

# 低カロリー燃料燃焼ガスタービン燃焼器の数値解析

## Numerical Simulation of Gas Turbine Combustors Burning Low-Calorific Fuel

RIECHELMANN Dirk 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 工学博士  
 藤 森 俊 郎 エネルギー・プラント事業本部電力事業部開発部 課長 工学博士  
 藤 原 弘 新潟原動機株式会社技術センター マネージャー 技術士（機械部門）  
 小 山 正 道 新潟原動機株式会社技術センター

燃焼数値解析は十分に実現象を再現でき、かつ計算時間が短ければガスタービンなどの開発や改善に大いに役立つ。渦崩壊モデルは燃焼モデルとして広く使われるが、詳細な燃焼反応を考慮できない。そこで、確率密度関数を用いた手法を利用して低カロリー燃料の燃焼解析を実施し、渦崩壊モデルで得られた結果と比較した。この結果、燃焼モデルによって流れ場、温度分布に大きな差異が現れることが分かった。さらに、実験結果と比較した結果、確率密度関数を用いた手法はより実験結果に近いことが分かった。

Development and improvement of gas turbines can be significantly improved by CFD (Computational Fluid Dynamics), provided that the computational models are reliable and efforts regarding time and memory are reasonable. The eddy-break-up model has widely been used up to now as the combustion model. PDF (Probability Density Function) methods are believed to be superior because detailed chemistry can be considered and, consequently, intermediate species concentrations are included. In this paper, the ability of the models to reproduce combustion of low-calorific fuels is investigated. Both models predict quite different velocity fields and temperature distributions. By comparison with experiment, the PDF method is shown to give better predictions for the combustor simulated here.

### 1. 緒 言

CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) は解析結果が十分に信頼でき、かつ計算時間が短ければガスタービンなどの開発や改善に大いに役立つ手法である。CFDで用いられる燃焼モデルとしては、EBU (Eddy Break Up: 渦崩壊) モデル<sup>(1)</sup> が広く使われており、工業的な燃焼解析でも適切な結果が得られる場合がある。しかし、近年の環境規制強化や、従来使われてこなかったバイオマスなどの低カロリー燃料が使用されるようになると、EBU モデルを用いて燃焼解析を行うことに疑問が生じてくる。排気ガスの再循環がある場合や、低カロリー燃料を使用した場合には、EBU モデルの「燃料と酸化剤が混合されれば燃焼は一瞬で進行する」という仮定が成立しなくなるからである。

一方、PDF (Probability Density Function: 確率密度関数) モデルを用いた手法<sup>(2)</sup> は、詳細な化学反応を考慮できるにもかかわらず、計算時間が EBU モデルとほとんど変わらないというメリットをもつ。PDF 手法を用いた燃焼解析に関する研究は数多く実施されているが、仮定した PDF (Presumed PDF: PPDF) を用いる手法と、輸送方

式を解くことによって求めた PDF (Transport PDF: TPDF) を用いる手法に分けることができる。前者の PPDF 手法は後者の TPDF 手法と異なり、化学種保存式中の非線形性の強い反応率を計算する必要がない。このため、仮定した PPDF 手法は計算の安定性が高く、収束性が良いため計算時間の短縮が図れるという特徴がある。

噴流火炎における PDF 手法の妥当性は数多くの研究者によって調べられている<sup>(3)~(5)</sup> が、ここではガスタービンなどで用いられる強い旋回流場における燃焼数値解析を取り上げる。解析精度には乱流モデルおよび燃焼モデルが大きな影響を与えるが、ここでは燃焼モデルに注目して述べる。

### 2. 解析方法

強い旋回流場の解析はレイノルズ応力モデルを用いるのが一般的になりつつある。しかし、燃焼が含まれる流れ場においては、条件によって標準  $k-\varepsilon$  モデルを用いても、物理現象を精度良く再現できるといわれている。このため、ここでは乱流モデルは  $k-\varepsilon$  モデルを用い、燃焼モデルの影響について議論を進める。

