

[別紙 2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 栗本 直規

本論文は、”マイクロ制御素子による噴流燃焼の能動制御”と題し、6章より成っている。

小型分散エネルギーシステムは、大型集中発電プラントとは対照的に、エネルギーを多様な形態で、系統的に、より高効率に利用できる可能性を有している。しかし、一般に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排出増加が克服すべき課題である。特に、小型分散システムにおいては負荷の頻繁な変化を伴うので、いかにして燃焼器内で高効率でクリーンな燃焼状態を維持するかが重要な技術課題である。小型燃焼器内の燃焼制御に関しては、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く、新たな能動的な燃焼制御手法の構築が必要であると言える。本論文は、初期せん断層中の渦生成の操作による噴流燃焼の能動制御手法を提案し、その制御効果の実験的検証を試みたものである。

第一章は序論である。まず、産業応用の観点から従来の燃焼制御技術を論じ、小型燃焼器の高性能化には省スペースで簡易構造の噴流燃焼制御手法の開発が必要であると述べている。次に、噴流

燃焼に関する従来研究を概観し、単軸及び同軸噴流の大規模渦構造、浮き上がり火炎の保炎機構、保炎器後流火炎の構造、およびそれらの制御技術に関して、これまでに得られている知見に触れている。特に、噴流の大規模渦構造の形成と物質輸送は、初期せん断層に生じる渦輪の挙動に支配されるため、せん断層不安定を音響励起し、設計条件下で噴流特性を改善する試みがなされてきたこと、一方、渦放出過程を積極的に制御し、広い流動条件の下で噴流火炎特性を改善する試みはなされていないことが述べられている。これらを踏まえて、渦放出の能動制御を通じた噴流燃焼制御の新たな手法を提案し、その制御効果を実験的に実証することを本論文の目的としている。また、レーザー計測による機構解明の燃焼工学上の意義について触れ、二成分粒子画像流速計(以下 PIV)及びレーザー誘起蛍光法 (以下 LIF)により、制御機構を明らかにすることを述べている。

第二章では、マイクロ・フラップ群を備えた制御ノズル、噴流供給装置及び PIV・LIF 計測の設計が詳述されている。計測は噴流の横断面及び軸断面に対して行われる。等温流及び燃焼流の速度計測には、SiO₂ 粒子をトレーサとした PIV 法を適用している。PIV パラメータは計測の不確かさを最小にするように最適化され、不確かさは瞬時速度に対して $\pm 7\%$ (95%包括度)としている。メタン混合分率の計測には、メタンとアセトンの濃度分布が等しいことを仮定して、アセトンを用いた LIF 法を適用している。励起光強度の時間空間分布を補正し、瞬時混合分率の不確かさを $\pm 15\%$ (95%包括度)と見積もっている。また、流れの時間スケールと空間解像度やメタンとアセトンの拡散係数の違いなど、計測系の妥当性を検証している。

第三章では，非燃焼のメタン・空気同軸二重噴流を制御し，フラップ動作がせん断層の時空間発展及び物質初期輸送に与える影響を検討している．それによると，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．これは，従来までの噴流不安定を音響励起する制御手法とはことなり，制御入力と同期して大規模渦を連続放出することにより，同軸噴流混合を最適化できる．ここで，制御噴流の物質輸送は，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が述べられている．渦の直径 lv は半径方向の輸送範囲を，渦放出の長さスケール比 k は濃度変動をそれぞれ特徴づける．また，環状噴流の運動量流束を中心噴流よりも大きくとることにより，内側せん断層の渦を強化し，噴流混合を顕著に促進できると報告している．

第四章では，同軸噴流浮き上がり火炎を対象とし，ノズル近傍の渦構造を操作することにより異なる保炎機構の安定火炎を作成できることが述べられている．まず，不安定な浮き上がり火炎は，制御により顕著に安定化することが報告されている．特に，鋸波信号にもとづくフラップ動作を作用させることにより，火炎基部はノズル極近傍に安定保持される．火炎基部の画像計測により，制御火炎の安定化機構が明らかにされている．等温流の LIF 計測からは，可燃混合気層が大規模渦の崩壊とともに広範囲に分布することが理解され，燃焼流の PIV 計測からは，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が求められている．これらの結果から，火炎の安定化は可燃

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と結論付けている。また、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ことが述べられている。制御機構は瞬時 PIV 計測から推測され、火炎安定化は、大規模渦がノズル近傍で崩壊し、火炎基部上流の速度変動が抑制されるためであると結論付けられている。

第五章では、ブラフボディ型保炎器後流の火炎を対象とし、混合過程を能動的に操作することにより、設計及び非設計条件下で熱発生率の変動、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NOx)の排出特性を改善できることが報告されている。まず、設計条件を想定した当量比 0.72 では、大規模渦の連続放出により混合を促進させることで、NOx 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ている。一方、非設計条件を想定した当量比 0.48 では、小スケールの渦を連続誘起させることにより、熱発生率の変動を抑制し、火炎を安定保持できることが報告されている。これは、小スケール渦により、混合を噴流軸付近で局所的に行い、十分な燃焼速度を与える燃料過濃な混合気を供給できるためであると結論付けられている。

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、本論文は、大きな負荷変動を伴う噴流火炎の能動制御手法を提案・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。制御手法として、フラップ型アクチュエータ群を配備した同軸二重ノズルが提案され、制御効果として、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が定量評価されている。フラップは、環状噴流外側せん断層に作用し、火炎上流の大規模渦構造の時空間発展を能動的に制御する。制御により、浮き上がり火炎の保炎機構を強化できること、およびブラフボディ型保炎器後流火炎が定格・非定格条件のもとで改善できることが実証されている。また、PIV 及び LIF 計測により制御機構を解明し、せん断流における渦生成を積極的に操作することが、噴流燃焼の制御に効果的であることが明らかにされている。これらの知見は、将来の新しい燃焼制御システムの設計に有用な指針を与えるもので、燃焼工学をはじめ機械工学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。