

論文審査の結果の要旨

氏名：秋 元 雅 翔

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：円形噴流に生じる渦輪の発生要因と制御

審査委員：（主査） 教授 木 村 元 昭

（副査） 教授 吉 田 幸 司

教授 村 松 旦 典

本論文は、流体力学で取り扱われる流れの形態の一つである噴流拡散を大気圧プラズマにより制御し、これを部分予混合燃焼の操作に適用するものである。このためこの研究は、流体力学、プラズマ物理、制御手法、燃焼などの多くの専門分野にわたる。噴流は自然界や産業界に生じる代表的な流動様式の一つであり、加熱、冷却、乾燥、噴霧、微細化、混合、燃焼などの多様な目的に利用されている。また、噴流の拡散制御は、機器の高機能・高効率化及び環境負荷低減など、快適な人間生活を生み出すために重要である。このため噴流自体の流動特性を実験的、解析的、シミュレーションより求める研究が古くから継続的に行われている。噴流拡散は、ノズルより噴出後に生じる渦輪構造の発生・成長・崩壊機構およびその制御に関する研究を通して進められてきている。そして、渦輪の発生・成長過程を操作する噴流拡散制御法が数多く提案され、音波やMEMS微小フラップ等でノズル出口付近の自由せん断層に擾乱を与え、流れの不安定性を増幅して渦輪の発達を促進し噴流初期領域の拡散混合を増大できることが報告されている。

近年、大気圧プラズマの一つである誘電体バリア放電を用いた、DBD（Dielectric Barrier Discharge）プラズマ・アクチュエータ：DBD-PA が流体制御デバイスとして注目を集め、米国航空宇宙学会（AIAA）をはじめ国内外において剥離の抑制を目的とした境界層制御の研究が盛んに行われている。しかし、噴流制御への適用例が少ない中に申請者は、噴流に DBD-PA を適用した場合の噴流拡散特性に関して、電極と誘電体の形状と配置、印加する周波数と電圧がいかに関与するかを実験的に研究し、DBD-PA の有効性を見出すと共に、各因子と噴流拡散との関係を明らかにしてきた。一方、非平衡プラズマを用いた点火・燃焼支援技術の研究が進められており、自動車用ガソリンエンジン点火やマイクロガスタービンの低負荷運転時の燃焼の安定化への応用が期待されている。

本論文は噴流拡散の DBD-PA による操作をバーナー燃焼に適用することを念頭に置いた研究論文であり、特筆すべき次の三つの独創性が伺える。まず、噴出前の管内構造に注目し噴流拡散の根本的な要因に言及している。助走管を有する先細ノズルから噴出される円形噴流の渦輪の自然周波数は、噴流装置内部に生じる音響共鳴の共鳴周波数に起因しており、その圧力変動の特定の周波数が自然周波数を支配していることを見出している。次に、DBD-PA を円形ノズルに導入した制御方法を確立している。DBD-PA の誘起流によりノズル出口近傍に発生する渦輪の発生挙動を変化させ、特にロックイン現象が生じるバースト周波数で DBD-PA を駆動することで、渦輪をバースト周波数と同じ周波数で発生させ、特定の範囲で任意な渦輪の発生を可能とした。さらに、本方式の部分予混合燃焼への適用に成功している。DBD-PA を用いて、空気とプロパンガスの部分予混合気によるバーナーノズルの噴流拡散火炎を制御した結果を実験的に評価している。DBD-PA を OFF では失火してしまう噴出流速でも、前述のロックイン現象を用いることで燃焼ガスの空間濃度分布の安定化と、流れ方向に軸を持つ縦渦の発達により、浮き上がり火炎の保炎を可能としている。

本論文は、全7章から構成されている。審査の結果、次のように考えられる。

第1章「序論」では、噴流拡散の諸特性をまとめ、従来の噴流拡散制御方法の紹介と今回用いる DBD-PA の原理と長所短所を示している。また、本論文の各章の目的を述べている。

第2章「自由噴流初期領域の渦輪列の発生要因」では、円形先細ノズルから噴出される、噴流初期領域に発生する渦輪列の発生要因を特定し、従来の研究でプリファード周波数が広範囲にわたっている要

因を述べた。また、プリファード周波数の発生要因を提言して、噴流にどのような影響を及ぼすかを述べている。まず、噴流初期領域に発生する渦輪列の発生周波数（自然周波数）をハイスピードカメラ画像より目視によるカウントという地道な作業で求めている。その結果、自然周波数はレイノルズ数 Re に対して階段状に上昇し、レイノルズ数の上昇に対して自然周波数がほぼ一定に保たれる範囲が存在することを示した。また、シミュレーションで噴流装置内部の音響共鳴が生じる周波数を求め、加えてマイクロホンで噴流装置内部の圧力変動を実測して周波数解析を実施している。さらに、LDVによりノズル直後の流速変動を計測しFFT解析によりその周波数分析を実施している。以上の複数の徹底した調査より、圧力と流速変動の振る舞いが一致していることから、噴流装置内部に発生する圧力変動は噴流装置内部形状や大きさに依存する音響共鳴によって引き起こされ、これが噴流の渦輪列の発生要因となることを結論付けていることは、流体工学的に重要な成果と考えられる。

