

論文の内容の要旨

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

本論文の目的は

- (1) 円形噴流初期領域に自然発生する渦輪列の、周波数の発生要因を特定すること。
- (2) 円形噴流を DBD プラズマアクチュエータ (DBD-PA) で制御し、その噴流拡散過程を明らかにすること。
- (3) 浮き上がり火炎を DBD-PA で制御し、その挙動を明らかにすること。

である。

噴流は産業に利用されている流動様式の一つであり、噴流の流動特性は噴流に生じる渦輪によって支配される。

噴流制御の研究において噴流を励起する周波数は、噴流に渦輪が形成される周波数で求めたストローハル数 St や、プリファード周波数で求めたストローハル数 St を基準に決定することが多い。過去の研究において、プリファード周波数 f を噴流に発生する大規模渦輪列の周波数とすると、ストローハル数 $St=f \cdot d/U$ (d : ノズル出口内径, U : 噴出速度) は $0.24 \sim 0.51$ となることが多い。このように従来の研究ではプリファード周波数より求めるストローハル数の値は広範囲にわたっており、研究対象、研究条件によって異なる。したがって、プリファード周波数を基準に制御を行い、特定の噴流現象で効果的な制御結果を得られても、異なる噴流現象にその周波数で制御した結果をそのまま適用することは困難である。ここでプリファード周波数は噴流初期領域の渦輪の発生周波数に影響を受けるが、この自由噴流初期領域の渦輪列の発生周波数がどのように定まるかは詳しく研究されていない。そのため、本論文では自由噴流初期領域の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より算出されるストローハル数の値が広範囲にわたっている要因を明らかにした。

次に、DBD-PA をノズル内部に組み込んだ同軸型 DBD-PA ノズルを用いて円形噴流を能動的に制御した。噴流の能動的制御は、例えばスピーカーによる音響励起や小型フラップ型マイクロ電磁アクチュエータで行われている。しかしスピーカーによる制御はノズル構造体が大きくなる、また小型フラップ型マイクロ電磁アクチュエータでの制御は駆動周波数が遅いため制御可能な噴流流速範囲が狭いというデメリットが存在する。それらのデメリットを解決するために DBD-PA を用いて噴流を制御し、その噴流拡散過程を明らかにした。DBD-PA は交流高電圧を印加することで流れが誘起されるアクチュエータで、アクチュエータ自体が薄型、小型であり、応答性が早くて高い周波数 (数 kHz ~ 数十 kHz) で駆動可能である。また本論文独自の駆動波形によって DBD-PA を駆動し、噴流に発生する渦輪を制御した。

そして、DBD-PA をノズル内部に組み込んだ DBD-PA バーナーノズルによって浮き上がり火炎を制御した。浮き上がり火炎は逆火の恐れが無く、火炎基部上流で空気と燃料の混合が促進されるため NO_x 低減に効果的であり、拡散燃焼と比較して火炎が短くなるため燃焼負荷率を低減できる。しかし、浮き上がり火炎の基部は上下に振動しながら燃焼するため吹き消えしやすい。未制御時では失火する噴流噴出流速でも、DBD-PA で制御することで浮き上がり火炎を保持できることを明らかにした。

本論文は全 7 章で構成される。以下に各章の概要を示す。

第 1 章 序論

第 1 章では噴流の諸特性と制御手法及び DBD-PA の作動原理をまとめ、また本論文の目的を述べた。

第 2 章 自由噴流初期領域の渦輪列の発生要因

第 2 章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

の発生要因を低減すると、噴流にどのような影響を及ぼすかを述べた。

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）を求めた。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。この自然周波数の上昇は、ノズル出口での運動量厚さと噴出流速によって求まるストローハル数に依存していることを示唆した。

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、さらに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行った。その結果、シミュレーションで求めた音響共鳴が生じる周波数と、マイクロホンで実測した圧力変動が生じている周波数が一致することを示した。そのため、噴流装置内部に発生する圧力変動は噴流装置内部形状に依存する音響共鳴によって引き起こされていることを示した。