精度良い解析結果を得るには、標準  $k-\varepsilon$  モデルのモデル

係数を修正する必要がある。Janicka and Peters<sup>(3)</sup> は混合率 (= 無次元化した化学種濃度: 後述の(5)式を参照) のプラントル数を 0.75, または, 0.6 とすることが適当であるとしているが, リーヒェルマンと藤森<sup>(6)</sup> は, 静空気への二酸化炭素噴流拡散実験結果から, 標準値の 0.5 を用いたほうが適当であるとしている。

燃焼モデルは EBU モデルと PPDF 手法の二つを比較する。確率密度関数の関数形は結果に大きな影響を与えるため<sup>(5)</sup>, 解析結果とともに用いた PDF 手法を明確にしておく必要がある。以下では EBU モデルと PDF 手法で用いる反応モデルについて述べる。

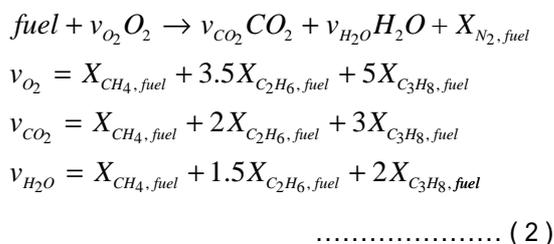
### 2.1 EBU モデル

ここでは標準 EBU モデルを用いる。反応率は(1)式に従って算出する。

$$\tilde{R} = A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ \frac{Y_{fuel}}{W_{fuel}}, \frac{Y_{O_2}}{v_{O_2} W_{O_2}}, B \frac{Y_{CO_2} + Y_{H_2O}}{v_{CO_2} W_{CO_2} + v_{H_2O} W_{H_2O}} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

- R : 平均反応率
- A : モデル係数 (= 4.0 )
- B : モデル係数 (= 0.5 )
- ρ : 密度
- ε : 乱流エネルギーの散逸率
- k : 乱流エネルギー
- Y<sub>i</sub> : 化学種 i の質量分率
- W<sub>i</sub> : 化学種 i の分子量
- v<sub>i</sub> : 化学種 i の化学量論係数

燃料には低カロリー燃料を模擬した都市ガスと二酸化炭素の混合気を用いた。EBU モデルでは(2)式で定義した総括反応を用いる。



X<sub>i, fuel</sub> : 燃料に含まれている化学種 i のモル分率

解析を実施する際, 人工的に燃料と定義した化学種を用いる。燃料の分子量は実際の組成から計算する。反応流体

を解析する場合, 大きな温度変化を伴う化学種熱容量の変化を考慮しなければならない。第 1 図に化学種の温度による熱容量の変化を示し, 都市ガスを二酸化炭素と 1 : 0.4 の割合 (体積比) で混合した燃料, 酸素および二酸化炭素などの比熱を示す。

### 2.2 火炎片モデル

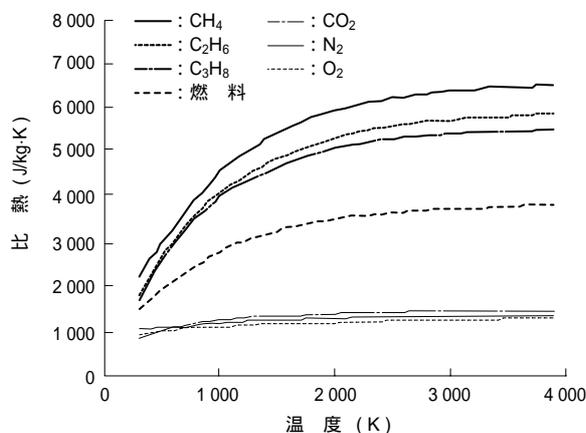
ここで対象とするガスタービン燃焼器内の流れ場は乱流であり, その中に存在する火炎はある厚みをもって存在しているように見える。しかし, 流れの変化に比べて化学反応速度は十分速いため, 反応帯は薄い面とみなすことができる。乱流場の直接火炎を観察すると厚みをもって見えるのは, 薄い火炎面が時間によって変動するためである。そこで, 乱流火炎が幾つかの小さい平らな火炎片から構成されるとみなして燃焼解析を行うモデルが定常火炎片モデル<sup>(7)</sup> (Steady Laminar Flamelet Model : SLFM) である。PDF を用いた燃焼解析手法では, まず, この定常火炎片モデルを用いて混合率の平均および分散に対する微分方程式<sup>(2), (7)</sup> を解く。

