

審査の結果の要旨

氏名 齋木 悠

本論文は、「大規模渦構造の操作による旋回同軸噴流混合・燃焼の能動制御」と題し、6章より成っている。

資源制約、環境保全に配慮した持続型社会の構築は、21世紀の最重要課題である。小型分散エネルギーシステムは、建設導入が容易で、様々な燃料が利用できるため、従来の大型発電所と比較し、エネルギーを多様に、かつ高効率に利用できる可能性を有する。ただし、機器の小スケール化に伴う、要素効率の低下や環境汚染物質の増加は克服すべき課題であり、例えば、オンサイト発電用マイクロガスタービンなどで使用される小型燃焼器では、負荷率の大きな変動に伴い、燃焼効率の低下、NO_x排出量の増加および火炎の不安定化が懸念される。一方で、燃焼現象は、熱・物質・運動量の輸送・拡散に強く依存するため、流体制御による燃焼特性の著しい改善が期待される。以上を踏まえ、本論文は、負荷条件に応じて、ガスタービン燃焼器内の流動構造を変化させ、常に健全な燃焼特性を維持し得る能動制御手法の開発を意図して行われた実験的研究である。燃焼器内の熱流動をモデル化した旋回同軸噴流燃焼場を対象とし、内外剪断層中における大規模渦構造の操作を通じて、燃料・空気混合および燃焼特性の改善を試みている。

第一章は序論であり、まずマイクロガスタービンが有する小型分散電源としての優れた特性と克服すべき課題を列挙し、小型燃焼器に対する能動制御技術の有用性を提示している。次に、ガスタービン燃焼器内の基礎的な流動形態である噴流現象を取り上げて、不安定性と大規模渦構造、またその制御手法に関して、過去の研究を踏まえ、非旋回および旋回噴流各々の観点から、それらの相違点も含め述べている。さらに、噴流中の大規模構造の操作を通じた燃焼制御の従来研究を紹介している。中でも、フラップ型マイクロアクチュエータを用いた同軸噴流混合・燃焼の制御例に着目し、その有効性を述べると共に問題点を挙げている。即ち、フラップ運動に伴う渦生成機構が未だに不明であること、実用的な制御手法の提案には実機に近い流動・燃焼場での制御の評価が必要であることを指摘している。以上のことから、フラップによる制御入力の実態を解明し、さらにガスタービン燃焼器内で多用される旋回同軸噴流燃焼を対象として、負荷条件に応じて渦構造・混合特性を操作し、燃焼特性を改善し得る能動制御手法を構築する

ことが、本論文の目的であると述べられている。

第二章では、一連の実験を行うための、旋回同軸噴流装置、レーザ計測・燃焼ガス計測手法および制御手法について詳説されている。案内羽根式旋回器における羽根の枚数・形状・角度に関して、その設計指針を記述すると共に、旋回強度が制御効果に及ぼす影響を解明するため、異なるスワール数の旋回器を製作したことが述べられている。フラップ群は、環状旋回噴流の外側剪断層に直接かつ局所的に攪乱を投入するため、外側ノズル内壁に配置している。また、旋回噴流は三次元的な流れであるため、3成分速度場を計測可能なステレオ PIV を採用したこと、そしてその計測原理を述べ、さらに、不確かさ解析を通じた各種画像取得・処理パラメータの最適化を図り、高い精度での測定を保証している。スカラー場計測のための PLIF および CO/NO_x 排出量計測に関しても、同様に不確かさ解析を用いることで、目的に照らして十分な精度で測定可能であることを確認している。

第三章では、制御素子として用いたフラップ型アクチュエータによる制御入力 of 解明を行っている。本制御手法の基礎的なメカニズムを明らかにするため、非旋回同軸噴流を対象とし、ノズル出口近傍を拡大撮影する PIV を用いて、大規模渦生成の起点となる速度攪乱およびその発達過程を詳細に調査している。その結果、まず、フラップ振り下ろし運動に伴い、負と正の強い半径方向速度が誘起され、これらが大規模渦輪の生成起点となることを示した。さらに、速度攪乱の発達様相は、フラップ駆動周波数に大きく依存し、駆動周波数が高い場合には、前後の制御周期で誘起された正と負の半径方向速度により、一つの渦輪を形成することを示した。このことから、本手法では、フラップ駆動周波数を変化させることで、噴流剪断層中に放出する渦の径を制御可能であることを明らかにしている。

第四章では、フラップを旋回同軸噴流に適用し、メタン・空気流体の混合制御を試行している。その結果、まず、フラップ運動により、スワール数に依らず渦輪の生成起点となる、非旋回時と同程度の半径方向速度を誘起できることを確認しており、本手法により、旋回噴流の外側初期剪断層においても大規模渦生成を制御できることを明らかにしている。ただし、その一方で、内側剪断層における渦構造は、スワール数に強く依存することを見出している。旋回同軸噴流では、環状噴流の接線方向速度成分により、噴流中心部の圧力が低下し、中心噴流が加速されるため、ノズル近傍における運動量流束差が小さくなる。そのため、非旋回噴流と比較して内側剪断層中の渦強度が弱まり、中心流体の輸送・混合促進効果の低下を来すことを指摘している。一方、スワール数が低い条件では、中心噴流の加速が小さく、渦輪の作用により早期に可燃混合気を形成でき、さらにフラップ駆動周波数を変化させることで、メタン流体の輸送・混合特性を制

御可能であることを明らかにしている。

第五章では、混合制御実験で得られた知見を踏まえ、旋回同軸噴流燃焼を対象とし、ガスタービンの負荷変動を想定した異なる出力・当量比条件の下で、燃焼特性の制御を試みている。本実験条件下では、浮き上がり火炎を形成するため、火炎基部上流の混合制御を通じた特性改善を意図している。その結果、まず、制御により渦を連続的に放出することで、濃度乱れの小さい可燃混合気を形成し、希薄燃焼限界下の当量比条件および高運動量流束比条件においても、火炎の安定保持が可能となることを示した。さらに、異なる負荷条件に応じて、フラップ駆動周波数を選択することで、輸送・混合特性を制御し、 NO_x 排出量を増加させることなく、CO 排出量を最大で 50%程度改善できることを明らかにしている。

第六章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている

以上、本論文では、ガスタービン燃焼器で多用される旋回同軸噴流燃焼において、大規模渦構造の操作を通じて燃料・空気の混合過程を制御し、幅広い負荷条件において、燃焼特性を改善できることを明らかにしている。本研究で得られた成果は、期待される小型分散エネルギーシステムの高性能化に繋がるだけでなく、流体・燃焼制御手法に新たな知見を加えるものであり、熱流体力学をはじめ機械工学の学術の上で寄与するところが大きい。

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。