

## 論文の内容の要旨

論文題目            マイクロ制御素子による噴流燃焼の能動制御

氏     名            栗本 直規

本研究は、せん断流の操作を通して噴流燃焼を能動制御する手法を提案・実証することを目的とした実験研究である。燃焼器内の基本的な流れ系として同軸二重噴流を選択し、メタン燃料の浮き上がり火炎あるいは保炎器後流火炎を制御対象とした。制御には、フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群\*を配備した同軸二重ノズルを用いた。フラップは環状噴流外側せん断層に作用し、大規模渦構造の時空間発展を能動的に制御する。火炎特性として、火炎の位置とその安定性、熱発生率の変動、未燃炭化水素および窒素酸化物の排出量を考慮し、制御効果の定量計測を行った。その結果、火炎特性は、異なる流動条件のもとでも、渦放出を制御することにより顕著に改善されることが示された。また、粒子画像流速測定法(PIV)及びレーザー誘起蛍光法(LIF)により、制御機構を解明した。

マイクロガスタービン・小型分散エネルギーシステムは、大型発電所と異なり、エネルギーをより系統的に高効率に利用できる可能性を有している。しかし、機器の小型化にともなう要素効率の低下や環境汚染物質の増加が克服すべき課題である。一般に、小型燃焼器では負荷の変化が頻繁であるため、受動的な混合・保炎機器を用いて低 NOx 高効率安定燃焼を維持することは難しい。例えば、全負荷条件に対して最適設計された予混合燃焼器では、部分負荷時には当量比が低下して燃焼速度が減少したり、流量が減少して循環流が弱化したりする。このため、設計位置で健全な予混合火炎を維持することができず、顕著な窒素酸化物排出を伴う拡散火炎を主体とした運転に切り替える必要がある。従って、小型燃焼器の一層の高性能化には、高負荷変動火炎を効果的に制御できる、省スペースで簡素な燃焼制御手法の構築が必要である。

噴流は、流体力学的には自由せん断流に大別され、産業界における最も基本的な流動様式の一つである。噴流の大規模渦構造と初期の物質輸送はせん断層に生じる渦輪の挙動に支配される。このため、古くから、せん断流の制御を通して噴霧、混合、音響ノイズなどの噴流特性を改善に関する試みがなされ成功を収めている。しかし、流動条件に応じて制御量を調整し、噴流火炎の特性を改善しようとする試みは皆無である。以上を踏まえて、本研究では、せん断流の操作を通して噴流燃焼を能動制御する手法を提案・実証することを目的とした。

本研究では、燃焼器内の基本的な流れ系として同軸二重噴流を選択し、メタン燃料の浮き上がり火炎あるいはブラフボディ型保炎器後流の火炎を制御対象とした。制御ノズルとして、フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群\*を外側ノズル内壁に配備した同軸二重ノズルを提案した。フラップ群は、外側せん断層へ作用し、同軸二重噴流の大規模渦構造とそれに伴う燃料の初期輸送・混合特性を能動制御する。火炎特性として、火炎の位置とその安定性、燃焼負荷率の変動、未燃炭化水素の排出量、窒素酸化物の排出量を考慮した。火炎位置とその安定性に関しては、それらが保炎機構に強く支配されると考え、浮き上がり火炎を制御対象とした。燃焼負荷率の変動、未燃炭化水素及び窒素酸化物排出に関しては、それらが混合過程に強く支配されると考え、ブラフボディ型保炎器後流の火炎を制御対象とした。

実証実験の第 1 段階として、フラップ動作がノズル近傍の大規模渦構造に与える影響を系統的に理解するため、レイノルズ数 2400 の、非燃焼のメタン・空気同軸二重噴流の制御を行った。フラップ動作のパラメータとして、変位波形、隣り合うフラップ間の位相差及び動作周波数を考慮した。その結果、鋸波信号にもとづくフラップ動作をせん断層に作用させることで、せん断界面の急峻な変形を起点として、大規模渦を制御入力と同期して生成できることを示した。これにより、コラム不安定などの噴流の不安定モードに依存せずに、渦放出を人為的に制御できる。制御噴流の大規模渦構造は、内外噴流の運動量流束比、駆動周波数の影響を強く受ける。特に、中心噴流よりも環状噴流の運動量流束を十分に大きくすることで、内側せん断層の渦を強化し、混合を顕著に促進できることを示した。