PDF は火炎片が乱流によって影響される度合を統計的に評価する手法である<sup>(8)</sup>。ここでは(3)式によって定義した β 関数を PPDF 手法として用いた。

$$P_\beta(f; a, b) = \frac{f^{a-1}(1-f)^{b-1}}{\int_0^1 f^{a-1}(1-f)^{b-1} df} \dots\dots\dots (3)$$

- f : 混合率
- a, b : パラメタ

パラメタ a, b は混合率の平均と分散から決定する。火炎中の温度などの物性は, (4)式で示される流れ場のひずみによって変化するので, 混合率だけではなく, ひずみ速度も燃焼状態を決めるパラメタとなる。



第 1 図 化学種の温度による熱容量の変化  
Fig. 1 Change of heat capacity of chemical species with temperature

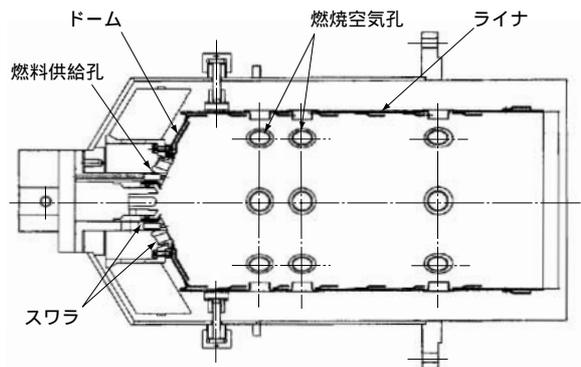
$$S = \sum_{i=1 \sim 3} \sum_{j=1 \sim 3} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \dots\dots\dots (4)$$

乱流によるひずみ速度の変動はしばしば対数関数を用いて表現されるが、ここではパラメタの数とともに計算時間を短縮するため Dirac の  $\delta$  関数を用いた。

燃料・空気が十分に存在しても、その場でのひずみ速度が臨界ひずみ速度を超えると火炎は消失する。したがって、局所ひずみ速度が臨界ひずみ速度より速いか遅いかによって、解くべき問題が混合流であったりまたは、反応流であったりする。第2図に混合率の平均および分散による温度変化を示す。第2図-(a)は混合流として解いた場合の結果、-(b)が反応流として解いた結果である。混合流の場合、混合率の分散による温度への影響は小さいが、反応流においては非常に大きい。

### 3. 解析結果

数値解析の対象となった燃焼器の概略形状を第3図に示す。予熱空気は幾つかのスワラおよび燃焼空気孔から燃焼器内へ流れ込む。燃料は下水処理の際に得られる汚泥消化ガスである。ここでは汚泥消化ガスを都市ガスと二酸化炭素からなる混合ガスに模擬して、解析を行った。模擬ガス(燃料)の成分を第1表に示す。模擬ガスの発熱量は約 23 MJ/kg で、都市ガスの発熱量(約 45 MJ/kg)と比べて約 50%であるが、二酸化炭素が多く含まれているため



