

# ガスタービン燃焼器における噴霧燃焼 及び熱流動解析技術の開発

高橋 洋一\* 須山 達夫\*

## Development of Numerical Simulation on Spray Combustion in Gas Turbine Combustor

Yoichi TAKAHASHI, Tatsuo Suyama

In gas turbine system high temperature of turbine inlet is needed for higher heat efficiency improvement. On the other hand, increase of NO<sub>x</sub> amount in the exhaust gas become a problem for higher temperature of combustion gas. Mitsui E&S Holdings Co. Ltd. has combustor products for example gas turbine, and these combustor products have an important problem for high heat efficiency and reduction of pollutant emission for example NO<sub>x</sub>.

In this paper the computational fluid dynamics (CFD) on combustion is used for spray combustion test apparatus of gas turbine combustor, and it is confirmed that observation results of the temperature and O<sub>2</sub> mole fraction and NO<sub>x</sub> mole fraction at the combustion field agree with numerical results well. It is confirmed that the analysis technology of CFD on combustion is useful for understanding of combustion behaviors and effective as a tool for designs of combustor.

ガスタービンシステムでは熱効率向上を目的として、タービン入口温度の高温化が図られている。一方、燃焼ガス的高温化は排ガス中NO<sub>x</sub>量の増加をもたらす。三井E&Sホールディングスではガスタービン等の燃焼関連製品を取り扱っており、これらの製品の高効率化とNO<sub>x</sub>等の有害物質の排出低減の両立が重要な課題となっている。

本報では、ガスタービン燃焼器の噴霧燃焼試験装置を対象とした燃焼・熱流動解析を行い、燃焼場での温度、O<sub>2</sub>濃度、NO<sub>x</sub>濃度などの解析結果が実測結果と良く一致することを確認した。これらのことから本報で用いた燃焼・熱流動解析技術は、燃焼器内の状態を把握するのに有用であり、燃焼機器の設計用ツールとして有効であることを確認した。

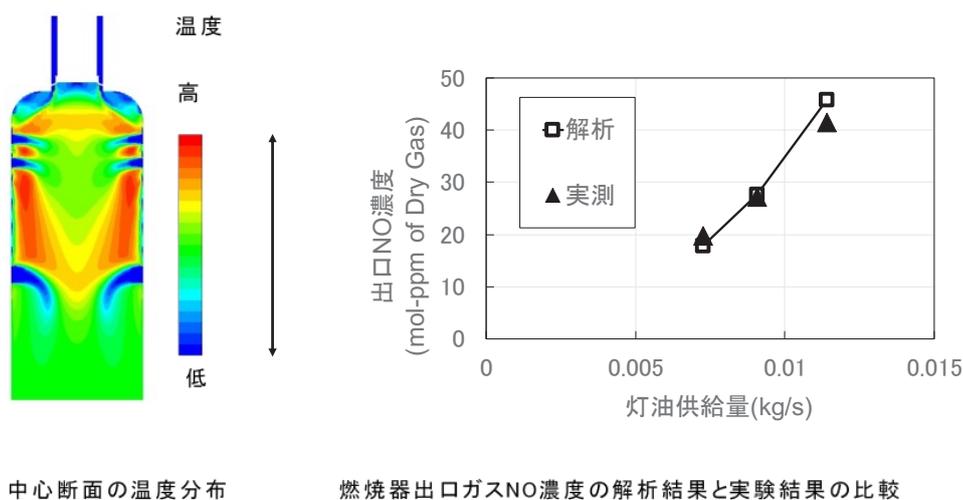


図1 ガスタービン燃焼装置の燃焼・熱流動解析結果

Results of Numerical Simulation on Spray Combustion in Gas Turbine Combustor

\*三井E&amp;Sビジネスサービス 技術開発部

## 1. はじめに

三井E&Sマシナリーでは、写真1に示すガスタービン等の燃焼関連製品を取り扱っており、これらの製品の高効率化、NO<sub>x</sub>等の有害物質の排出低減に継続的に取り組んでいる。

ガスタービンシステムは熱効率向上を目的として、タービン入口温度の高温化が図られている。一方、燃焼ガスの高温化は排ガス中NO<sub>x</sub>量の増加につながるため、燃焼器の内部現象を把握してNO<sub>x</sub>量の増加を防ぐ設計をすることが求められている。

