

ガスタービン燃焼器開発における燃焼解析技術

Turbulent Reacting Flow Analysis for Gas Turbine Combustor

技術本部 西田 啓之*¹ 斎藤 圭司郎*²
 萬代 重實*³ 川田 裕*⁴
 高砂製作所 田中 克則*⁵

低 NO_x 燃焼器の開発では気流試験や燃焼実験を中心に行うことが多いが、得られる情報が限られること、その費用が膨大になるという問題がある。近年、電子計算機と乱流燃焼解析技術の進歩に伴い、燃焼器内の諸現象を数値計算である程度予測できるようになってきた。本報では燃焼器の開発における燃焼解析技術の位置付けと、乱流燃焼モデルである渦消散モデルによる燃焼解析例を示し、その課題、燃焼モデルの改良について紹介する。

Developing a low NO_x gas turbine combustor, usually requires many experiments with flow and combustion. Computational prediction technology in the combustion field has progressed with advances in the computer technology and the turbulent combustion model. This report covers applications in CFD for the development of the gas turbine combustor and some discrepancies between CFD and experimental results, and improved methods to solve them.

1. 緒言

ガスタービンは高効率化のため年々タービン入口温度が上昇し、最新鋭のものではタービン入口温度 1773 K、コンバインドプラント効率約 52 % (HHV) となっている。また、ガスタービン燃焼器では環境負荷低減のため希薄予混合火炎方式による低 NO_x 化を図っている。

近年の電子計算機と乱流燃焼解析技術の進歩とともに、ガスタービン燃焼器内の諸現象を数値計算である程度予測できるようになってきた。乱流燃焼解析は、乱流解析と発熱モデルの両者を連立させて解く手法が主流である。乱流解析には Navier Stokes (NS) 方程式を直接解く直接数値シミュレーション (DNS)、渦をフィルタリングして解く大渦シミュレーション (LES)、NS 方程式を時間平均し渦粘性を導入して解く RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation) などの手法がある。また発熱モデル、一般にいわゆる燃焼モデルには分子動力学モデル、フレイムシートモデル、前述の乱流解析の結果から高次相関を導入したモーメント法⁽¹⁾や確率密度関数を導入したモデル⁽²⁾ (PDF 法) 及び渦崩壊モデル (EBU 法)⁽³⁾、渦消散モデル (EDC 法)⁽⁴⁾などがある。

計算時間及び費用の点から燃焼器開発には RANS 系の乱流解析と EDC 法などを組合せた手法が現実的である。そこで、本報では燃焼解析技術の位置付けと、EDC 法による燃焼解析例を示し、その課題と燃焼モデルの改良について述べる。

2. 燃焼器開発における燃焼解析の位置づけ

2.1 性能予測

燃焼解析は燃焼器に対する数値実験であり、燃焼実験より容易、かつ、安価に各部形状の性能に及ぼす影響を把握できる。実験では燃焼器内の状態量を詳細に把握するためには多大な労力が必要であるが、燃焼解析では燃焼器内各部の温度

分布、速度分布、発熱率分布、火炎構造など多くのデータを比較的容易に把握することができる。

2.2 燃焼解析と燃焼実験データの対比検討

燃焼解析では多くの情報が得られる長所がある反面、その精度が低い短所がある。一方、燃焼実験では代表点の限られたデータしか得られないが、その精度は高いといえる。したがって両者の結果を比較検討、解釈することにより、燃焼現象を詳細に理解できるようになる。また、燃焼解析に用いるモデルの改良、精度向上を図っていくことも可能となる。

2.3 燃焼器開発時の評価性能

ガスタービン燃焼器において性能関係の評価項目としては、失火限界、不安定燃焼限界、振動燃焼、逆火、燃焼効率、火炎長、燃焼器出口温度分布、そして、NO_x、CO などの排気性状が挙げられる。これらのうち、火炎長、燃焼器出口温度分布については、現時点でも評価できるが、他の項目については実用的に評価できるようになる過渡期にある。さらに、利用技術の高度化を図っていく必要があるといえる。