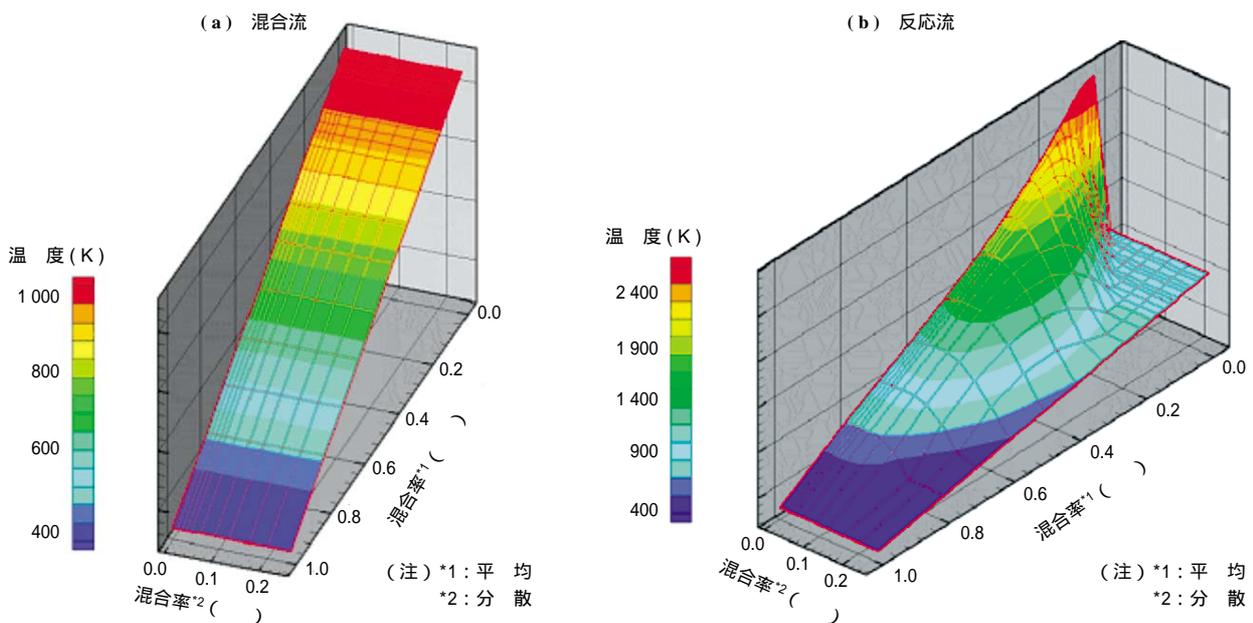
第3図 数値解析の対象となった燃焼器の概略形状  
Fig. 3 Outline of model combustor

第1表 模擬ガス(燃料)の成分(vol%)  
Table 1 Composition of model fuel (vol%)

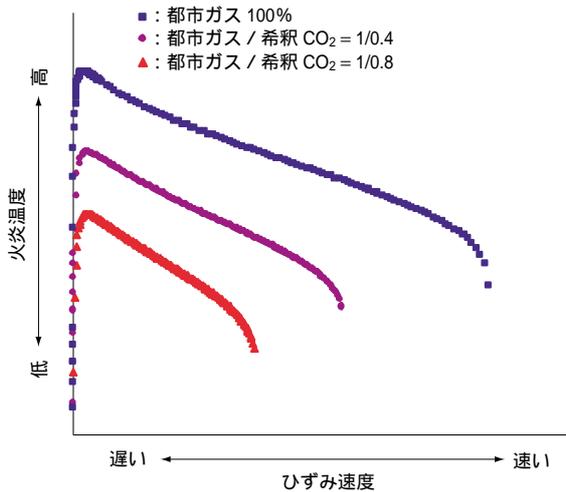
混合割合	1/0.4	1/0.8	
化学種	CH <sub>4</sub>	63.7	49.5
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.9	3.0
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.8	1.4
	N <sub>2</sub>	1.7	1.3
	CO <sub>2</sub>	28.9	44.8

