

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 齋木 悠

有限な資源と地球環境の保全に配慮した持続型社会の構築は、21世紀型産業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、様々な燃料が利用可能であるため、従来の大型火力発電所と比較し、エネルギーをより多用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る。例えば、小型分散電源の中核であるマイクロガスタービンで使用する小型燃焼器では、一般に、低窒素酸化物および高効率燃焼を達成できる希薄予混合燃焼方式が採用されている。しかしながら、予混合火炎の優位性は、限られた流動・燃焼条件でのみ成り立ち、通常、当量比が過少となる部分負荷運転時には、火炎を安定維持できず、拡散燃焼を主体とした運転方式に切り替える必要がある。拡散火炎は安定性に優れる一方で、火炎温度が高くなり、また燃焼反応も緩慢になるため、窒素酸化物排出量および燃焼効率が悪化する欠点を有する。小型分散エネルギーシステムの運転時には、負荷率の大きな変動を伴うと予想され、部分負荷条件下での環境負荷増大は、導入の障害となりうる。一方で、燃焼現象は、分子レベルの化学反応と熱・物質・運動量の混合・拡散が深く関わり合った現象である。そこで、流れを積極的に制御することで、混合・拡散過程を操作し、状況に応じて燃焼特性の改善を行う能動制御システムの構築が期待される。

以上の背景を踏まえ、本論文は、ガスタービン燃焼器内の典型的な流れ・燃焼場である旋回同軸噴流燃焼を取り上げ、負荷条件に応じて流動構造を変化させ、常に健全な燃焼特性を維持できる能動制御手法の提案を行った実験的研究である。本研究では、旋回同軸噴流内外せん断層中における大規模渦構造の操作を通じて、燃料・空気の混合、さらには燃焼特性を改善することを意図している。そのための噴流制御素子として、フラップ型マイクロ・アクチュエータを採用した。フラップ群は、案内羽式軸流スローラを備えた旋回同軸噴流ノズル出口内壁に配置され、環状旋回噴流の外側せん断層に攪乱を直接与える。なお、実験を通じて、内側および外側の流体には、メタンおよび空気をそれぞれ用いた。制御に伴い変化する流動・大規模渦構造および混合特性の評価は、2成分粒子画像流速計 (PIV)、2次元3成分粒子画像流速計 (Stereoscopic-PIV) および平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) により

定量的に行った。

本研究で用いるフラップ型マイクロ・アクチュエータは、これまでに、単軸噴流および同軸噴流に適用され、せん断層中の大規模渦構造を柔軟に制御できることが実証されている。しかしながら、フラップ運動に伴い、噴流初期せん断層に投入される速度攪乱やその大規模渦構造への発達過程は、未だに明らかにされていない。そこで、研究の第一段階では、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フラップ制御入力およびその発達過程を詳細に調査した。なおここでは、本制御手法の基礎的なダイナミクスを明らかにするために、旋回を与えない同軸噴流を計測対象としている。実験を通じて、全てのフラップは同位相で駆動され、入力信号波形は最も制御効果が高い鋸波形とした。このとき、フラップは、鋸波状に徐々に立ち上がり、最大変位に達した後、壁面に急速に振り下ろされる。PIV計測の結果、フラップ振り下ろし動作に伴い、環状噴流外側せん断層には、負（振り下ろし方向に対して逆方向）および正の強い半径方向速度が誘起され、これらが大規模渦生成の起点となることを明らかにした。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する。フラップ駆動周波数が低い場合には、上記の負および正の半径方向速度がそれぞれ発達することで、外側せん断層内に2つの大規模渦輪が形成される。一方で、駆動周波数が高い場合は、ある制御周期で誘起された正の半径方向により形成される渦と次の周期で誘起された負の半径方向速度による渦が合体することで、一つの大規模渦輪を形成する。従って、駆動周波数を変化させることで、正・負の半径方向速度の流れ方向間隔（移流速度/フラップ駆動周波数）を調整し、外側せん断層に放出する渦の大きさを柔軟に制御可能である。なお、このとき内側せん断層の渦の大きさも同様に調整でき、中心流体の輸送・混合特性を制御できる。

