

成果概要

課題番号 hp130114

ガスタービン燃焼器における過渡的挙動に付随する問題の原因究明

平野昂志 川崎重工業株式会社 技術研究所

1. 研究の背景と目的

ガスタービン燃焼器とはガスタービンエンジンの主要構成要素のひとつであり、高効率化の要求に伴って燃焼温度の高温化も進んできた。また有害物質である NOx は高温化に伴い生成される量が増加するため、これを低減させることも重要な課題である。このような要求に対応していくため、我々は希薄予混合燃焼を採用しているが、同時に様々な問題の発生が懸念される。例えば希薄可燃限界付近での運用を行った場合、火炎を保持できずに吹き消えてしまう失火現象や、流入空気に脈動があった場合に、それに応答するように燃焼が不安定になる可能性がある。また、燃料と酸化剤を予め混合させる流路中においては火炎が逆流する、いわゆる逆火現象の発生も懸念される。これらは開発過程で予測、対応すべき重要な問題であり、数値解析技術を利用した予測と原因究明、開発の効率化が重要である。

燃焼器の設計に数値解析を積極的に使っていくことにより、試験において計測することが不可能な物理量の取得や、開発コストや工数の削減に寄与が大いに期待されるが、現在の開発で求められるスピードと計算機性能を考慮すると、現状は燃焼器単体の RANS 計算による時間平均場での考察、検討を実施している。しかしながらこの手法ではガスタービン燃焼器の NOx 低減のベースとなっている部分予混合燃焼に関して、微細な渦がもたらす物理量（温度、圧力、流速、燃料濃度）の時空間方向に対する微小な変動を捉えることができないため、正確な NOx 評価も困難となっている。従って、非定常性を考慮できるモデルを用い、予混合の燃焼場に関し詳細に検討を行う必要がある。

これまでの検討[1]により、2気圧のリグ試験条件における NOx 発生量を予測した数値解析では、発生する NOx を 20%の誤差の範囲内で予測できている。しかしこの燃焼モデル[2][3]では 20気圧程度となる実際のエンジン条件においては燃焼場を適切に再現できないという問題があり、燃焼モデルの改良が急務となっている。このように、微細な渦構造を捉える過渡的な挙動を検討する非定常解析を実施し、モデルの検証を迅速に行っていくには、大きな計算リソースが必要となっている。

以上の研究背景および意義を踏まえ、今課題ではガスタービン実機燃焼器を対象とした非定常の数値解析を行い、エンジン条件における燃焼場を再現可能なモデルを構築し、希薄燃焼時に発生しうる様々な問題の予測およびその発生原因究明を目的とする。具体的には層流火炎片モデ

ルを導入した Large Eddy Simulation (LES) を実施し、乱流燃焼速度モデルの改良および検証を行う。そして希薄燃焼（低負荷）時における温度場における特徴の検討、さらには運転負荷に変動があった際の挙動に関し検討を行う。

2. 計算モデル

非定常性の考慮のためには Large Eddy Simulation (LES) を用い、燃焼現象の考慮には層流火炎片モデルによりモデル化を行う。この手法は北海道大学との共同研究にて開発している計算コード“FrontFlow/Red” [4]に実装されており、単缶の NOx 発生量を予測した数値解析においては発生する NOx を 20%の誤差の範囲内で予測できている。LES における SGS モデルは Smagorinsky モデル ($C_s=0.1$) とし、空間積分には 2 次精度中心差分を、時間積分にはオイラー陰解法を用いた。

検討対象は川崎重工業にて開発している産業用ガスタービン燃焼器“L30A-DLE”であり、Fig. 1 にモデル図を示す。この燃焼器は希薄予混合気が流入するメインバーナ、追焚きバーナに加え、100%の燃料が流入するパイロットバーナの計 3 系統のバーナを有している。壁面部分には燃焼器ライナ冷却のための空気が流入するスリットが設けられている。メッシュ数はおよそ 2000 万メッシュであり、壁面は断熱滑り無し条件とした。時間刻み幅は 2.5×10^{-6} [sec.]である。