火炎の安定性に大きな影響を与える<sup>(9)</sup>。

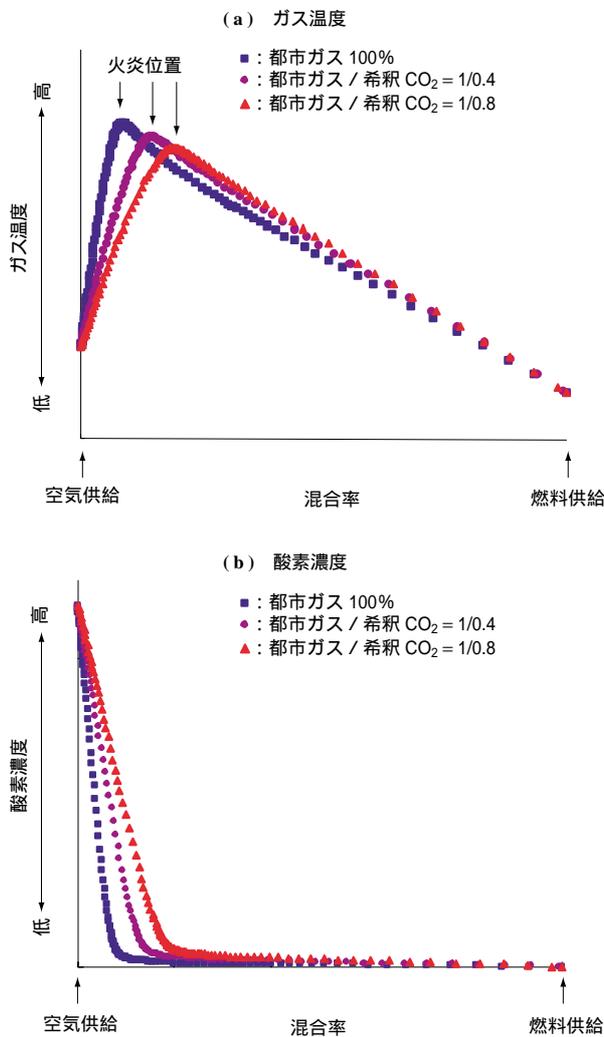
第4図はひずみ速度による火炎温度の変化を示す。二酸化炭素を混合することによって燃料の熱容量が変化し、さらに、熱と物質の拡散速度比が変化するため(ルイス数効果<sup>(9)</sup>)、より臨界ひずみ速度が遅くなる。また、低ひずみ速度ではふく射による熱損失のため消炎が起こる。臨界ひずみ速度の50%のひずみ速度において、燃料組成による火炎構造の変化を第5図に示す。横座標は混合率を意味する。



第2図 混合率の平均および分散による温度変化  
Fig. 2 Change of temperature with mean and variance of mixture fraction



第4図 ひずみ速度による火炎温度の変化  
Fig. 4 Changes in flame temperature due to strain rate



第5図 燃料組成による火炎構造の変化  
Fig. 5 Changes in flame structure due to different fuel composition

燃料中の二酸化炭素成分が多くなるほど、火炎の位置（温度が最大となる位置近く）が右へ移動する。燃料中の  $\text{CO}_2$  が多くなるとともに酸素は、より燃料側へ拡散することが

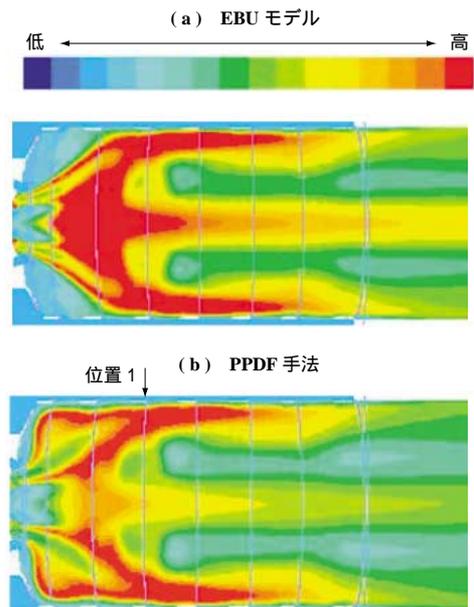
分かる（第5図-(b)）。

### 3.1 燃焼モデルの影響

第6図は1:0.4の体積比で混合した模擬ガス（第1表）を燃焼させたときの燃焼器内の温度分布を示す。第6図-(a)はEBUモデルを用いたときの結果、-(b)はPPDF手法を用いたときの結果である。両図を比較すると燃焼器中央部分とドーム近辺における温度分布に大きな違いが現れている。EBUモデルでは中央部分の温度が高い解析結果が得られたが、PPDF手法の場合は、燃焼空気供給位置（第6図-(b)に示す位置1近辺）よりも後流側には高温領域が広がっていない。また、PPDF手法によるドーム近辺の温度分布は、EBUモデルのそれと比べ高い温度を示している。