3. ガスタービン燃焼器の燃焼解析例

燃焼解析に際しては各モデルを変更しやすいように自社開発した SICOH-3D (Simulation of Combustion and Heat Transfer) を使用した。

3.1 基礎方程式

基礎方程式は連続の式、運動方程式 (NS 方程式)、エネルギー式 (エンタルピー式)、濃度拡散方程式であるが、これらの基礎式に対して有限体積法を用いて離散化する。これは流体要素のコントロールボリュームについて時間平均 (RANS) した後離散化するもので、現在最も一般的に使用されている流動解析手法である。特に乱流現象に関しては、速度の定常成分と非定常成分とを分離し、乱流現象を記述する定常成分に関するレイノルズ方程式を得る。

*1 高砂研究所燃焼・伝熱研究室

*4 高砂研究所次長 工博

三菱重工技報 Vol. 38 No. 2 (2001-3)

*2 高砂研究所流体研究室

*5 タービン技術部ガスタービン設計課燃焼器チーム

*3 高砂研究所主幹 工博

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) + F_i \quad (1)$$

ここで,

$\bar{u}_i$: i 方向の時間平均速度

$\bar{u}'_i$: i 方向の変動速度

x_i : i 方向座標

ρ : 密度

p : 圧力

μ : 粘性係数

F_i : i 方向の外力

右辺第3項のレイノルズ応力項にブジネス近似とプラントル・コルモゴロフの関係を用いて乱流エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ε の輸送方程式を得る.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho (P_k - \varepsilon) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (3)$$

ここで,

$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$: 渦粘性係数

$P_k = -\bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$: 乱流エネルギー生成項

$-\bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$: レイノルズ応力

各定数は一般に使用される次のものを使用する.

$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09$

化学種の保存式は, 式(4)で表される.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho X_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j X_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j} J_{ij} + R_i \quad (4)$$

ここで,

X_i : 化学種 i の質量割合

J_{ij} : 化学種 i の j 方向拡散流束

R_i : 化学反応による化学種 i の生成速度

J_{ij} は濃度こう配により生ずる拡散流束であり, 乱流下では式(5)により与えられる.

$$J_{ij} = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial X_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$D_{i,m}$: 混合物中での化学種 i の拡散係数

($X_i \ll 1$ のとき)

Sc_t : 乱流シュミット数

また, 化学反応速度はアレニウスの反応速度則又は乱流混合によって支配される. アレニウスの反応速度則は式(6)で表される.

$$R_{Ci} = -\nu'_i M_i A T^\beta \left[\prod_{j=\text{reactants}} \left(\frac{\rho X_j}{M_j} \right)^{\nu_j} \right] \exp(-E/RT) \quad (6)$$

ここで,

R_{Ci} : 化学種 i の化学反応速度 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]

ν'_i : 化学種 i の化学量論係数 (無次元)

M_j : 化学種 j の分子量 (kg/kmol)

A : 反応の頻度因子

T : 局所ガス温度 (K)

β : 温度指数 (無次元)

ν_j : 化学種 j の反応速度指数 (無次元)

E : 反応の活性化エネルギー (J/kmol)

R : 気体定数 [$\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$]

乱流混合による化学反応速度は, EDC 法⁽⁴⁾を用いて,

$$Rm_i = \nu'_i M_i A_m \rho \frac{\varepsilon}{k} M \quad (7)$$

ここで,

$$M = \min \left[\left(\frac{X_i}{\nu'_i M_i} \right)_{i=\text{reactants}}, B_m \frac{\sum_{j=\text{products}} X_j}{\sum_{j=\text{products}} \nu'_j M_j} \right]$$

Rm_i : 混合支配反応速度 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]

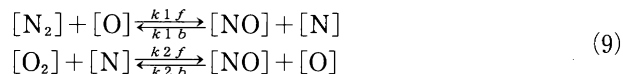
A_m : 反応混合率定数 A

B_m : 反応混合率定数 B

混合支配反応では, 乱流反応域に入った反応種又は生成種のうちで反応速度の最も遅いものを反応速度とする. 併せてアレニウスの反応則を各セルに対して同時に計算し, これら両者の小さい方を反応速度として使用する.

$$R_i = \min(R_{Ci}, Rm_i) \quad (8)$$

つぎに, NO_x 生成機構の基本式である式(9)のZeldovich反応により燃焼器内の分布を求めた.