燃焼機器の内部で起きている現象を実験で把握するためには、測定用装置（熱電対、ガス採取用プローブ等）を設置した試験装置を用いて、燃焼特性を左右するパラメータ（燃焼機器構造、燃料及び空気流量等）を変更して計測することが、必要であるが、それらを十分満たすことは難しい。一方、実測以外で装置内部の現象を推定する手段としては数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）が有効である。本報ではCFDに液体燃料の噴霧モデルと燃焼反応モデルを加えた燃焼・熱流動解析を行った。この解析法では、燃焼機器の構造、燃料、空気流量などの運転条件が容易に設定可能となる上に、燃焼機器内部の物理量の分布について、視覚的な表示及び数値として抽出が可能であり、それらの結果を用いて内部現象の理解が容易となる。このため燃焼機器の設計の改良に有効な手法と言える。

本報では、灯油を燃料とするガスタービン燃焼器を模擬した試験装置について、熱流動解析ソフトANSYS Fluent18.2を用いて燃焼・熱流動解析を行った結果を紹介する。また、この試験装置を用いた燃焼試験では、熱電対、ガスサンプリングプローブを用いた燃焼試験装置内の温度、各ガス濃度の測定を行っている<sup>1)2)</sup>。そこで、計測結果と解析結果の比較を行い燃焼流動解析の有効性を検証した。



写真1 SB5Nガスタービン外観写真  
General View of SB5N Gas Turbine

## 2. ガスタービン燃焼試験装置および解析概要

### 2.1 ガスタービン燃焼試験装置

実験に用いたガスタービン燃焼試験装置を図2に示す。燃焼用空気（以下、スワラ空気）は羽根角45°のスワラを通して流入する。二次空気は噴霧ノズルから $x/D=0.37, 0.55$  (D:燃焼試験装置内径220mm)の位置に壁面に周方向60°ごとに開けられた直径15.6mmの二次空気孔から流入する。さらに $x/D=1.40$ の位置には周方向30°ごとに開けられた大小二種類の希釈空気孔から希釈空気が流入する構造になっている。希釈空気孔は直径30mmの大孔が90°ごとに4ヶ所配置され、それ以外は12mmの小孔が配置されている。壁面には燃焼試験装置長さ方向に8ヶ所、冷却空気を入れる機構を設けている。燃料微粒化用ノズルにはデラバン社製の噴霧ノズルを用いた。なお、試験装置は、大気圧で運転した。図2中のA～D及び0°、15°の面では燃焼試験において温度、ガスサンプリング計測を行っている。

### 2.2 解析の概要

図3に本解析に用いた計算格子の例を示す。解析領域はスワラ空気入口から、燃焼試験装置出口までとされている。

本報の解析では以下の5項目の現象を扱っている。

#### ① 流れ場

流れ場は乱流として扱い、化学組成、温度、圧力による密度変化を考慮した。

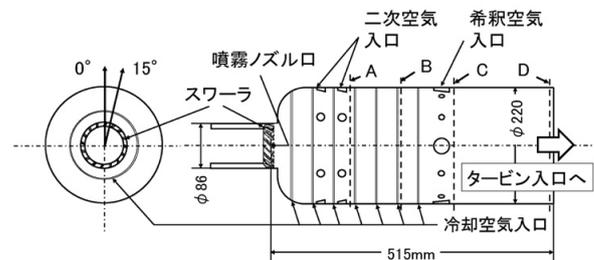


図2 噴霧式ガスタービン燃焼試験装置  
Experimental Apparatus of Gas Turbine Combustor for  
Spray Combustion

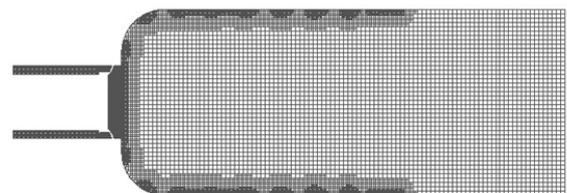


図3 計算格子の例  
Computational Grid Sample

## ② 噴霧液滴の挙動

ノズルから射出された粒子について、ラグランジュ法を用いて飛跡、液滴温度、蒸発を計算した。飛跡計算の際には周囲気流の乱流条件が液滴運動に与える影響を考慮した。

## ③ 温度

炉内の熱移動では、熱伝導、対流伝熱、ふく射伝熱を考慮した。燃焼試験装置外への伝熱については、熱伝導、対流伝熱を考慮した。

## ④ 燃焼反応

燃焼については、燃料液滴から蒸発した燃料蒸気と空気による気相反応を考慮した。

⑤ NO<sub>x</sub>計算

NO<sub>x</sub>の計算については用いたANSYS Fluent18.2に搭載された、NO<sub>x</sub>モデル機能を用いた。その機能では①～④の計算終了後、得られた温度、化学組成分布を用いた後処理によって計算が行われた。

