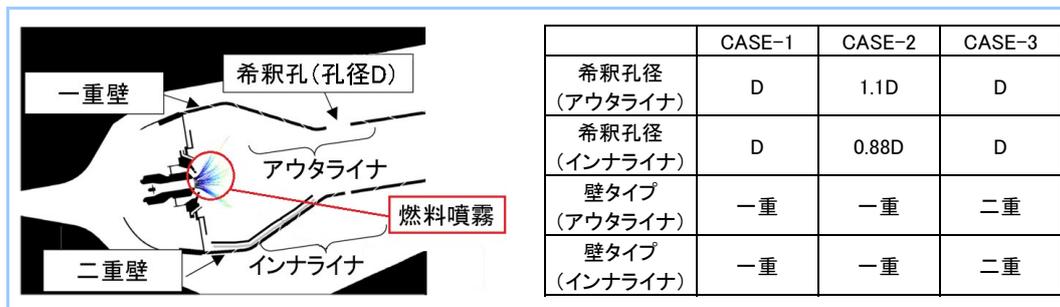
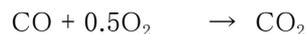


図4 解析条件

## 2.2 解析手法

解析コードは STAR-CD ver.3.26 を使用した。以下に適用した解析手法の概要をまとめる。

- ・燃料 :ドデカン C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> (JET-A 燃料模擬)
- ・燃焼形態 :拡散反応系
- ・燃焼モデル :Eddy Breakup モデル
- ・液滴粒径分布 :Rosin-Rammler 分布仮定
- ・液滴分裂 :Reitz-Diwakar モデル
- ・反応式(三段総括反応)

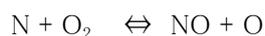
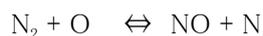


- ・対流項離散化スキーム:MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme)
- ・解析スキーム :3次元圧縮性定常流れ, RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 法
- ・乱流モデル :標準型 k-ε モデル

## 2.3 NO<sub>x</sub> モデル

NO<sub>x</sub> は、一酸化窒素 (NO) のみを取り扱う。燃焼において発生する NO は、燃焼用空気中の N<sub>2</sub>を直接の生成源とする thermal NO と燃料中のN成分を生成源とする fuel NO に大別される。

また, thermal NO は、拡大 Zeldovich 機構



に従う Zeldovich NO と、空気中の N<sub>2</sub>と燃料中の炭化水素とが反応して生じる HCN, CN 等を生成源とする prompt NO からなるが、本燃焼器においてはNO生成の傾向を見るため、前者のみを考慮した。Zeldovich NO の生成量はN成分についての準定常近似及び Baulch ら<sup>(2)</sup>の反応速度定数値を用いて評価した。

NO 濃度は他の燃焼生成物に比較して小さく、かつ反応の時間スケールが炭化水素燃焼の時間スケールよりも大きいため、噴霧燃焼流れ場にほとんど影響を与えることはない。そこで、噴霧燃焼流れ場の定常計算が終了した後に NO 計算を実施した。すなわち、定常状態における各化学種の濃度からNOの生成速度を求め、各セル内単位時間におけるNOの生成・消失・移流のバランス(定常状態)を解いてNO濃度分布を求めている。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 燃焼器内における噴霧燃焼場の特徴

まず、ベース条件である CASE-1 を代表例として挙げ、今回対象とした噴霧燃焼場の特徴を示す。

図5に本数値解析により得られた絶対速度ベクトルの分布を示す。図中には、流れの傾向がわかりやすいように黒い実線矢印を追記するとともに、特徴的な部分をA~Dで示した。図より、絶

対速度は希釈孔以降の希薄燃焼領域(D部)において最も高い値を示すこと、また、この領域において、希釈孔からの流入空気はインナライナ側とアウトライナ側の大希釈孔が千鳥配置であることにより急速に混合することがわかる。また、絶対速度は燃料ノズル近傍の燃料噴霧直後においても高い値を示すが、旋回流を形成して広がりながら急速に減衰する。さらに、主燃焼域において、燃料ノズル下流の中央部(A部)、及び上流のライナ壁面近傍(B部)においては保炎に寄与する循環流が形成されており、下流の希薄燃焼域へ通じる主流は、ライナ壁面に沿った部分(C部)であることがわかる。