3.2 拡散炎型燃焼器の実験値と解析値の比較

拡散炎型燃焼器の概略図, 条件及び実験値と解析値の比較を表1に示す. ガスタービン実機の圧力は約1.5 MPaであるが, 実験で燃焼器内の温度分布, 濃度分布を計測するために, 大気圧条件で比較を行った. 燃料は天然ガスである.

また, 計算メッシュは燃焼器周方向60°分の周期境界条件として, 周方向13分割, 半径方向24分割, 軸方向66分割の合計16182セルである.

両者を比較すると, NO_x 濃度分布を除いて, 流動状況, ガス温度分布, 酸素濃度分布は定性的には一致している. ガス温度の実験値はふく射誤差のため全般的に50~100 K低めとなっているが, これを考慮しても第1段空気孔及び第2段空気孔下流の解析値が実験値より大幅に高く, 解析での発熱速度が高すぎる結果となっている. また, NO_x 濃度分布に関しては, 実験では高温ガス温度領域全体にNO_xが拡散した分布を示すのに対し, 解析では, 高温部の極めて狭い領域にのみNO_xが存在している. また, 燃焼器出口でのNO_x濃度は実験値60 ppmに対し, 計算値は2 ppmにとどまっている.

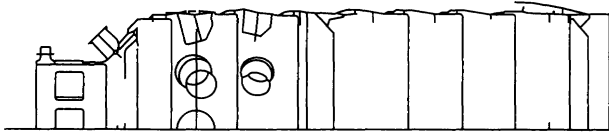
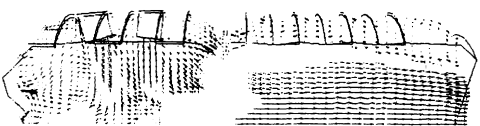
4. 燃焼解析に関する一考察

4.1 計算メッシュサイズの影響

火炎厚み, 乱れミクロスケールは0.1~1 mmのオーダーである. これらを詳細に解析するためには計算メッシュサイズとしては0.01 mm程度とする必要がある⁽²⁾. しかし, ガスタービン燃焼器ではその径が約300 mm, 長さが1000 mmであ

表1 拡散燃焼器でのCFDと実験結果の比較

Comparison of CFD and experiment results for diffusion flame type combustor

燃 焼 器 概略形状 及び条件	 条 件 $G_a=1.70\text{ kg/s}$ $P_a=0.11\text{ MPa}$ $T_a=650\text{ K}$ $T_g=1473\text{ K}$ 燃料：天然ガス	
	CFD	実 験 結 果
流動状況		
ガス温度分布		
O ₂ 濃度分布		
NOx濃度分布		

り、計算機の容量、計算時間の制約から周方向、径方向に1.5～3 mm、長さ方向に10 mm程度のメッシュサイズとすることが現実的であり、詳細現象を解析するには不十分といわざるを得ない。計算メッシュの平均量で諸変数を取扱うため、小径の燃料噴流の減衰が大きくなる、拡散火炎と予混合火炎の差異が小さくなるなどの問題は否めない。

4.2 燃焼に関する諸変数の取扱い

RANS系の解析では速度、圧力の時間平均とその変動をベースとし、各成分濃度、温度などは平均値のみを取扱ってきた。燃焼現象では温度に対し強い非線形性があり、平均値だけでは十分に燃焼を予測できない問題がある。例えば、温度上昇とともに指数関数的に生成量が増大するNOxは、その生成量を低く評価してしまうなど、時間的、空間的影響の大きい事象は正確に予測できない。このような課題に対しては、物理量の変化率、こう配に対応したメッシュサイズの設定、新しい状態変数の導入、あるいはPDF法などの採用などの必要がある。また、乱流モデルは、その発展の経緯から高次の微小項や密度変化に対する相関項が省略されていることもあり、燃焼計算を行う場合には注意が必要である。