## 3. ガスタービン燃焼試験装置

本報のガスタービン燃焼試験装置の燃焼・熱流動解析では、まず炉内の流れ場、液滴噴霧の挙動、伝熱、ガス燃焼反応を計算し、その計算結果を用いてNO<sub>x</sub>計算を行っている。使用したモデルの内容について以下に述べる。

## 3.1 乱流モデル

本報で使用した乱流モデルは、ガスタービン燃焼試験装置内のスワラによる旋回流の影響が大きくなることを考慮して、旋回流に適用可能なRealizable k-εモデルを用いた。

## 3.2 液滴噴霧モデル

噴霧液滴の運動についてはラグランジュ法により解析した。ノズル噴霧口から射出された粒子について運動方程式から飛跡を、伝熱式から粒子（液滴）温度を計算した。粒子は液滴の蒸発を設定してあり、これら伝熱式から解いた粒子温度が特定の温度（蒸発温度、沸点とは異なる数値）以上となったとき、液滴粒子の蒸発が始まる。壁面での境界条件として、液滴粒子が壁面に衝突したときにはその場所で、液滴が蒸発する設定としている。図4に本報の解析で用いた液滴噴霧条件のモデル図を示す。噴霧口からの噴霧パターンとしては粒子径がRosin-Rammler分布<sup>3)</sup>を持ち、リング状に広がるHollow-Coneモデルを採用した。噴霧液滴の分布はコールド試験で燃料である灯油をトラップ採取した測定結果をもとに設定した。測定結果より噴霧角度50°、平均粒径150 μmの粒度分布が得られ、その設定値によりHollow-Cone型噴霧モデルで解析することができた。

## 3.3 伝熱モデル

本報の燃焼・熱流動解析では熱移動として、熱伝導、対流伝熱、ふく射伝熱を考慮した。

燃焼試験装置の壁面における外部の放熱に関しては熱伝

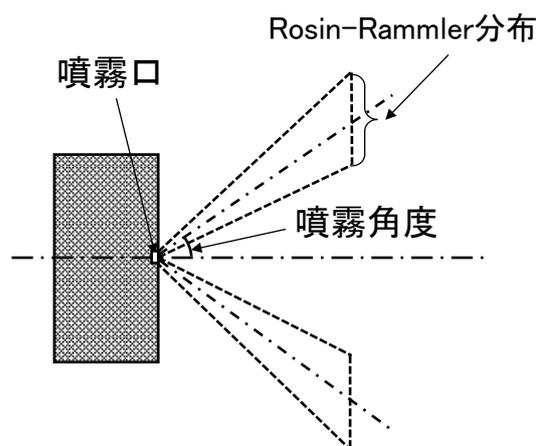


図4 Hollow-Cone型噴霧モデル図  
Modeling of Hollow-Cone Spray Pattern

達境界面を採用した。すなわち、壁面の厚さと熱伝導率、燃焼試験装置外部の熱伝達率と外部温度を設定して放熱量を計算した。

噴霧液滴への伝熱については3.2で述べた気体側からの対流伝熱とふく射伝熱を考慮した。これらによる伝熱によって液滴は加熱され特定の温度以上になると蒸発が始まる。

燃焼場においては、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>O等のガスによる吸収、放射があり、これらによるふく射熱移動も加味して解析した。本解析では、壁面とガス間、液滴粒子とガス間のふく射熱移動に関する輸送方程式をモデル化するDO (Discrete Ordinates) モデルを用い、ふく射エネルギー移動を考慮したエネルギー保存式と連立させて解いた。

## 3.4 ガス燃焼反応モデル

本報のガスタービン燃焼試験装置の解析では、液体燃料である灯油は燃焼用空気に直接噴霧される。微粒子化した灯油は3.2で述べた噴霧液滴モデルの計算により蒸発し、気相へ移動したものが燃焼用空気と反応する気相反応を設定している。