そして、自然周波数の上昇が停滞する周波数と噴流装置内部の音響共鳴の周波数が一致した。そのため、円形先細ノズルより噴出される噴流初期領域に生じる渦輪列の発生周波数は、ノズル出口より上流の噴流装置内部の音響共鳴の周波数の一つの要因となって決定され、プリファード周波数も噴流装置内部の音響共鳴の影響を受けることを示した。この音響共鳴の周波数は噴流装置全体の形状によって定まる。従来の研究では噴流の代表的な特性である大規模渦輪列の周波数はプリファード周波数、噴出流速及びノズル出口内径で求まるストローハル数でまとめられている。このプリファード周波数から求めたストローハル数の値は噴流装置内部の形状は考慮されないため、研究対象や研究条件によって広範囲に渡っていたことを示した。

次に、装置内部の音響共鳴による音圧レベルの大きさが噴流初期領域に生じる渦輪列にどのような影響を及ぼすか述べた。噴流装置内部の音圧レベルの大きさによって、噴流初期領域に発生する渦輪の位置や渦輪同士のペアリング位置が変化して、噴流の拡散過程が変化することを示した。

第3章 DBD-PA による噴流渦構造の変化

第3章では同軸型 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た。ノズル出口に積極的な速度変動を与えるため、DBD-PA は on と off を交互に繰り返すバースト波形で駆動して間欠的に誘起流れ発生させた。このバースト波形をバースト周波数 f_{burst} で DBD-PA に印加した。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を示した。

$f_{vortex} = f_{burst}$ 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を示した。

第4章 DBD-PA による噴流拡散過程の変化

第4章では同軸型 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た。実験は主にレイノルズ数 $Re = 5000$ と 10000 の噴流で実施した。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 $U_b \cong 3.5$ m/s, $V_{p-p} = 14$ kV では $U_b \cong 2.0$ m/s 及び $V_{p-p} = 12$ kV では $U_b \cong 0.5$ 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を述べた。ロックイン現象は $Re = 5000$ の噴流では印加電圧によらず $f_{burst} = 0.9f_n \sim 1.4f_n$ の範囲、 $Re = 10000$ の噴流では $V_{p-p} = 16$ kV と 14 kV で $f_{burst} = 0.9f_n \sim 1.4f_n$ の範囲及び $V_{p-p} = 12$ kV で $f_{burst} = 0.9f_n \sim 1.3f_n$ の範囲で発生することを示した。そのため、ロックイン現象が発生するバースト周波数の範囲は誘起流速の増加と共に広範囲になるが、一定の範囲に飽和することを示した。

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を述べた。その結果、 $f_{burst} = 0.9f_n$ と $1.0f_n$ は $V_{p-p} = 14$ kV でペアリングの頻度が高く、 $V_{p-p} = 16$ kV では低くなることを示した。 $f_{burst} = 0.9f_n$ と $1.0f_n$ では、ロックイン現象によって定常周期で生じる渦輪がペアリングするために大規模渦輪が発生して、噴流上流で噴流幅が拡大することを示し、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って高い周波数で生じる小さ

な渦輪が噴流上流で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た。

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。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を述べた。

第5章 DBD-PA による噴流渦輪の操作

第5章では通常のバ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バースト波形を設計して DBD-PA を駆動し、噴流を制御した。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を示した。その大規模渦輪によって、噴流上流で通常のバースト波形よりも噴流拡散が促進することを示した。

第6章 DBD-PA による部分予混合火炎の制御

第6章では DBD-PA バーナーノズルを用いて、空気：80%，プロパン：20%の部分予混合気による浮き上がり火炎を制御した。

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を示した。

第7章 本論文の結論

第7章では本論文の研究結果より得られた結論をまとめた。

- (1) 噴流初期領域の渦輪列はノズル出口より上流の、噴流装置内部の音響共鳴の周波数で発生する。
- (2) DBD-PA で噴流にロックイン現象を発生させると、噴流上流で拡散が促進、噴流下流で拡散が抑制できる。
- (3) DBD-PA によってロックイン現象を発生させることで、本来失火してしまう部分予混合気の噴出流速でも、浮き上がり火炎の保炎が可能となる。

以上