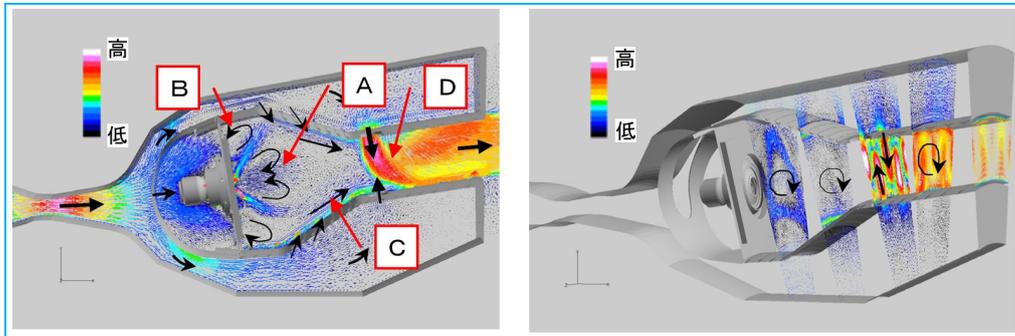


図5 速度図(CASE-1)

図6～9に本数値解析により得られた燃焼器内部の燃料の質量分率、酸素の質量分率、温度、及び NO<sub>x</sub>(NO)の質量分率の断面分布をそれぞれ示す。図8のA～D部は図5と同じ位置である。図より、燃料噴霧コーン周辺、及び循環領域である主燃焼域の中央部(A部)において、燃料過多(当量比>1)により酸素がほとんど存在せず、温度が周囲より低いため NO<sub>x</sub> 発生が抑えられるという、RQL 燃焼器の典型的な特徴を示していることがわかる。また、主燃焼域における高温領域は、燃料濃度が低い上流側壁面付近の循環領域(B部)と、燃料濃度が高い中央部からの流れがライナを冷却した空気流と混合する領域(C部)に限られており、NO<sub>x</sub> 濃度も概ねこれらの温度分布に沿った分布を呈していることがわかる。

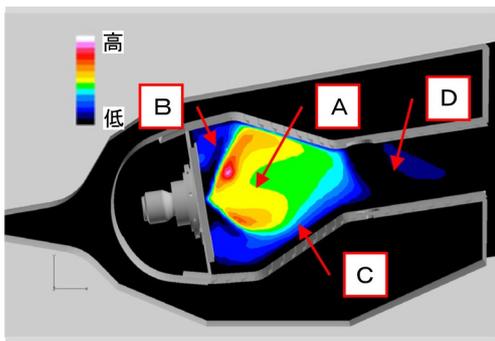


図6 燃料濃度分布(CASE-1)

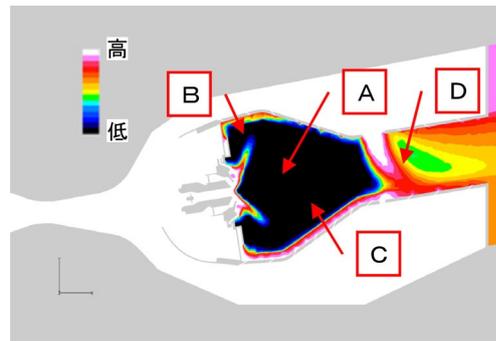


図7 O<sub>2</sub>濃度分布(CASE-1)

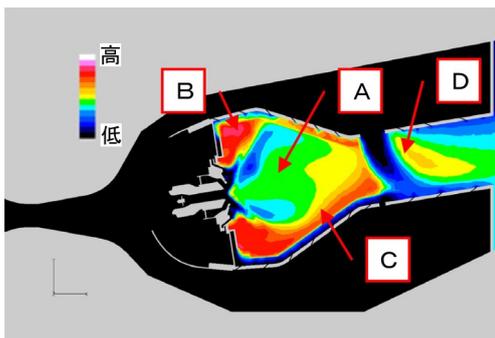


図8 温度分布(CASE-1)

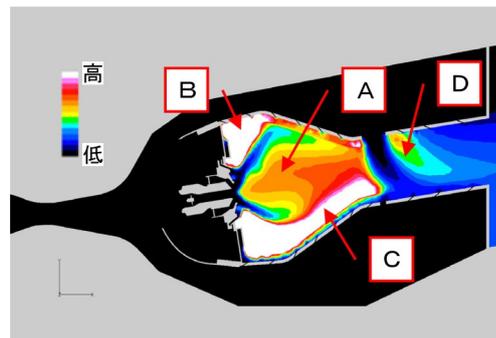


図9 NO<sub>x</sub>濃度分布(CASE-1)