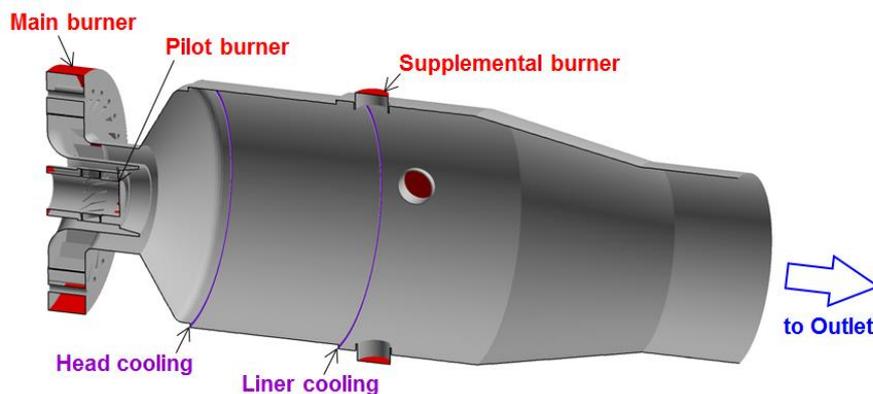


Fig. 1 検討対象 (L30A-DLE 燃焼器)

3. 並列計算の方法と効果 (性能)

本解析コード Front Flow Red (ver3.1)では、計算格子を分割する領域分割法を用いて各ノードにそれぞれの計算領域を割り当て、さらに領域間ののりしろ部の変数に対して、MPI (Message Passing Interface)を用いて通信し合うことで並列化がなされている。乱流燃焼解析ソルバーとして比較的高い並列化効率を有する他、スケーラビリティも悪くはない。

並列化の解析パフォーマンステストは、理化学研究所「京」コンピュータの他、北海道大学情報基盤センタースーパーコンピュータシステム SR16000、九州大学情報基盤研究開発センター高

性能アプリケーションサーバ(HA8000-tc/HT210; Hakozaki)上で行われた。並列化テストでは、L30A-DLE 燃焼器を計算対象とし、上述の乱流モデル（標準 Smagorinsky モデル）および燃焼モデル（2 scalar Flamelet モデル） [5]を利用している。計算格子として、上記の 2000 万要素格子のケースと、それをベースに自動細分化ルーチンを利用して生成した計算格子（1.59 億要素）の 2 つを対象とした。

Figure 2 に並列数を変更した際の計算実時間を示している。この計算実時間は基準ステップ（1000 step）、基準節点数（100 万節点数）で規格化したものである。本解析モデルでは流体の運動量保存方程式、燃焼場を表現するためのスカラー方程式の他に、ポアソン方程式型である圧力補正方程式を毎ステップ厳密に収束させる必要がある。実際に、計算時間の大部分が圧力補正方程式の収束に割かれている。その収束手法にあたるマトリクスソルバーには、共役勾配法（ICCG 法）が用いられている。この手法は収束性が良好であるものの、計算格子数の増加に伴って収束までの反復回数が増加することが特徴である。Fig. 2 において、基準節点数で規格化しているにもかかわらず、格子サイズの大きなケースほど計算実時間を大きいのはそのためである。

今回の並列化テストでは、最大並列数 1000 程度と比較的小規模ではあるが、この並列数においては Hakozaki のパフォーマンスが良いことが示される。ただし、並列数に対する計算実時間の傾きから、京コンピュータを利用したケースの方が、並列数を増加させた際のスケラビリティが良好であることがわかる。乱流燃焼場を精度良く予測するためには、細格子を用いて微細な渦構造を十分に捉えることが重要である。加えて上述の通り、計算格子の細分化（要素数の増加）に伴い圧力補正方程式の反復回数が増加する傾向にあることを勘案すれば、計算格子サイズの大規模化に伴い、大並列数での解析は必須となる。実際、本解析モデルにおいても 1 億要素オーダーの計算格子を用いた乱流燃焼場解析をおこなった場合、1000 並列程度の並列数では流れ場の非定常解を十分に得ることが難しいことがわかった。したがって、今後の課題の 1 つとして「京」コンピュータなどを利用した大並列数での大規模解析が挙げられる。