4.3 計算対象領域の設定

燃焼器内部の燃焼解析を行うに際して、燃焼器入口までの空気流路、燃焼器出口から後方の燃焼ガス流路を計算対象領域に含めることが重要である。流れ、乱れは燃焼器の上流、下流の影響を受けるため、燃焼器出入口を境界条件に設定すると燃焼器内圧力分布の空気配分に及ぼす影響、空気孔部の偏流などの影響が消去されてしまうこととなる。

4.4 燃焼モデルの妥当性

燃焼モデルとしては渦崩壊、消散モデルが一般的であるが、これらでは混合速度と反応速度の遅い方が律則であるとするもので、これらの比であるダムケラー数が0、あるいは無限大に対応するものである。拡散炎では文字どおり混合拡散が律則であると考えられるので、これらのモデルを適用し得ると考えられる。しかし、ガスタービン燃焼器のように高乱流場の予混合火炎では、ダムケラー数が1に近く、混合速度と化学反応速度が同程度であるため、両者を考慮したモデルが必要である。また、前記のような燃焼モデルでは層流燃焼速度、すなわち、化学反応に至るまでの予熱帯温度伝導の影響が加味されていない。

乱流燃焼モデルに関して、多くの研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾があるが、幅広いダムケラー数領域に適用可能なモデルとして更なる精度向上が必要である。

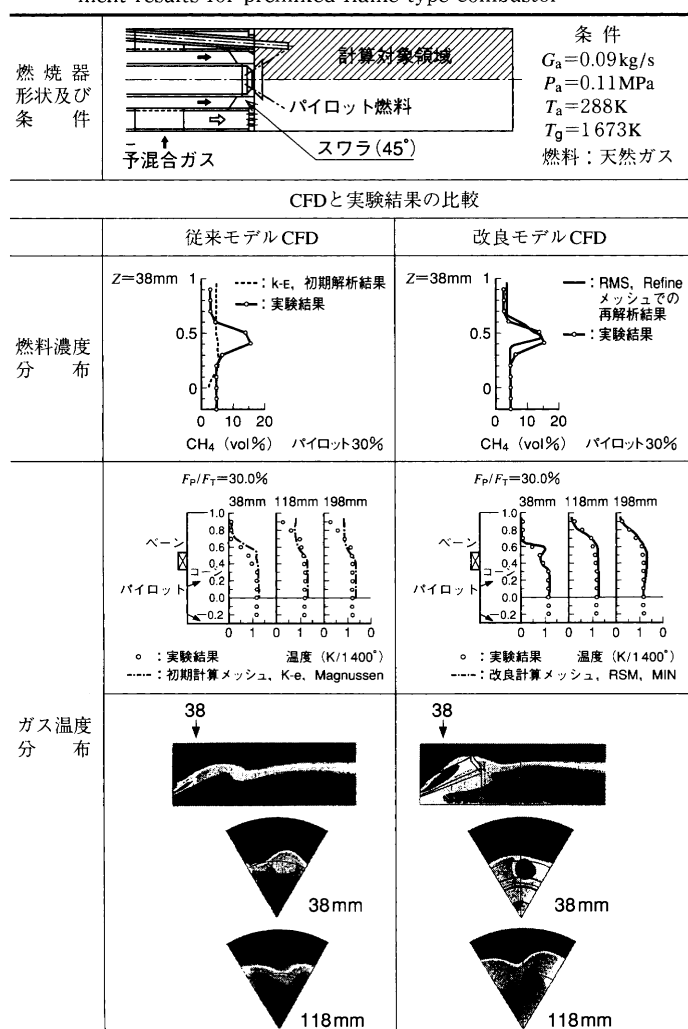
4.5 解析モデルの検証

ガスタービンを始め工業規模の燃焼機器の数値解析に際しては、速度分布、乱流特性などの流れ場、そして、燃料と空気、あるいは、既燃高温ガスとの混合特徴などについてその妥当性をまず等温場で検証しておく必要がある。そして、次ステップとして温度分布の対比により燃焼モデルを検証することが必要である。

