

[別紙2]

## 審査の結果の要旨

氏名 光石 暁彦

本論文は、「周期攪乱を受ける閉空間内同軸二重噴流の混合機構に関する研究」と題し、五章より成っている。

近年、小型の分散エネルギーシステムを導入して、多様な個別ニーズに応えると共に、マクロな省エネルギー・省資源、そして環境負荷低減を達成するという構想が注目されている。このような分散システムのコアテクノロジーとして、マイクロガスタービン、あるいはそれと燃料電池とのハイブリッド・システムがあるが、このような小型プラントで使用される燃焼器の燃焼効率向上、排出ガス清浄化のために、変動する負荷条件の下で安定した希薄予混合燃焼を達成する技術の確立が望まれている。本論文は、燃焼器内部流の基本モデルとして閉空間内同軸二重噴流の流動、混合の過程を取り上げ、ノズル出口で導入される周期的な攪乱による渦輪放出に伴うスカラー混合制御効果を、系統的な数値シミュレーションを通じて明らかにすることを試みたものである。

第一章は序論であり、安定な分散型エネルギーシステムを構築する上で不可欠になる柔軟性に優れた燃焼器の開発の必要性や、燃焼器の基礎となる流れ場である噴流に関連した過去の研究の知見について概観している。特に、運転に柔軟性を付与し得る燃焼器に関する従来の研究として、剪断層を直接励起して噴流近傍場に渦構造を能動的に形成する手法に注目し、過去に得られた知見と問題点をまとめ、数値解析による詳細機構の解明の重要性を説いている。また、噴流や平面混合層に対して周期攪乱や乱数擾乱を与える影響について、過去に行なわれた実験や数値計算の結果をまとめている。

第二章では、本研究で用いられた数値計算コードの詳細を記述しており、閉空間内同軸二重噴流の計算モデルと非圧縮性流体直接数値計算の支配方程式、時空間の離散化の手法、壁面及び出口境界条件、そして噴流入口平均速度分布に重畳して導入される周期攪乱の計算モデルについて詳述している。本研究で仮定された初期攪乱は、先行実験研究において確立している手法を正弦波攪乱としてモデル化したものである。すなわち、ノズル内壁に備えられたフラップ型マイクロアクチュエータ群の軸対称収縮運動の効果を、噴流入口の周期的速度変動としてモデル化している。また、本研究で用いた数値計算コードの健全性を速度場の一次および二次のモーメントの格子依存性の確認から検証し、さらに本シミュレーションの妥当性を、中心軸上平均速度・速度乱れ強さの従来の実験データ、および可視化実験によるスカラー濃度場構造の観察結果との比較を通じて実証したことを述べてい

る.

第三章では、周期攪乱によりノズル近傍に放出される渦輪がスカラー混合に与える影響について、主に振幅依存性の観点から述べている。特に、本研究で混合を制御するための渦輪を放出するためには、臨界振幅値以上の攪乱が必要であること、その臨界値を挟み、領域全体に渡る流動混合様式が不連続的に変化することが示される。そして臨界値以上では、平均スカラー濃度分布が攪乱の強さに単調に応答するため、混合の柔軟な制御が比較的容易に行えるが、逆に臨界値以下では分布の応答は攪乱振幅に対して単調でないため、混合の柔軟な制御は比較的困難になることを示した。また、この臨界振幅値は、噴流の初期乱れ強さに対応している可能性を示唆している。

第四章では、一定の攪乱振幅で渦輪を連続的に生成した際のスカラー混合に対する攪乱周波数の影響を調査している。その結果、ノズル近傍におけるスカラーは、攪乱周波数によらず、まず内側剪断層の渦輪に巻き取られ流下し、さらに下流に出現する特徴的な縦渦構造によって混合されること、従ってこれらの縦渦構造の特徴・成長機構の理解が混合機構の全容を把握するために不可欠であることを指摘している。軸方向渦度の周方向スペクトル解析から、スカラーの巻き取られる内側剪断層渦輪に連動して中心軸近傍に出現する縦渦構造は、最大空間成長率をとるモードが固有の間隔を隔てて分布していることが示される。さらに、渦度乱れ強さ収支式の解析から、中心軸近傍の縦渦構造の主要な成長機構は渦の伸張効果が担っていること、これに対して外側剪断層上の縦渦構造は径方向の平均的な剪断による渦の傾斜による成長が卓越しており、リブ渦構造を伴った平面混合層と類似の空間発達機構を有することを示している。すなわち、本研究で対象としている高流速比同軸二重噴流においては、スカラー混合に重要な内側剪断層の三次元化過程は、平面混合層のそれとは大きく異なることを指摘している。

第五章は結論であり、本論文で得られた上記成果をまとめている。

以上、本論文では、分散型エネルギーシステムに多用される小型燃焼器に注目し、その内部流動を理想化した閉空間内同軸二重噴流に対して、系統的な直接数値シミュレーションを行い、噴流渦構造の操作とスカラー混合機構の関係について詳細な解析結果と報告している。すなわち、攪乱の振幅と周期に対する噴流の発達過程やスカラー濃度分布の変化を定量的に検討して、基本特性を明らかにしている。さらに、内側剪断層の三次元化とそれに伴うスカラー混合過程が、従来から知見の蓄えられている平面混合層と異なるものであることを指摘している。これらの研究結果は、閉空間内二重噴流の混合に対して、剪断層渦輪を能動的に生成放出する制御の効果を、その流体力学的機構の側面から明らかにしたもので、小型燃焼器などの設計技術の進展に寄与すると同時に、乱流工学、熱流体工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。