乱流場における燃焼反応を計算するモデルに渦消散モデルがある。ただし、このモデルでは燃料と空気が混合したセルにおいて瞬時に反応が起きる（反応速度が無限大となる）設定となっている<sup>4)</sup>。本報の解析ではより実際に近い有限の反応速度をもったモデルを用いるため、Flamelet approachを採用した。このモデルでは燃料、空気（O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>）のほかに多数のラジカル（O、OHなど）を含んだ化学組成を取り扱う。それらの素反応式をもとに、化学組成の組成分率とそれに対応するスカラー量（質量分率、密度、温度など）の確率密度関数（Probability density function: PDF）を計算し、これを流動、伝熱の式と連立させて解いた。

本報の解析で用いた素反応式は、Hu Wangらによって報告されているn-ドデカンの燃焼式である<sup>5)</sup>。この式は100種類の化学組成と432種類の素反応式から成るものである。

### 3.5 NOxモデル

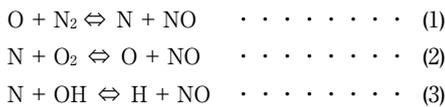
NOx解析は2.2で述べたように流れ、伝熱、燃焼の解析が終了した後に得られた結果をもとにANSYS Fluent18.2の持つ機能による後処理計算として求めた。

NOxの生成機構にはサーマルNOx、フューエルNOx、プロンプトNOxがある。本報の燃焼試験装置による試験では燃料に灯油を用いている。そのため、燃料中に含まれる窒素分 (Fuel Bound Nitrogen : FBN) はほとんど0wt%と見なせるので、本報の解析ではフューエルNOx生成は取り扱わなかった。以降にサーマルNOx、プロンプトNOxの生成メカニズムと計算式について記載する。

なお、これまでの文中でNOxと記載しているがANSYS Fluent18.2のNOxモデルで計算されるのはNOのみである。燃焼反応のような高温中で生成するNOxはNOがほとんどであるため、NOの生成挙動がすなわちNOx生成挙動と見なせるので以降はNOについてのみ記載する。

#### 3.5.1 サーマルNO

サーマルNOの生成メカニズムは以下の3つの反応式からなる拡大Zeldovichメカニズムを用いた。



ここで以下の反応速度定数を定義する。

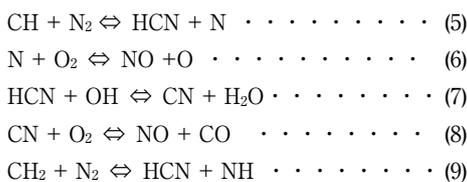
$k_{n1}$ ,  $k_{n2}$ ,  $k_{n3}$  : 式(1), (2), (3)の各NO生成反応速度定数  
 $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$ ,  $k_{r3}$  : 式(1), (2), (3)の各NO解離反応速度定数  
 式(1)~(3)が準定常状態として仮定するとNOの生成速度式は以下のように解かれる。

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{f1}[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r1}k_{f2}[\text{NO}]^2}{k_{f2}[\text{N}_2]k_{f2}[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r1}[\text{NO}]}{k_{f2}[\text{O}_2]} + k_{f3}[\text{OH}]\right)} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)の[NO], [O], [N<sub>2</sub>], [O<sub>2</sub>], [OH]は各化学組成のモル濃度(mol/m<sup>3</sup>)である。この式(4)を解くためには[O]と[OH]の濃度が必要となるが、3.4で述べた素反応式中に[O]と[OH]の濃度が用いられているのでその数値を用いて解いた。

#### 3.5.2 プロンプトNO

炭化水素を燃料とする場合、空気に対し燃料が過剰(当量比が1以上)な条件では炭化水素とN<sub>2</sub>が反応してHCNを生成し、NOの生成源となる。その反応式は以下のとおりである。



詳細な反応は上記の5式であるが、それを基に式(10)のような経験則的なプロンプトNO生成速度式が求められている(DeSoeteメカニズム<sup>6)</sup>)。

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = f k'_{pr} [\text{O}_2]^a [\text{N}_2] [\text{Fuel}] e^{-E_a/RT} \dots \dots \dots (10)$$

$$f = 4.75 + 0.0189n - 23.2\psi + 32\psi^2 - 12.2\psi^3 \dots \dots \dots (11)$$

[fuel] : 燃料濃度, ここではn-C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>濃度(mol/m<sup>3</sup>)  
 a : 酸素の反応次数 (酸素濃度により異なる数値を用いる)  
 k' <sub>pr</sub> : 頻度因子(m<sup>3</sup>/mol·s)  
 n : 燃料種 (ここではn-C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>) 中の炭素数で12  
 ψ : 空気過剰率 (実際の空燃比/理論空燃比, 本報の条件では計算適応範囲を下回るため適用範囲最低値の0.75を用いた)

