

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 光石 暁彦

近年、エネルギーのエンドユーザに近接した区域で、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、あるいはそれら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、排出ガス低減、希薄予混合燃焼安定化を達成する設計技術の確立が望まれている。以上の背景から、本論文は、閉空間内同軸二重噴流の流動、混合の過程を取り上げ、特にノズル出口で導入される周期的な攪乱による制御効果を、系統的なシミュレーションを通じて明らかにしようと試みたものである。

本論文では、二重噴流の内外の初期発達剪断層に形成される軸対称な渦輪構造に注目し、これらの生成発達を能動的に制御することによって適なスカラー混合場を達成することを意図している。ノズル内壁に設置のマイクロフラップを利用した噴流制御に関する先行実験研究を模擬して、噴流中の一様微小攪乱に加え、外側ノズルの直径を周期的に変化させる有限振幅攪乱を与えた。噴流の流量を一定に保ったままノズルの直径を変化させるため、最大流速が周期的に増減する。攪乱による計算領域入口速度分布の変化を図（光石暁彦_図 1.jpg 参照）に示す。例えば、環状噴流の外側直径を全体の 1/40 収縮させることで、最大流速は 20%近く変化していることが分かる。

このような攪乱を投入した結果、攪乱振幅、攪乱周波数に依存して渦輪の強さや大きさが変化し、噴流の側壁への付着距離や噴流軸上の再循環領域の大きさなど、流れ場全体の流動様式、そして混合過程が不連続的に変化することを明らかにした。過去の文献において、閉空間内の環状噴流の流動様式は、バルクの流速に基づくレイノルズ数の値と、その履歴の効果によって不連続的に変化することが報告されているが、流量を一定に保った同軸二重噴流におけるこのような報告は過去に例がない。

攪乱振幅が臨界値以下の場合、振幅の変化に対する流動様式と混合過程の変化は単調ではなく、混合を柔軟に制御することが困難なのに対し、臨界値以上の場合の混合過程は攪乱振幅に単調に依存するため制御が可能となることが明らかになった。各流動様式における瞬時渦構造とスカラー濃度分布を図（光石暁彦_図 2.jpg）に示す。左図は攪乱によるノズル直径の収縮が直径の 1/500 の場合で、右図は 1/40 の場合である。流動様式の変化は、高速の環状噴流の挙動が不連続的に変化したことに起因する。振幅が臨界値以下では、環状噴流はほとんど周囲流体と混合しないままコア効果によって側壁へと偏向し、側壁に再付着する。中心噴流流体は周方向にその位置を変えながらも、環状噴流に引きずられるように側壁方向へ巻き上げられ、再付着点後流で中央に形成された大規模な再循環バブルと下流へ向かう環状噴流の狭間で激しく混合する。それに対して振幅が臨界値以上では、環状噴流と中心噴流の混合が上流で活発になり、周囲流体とも混合しながら側壁に再付着する。中心噴流流体の混合は内外剪断層の相互作用に支配されており、攪乱によって剪断層に生成される渦輪と共に流下し、渦輪の三次元的な構造の崩壊に伴って混合が達

成される。

攪乱振幅を臨界値以上の一定値に保った時、攪乱周波数に応じて下流の渦構造やそれらの相互作用が変化することを示した。同時に、中心軸近傍に流れ方向に軸を持つ縦渦構造の成長が確認され、内外剪断層の渦輪の三次元化とそれらの崩壊に伴うスカラー混合に対して促進効果を有すること、縦渦構造の成長を促す流れ方向の伸張作用においては攪乱周波数の最適値が存在することを明らかにした。図（光石暁彦_図 3.jpg）に示したのは、環状ノズル外側直径と環状噴流バルク平均流速で定義される無次元の周波数（ストローハル数）が 0.5, 1, 1.5（図中左から順に）のケースにおける流れ方向の伸張作用の等値線である。この 3 ケースの中では、ストローハル数が 1 の時に中心軸近傍に非常に強い伸張作用が働いていることが分かる。縦渦構造の伸張作用に攪乱周波数の最適値が存在するメカニズムは以下の通りである。連続的に放出される渦輪間には、主流方向の伸張部と圧縮部に交互に形成され、縦渦構造の伸張作用は、この伸張部において卓越する。

また、初期の縦渦構造は、内側剪断層渦輪の周縁において剪断の比較的強い部位で渦輪の巻き上がりと同時に組織的に形成される。従って、初期に巻き上がる渦輪の強さと、その後の渦輪間相互作用による伸張効果の双方が揃って、初めてスカラー混合は促進される。攪乱周波数が低くなると、主流方向の渦輪間距離は長く保たれるために、伸張部は十分な速度勾配をもって形成される。しかし、周期収縮の時間微分として与えられる入口径方向流速が弱まるために、初期渦輪の渦度は弱まることや、渦輪の初期巻き上がりまでに渦輪自身の三次元化が進むことなどから、渦輪周縁の平均的な剪断は弱まり、初期縦渦の渦度が弱められる。その結果、縦渦が形成されないままに、放出間隔の長い渦輪によって輸送されたスカラーは、下流において周期攪乱に同期した濃度変動を残す。逆に攪乱周波数が高くなると、初期渦輪の渦度が強まった結果初期縦渦に十分な強さを与えられる強い剪断が渦輪周縁部に形成されるものの、主流方向の渦輪間距離が過度に短くなってしまい、内側剪断層渦輪間の伸張部と圧縮部は明確には形成されず、縦渦は成長することができない。さらに、渦輪同士の間隔が短いことによって渦輪間の干渉が顕著になり、中心軸近傍に固有の縦渦構造を成長させることができないうちに渦輪自身の渦度を失いながら、二次元性を保って流下することになる。主流方向に間隔の狭い渦輪は、スカラー場に対して径方向にも大きな影響力を持たず、中心軸近傍の縦渦構造の出現も期待できないことから、中心軸近傍は混合が抑制され、平均的に高濃度の流体が流下することになる。このように、同軸噴流のノズル直下流におけるスカラー混合の評価において、中心軸近傍の縦渦構造の存在は、攪乱によって放出される渦輪以外にも考慮に入れるべき要素である。

また、この中心軸近傍の縦渦構造は、空間的に成長し得るための固有の渦核スケールを持つことが明らかになった。主流方向渦度変動の周方向空間スペクトルの解析を行った所、領域内で最大の空間成長率を達成するモードの周方向の波数は、径方向座標に応じて中心軸から階段状に増加することが示された。また、噴流入口から即成長を開始するモードの最大波数は、最大成長率のモードよりは高いものの、やはり有限の範囲に収まっている。すなわち、混合の促進に対して有効な縦渦構造は、その発生においても成長においても、パラメータによって決まる固有の渦核スケールを持っているため、同軸噴流の内径の選択や内側剪断層の入口運動量厚さなどは、同軸噴流における中心噴流流体のスカラー混合を予測・制御する際には重要な意味を持つてくると考えられる。