燃焼器上流で発生した NO<sub>x</sub> は下流に運ばれるとともに希釈孔からの空気流入により希釈される。この希釈孔の直下流(D部)においては、局所的に当量比が1付近となり高温となるために一時的に NO<sub>x</sub> 濃度が増えるが、その後空気との混合が進み、希釈されるとともに温度が下がることで NO<sub>x</sub> 濃度も下がり最終的に燃焼器出口に至る。これより、燃焼器出口での NO<sub>x</sub> 濃度(排出量)を低減するためには、NO<sub>x</sub> 発生部分(高温領域)を可能な限り減らすこと、特に主流部(C部)においてライナ冷却空気流と燃料過濃域の混合を極力抑える(当量比1付近の高温ガスの大量発生を回避する)ことが効果的であることが示唆される。

図 10 に燃焼器の入口から出口に至る各部の圧力を入口圧力で正規化した分布の解析値と試験値の比較を示す。図より、解析値は概ね試験値に一致することがわかる。

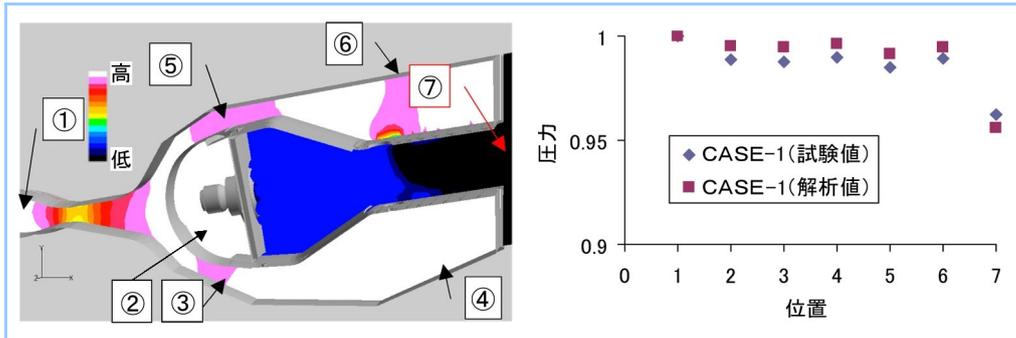


図 10 圧力分布 (CASE-1)

### 3.2 希釈空気流量配分・ライナ冷却流流出位置の影響

図 11~14 に本数値解析により得られた CASE-2 及び CASE-3 に対する燃焼器内部の温度及び NO の質量分率の断面分布をそれぞれ示す。図 8, 9 に示した CASE-1 に比較して、CASE-2 では主燃焼域の温度や NO<sub>x</sub> 分布は同等ながら、アウトライナ側希釈孔を大きくした効果により直下流の高温領域が広く、出口での NO<sub>x</sub> 濃度が増大することがわかる。これは、両ケースで希釈空気の総流量は同等であるが、アウト/インナ両側で希釈孔径が異なる CASE-2 では希薄燃焼領域での混合が全体的に不均一となり、局所的に当量比1近傍の高温燃焼領域が広がる結果、NO<sub>x</sub> 増大につながったものと考えられる。

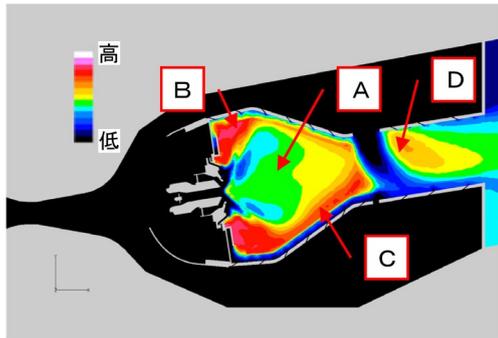


図 11 温度分布 (CASE-2)

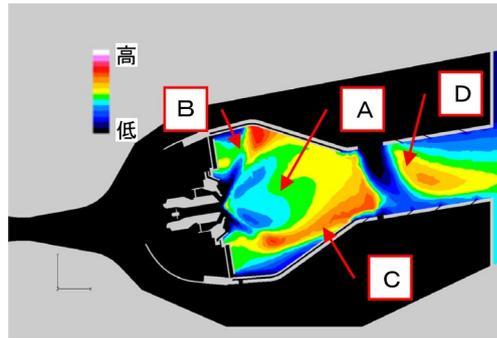


図 12 温度分布 (CASE-3)

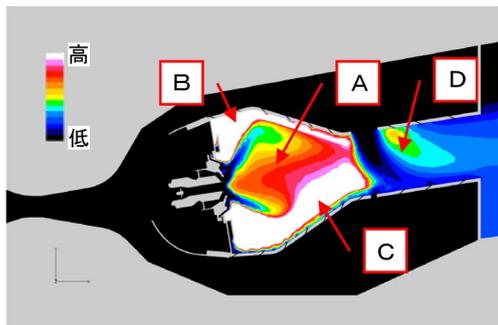


図 13 NO<sub>x</sub> 濃度分布 (CASE-2)