3.5.1のサーマルNOの計算ではANSYS Fluent18.2のNOxモデルの反応速度定数はデフォルトの値を用いて、適切と思われる数値が得られたが、プロンプトNOでは想定よりもかなり小さな数値しか得られなかった。式(10)を用いたプロンプトNOの推算は、燃料種や温度範囲によって異なった係数が提案されており、用いる係数によって実測値と桁で異なる場合があることが報告されている<sup>7)</sup>。そのため、今回の解析では燃焼試験装置による実測結果に対して適切となる頻度因子を見直す必要がある。本報では、この値を実験結果に基づきk' <sub>pr</sub>=1.60×10<sup>9</sup>(m<sup>3</sup>/mol·s)とした。

## 4. 燃焼試験

ガスタービン燃焼試験装置を用いた燃焼試験では、空気流量を0.525kg/s (1464.9Nm<sup>3</sup>/h) で一定とした。装置の運転では燃焼試験装置内圧を大気圧に、燃焼用空気温度を210℃に設定した。燃料は灯油を用い、その供給量は0.0114, 0.00908, 0.00725kg/sの3条件とした。それら燃料供給流量と全空気、スワラ空気、2次空気、希釈空気、冷却空気各流量に対応する空気過剰率を表1に示す。

この実験では熱電対とガスサンプリングプローブを燃焼試験装置内に入れ、各所の温度と、各ガス濃度を調べた。図2に示したサンプリング箇所A~Dは、燃焼試験装置長さ方向で以下のとおりの関係である。

- A : 2次空気入口直下 (x/D=0.618)
- B : 2次空気入口と希釈空気入口の間 (x/D=0.977)
- C : 希釈空気入口(大)直下 (x/D=1.50)
- D : 燃焼装置出口直前 (x/D=2.30)

2.1で述べたとおり、A~Dの平面上の円周方向の2点でサンプリングを行った。2次空気入口孔と希釈空気入口大孔の中心が重なる箇所を0°とする箇所と、そこからスワラの旋回方向へ15°移動させた箇所の2点である。これらについては図2に記載されているものである。これら4箇所の平面の二つの角

度について、それぞれ平面中心から半径方向に9ヶ所の温度計測、ガスサンプリングを行った。計測結果については、後述の5.で解析結果との比較として掲載する。

5. 解析結果及び実験結果との比較

解析結果の一例として表1における条件1の解析結果として、図5に燃料である灯油（本解析ではC<sub>12</sub>H<sub>26</sub>で代替）の噴霧軌跡図を、図6(a)~(d)に燃焼装置長さ方向断面中心におけるガス速度ベクトル、温度、O<sub>2</sub>濃度、NO濃度を示す。

5.1 噴霧粒子の軌跡

図5に液体燃料を噴霧したときの粒子の軌跡を示す。図5では粒子径を色で区別している。図に示されるように噴霧直後の壁面付近で液体燃料の蒸発が多く見られる。後述する温度分布などでも壁面付近の温度が高くなっており、壁面付近で蒸発した液体燃料による燃焼が起きていると考えられ、図5の粒子軌跡の傾向は、それに沿った計算結果となっている。

5.2 各解析結果

表1における条件1の解析結果について、図6に燃焼試験装置中心断面(0°)における速度ベクトル、温度、O<sub>2</sub>濃度、NO濃度を示す。

表1 各灯油流量と空気過剰率

Flow Rate of Kerosene and Excess Air Ratio

		条件1	条件2	条件3
灯油流量(kg/s)		0.0114	0.00908	0.00725
空気過剰率	全空気	3.18	4.00	5.01
	スワラ空気	0.291	0.365	0.458
	2次空気	0.822	1.03	1.29
	希釈空気	1.32	1.66	2.08
	冷却空気	0.749	0.942	1.18

