

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名

謝 正海

本論文はエンジン解析コード KIVA のソースコードを出発点とし、ガスタービン実用燃焼器への応用を目指し、論文提出者によるその修正と新たな機能の追加を行い、汎用性の高い燃焼器解析方法を確立したものである。燃焼器設計に応用可能にするために、液体燃料噴霧を含め、乱流 RANS モデル、渦消散モデル、アレニウス燃焼モデル、多段階反応機構モデルを用いて計算コードは構築されている。

従来の燃焼器解析は、燃料の混合等を含め燃焼反応を含まない計算は設計支援に役立っているが、燃焼を含んだ解析は実用レベルにあるとは言い難い。これは、燃焼器の中は物理過程と化学反応過程が同時に進行し、互いに影響を及ぼし合う複雑な場であるために、理論的にそれを正しく予測することが極めて困難であることによる。従って、現在までの燃焼器開発は、リグテスト装置等を用いた燃焼計測データによって実施されてきた。しばらくの間は、実験を基本にした研究開発が続くものと考えられるが、より効率的で計画的な開発を行うために、燃焼計測技術にあわせて、実用的な燃焼器解析ソフトの開発が期待されている。精度の良い実用的な燃焼解析ソフトを用いることにより、設計パラメータを動かしたときの特性への影響調査をシミュレーションで行うことができ、現在多大な資源と期間をかけて行われている新しい燃焼器開発を、短時間で効率的に実施できる可能性が高い。

近年、計算機の発達および低価格化と、燃焼の数値解析法の発展に伴って、従来非常に困難であった燃焼器の数値解析が行われるようになってきた。多くの反応性熱流体汎用解析コードが市販されていることにより、燃焼器の設計・開発段階で設計者が自らその設計業務の一部として数値解析を行う時代になりつつある。しかしながら、現段階において、実用的な燃焼器数値解析コードが必ずしも普及するには至っていない。通常の市販コードは高価で、ソースコードも非公開であり、信頼性の問題を含めて、使用者の各々の要求に応じられない欠点を持つ。これらと比較し、KIVA はすべてソースコードとして公開され、その改変を自由に行うことができる。エンジン燃焼室向けに開発された本数値解析コードが、論文提出者の博士課程における研究活動として、ガスタービン燃焼器にも応用可能と

判断した。従って、本論文で燃焼器解析研究のコードとして KIVA を選択した。

本論文では、まず KIVA でディーゼルエンジンの液体噴射、拡散燃焼における数値計算を行い、実験とよく一致することを確認した。つづいて、コードを修正することにより、実用燃焼器の多数個流入口を持つ流れを表現することができ、検定問題として、同軸噴流実験と定性的に合うことを示した。さらに、ガス希薄予混合燃焼器 LPC(Lean Premixed Combustor)の実験を比較対象とし、軸対称モデルおよび3種類格子の3次元モデルで燃焼解析を行い、燃焼器解析における汎用性の大きいシミュレーション手法を確立した。

本論文の解析対象であるダブルスワラー燃焼器は、近年開発されてきた LPC 燃焼器の一種で、希薄予混合二段燃焼方式を採用しながら、広い燃焼範囲において低  $\text{NO}_x$  と安定燃焼を実現できるものである。本燃焼器の実験は、企業の研究所において実施され、その一部が公表されているが、燃焼数値解析について研究が公表されたことはまだない。ダブルスワラー燃焼器で旋回流や複数の再循環領域は存在し、希薄メタンは Pilot, 1st, 2nd ノズルの3個所から、空気は冷却スロットと希釈孔から燃焼器に流れ込む。極めて複雑な流れおよび燃焼形態が現れ、数値解析するためには精度のよい乱流モデル、および燃焼モデルが要求されている。本論文で反応流と旋回流を主眼にして燃焼反応機構と乱流モデルの両面から燃焼器解析の精度に与える影響を考察した。即ち、メタンの1段階、2段階および4段階反応機構の各々のモデルで実験の火炎面位置を正確に捕らえることができた。特に4段階反応機構においては、温度分布などの定量的特性を正確に表現できることを確認した。段階を増すにつれて、反応機構のメカニズムが物理、化学的に実際の現象に近づくことが明らかになった。また、乱流モデルを中心とし、旋回流に対応できると言われる幾つかの乱流モデルを用いて解析を行った。従来 KIVA に使われている  $k-\epsilon$  モデル、RNG  $k-\epsilon$  のほかに、LPS  $k-\epsilon$ 、Chen  $k-\epsilon$ 、陽的代数応力モデル(EASM)を KIVA コードへ組み込み、乱流モデルによって予測温度分布に与える影響も検討した。しかし、LPC 燃焼器解析においては、乱流モデルよりも、化学反応機構が重要な役割を果たすことが明らかになった。最後に、研究開発された解析コードを用いて設計への応用を試み、入口空気旋回数、負荷、空気希釈量などの設計パラメータを動かした時の特性への影響調査を行った。評価基準として、燃焼器の出口排ガス  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、出口温度の均一化評価パラメータ MWSD(mass-weighted standard deviation)あるいは PF(pattern factor)などを定量的に評価することによって、設計の方向性を明確に示すことができた。

なお、本論文で申請者は液体燃料噴射、燃焼、乱流等を含む膨大な KIVA コードの構造、数値解析方法を詳しく調査した上、コードの多数のバグを直し、世界に普及しているコードの信頼性を高めた。KIVA を改造することによって燃焼器解析へ適用することにより、そのコードの普遍性と拡張性を示すことができ、燃焼シミュレーションの分野に大きな貢献を行った。特に LPC 燃焼器解析において、KIVA を用いる解析は世界初の試みである。

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。