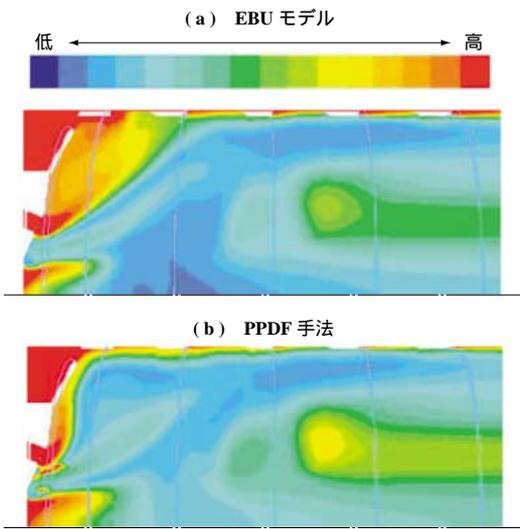
燃焼器内の密度分布を第7図に示す。PPDF手法の場合（第7図-(b)）、燃料供給孔近辺で高い部分を示す。第8図に示すように燃料供給孔近辺ではひずみ速度が速いことが分かる。一般に、ひずみ速度の速い領域は乱流散逸率の高い領域でもある。したがって、(1)式に示すようにEBUモデルは反応率が散逸率に比例するため、反応率を過剰に評価する傾向がある。一方、PPDF手法の場合、ひずみ速度が臨界ひずみ速度より遅くなければ、化学反応が進行しない。このため、PPDF手法では燃料供給孔近辺で燃焼反応が進行しなくなり、密度はEBUモデルの結果と比べ高くなる。

第9図に燃焼器内の混合率分布を示す。混合率とは次の

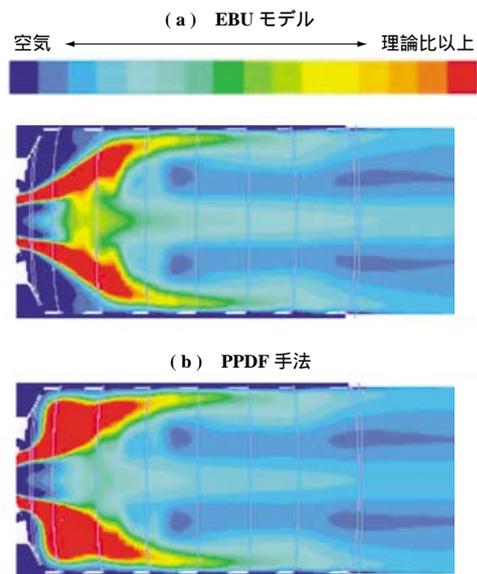


(注) 位置1: 第13図に示す断面の軸座標

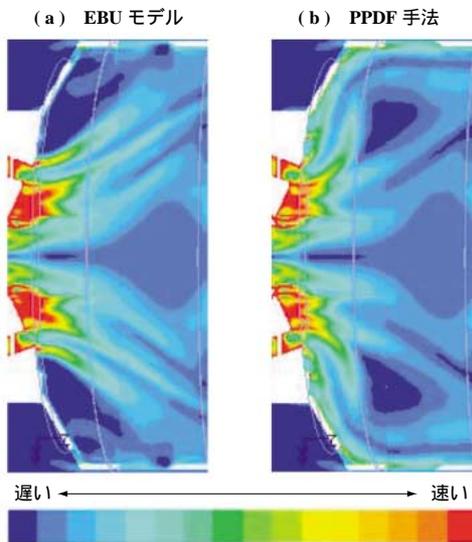
第6図 燃焼器内の温度分布  
Fig. 6 Temperature distribution in combustor



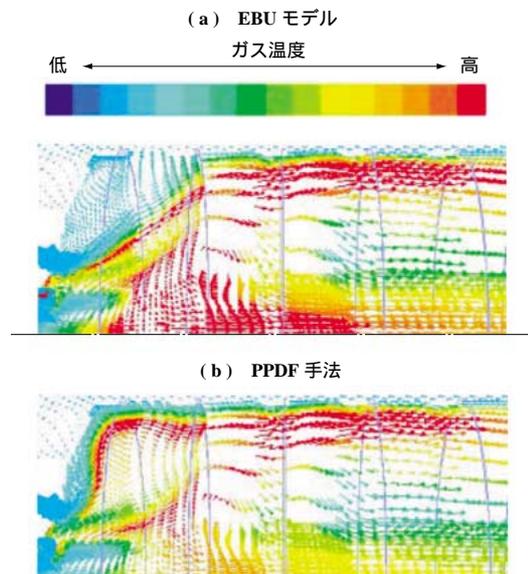
第 7 図 燃焼器内の密度分布  
Fig. 7 Density distribution in combustor