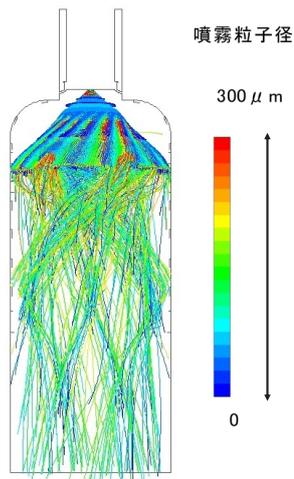


図5 液体燃料噴霧粒子の軌跡  
Particle Track of Liquid Fuel Droplets

濃度を示す。図6(a)ではスワラ空気入口から2次空気入口までは軸方向（燃焼試験装置長さ方向）の渦が弱いながらも見られる。2次空気入口付近では、そこから入った空気は直進せず、円周方向の旋回流れが形成されている。2次空気入口と希釈空気入口の中間以降では燃焼試験装置中心部の軸方向流れが強くなっている。

図6(b), (c)では燃焼試験装置上部において噴霧された燃料の燃焼による温度上昇が見られるが、表1にあるようにこの部分は空気量が理論空気量よりも低いため、O<sub>2</sub>濃度は非常に低く、酸素が欠乏している状態である。2次空気入口以降では空気が供給されるため燃焼が促進され、燃焼試験装置内で内温度が高くなり試験装置内最高温度になっている。燃焼試験装置内では中心よりも壁面での温度が高くなっており、図5の燃料液滴の噴霧状況との対応がとれる。図6(d)ではNOの