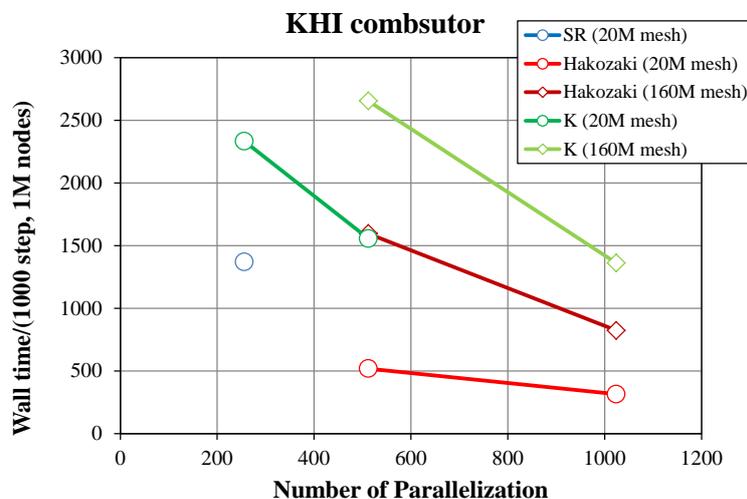


Fig. 2 並列化パフォーマンス

4. 研究成果

4.1 高圧条件に対応した乱流燃焼モデルの検証

Fig. 3 に LES 燃焼解析を川崎重工にて開発している L30A-DLE 燃焼器に適用した際の結果を示す。この検討における空燃比は 49 となっており、断熱火炎温度はおよそ 1300deg.-C であるため、解析より得られた温度は良い一致を示している。また燃焼効率 99.9%と計測結果と良い一致を示しており、NOx 生成量も 3ppm と実機と同程度のオーダーとなっている。以上のことから、本解析手法は L30A-DLE のエンジン条件に対しても燃焼場を適切に評価できることが確認された。

燃焼モデルにおけるパラメータの設定には試行錯誤が必要であり、スーパーコンピュータ「京」を用いることでスピーディにモデルの最適化を図ることができた。

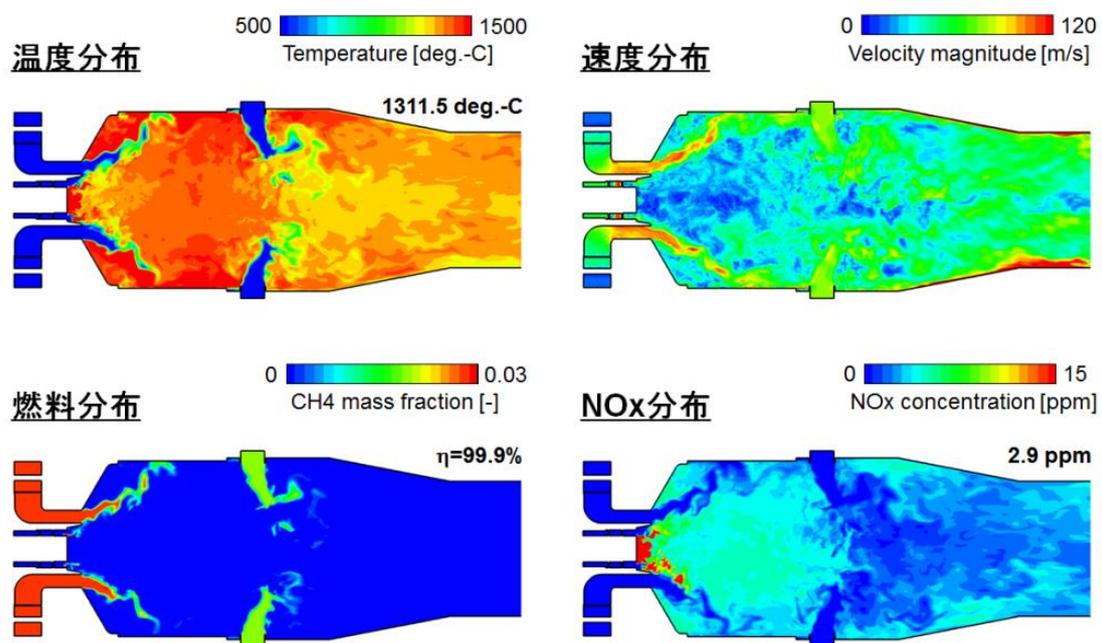


Fig. 3 L30A-DLE 燃焼器中心断面における各物理量分布

4.2 負荷遮断時における挙動の検討

Fig. 3 に示す空燃比 49 の定常状態から、追焚きバーナにおける燃料をカットし負荷遮断を行った。その際の温度分布の推移を Fig.4 に示す。図中の時間 t は燃料カットからの時間経過である。追焚き下流の燃焼領域に着目すると、徐々に温度が下がっていく事が確認できる。また追焚きより上流にあるメインバーナの燃焼領域についても温度の低減が確認でき、追焚きバーナから流入した空気の逆流による影響である。そのためメインバーナにおける燃焼を保持するために、追焚きからの流れがメインに影響を及ぼさないように、流れを分断できる燃焼器構造にすることで保炎性の向上を図ることができると考えられる。