第 9 図 燃焼器内の混合率分布  
Fig. 9 Mixture fraction distribution in combustor



第 8 図 燃料供給孔近くのひずみ速度  
Fig. 8 Strain rate close to injection nozzle



第 10 図 燃焼器内の流れ場  
Fig. 10 Flow field in combustor

(5) 式で定義される状態量で，空気供給側では 0，燃料供給側では 1 となる．

$$f = \frac{\xi - \xi_0}{\xi_F - \xi_0}, \quad \xi = Y_{fuel} - \frac{Y_{O_2}}{\nu_{O_2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$f$  : 混合率  
 $\xi$  : 保存量

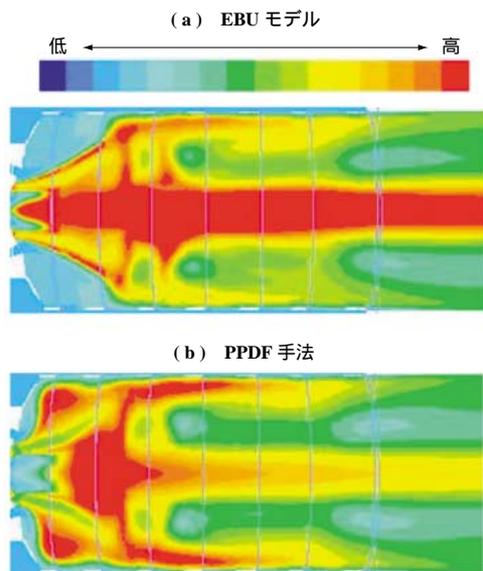
火炎は燃料と空気が過不足なく反応する混合率において形成される．ここで検討している混合ガス（燃料）の場合は 0.201（混合割合 1 : 0.4）および 0.224（1 : 0.8）である．混合率分布（第 9 図参照）を温度分布（第 6 図参照）と比較すると高温空気領域の境界線が理論比となる領域と一致することが確認できる．

第 10 図は燃焼器内の流れ場を示す．二つの燃焼モデル

で得られた結果には，ドーム近辺において大きな違いがある．EBU モデル（第 10 図 - (a)）の場合は燃料が主流方向に対して約 40 度の角度で広がる．このためドーム近辺では逆流領域が発生する．一方，PPDF 手法（第 10 図 - (b)）の場合は燃料が大きく広がってドームに沿ってライナへと流れる．

### 3.2 燃料組成の影響

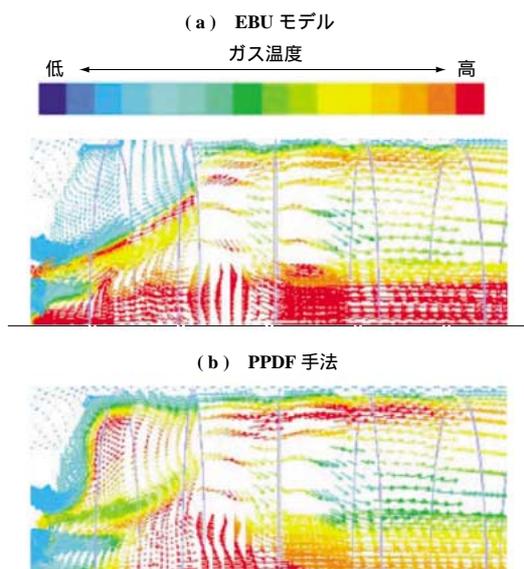
燃料組成の影響を把握するため，もう一つの混合割合で解析を実施した（混合割合 1 : 0.8）．境界条件は 3.1 節で述べたケースと同様であるが，同じ発熱量となるよう模擬ガス（燃料）の供給量を増やした．温度分布を第 11 図に



