

論文の内容の要旨

論文題目 Large-Eddy Simulation を用いた予混合乱流燃焼場の実用解析に関する研究
氏名 富永 卓司

1. 序論

高効率化や有害排気の低減など様々な点に関してますます厳しくなる性能要求を満足するため、近年の工業用燃焼器設計では、より詳細な器内の現象把握が必要となっている。特にガスタービン燃焼器においては、近年有効な有害排気低減手法の一つとして希薄予混合燃焼方式の導入が進められているが、燃焼振動や火炎の吹き消えなどの燃焼不安定を生じやすく、より詳細な現象把握と予測手法の確立の必要性が高まっている。そこで本研究では、工業用ガスタービン燃焼器における重要課題の一つである低 NO_x 燃焼技術実現に向けて、燃焼器内乱流燃焼場の瞬時局所状態を把握可能な数値予測手法の構築及びその検証に関する一連の研究を行った。数値予測手法の構築にあたっては、従来研究において乱流燃焼場の非定常解析手法としての有効性が示されてきた[1,2]Large-Eddy Simulation による乱流モデリングと flamelet 概念に基づく燃焼反応モデリングのカップリングによる数値予測手法に注目し、実用乱流燃焼場への適用性を高めるため、2種の火炎面追跡スカラを用いる手法 (2-scalar flamelet アプローチ) を導入した。

2. 2-scalar flamelet アプローチを用いた部分予混合燃焼場の解析モデルの構築

乱流の最小長さスケールに対して燃焼反応帯の厚さスケールが小さい場合、乱流渦による影響は火炎の変形に留まり、その内部構造までは影響を与えないと考えられる。そのような状況では、乱流火炎の火炎内部構造は層流火炎と同様になり、乱流火炎を接線方向の微小幅に分割すると層流火炎片(flamelet)の集合であると考えられる。この概念を flamelet 概念と呼ぶ。この概念に基づき、火炎のマクロ形状を流れ場スケールで解析し、ミクロな火炎内部構造に関しては火炎に対する別途単純化した系での解析結果を用いる、スケール分離による解析手法を flamelet アプローチと呼ぶものとする。本研究では、予混合燃焼に対する G 方程式モデル (式 1) [3]と拡散燃焼に対する保存スカラアプローチに基づいた混合分率 ξ の方程式 (式 2) をカップリングする事で、両燃焼形態の中間的な複合燃焼場にも適用可能な数値予測手法を構築した。拡散火炎モデルには化学平衡モデル[4]を選定し、SGS スカラ流束項は勾配拡散モデルにより評価した。また、予混合火炎の伝播速度については 1次元火炎伝播の詳細反応解析に基づくデータを使用するものし、SGS 乱流燃焼速度は Yakhovitch によるモデル[5]、SGS スカラ流束項は勾配拡散モデルを用いて、それぞれ評価した。

3. 希薄予混合燃焼器内現象の数値予測による検証

構築した数値予測手法を、有限体積法による非定常乱流解析コードに実装し、複雑形状を有する実用燃焼器の複雑形状へも適用可能な数値解析システムを構築した。そして、その数値予測システムの検証として、図1に概略図を示す希薄予混合ガスタービン燃焼器内における乱流燃焼場を対象とした数値解析を行った。

3. 1. 非燃焼乱流場の LES 予測に関する検証

燃焼乱流場予測の検証解析に先立ち、非燃焼乱流流動に対する LES 解析についても実行し、実験計測値との比較による評価を行った。図2に旋回ノズル出口から距離 $3/4D$ (D :旋回ノズル外径) における軸方向速度とその変動強度の半径方向プロファイルを示す。乱流変動による燃焼速度の加速の見積もりが重要となる主旋回流が流れる燃焼器外周壁近くから、パイロット添加燃料の乱流拡散が重要となる燃焼器内周部の循環領域内まで、全体的な予測速度変動強度の実験値との一致が示されている。これにより、LES 解析によって、燃焼器内の時間平均速度場に加え、燃焼現象との相互作用の予測で重要となる乱流速度変動強度についても十分な予測結果が得られる事を示した。

3. 2. 乱流燃焼場予測に関する検証

続いて、乱流燃焼場に対する検証解析を実施した。解析で得られた flamelet スカラ G 及び ξ と温度の同時刻における瞬時分布をそれぞれ図3(a)-(c)に示す。燃焼チャンバ外周部分では未燃状態であるために低温となっており、循環領域内では、パイロット燃料の拡散によって形成された燃料濃度分布が既燃混合気温度の分布を形成している。これらはそれぞれ、スカラ G 及び ξ により表現されており、本研究で構築した 2-scalar flamelet アプローチによって予混合的な燃焼と非予混合的な燃焼の共存する複合燃焼状態が表現可能となった事が確認できた。

