

称号及び氏名 博士（工学） 近藤 暁

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 31 日

論文名 縦渦による超音速混合促進機構に関する研究

論文審査委員 主査 新井 隆景

副査 辻川 吉春

副査 大久保博志

## 論文要旨

次世代の極超音速輸送機や宇宙往還機の極超音速飛行時（飛行マッハ数5 以上）の推進機関としてスクラムジェットエンジン（Supersonic Combustion RAMJET ENGINE）が有望視されている。スクラムジェットエンジンは極超音速気流を飛行マッハ数の3分の1程度のマッハ数に減速して超音速のまま燃焼器に導き、水素等の燃料を噴射して燃焼させる点が特徴である。従来のジェットエンジンやラムジェットエンジンなどの推進機関は吸入空気を亜音速まで減速させてから燃焼を行なうが、これを飛行マッハ数5 以上の極超音速飛行に適用すると強い衝撃波が発生し、総圧損失が増すとともに著しい温度上昇による燃焼生成物の解離が生じ、性能が低下する。また温度、圧力が高くなりエンジン構造材の冷却、強度に対する要求が増す。超音速のまま燃焼を行なうスクラムジェットエンジンはこのような問題を解決する有効な手段であると考えられている。しかし、気流流速が音速を超えるスクラムジェットエンジン燃焼器内での流入空気滞留時間は1ms 程度と極めて短い。それゆえ、流入空気と燃料である水素を極めて速やかに混合・燃焼させるための超音速混合促進制御技術がスクラムジェットエンジン開発の技術的な鍵となっている。しかし、超音速流では、攪乱の移流マッハ数の増加とともに圧縮性の影響が顕著に表れ、混合現象を支配する攪乱の成長や乱流渦の生成が極めて低く抑えられてしまう。そのため圧縮性が緩和される、流れ方向に回転軸を持つ縦渦の利用が注目されている。縦渦の超音速混合促進における役割は、まず大規模な縦渦を超音速流中に導入し、縦渦の強い連行作用により大量の主流流体を縦渦内に取り込むことにある。次にこの縦渦がエネルギーカスケード過程で微細な渦を次々に生成し、崩壊していくことで燃料と空気の接触面積を飛躍的に増加させ、燃焼に適した混合を達成する。このような超音速混合促進技術は、スクラムジェットエンジンだけに限らず、化学酸素沃素レーザ（Chemical Oxygen-Iodine Laser: COIL）の技術にも直結する課題であり、超音速乱流制御の基礎的な問題としても重要である。

本研究で使用した縦渦導入デバイスは、壁面に設置した圧縮ランプ（第4章で使用）もしくはバックステップ（第5章で使用）とその両側に配置された膨張ランプにより生じる剪断によって縦渦を導入する。本研究では流路下壁中央に導入された、互いに逆方向に回転する2つの縦渦（縦渦対）によって作られる流れ場を対象とした。このタイプの縦渦導入デバイスはHyper mixer という名で研究されており、超音速混合促進に有効であることが確認されているが、その混合場の詳細は明らかにされているとは言い難い。本研究の目的は縦渦が導入された超音速混合場の流れ場について、縦渦の生成から崩壊に至る過程や燃料と空気の混合過程を明らかにし、さらに混合

領域の拡大や縦渦の崩壊を支配するパラメータを特定することで、混合に効果的な流れ場を見出し、それを人為的に生成する方針を得ることである。本論文はこのような目的のもとに行った一連の研究をまとめたものであり、6章からなる。

第1章では、研究の背景と目的を述べ、本論文各章の主題を要約している。

第2章では、本研究で使用した実験設備や実験装置について述べている。

第3章では、混合促進技術の改良に必須な濃度の時系列計測手法について提案し、その有効性について述べている。現在、空気と燃料の混合状態の評価手法は時間平均的な評価が主である。しかし、燃焼は空気と燃料とが直接接触あわなければ生じない現象であるため、平均的な評価よりも時系列の、それも瞬間的な混合状態を定量的に評価できる混合評価手法が望ましい。そこで、熱伝達特性の異なる2本の熱線（通電加熱された金属の細線）を持つ2線式平行熱線流速計を応用して、最大500 kHzの濃度・質量流束変動を時系列同時定量計測できる混合評価手法を提案した。ここでは濃度・質量流束の計測原理を述べ、較正結果や計測時に見込まれる誤差を示すとともに、二次元超音速混合層の計測を通じて計測結果の妥当性を示した。濃度の時系列定量計測に関して、数百kHzのオーダーでの計測手法は筆者の知る限り世界的にも本手法のみであり、超音速流などの非常に速い流れでは従来計測できなかった混合場の小スケールの流体構造まで計測でき、画期的な計測手法であるといえる。