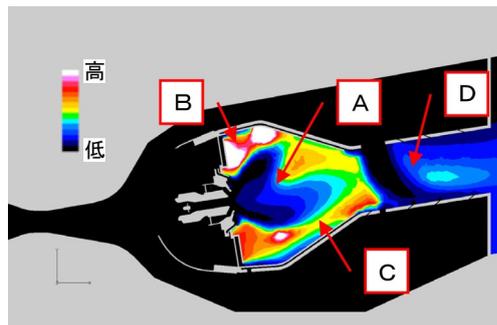


図 14 NO<sub>x</sub> 濃度分布 (CASE-3)

一方、CASE-3 においては、C部における温度が他のケースに比べて低く、主燃焼域及び燃焼器出口でのNO<sub>x</sub>濃度も低いことがわかる。これは、ライナ冷却の空気流が燃料過濃な主燃焼域と混合した結果起こる温度及びNO<sub>x</sub>濃度の上昇(CASE-1, CASE-2)がCASE-3では抑えられることに起因しており、二重壁ライナがNO低減に極めて有効であることを示している。

図15に各ケースにおける出口NO<sub>x</sub>濃度(質量分率)の解析値と試験値の比較を示す。図中では、CASE-1のNO<sub>x</sub>濃度を解析値、試験値ともにそれぞれ1とし、それからの変化割合を示す。解析値、試験値ともに、CASE-1に比べてNO<sub>x</sub>濃度はCASE-2で増大、CASE-3で減少することから、RANSシミュレーションはライナ冷却や希釈空気流量配分の影響を概ね予測できていることがわかる。しかし、定量的には、試験で得られたNO濃度は解析値の約3倍であり、定量的な予測精度を向上させるためには、NO<sub>x</sub>モデルの改良やLES等の高精度な非定常解析の適用が必要であるものと考えられる。

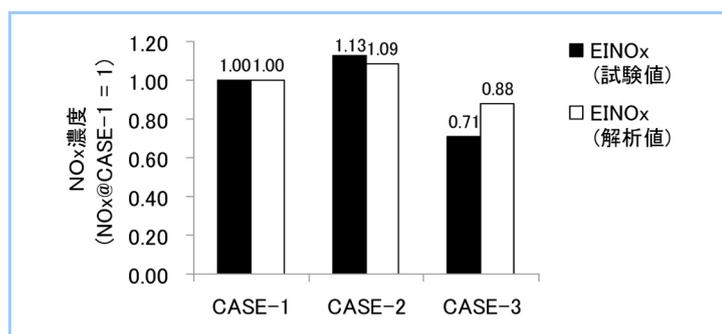


図15 NO<sub>x</sub>排出量の計算値と実験値の比較

## 4. まとめ

本研究では、燃焼器のアウタライナ/インナライナ間の希釈空気流量のバランス、及び一重壁と二重壁ライナの違いがNO<sub>x</sub>排出特性に及ぼす影響をCFDにより予測し、実験による検証を行った。その結果、CFD適用により燃焼器内部の流れやNO<sub>x</sub>排出性能の定性的な予測が可能であること、希釈空気流量をアウタライナ/インナライナ間で同程度の流量にバランスさせて二重壁ライナを適用することがNO<sub>x</sub>低減に有効であることが明らかとなった。また、RANSシミュレーション結果はセクタ燃焼試験結果と定性的には一致するものの、定量的には差異が生じることが確認できた。この理由としては、RANSシミュレーションではNO<sub>x</sub>モデルや乱流燃焼モデルの精度が不十分であることが挙げられる。今後は、LESや詳細燃焼モデル適用することで予測精度をさらに向上させていく予定である。

### 謝辞

本研究を進めるに当たっては、京都大学の小森悟教授、黒瀬良一准教授のご指導を頂いた。燃焼試験データは、JAXA 調布航空宇宙センター(東京都調布市)の高圧燃焼試験設備における試験で得られたものである。また、本研究は、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の研究助成を受けて行われた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

### 参考文献

- (1) 黒瀬良一, 赤松史光, “噴霧燃焼の実験と数値シミュレーション”, 日本燃焼学会誌, Vol.50, pp.206-214 (2008).
- (2) Baulch, D.L. et. al., “Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions”, Butterworth (1973).