次にスカラ G の瞬時及び時間平均の分布を用いて、予混合火炎面と定義した $G=0.5$ の等値面を図4に示す。両者の比較から、瞬時の火炎面は時間平均よりも複雑な形状を有している事が示された。これらの火炎面をチャンバ軸方向に 20mm 等間隔に分割し、それぞれの区間での火炎面面積を比較したグラフを図5に示す。瞬時での火炎面面積は時間平均火炎面に対して 150%前後広くなっており、GS での火炎面の変形に伴う火炎面面積増加によって生じる燃焼速度の増加が直接解析されている事が確認された。また、時間平均火炎面厚さが瞬時 GS 火炎面の倍程度の厚さを持ち、GS 火炎面変動が時間平均温度分布を形成する過程についても直接再現されている事が確認され、今後本手法を、NOx 予測や音響振動予測などと連成した解析を実施する際に、時間変動成分の評価におけるモデル依存性の低減に有効となる可能性を示した。

さらに、総燃料投入量とパイロット燃料比について表 1 に示す 3 通りの組み合わせ (Case A,B,C) による燃料条件を用いた解析結果について、それぞれ対応する計測値との時間平均温度プロファイルの比較を行った。図 6 (a) に示したノズル出口より 38mm 下流では、燃焼器中心部($r=0\text{-}30\text{mm}$)が予混合気旋回流の形成する循環領域に相当し、既燃混合気が充満した高温領域となっている。この領域では、定量的に全条件で温度の過大評価が見られるものの、パイロット燃料流量の最も小さい Case A が B, C に対して高温となる定性的な傾向が実験計測結果と一致した。

一方、図 6 (b) に示したノズル出口から 358mm 下流の外周領域 ($r=70\text{-}100\text{mm}$) では、パイロット燃料流量の多い Case B, C が高温となっており、内外周で解析条件間の温度の高低が逆転するという定性的なプロファイルの変化に関する一致が確認された。これらは、パイロット燃料流量の減少につれてその噴流の貫通距離が短くなるため、多くの燃料が循環領域内に取り込まれて内周での燃料濃度が上昇し、逆に外周部への燃料輸送は減少して燃料濃度が低下するためと考えられる。また、図 3 (b) では Case B に対して Case C が同傾向の温度プロファイルを示しながら全体的に高温となっており、総投入燃料量の差による温度の差も再現されている。

以上のように、総投入燃料量及びパイロット燃料比の条件変化により生じる燃焼器内現象の定性的な変化が、構築した数値予測システムにより予測可能であることが確認できた。

4. 解析結果の分析と解析モデルの改良に向けた検討

さらに、上述の検証解析結果に対してアприオリな評価による分析と追加解析による解析条件の結果への影響評価を行った。これにより、希薄予混合燃焼器内における乱流燃焼場への適用において重要となる要素を、解析条件と解析モデルの両面について明らかにした。さらに解析結果に対する分析から、希薄予混合燃焼器内における特徴的な現象として、予混合気の希薄化に伴う予混合火炎の化学反応速度の低下により微小乱流変動の反応帯内部構造への影響が支配的になり得ることと、少なくともグリッドスケールにおいては予混合気の濃度不均一性の火炎への影響が生じている事を指摘した。

5. 結論

以上の研究により、より高度な低 NO_x 燃焼技術の実現に必要とされる、希薄予混合燃焼器内の実用乱流燃焼場に適用可能な非定常現象数値予測手法の構築と検証がなされた。

また、検証解析結果を用いた評価と考察を加えることにより、構築手法の希薄予混合燃焼器内の現象把握に適用するにあたって今後検討されるべき現象を明確にし、さらなる高精度な数値予測手法の実現に向けた課題を明らかにした。

参考文献

- [1] 村田 〇, 生産研究, vol. 53, no. 1, 2001, pp. 53-56.
- [2] N. Park et al., Second International symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena, Vol. 3, 2001, pp291-296
- [3] Bilger,R.W., *Comb. Sci. and Tech.*, 13, 1976, pp.155-170.
- [4] Williams, F. A., *Combustion Theory* (2nd ed.), Addison-Wesley, 1985.
- [5] Yakhot, V., *Comb. Sci. and Tech.*, Vol. 60, 1988, pp. 191-214.