これを踏まえ、研究の第二段階として、フラップ型アクチュエータを旋回同軸噴流に適用し、二流体の混合制御を行った。旋回強度の指標であるスワール数は2条件とし、制御パラメータとしてフラップ駆動周波数を変化させた。その結果、はじめに、フラップ運動によって、旋回噴流の初期せん断層においても、スワール数に大きく依存せず、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た。前述した通り、これは、渦生成の起点となる速度攪乱であり、本手法により、旋回同軸噴流外側せん断層内の大規模渦生成を制御できることを明らかにした。一方で、内側せん断層における大規模渦生成の様相は、スワール数に強く依存する。旋回同軸噴流では、環状噴流の接線方向速度成分により、噴流中心部に負の流れ方向圧力勾配が形成されることで、中心噴流が加速する。さらに、その影響は、旋回速度の増加に伴い大きくなる。そのため、スワール数が高い条件では、ノズル近傍における内外噴流の運動量流束差が顕著に低下し、中心流体の輸送・混合に支配的な役割を担う内側せん断層中の渦輪を形成できない。一方で、スワール数が低い条件で

は、中心噴流の加速が比較的小さいため、内外せん断層に大規模渦輪を形成可能である。従って、旋回同軸噴流において、顕著な混合制御効果を得るには、ノズル径比を調整し、中心噴流の運動量流束を小さくすることが有効であると言える。また、スワール数が低い条件では、フラップ駆動周波数を変化させることで、せん断層中における大規模渦構造を操作でき、混合特性を制御可能である。メタン・空気の混合特性を定量的に評価した結果、フラップ駆動周波数が高いストローハル数 $St_a \geq 1.0$ の制御噴流では、渦輪の連続生成により中心メタン流体が輸送され、非制御時と比較し早期に濃度乱れの小さい可燃混合気を形成できることを明らかにした。スワール数が低い条件においても、中心噴流が加速するため、非旋回同軸噴流の制御で得られるようなノズル出口直下流での急速均一混合は難しい。ただしその一方で、内側せん断層付近において、局所的に混合を促進し層状可燃混合気を形成できる。またこのとき、フラップ駆動周波数を変化させ、渦の大きさを調整し、中心流体の輸送範囲を制御できる。

この知見を踏まえ、研究の最終段階では、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模擬した異なる3つの出力・当量比条件の下で、燃焼特性の制御を行った。なお、本実験条件下では、浮き上がり火炎を形成する。そこで、大規模渦構造の操作により火炎基部上流の混合過程を制御することで、特性改善を試みた。ここで、燃焼特性は、保炎特性、一酸化炭素 (CO) および窒素酸化物 (NO_x) 排出量により評価した。その結果まず、混合制御により、当量比および運動量流束比に対する保炎限界を、非制御時に対して、顕著に改善できることを明らかにした。特に、フラップ駆動周波数が高い条件では、渦を連続放出し、濃度乱れの小さい可燃混合気を火炎に供給することで、当量比が希薄燃焼限界よりも小さい0.3の条件においても火炎を安定保持可能である。なお、このときの運動量流束比は、非制御時における保炎限界の3倍程度大きい。さらに、負荷条件に応じて、フラップ駆動周波数を段階的に変化させることで、燃焼排出ガス特性を顕著に改善できることを示した。比較的、当量比が高い条件では、 $1.0 \leq St_a \leq 1.6$ の制御により、渦輪を連続生成して混合を促進し、酸化剤が豊富な混合気を供給することで、 NO_x 排出量を保持したまま、CO排出量を50%程度改善できる。一方で、当量比が低い条件では、 $St_a \sim 1.6$ の制御により、渦径を小さくし、過大な混合を避け、燃料豊富な層状混合気を形成することで、同様に、 NO_x 排出量を保持したまま、CO排出量45%程度改善できることを明らかにした。

以上、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実証した。