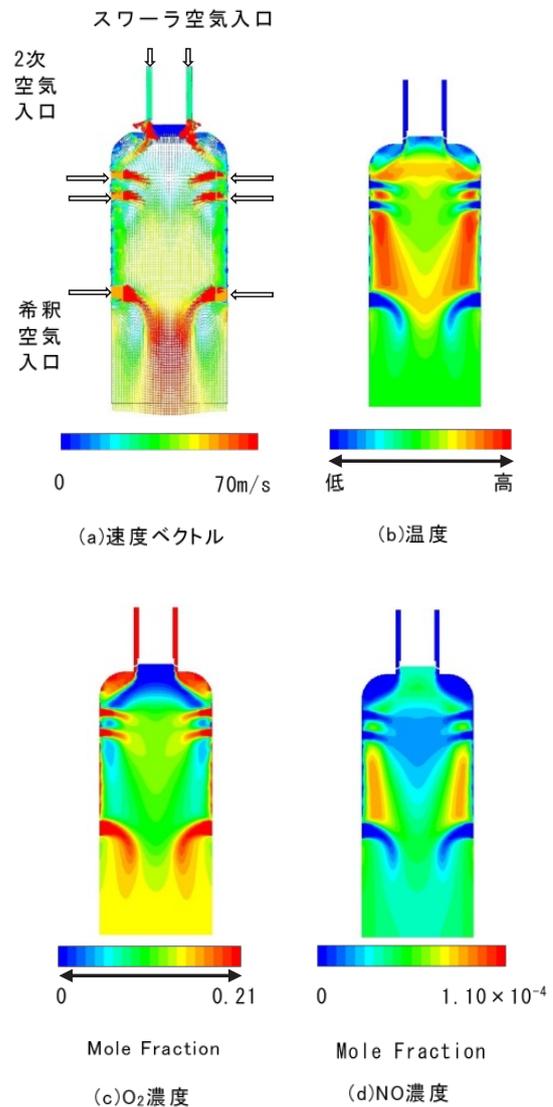


図6 解析結果  
Numerical Simulation Results

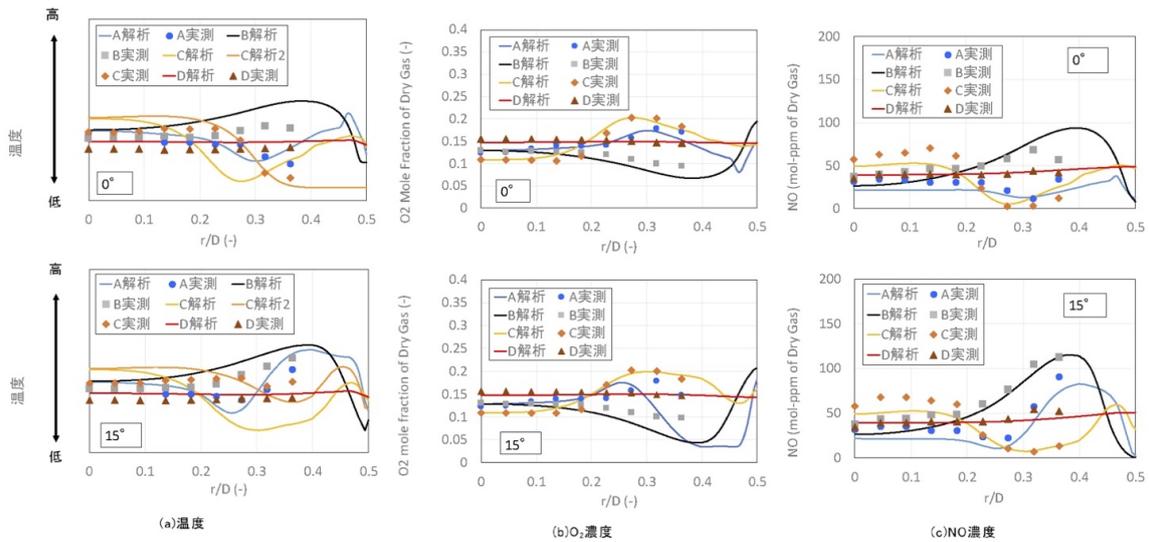


図7 解析結果と実測結果の比較

Comparison of Numerical Simulation with Experiments

濃度は図6(b)の温度の高い部分でNOの濃度が高くなっており、温度によるNO生成の状況を再現できている。

5.3 解析結果と実測値の比較

表1における条件1の解析結果と実測結果の比較を図7(a)～(c)に示す。実測箇所は4.に示したように燃焼試験装置長さ方向A～Dの4点、A～Dの各平面上で円周方向に2点の角度とした。

図7(a)の温度ではA, B, D面の両方の角度では解析結果と実測結果は、解析結果がおおむね100～200℃高い傾向にあるが、燃焼試験装置半径方向の分布は同様の挙動を示している。ただし、C面については実測値と解析結果の傾向は若干異なっている。そこで、C面より少し上流側 (X/D=1.41) の温度を確認 (図7(a)中のC解析2) したところ、実測結果と同じ傾向の解析結果が得られた。

図7(b)のO<sub>2</sub>濃度、(c)のNO濃度についてはA～D面、0, 15°の両方の角度で解析結果と実測結果が同じ傾向を示している。これらのことから本報で用いた解析によって燃焼試験装置内の現象を予測できていることが分かる。

NOの解析では3種類の灯油供給量 (表1条件1～3) における燃焼試験装置出口のNO濃度を求め、それを実測値と比較した。その結果は図1の右に掲載したものである。解析結果はいずれも実測結果と良く一致しており、本報で用いた解析方法により高い精度の予測が可能である。

6. おわりに

ガスタービン燃焼試験装置の液体燃料噴霧燃焼について、旋回乱流、液滴噴霧、伝熱 (熱伝導, 対流伝熱, ふく射伝熱)、多数の素反応式によるガス燃焼反応、NO<sub>x</sub>計算等を組み合わせた燃焼・熱流動解析手法を用いることにより、実測値に近い解析結果を得ることができた。

本報で開発した燃焼・熱流動解析技術を三井E&Sマシナ

リーおよびグループ全体の燃焼関連機器製品へ適用し、燃焼機器設計ツールとして活用できるように発展させていく。さらに、解析だけではなく本報で行ったような燃焼機器実機のデータとの比較を通じて、燃焼・熱流動解析技術の精度を高めていく予定である。

参考文献

- 1)古畑：噴霧燃焼プロセスの解析モデルとその応用に関する研究，東北大学大学院工学研究科博士論文(1994)
- 2)古畑,外：噴霧燃焼シミュレーションによるガスタービン燃焼特性の予測，日本エネルギー学会誌，73(1994)，p.120
- 3)化学工学便覧改訂七版：化学工学学会編，丸善(2011)，p.178
- 4)須山,外：三井リサイクリング21(R21)の燃焼熱流動シミュレーション，三井造船技報，184(2005-2)，p.32
- 5)H. Wang, et al. : Development of a reduced n-dodecane-PAH mechanism and its application for n-dodecane soot predictions, Fuel, 136(2014), p.25
- 6)G.G.De Soete : Overall reaction rates of NO and N2 formation from fuel nitrogen, Symposium (International) on Combustion, 15(1975), p.1093
- 7) Ph. Meunier, et al: The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames, Fuel, Vol.77, No.15(1998), p.1705

[問い合わせ先]

株式会社三井E&Sビジネスサービス 技術開発部  
TEL 0863-23-3021 高橋 洋一

本報は、2020年2月28日に以下のホームページに公開しました。

<https://www.mes.co.jp/solution/research/>