(文字数 : 計 3995 字、図表 : 計 14 個)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{G}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{G}}{\partial x_j} = \overline{\rho_u(\tilde{\xi}) s_T(\tilde{\xi}, u'')} |\nabla \tilde{G}| + \frac{\mu_{SGS}}{\sigma_G} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial x_j}, \quad (\sigma_G = 0.25) \quad (式 1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{\xi}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu(\tilde{T})}{Sc} + \frac{\mu_{SGS}}{Sc_{SGS}} \right) \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial x_j} \right\}, \quad (Sc_{SGS} = 0.5) \quad (式 2)$$

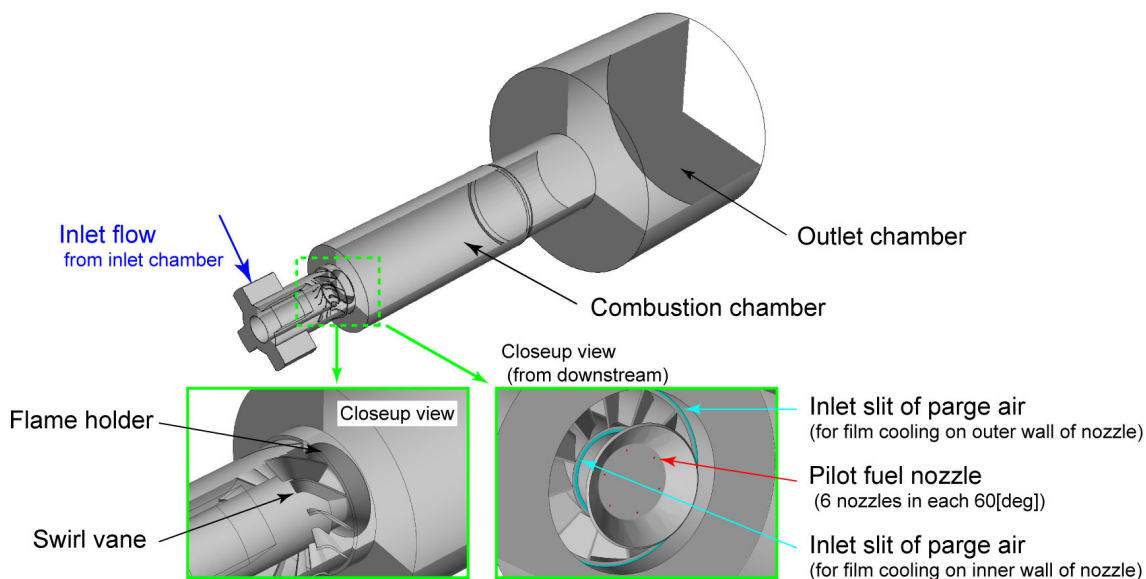
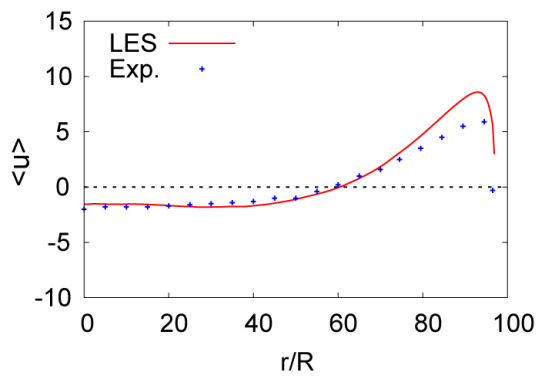
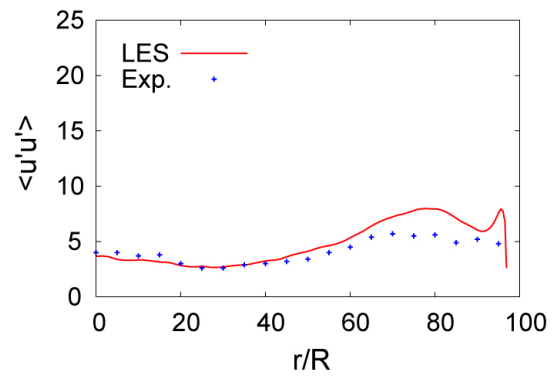


