

審査の結果の要旨

氏名 富永卓司

本論文は、「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」と題して、5章から構成されている。

近年の環境問題への関心の高まりから、工業用熱機関におけるさらなる高効率化、低排出化は急務となっている。代表的工業用熱機関の一つであるガスタービンシステムにおいても、次世代システム開発の重要課題の一つとして、燃焼器における低排出化技術である低 NOx 燃焼技術の開発が挙げられている。現在、ガスタービン燃焼器における低 NOx 燃焼技術としては、予混合燃焼技術の採用が進められているが、不安定な燃焼特性など設計における困難も多い。このため、より高度な燃焼技術の実現に向けては、燃焼器内現象を詳細に把握し、それに基づいた燃焼器設計が求められており、従来技術では実現されていない瞬時局所状態に対する高精度な予測手法の必要性が高まっている。

本論文では、以上のような燃焼技術開発における現象予測の要求に対して、従来技術による現象把握の限界を打破するため、対象現象である複合乱流燃焼場の特性により適する数値予測手法を導入した実用乱流燃焼場に適用可能な数値解析手法の構築と、同構築手法による実用燃焼器内予混合乱流燃焼場の数値予測に関する研究について述べている。

第1章においては本研究の背景である工業用ガスタービン燃焼器の現状とともに低 NOx 燃焼技術の重要性を述べ、その実現に必要な要素技術として、希薄予混合燃焼器内における非定常乱流燃焼場の詳細現象把握が必要である事を述べている。また、その要件を満足するための数値予測手法の構築に向け、従来の乱流燃焼場に対する数値予測手法の研究について乱流モデリングと燃焼モデリングの両面から調査、概観している。その結果に基づき、本研究の目的を、マルチスケール現象である実用燃焼器内乱流燃焼場を精度良く解析可能で、予混合と拡散の両燃焼が混在する複合燃焼場を取り扱う事ができ、非定常現象の解析にも適したガスタービン燃焼器内乱流燃焼場の数値予測システムの構築に設定している。

第2章では、第1章において述べた従来研究の内、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 Large-Eddy Simulation による乱流モデリングと flamelet アプローチ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着目し、同解析手法の拡張により実用乱流燃焼場への適用性を高めることによって、予混合燃焼と拡散燃焼の両燃焼形態が混在する複雑乱流燃焼場のための数値解析モデルを構築している。数値予測手法の拡張においては、従来 flamelet アプローチによる取り扱いが不可能とされていた複合燃焼現象（部分予混合燃焼現象）に対して、“2-scalar flamelet アプローチ”と呼ぶ2種の火炎面追跡スカラを用いた flamelet アプローチを導入する事で、その解析を可能にしている。この拡張と乱流燃焼モデルの導入及び乱流場解析とのカップリングを定式化する事によって、ガスタービン燃焼器内乱流燃焼場の数値予測システムの根幹となる解析手法を構築している。

第3章では、第2章において構築した数値解析手法を非構造格子による汎用 LES 乱流解

析コードへ実装し、実用燃焼器の複雑形状へも適用可能な数値予測システムを構築している。また、同予測システムを希薄予混合燃焼器を想定した供試体形状内における部分予混合燃焼場に対して適用することで、その有効性の検証を行っている。検証解析の結果から、第2章において構築した 2-scalar flamelet アプローチによる拡張が複合乱流燃焼場の解析を可能とした事が示されている。また、本解析手法の特徴である大規模非定常現象の直接的な解析が、乱流変動により生じる大規模な火炎面構造を直接捉え、大スケールでの燃焼速度の加速機構を再現しており、この効果にサブグリッドスケールにおける乱流燃焼速度の評価モデルを加える事によって、燃焼器内の予混合火炎の保炎機構が再現されることを示している。さらに、計測値との比較から、燃料条件に依存する定性的な温度分布の変化が予測可能であることを示し、本研究において構築された数値予測手法が燃焼器内の複合的な乱流流動現象によって形成される燃料濃度分布を再現し、燃焼反応モデルによって適切に燃焼気体温度と予混合気燃焼速度を予測した結果であることを述べている。以上の検証結果から、本研究において構築した数値予測システムの、燃焼器開発設計段階における器内現象予測システムとしての有効性が示されている。

第4章では、第3章における解析で得られた結果を元に、本論文で構築した数値予測モデルの各要素に関する影響度評価を行っている。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が、解析条件と解析モデルの両面について明らかにされている。また検証解析結果に基づく分析から、実用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る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、予混合気濃度の空間的な不均一性によって火炎厚さへの影響が生じている事を示し、今後の数値予測においては、これらの影響を含めたモデリングが必要かつ重要となる事を指摘している。これらによって、本研究で構築された数値予測システムの更なる予測精度改善に向けた指針が示されている。

第5章は総結論であり、Large-Eddy Simulation を用いた複合乱流燃焼場のための数値予測手法の構築、検証と、実用予混合燃焼器内における乱流燃焼場に関して本論文で得られた知見、成果がまとめられている。

以上に述べたように、本論文によって、工業用燃焼器開発において渴望されている高度な低 NO_x 燃焼の設計に必要な、実用予混合燃焼器内の複合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。これにより、実用燃焼器設計におけるより高度な燃焼設計の実現が期待できる。また、解析結果を用いた評価と考察を加えることにより、構築手法を実用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た。これにより、実用燃焼器内現象において解明されるべき現象が明らかになり、今後の研究における有意義な指針が示されたといえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。