第3章「DBD-PAによる噴流渦構造の変化」では、同軸型DBD-PAノズルで円形噴流を制御し、その噴流渦構造の変化を述べている。DBD-PAで噴流を制御した結果、印加したバースト周波数 f_{burst} と渦発生周波数 f_{vortex} の関係には $f_{vortex} > f_{burst}$, $f_{vortex} = f_{burst}$, $f_{vortex} < f_{burst}$ となる3区間が存在し、DBD-PAに印加するバースト周波数、すなわち誘起流を発生させる周波数によって、噴流に発生する渦の形態が異なることが理解できた。この中で特に重要なのは、 $f_{vortex} = f_{burst}$ が成り立つバースト周波数では、渦発生周波数がバースト周波数に同調するロックイン現象が発生することである。このロックイン現象が生じるとバースト周波数に同調して渦輪が発生してそれ以外の渦輪が生じないため、任意の周波数で渦輪が発生でき、渦輪の発生周期を制御できることは工業的に有用な成果であると考えられる。

第4章「DBD-PAによる噴流拡散過程の変化」では、同軸型DBD-PAノズルで円形噴流を制御し、その噴流拡散過程を述べている。実験は主にレイノルズ数 $Re = 5000$ と 10000 の噴流で実施され、バースト周波数 f_{burst} を自然周波数 f_n の係数倍として $f_{burst} = 0.2f_n \sim 2.0f_n$ 、DBD-PAへの印加電圧 V_{p-p} は $V_{p-p} = 16$ kV, 14 kV 及び 12 kV とした。DBD-PAから誘起される流れの誘起流速 U_b は、 $V_{p-p} = 16$ kV では $U_b \approx 3.5$ m/s, $V_{p-p} = 14$ kV では $U_b \approx 2.0$ m/s 及び $V_{p-p} = 12$ kV では $U_b \approx 0.5$ m/s である。まず、噴流にロックイン現象が発生するバースト周波数の範囲について、その範囲は誘起流速の増加と共に広範囲になるが、一定の範囲に限定されることが示されている。次に、 $Re = 5000$ の噴流で周波数解析による渦輪のペアリングの頻度と、ノズル中心軸上で計測した流速より噴流拡散過程が述べられている。ロックイン現象により定常周期で生じる渦輪がペアリングして大規模渦輪が発生し、噴流の上流側で噴流幅が拡大することを示している。特に $V_{p-p} = 14$ kV でDBD-PAを駆動したときに渦輪のペアリングの頻度が高く、噴流上流で噴流拡散が促進する。また、 $V_{p-p} = 16$ kV, $f_{burst} = 1.4f_n$ ではロックイン現象により高い周波数で生じる小さな渦輪がペアリングして渦輪が早期に崩壊し、噴流下流で自由噴流よりも噴流拡散が抑制されることを示している。以上より、DBD-PAに高電圧を印加させ、誘起流速を速くするほど噴流拡散が促進するわけではなく、誘起流速によって渦輪のペアリングの頻度も変化する。また、DBD-PAで噴流を制御することで、噴流拡散の促進及び抑制が可能であることが述べられ、本制御方法の有用性が示されている。

第5章「DBD-PAによる噴流渦輪の操作」では、通常のパースト波形よりも大規模な渦輪を発生できる独自のオリジナルパースト波形を設計してDBD-PAを駆動し、噴流を制御している。その結果、噴流上流部で3つの渦輪が合体し、大規模渦輪が発生できること、その大規模渦輪によって噴流上流で通常のパースト波形よりも噴流拡散が促進することが示されている。この内容は本制御手法の特徴を際立たせるもので、微小フラップなどの物理的なアクチュエータの揺動では不可能な、高応答なプラズマ・アクチュエータの有用性を示すものであり、新たな噴流拡散制御の道が開けたと考える。

第6章「DBD-PAによる部分予混合火炎の制御」では、DBD-PAバーナーノズルを用いて、空気:80%, プロパンガス:20%の部分予混合気による浮き上がり火炎の制御内容を示している。その結果、本来失火してしまう部分予混合気の噴出流速でも、DBD-PAによって浮き上がり火炎上流未燃部の部分予混合気にロックイン現象が生じると浮き上がり火炎が保炎できることが示されており、DBD-PAによる噴流拡散制御が燃焼においても十分に適用が可能である。

第7章「本論文の結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和2年10月22日