図 1 検証対象燃焼器概念図

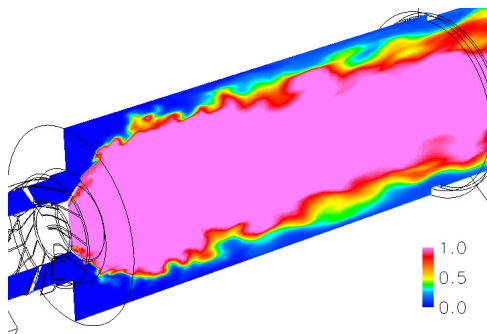


(a) 時間平均軸方向速度

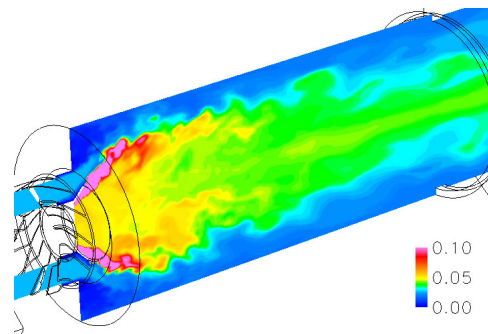


(b) 軸方向速度変動

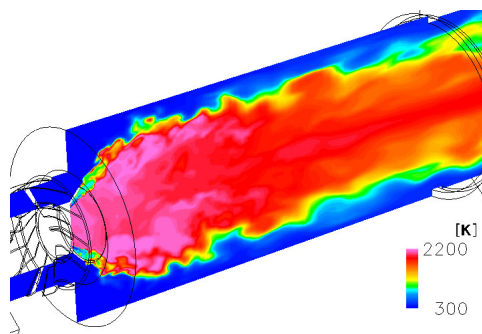
図2 非燃焼乱流場の LES による軸方向速度プロファイル ($x=3/4D$)



(a) スカラ G 分布

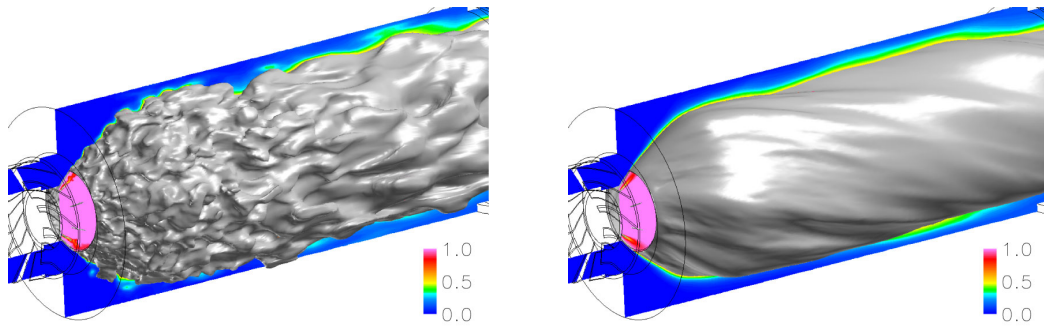


(b) 混合分率分布



(c) 温度分布

図3 乱流燃焼場解析による flamelet スカラ G 及び ξ と温度の瞬時分布



(a) 瞬時火炎面

(b) 時間平均火炎面

図4 予混合火炎面形状

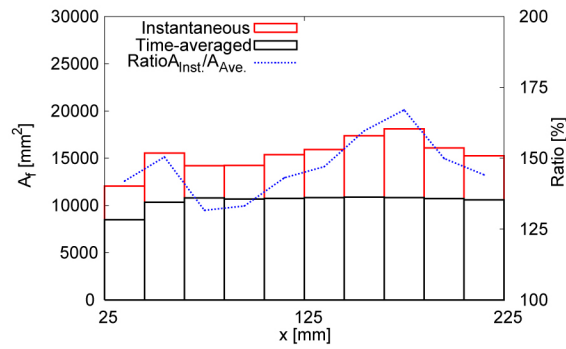
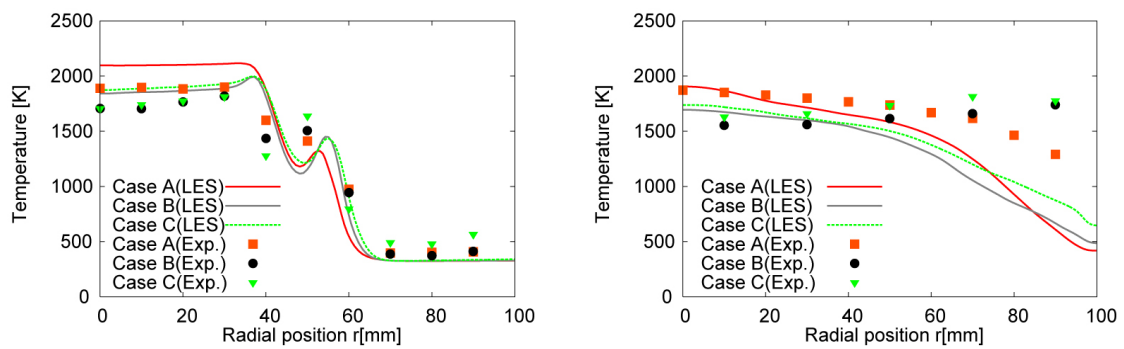


図5 予混合火炎面面積比較



(a) $x=38\text{mm}$

(b) $x=358\text{mm}$

図6 平均温度の半径方向プロファイル比較

表 1 解析条件

	Case A	Case B	Case C
気体圧力	1.0 [atm]		
予混合気温	50 [°C]		
主ノズル出口流速	12.5 [m/s]		
総燃料当量比	0.60	0.60	0.72
Pilot 比	30%	50%	50%
Pilot ノズル出口流速	190 [m/s]	316[m/s]	375[m/s]
主予混合気当量比	0.43	0.31	0.36