第4章では、流路下壁近傍に互いに逆方向に回転する2つの縦渦（縦渦対）を導入し、擬似燃料としてヘリウムを縦渦対の間から噴射した流れ場を対象として、シュリーレン可視化法とステレオPIVにより縦渦の形成から崩壊に至る挙動を調べた。また、第3章で提案した2線式熱線流速計による混合評価手法を用いて縦渦による混合促進過程を実験的に調べた。縦渦対中央部には低速の領域が形成され、主流と低速領域の剪断によって縦渦を取り巻くように大規模な渦輪状構造が形成されることを明らかにした。また、混合評価結果より、ヘリウムは縦渦や渦輪状構造に取り込まれ、これらの渦が主流流体を巻き込むことで流下に伴いヘリウムが次第に拡散し、混合していく様子を捉えた。さらに熱線出力波形の周波数解析により縦渦が渦輪状構造の攪乱により崩壊することを示唆する結果を得た。縦渦の生成から崩壊に至る機構を実験的な手法で計測した例は少なく、特に縦渦の周囲に形成される大規模な渦輪状構造の存在はこれまでに報告されていない。渦輪状構造が縦渦の崩壊に寄与するという結果から、積極的に渦輪状構造を利用することで縦渦の崩壊を早めるなどといった流れの制御手法の可能性を示した。

第5章では、主流マッハ数(1.8, 2.4)、縦渦導入デバイスの膨張ランプ角( $7^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $30^\circ$ )、縦渦導入デバイスに流入する境界層(層流境界層, 乱流境界層)、燃料噴射の条件(噴射なし, 空気噴射, ヘリウム噴射)をパラメータとして、シュリーレン法およびステレオPIVにより超音速縦渦による混合場を計測した。混合領域が拡大すれば縦渦や渦輪状構造は大量の主流流体を混合領域に取り込むことができるため、混合促進の観点で非常に重要である。そこで、シュリーレン画像から混合領域の高さ方向の拡大率を調べ、実験条件による拡大率の変化を調べた。また、ステレオPIVより得られた速度場から、縦渦対中央での吹き上げ速度と混合領域の流れ方向速度の比を算出し、混合領域の拡大率と比較することで、変動領域は2つの縦渦が互いに誘起する上向きの誘起速度により拡大することを示した。すなわち、拡大率は縦渦の循環に比例し、縦渦同士の間隔と変動領域の流れ方向速度に反比例することを明らかにした。一方、縦渦が小スケールの乱流渦に崩壊することで飛躍的に燃料と空気の接触面積が増加するので、縦渦の崩壊も混合促進の点で非常に重要である。そこで、計測された縦渦の循環の流れ方向推移から縦渦を崩壊に導くパラメータを特定した。第4章で得られた結果と同様、縦渦の崩壊はそれを取り巻く渦輪状構造と密接に関係し、渦輪状構造が強い場合には循環の計測値の減少量が大きく、縦渦の崩壊が早まることを示した。また、Dimotakisは亜音速流における実験に基づいて、剪断層や自由噴流などが微細な乱流渦を生成して崩壊していく条件はレイノルズ数 $Re > 10^4$ であるというMixing Transitionの考えを提唱している。本研究の計測結果からも縦渦は渦レイノルズ数 $Re_T > 10^4$ で崩壊が顕著であり、このMixing Transitionの考えが超音速縦渦に適用できることを示した。このように混合領域の拡大や縦渦の崩壊を支配するパラメータを特定し、種々の実験

パラメータが流れ場に及ぼす影響についても実験的に明らかにし、混合状態を制御するための指針を示した。

第6章では、本研究で得られた結果を総括している。

## 審査結果の要旨

本論文はスクラムジェットエンジンに関連する縦渦が導入された超音速混合場の基本的な流れ場を捉え、縦渦の生成から崩壊に至る過程や燃料と空気の混合過程を明らかにし、さらに混合領域の拡大や縦渦の崩壊を支配するパラメータを特定することで、混合に効果的な乱流渦を見出し、それを人為的に生成する指針を得ることを目的に行ったものである。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 混合場の濃度変動と運動量流束の変動を同時計測する手法を提案し、その有効性を示した。
- (2) 縦渦による超音速混合場では、縦渦とそれを取り巻くように形成される渦輪状の横渦構造が主流流体を巻き込むことで燃料が広範囲に拡散し、縦渦と渦輪状構造の干渉により渦が次第に崩壊して小スケールの乱流渦を生成することで混合が進む。
- (3) 混合促進の上で重要な混合領域の拡大率は縦渦の循環に比例し、縦渦同士の間隔と変動領域の流れ方向速度に反比例する。
- (4) 縦渦の崩壊に関して、渦輪状構造が強い、すなわち縦渦対中央と主流の剪断が大きい場合には、縦渦の崩壊が早まる。
- (5) Dimotakis のMixing transition の考えが超音速縦渦においても適用でき、縦渦は渦レイノルズ数 $Re_r > 10^4$ で崩壊する。
- (6) 変動領域の拡大率を大きくし大量の主流流体を取り込むためには膨張ランプ角 $\alpha = 14^\circ$ 程度のデバイスに層流境界層が流入する場合が望ましい。
- (7) 縦渦の崩壊を早めるためには、主流と縦渦対中央の低速領域との剪断を大きくし、強い渦輪を導入することが有効である。それにはランプ角を大きくし乱流境界層を流入させる必要があるが、その場合、変動領域の拡大率が小さくなってしまう。このように、変動領域の拡大率と縦渦の崩壊はトレードオフの関係にあり、流れ場の状態に合わせて最適化を行うことが望ましい。

本論文は超音速混合機構の解明を行ったもので、スクラムジェットエンジンの開発に重要な知見を与えた。さらに、超音速乱流混合機構の詳細を明らかにして、圧縮性流体力学の発展に寄与すること大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。