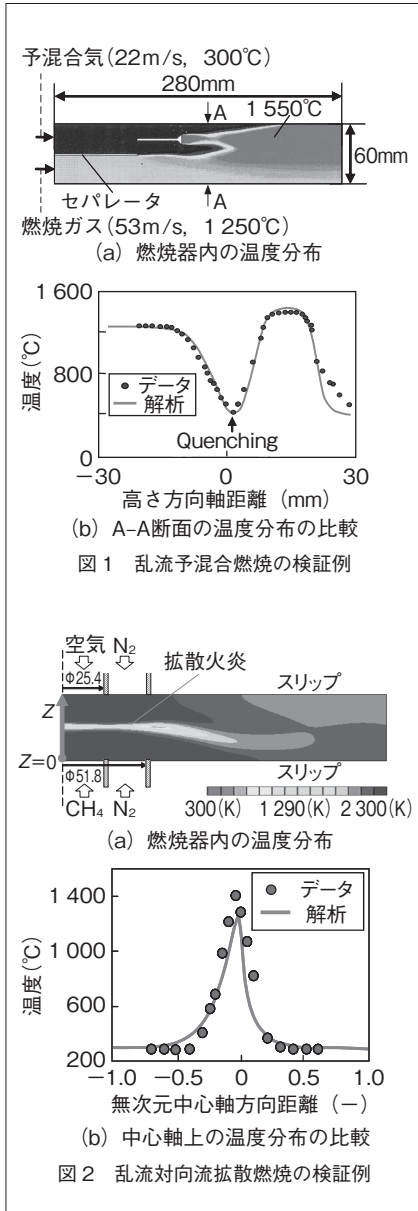


拡散・予混合統一燃焼モデルによる燃焼解析技術



1. はじめに

ガスタービン実燃焼器の試験は、高温・高圧空気下で行われるため、膨大なコストを伴う。その一部でも数値計算が代替できれば、燃焼器開発の大きな加速、コスト低減が期待できる。その実現のために、拡散燃焼と予混合燃焼をシームレスに解析可能な新たな燃焼モデルを提案したので、ここに紹介する。

2. 統一燃焼モデル

ガスタービン燃焼器では、NO_xほかの厳しい環境規制値に 대응するために、希薄予混合燃焼方式が主流であるが、

一部拡散燃焼方式のパイロットバーナ部を設け、火炎安定性を向上させている。実機燃焼器内の燃焼を高精度に予測・評価するには、混合燃焼と拡散燃焼が混在する燃焼場の解析技術が必須である。著者らは、従来提案の予混合燃焼モデル⁽¹⁾をベースに、拡散燃焼にも拡張した新たな燃焼モデルを構築した⁽²⁾⁽³⁾。予混合燃焼モデルでは、予混合燃焼を「有限の厚みの中で、反応進行度が0~1に変化するプロセスであり、火炎の位置は燃焼速度と流れ場のバランスにより決定される」過程と見なし、その過程を Hyperbolic Tangent 関数で近似的に表現することでモデル化している。その結果、層流および乱流共通の予混合燃焼反応速度 ω として、以下を得ている。

$$\omega = \frac{8\rho_u Su}{\delta} C^2(1-C) \quad (1)$$

ここに、 ρ_u は未燃焼ガスの密度、 Su は層流燃焼速度、 δ は層流火炎の厚み、 C は反応進行度である。モデルには陽に乱流の影響を含んでいないが、乱流の効果は反応進行度の乱流拡散係数を通じて考慮される。そのため、乱流モデルとしてRANS, LES, DSに適用可能である。燃空比、混合気予熱温度、圧力の影響は、 Su および δ を通じて考慮される。予混合燃焼モデル式(1)の検証事例を図1に示す。図1(a)は解析による温度分布を示し、(b)は(a)中A-A断面での高さ方向温度分布である。実験と解析はよく一致し、とくにセパレータ下流でのせん断層中に形成される消炎域をよく再現する。

次いで、拡散燃焼モデルでは、拡散燃焼は「燃料濃度が分布し、火炎各位置の当量比において成り立つ部分的な予混合火炎の集合体」と見なし、燃料濃度分布は Hyperbolic Tangent 関数で近似的に与え、部分的な予混合火炎の表現に式(1)を用いることによりモデル化し、層流の拡散燃焼反応速度 ω として、以下を得ている。

$$\omega(x) = \frac{4\rho_u Su}{\delta} c^2(1-c) \frac{\hat{\alpha}(1+\hat{\alpha}c)}{(1+\hat{\alpha}(2c-1))^2}$$

$$\times \left(\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2f}{dx^2} \right) \left(\frac{df}{dx} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 f は混合分率であり、その一次、二次こう配により、拡散燃焼を表現している。また、

$$\hat{\alpha} = \tanh \left(\frac{2 \frac{df}{dx}}{\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2f}{dx^2}} \right) \quad (3)$$

である。 $df/dx \rightarrow 0$ の極限では、式(2)は予混合燃焼モデル式(1)へと漸近する。乱流拡散燃焼の場合には、式(2)、(3)において、 $Su \rightarrow S_t$, $\delta \rightarrow \delta_t$ と置き換える。燃焼モデルには、当量比、燃焼器内圧力、空気温度、火炎伸張による消炎効果、燃料濃度こう配の影響が適切に考慮されており、予混合・拡散燃焼に対してシームレスに適用できる。

統一燃焼モデル、式(2)、(3)の対向流拡散火炎による検証事例を図2に示す。本事例でも実験をよく再現でき、一定の精度で検証できたと考える⁽⁴⁾。

3. おわりに

層流～乱流場の予混合・拡散燃焼場に統一的に適用できる燃焼モデルを提案した。提案モデルを乱流予混合、拡散火炎に適用し、火炎帯中の諸物理量分布を実験値と比較した。解析値は、一定の精度で実験値を再現できたものとする。今後、適用事例を増やし、さらなる検証を進める予定である。

(原稿受付 2008年9月18日)

[稲毛真一 (株)日立製作所]

●文献

- (1) 稲毛真一・大塚雅哉, 新たな乱流燃焼モデルの提案とその評価: 第1報 モデルの開発, 日本機械学会論文集, 61-586, B (1995), 2290.
- (2) 稲毛真一, 予混合～拡散燃焼場に適用可能な統一燃焼モデルの提案とその評価 (第一報 基本モデルの構築), 日本燃焼学会誌, 49-150, (2007), 47.
- (3) 稲毛真一, 予混合～拡散燃焼場に適用可能な統一燃焼モデルの提案とその評価 (第二報 基本モデルの構築), 日本燃焼学会誌, 49-150, (2007), 57.
- (4) Inage, S., Power for Land, Sea, and Air, Proceedings of GT2008, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany, (2008-6), GT2008-50233.