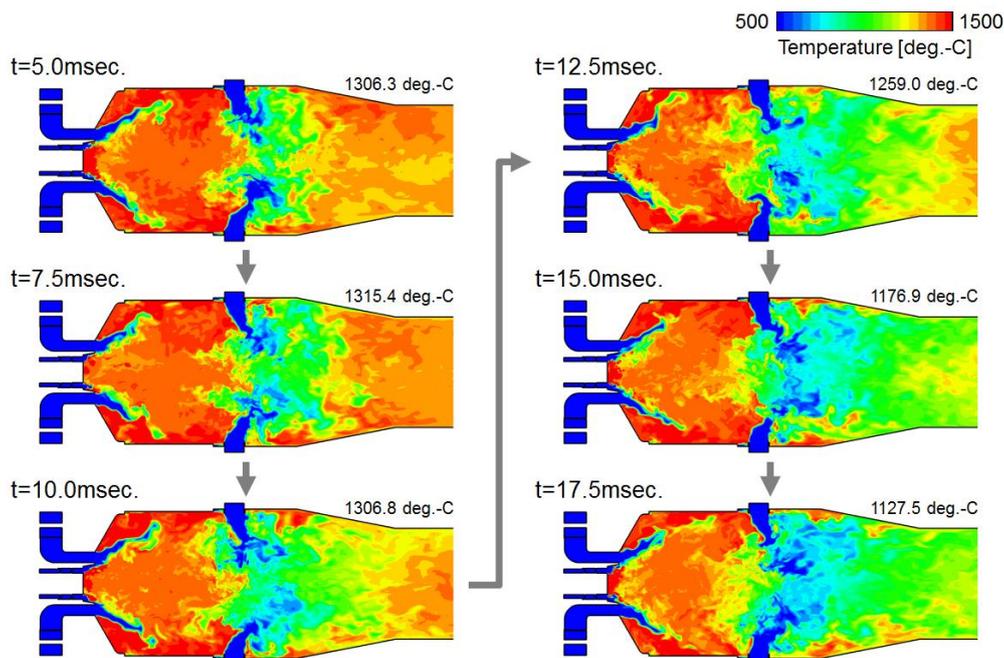


Fig. 4 追焚き燃料をカットした際の温度分布の推移

5. まとめと今後の課題

20気圧の高圧条件に対応した乱流燃焼速度モデルを構築し、L30A-DLE 実機燃焼器に対し、LES 燃焼解析を適用した。従来の Yakhot モデルでは評価できていなかったエンジン条件における燃焼場を再現することが確認でき、設計に対する適用範囲の拡大を図ることができた。また負荷を遮断した際の挙動についても検討し、各バーナの相互作用を確認することができた。

今後は希薄側の可燃限界を正確に評価できるように消炎モデルを考慮し、消炎限界の検討や燃料の投入スケジュールを反映した際の過渡応答の検討などを進めていく必要がある。特に過渡応答解析に関しては実時間で数十秒オーダーの長い時間スパンで計算することになり、またさらに、より詳細に微細な渦構造を捉え解析精度の向上を図ろうとした際は、計算メッシュ細分化に伴いメッシュの規模は数億メッシュとなる。以上のことから今後ますます、大規模な計算リソースの必要性が出てくると考えられるが、スムーズな計算の実行が不可欠である。

本来ならば今回の申請課題の中で、ガスタービンエンジンに搭載される燃焼器全缶（2億メッシュ）を解析することが目標であったが、ジョブの実行頻度および計算可能時間から断念した。前段階として行っていた燃焼器一缶（3000万メッシュ）のモデルにおいても既に、計算ジョブは4~5日に1回程度しか実行できず、実行できたとしても一度につき24時間しか実行できずにいた。1回のジョブにつき1,000ステップ程度進んでいたが、定常状態を検討するまでに少なくとも30,000~40,000ステップ必要である。以上のことを考慮すると、与えられた期間内に完了できるレベルではなかった。今後は、与えられた期間内に実行可能な正味の計算時間も考慮しておく必要があると思われる。

参考文献

- [1] Hirano K., et al., 2012, "Large-Eddy Simulation in an Industrial Gasturbine Combustor for NO_x Prediction" Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68925
- [2] Yakhot, V., 1988, Combustion Science and Technology, 60, pp. 191-214.
- [3] De Soete, G. G., 1975, "Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen," Proceedings of 15th International Symposium of Combustion, pp. 1093-1102.
- [4] Nakashima T., et al., 2007, "Numerical Prediction of a Combustion Flow in a Premixed Combustor with LES and 2-Scalar Flamelet Approach," Proceedings of the International Gasturbine Conference, TS-123
- [5] S. Daniele, P. Jansohn, 2012, "Correlations for Turbulent Flame Speed of Different Syngas Mixtures at High Pressure and Temperature" Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-69611