制御機構の解明には、軸断面および横断面の PIV 及び LIF 計測を用いた。その結果、混合過程に関しては、ノズル近傍では渦輪による輸送・伸長が支配的であり、下流では渦輪の崩壊に伴う細かいスケールの乱れと流れ方向に軸を持つ渦による混合が支配的であることが分かった。さらに、制御同軸噴流の大規模渦構造及び物質輸送・混合特性は、フラップにより生成される渦の直径  $lv$  及び渦放出の長さスケール比  $k = lv/(Uc/fv)$  で特徴づけられることを明らかにした。渦の直径  $lv$  は半径方向の輸送範囲を決める。渦放出の長さスケール比  $k$  は、渦の直径と次の渦が放出されるまでに渦が移流する距離の比であり、濃度変動を特徴づける。本制御では、大規模な渦輪を制御入力と同期して生成できるため、フラップの周波数を大きくすることで、大規模渦を最密誘起し、物質初期輸送を最適化できる。また、制御周波数を過大にすることで、渦の直径を調整し、濃度変動を抑制したまま中心流体の輸送範囲を柔軟に制御できる。

第 2 段階として、メタン燃料の浮き上がり火炎及びブラフボディ型保炎器後流火炎の制御を行った。まず、3.5 kW の浮き上がり火炎に対し、異なる保炎機構をもつ安定火炎の作成を試みた。その結果、鋸波信号にもとづくフラップ動作をせん断層に作用させることにより、大規模渦をノズル近傍に最密誘起し、火炎をノズル極近傍に安定保持できることを示した。制御火炎は広い流動条件の下で安定であり、吹き消え限界は顕著に拡大する。制御機構の解明には、燃焼流及び等温流の位相平均 PIV, LIF 計測を用いた。その結果、可燃混合気層は、大規模渦の作用により顕著に蛇行し、ノズル近傍では流速の遅い雰囲気流体との境界付近にまで輸送され、下流では広範囲に分布することが分かった。このため、火炎上流端は、ノズル近傍で流速の遅い雰囲気空気との境界付近に形成される。また、燃焼流の PIV 計測から、火炎面での速度ベクトルを条件抽出することで火炎伝播速度を求め、制御火炎の安定化機構を明らかにした。その結果、火炎安定化は、渦の上流側に形成される可燃混合気層の供給周期とその燃焼時間が釣り合うためであることが示された。

一方、矩形信号にもとづくフラップ動作を作用させることにより、火炎をポテンシャルコアよりも下流で安定保持できる。燃焼流の瞬時 PIV 計測から、火炎安定化は、大規模渦がノズル近傍で崩壊し、火炎基部下流の速度変動が抑制されるためであることが示された。

次に、リング状のブラフボディ型保炎器後流の火炎を制御した。ここでは、上流の混合過程を制御することにより、異なる当量比条件のもとで火炎特性を改善することを試みた。その結果、設計条件を想定した当量比 0.72 では、大規模渦を連続放出させることにより、熱発生率の変動を抑制し、NO<sub>x</sub> 排出の増加を伴わずに CO 排出を顕著に改善できることが示された。これは、混合が顕著に促進し、速度・濃度変動の小さい希薄混合気が供給されるためである。

一方, 非設計条件を想定した当量比 0.48 では, 小スケール渦を連続放出させることにより, 熱発生率の変動を抑制し, 火炎を安定保持できる. これは, 大規模な混合を抑制して, 可燃濃度の混合気を保炎器近傍に局所的に生成できるためである. また, このときも, NO<sub>x</sub> 排出の増加を伴わずに CO 排出を改善できる.

\*鈴木(宏)・笠木・鈴木(雄), 日本機械学会論文集 B 編, 65 巻 639 号, 1999, 3644-3651.

(以上)