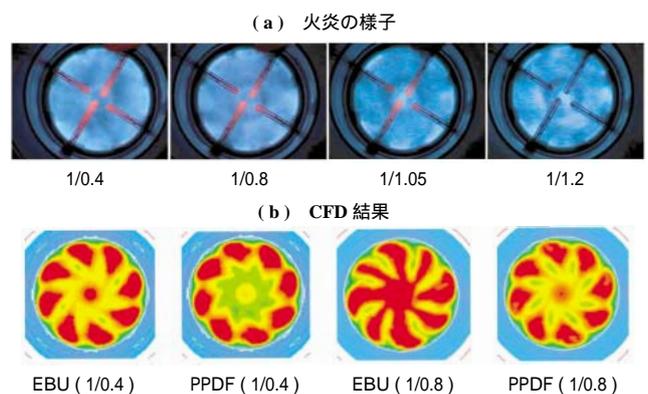
第 11 図 混合割合 1/0.8 の場合の温度分布  
Fig. 11 Temperature distribution for mixture 1 : 0.8

示す。二酸化炭素含有量を増やすと、EBU モデル ( 第 11 図 - ( a ) ) も PPDF 手法 ( - ( b ) ) もバーナ中心軸上の温度がより高くなる。また、流れ場を第 12 図に示す。PPDF 手法 ( 第 12 図 - ( b ) ) の場合はドームに沿う流れが弱くなっている。

第 13 図は燃焼器下流側から撮影した火炎の様子と、CFD の結果を比較したものである。燃料中の二酸化炭素含有量が増えるとともに、中心軸近辺での火炎輝度が増す ( 第 13 図 - ( a ) ) 。また、二酸化炭素含有量を増やすほど、ライナ近辺で形成される火炎と中心軸近辺のそれとの間に暗い領域が存在する ( 第 13 図 - ( b ) ) 。中心軸近辺で火炎輝度が増す傾向は、どちらの燃焼モデルを用いた解析でも



第 12 図 混合割合 1/0.8 の場合の流れ場  
Fig. 12 Flow field for mixture 1 : 0.8



第 13 図 色々な混合割合における温度分布と撮影した火炎との比較

Fig. 13 Comparison of temperature distribution with photos of flame for various mixtures

再現できたが、ライナと中心軸間の暗い領域は PPDF 手法を用いた場合のみ再現することができた。

#### 4. 結 言

低カロリー燃料焚き発電用ガスタービン燃焼器内における燃焼数値解析を、EBU モデルおよび PPDF 手法を用いて実施した。この結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 燃焼モデルは流れ場に大きな影響を与える。
- (2) EBU モデルを用いると中心で高温領域が予測される。一方、PPDF 手法を用いると試験と同様に中心の温度が燃料中の二酸化炭素成分の増加とともに高くなる。
- (3) PPDF 手法を用いることによって燃焼試験で観察される傾向を再現できる。

#### 参 考 文 献

- (1) D. B. Spalding : Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames The Combustion Institute Vol.13 ( 1971 ) pp.649 - 657
- (2) R. Bilger : Topics in Applied Physics, Turbulent Flows with Non-premixed Reactants Springer Verlag Vol.44 ( 1980 ) pp.65 - 113
- (3) J. Janicka and N. Peters : Prediction of Turbulent Jet Diffusion Flame Lift-off Using a PDF Transport Equation The Combustion Institute Vol.19 ( 1982 ) pp.367 - 374
- (4) C. M. Mueller, H. Breitbach and N. Peters : Partially Premixed Turbulent Flame Propagation

- in Jet Flames The Combustion Institute Vol.25  
(1994) pp.1 099 - 1 106
- (5) D. Riechelmann and T. Fujimori : On the Effect of Presumed PDF and Intermittency on the Numerical Simulation of a Diffusion Flame The Third Asia-Pacific Conference on Combustion (2001)
- (6) D. Riechelmann and T. Fujimori : PDF Simulation of Diffusion Flame in High Temperature Air Proceedings of the Third Symposium on Scale Modeling (2000)
- (7) N. Peters : Turbulent Combustion Cambridge University Press (2000)
- (8) RIECHELMANN Dirk , 加藤壮一郎 , 藤森俊郎 : 火炎片モデルを用いた乱流拡散燃焼数値解析の技術と応用 石川島播磨技報 第42巻第1号2002年1月 pp.8 - 12
- (9) D. Riechelmann, T. Fujimori and J. Sato : Effect of Dilution on Extinction of Methane Diffusion Flame in High Temperature Air Up to 1 500 K Combustion Science and Technology Vol.174 (2002.2) pp.23 - 46