4.6 改良モデルによる解析精度向上

検証実験は解析結果との比較のために単純形状の燃焼器で行った。予混合炎型燃焼器の概略図、条件及び値と解析値の比較を表2に示す。また、計算メッシュは周方向24分割、半

表2 予混合燃焼器でのモデルの改良と CFD と実験結果の比較
Comparison of conventional and improved CFD and experiment results for premixed flame type combustor



径方向 63 分割，軸方向 95 分割の合計 143 640 セルである。

表2に示すように両者を比較すると速度分布は定性的に一致しているが，パイロット燃料の濃度分布が軸方向距離 38 mm の点で既に差異を生じている。これは径 1 mm の燃料噴流の貫通力が計算では小さく評価されていることによる。また，ガス温度分布は軸方向距離 198 mm，壁面近傍の点で，解析では燃焼がかなり進行しているのに対し，実験ではほとんど進行していない結果となっている。

これまで述べた考察を基に混合速度と反応速度の双方が燃焼過程に寄与すると考えたモデルを採用した。

また，パイロット燃料噴流径に対応してその周囲のメッシュ分割を最適化した。表2の上を示した予混合炎型燃焼器での再解析結果と実験のガス温度分布の比較を表2に併せて示してあるが，解析結果と実験結果はかなり良い一致を示していることが分かる。

5. お わ り に

高効率ガスタービン燃焼器を開発するためには多額の開発費用が必要であり，いかに効率的に，かつ，短期間に開発できるかが大きな課題である。コンピュータ及び解析技術の進展により，燃焼器開発に燃焼解析を利用できるようになってきたが，以下の(1)～(4)などが必要と思われる。

- (1) 多少精度，確度が悪くとも既存解析技術ベースで解析を行い，実験結果との対比検討しながら，解析の利用，適用技術を高め，現象の理解を深めるツールとして使用する。
- (2) 乱れ，燃焼モデルを改良し，解析の精度，確度向上を図る。
- (3) 直接数値計算 (DNS)，大渦シミュレーション (LES) などにより部分現象，非定常現象の理解をし，燃焼モデルなどに反映する。
- (4) 確率密度関数法 (PDF 法)，モーメント法などの導入を図る。

燃焼解析は定性的な判断材料として非常に強力な設計思考ツールとなってきており，前記のような改良と，計算機の速度向上とが相まって，これまで以上に設計支援ツールとして欠かせないものになってくると期待される。

参 考 文 献

- (1) Launder, B. E., A Simple Second-Moment Closure for the Prediction of Turbulent Flow Under the Action of Force Fields -Part 2 Applications in Flow Affected by Body Force-, 生産研究, 41 巻 7 号 (1989) p.575
- (2) Jones, W. P. et al., Multi-scalar pdf transport equations for turbulent diffusion flame, In Turbulent Share Flow 5 : Selected paper, Springer-Verlag (1987) p. 296
- (3) Spalding, D. B., MIXING AND CHEMICAL REACTION IN STEADY CONFINED FLAMES, 13 th Symp. (Int.) on Combustion (1976) p.649
- (4) Magnussen, B. F. et al., ON MATHEMATICAL MODELING OF TURBULENT COMBUSTION WITH SPECIAL EMPHASIS ON SOOT FORMATION AND COMBUSTION, 16 th Symp. (Int.) on Combustion (1976) p.719
- (5) 香月ほか，乱流予混合炎における乱れと混合 (第3報，乱流燃焼モデル)，日本機械学会論文集 (B 編)，58 巻 547 号 (1992) p.929
- (6) 城戸，燃焼速度線図による予混合乱流燃焼速度モデルの検討，燃焼の科学と技術，Vol.1 (1992) p.45