

称号及び氏名 博士（工学） 七里 真悟

学位授与の日付 2025年3月31日

論文名 「超音速縦渦の生成・発達・崩壊に関する研究」

論文審査委員  
主査 佐々木 大輔  
副査 森 浩一  
副査 小木曾 望  
副査 坂上 昇史

## 論文要旨

本論文は、航空宇宙流体力学分野の重要な技術的課題の1つである超音速混合促進制御に縦渦を利用する場合において、超音速縦渦の生成から発達・崩壊に至る過程の詳細に関する著者の一連の研究をまとめたものである。

次世代の極超音速機の推進機関として有望視されるスクラムジェットエンジン（Supersonic Combustion Ramjet Engine）では、エンジン内に取り込んだ極超音速の気流を超音速状態で燃焼させる。これは、通常のジェットエンジンやラムジェットエンジンのように亜音速状態まで減速・圧縮すると、過大な全圧損失が生じるとともに、著しい静温上昇により空気中の酸素分子の解離が生じ、エンジン性能が著しく低下するためである。このため、典型的なスクラムジェットエンジンの作動条件では、燃焼器内において1ms程度と極めて短い気流の滞留時間の間に流入空気と燃料を混合させて燃焼まで導く必要がある。分子レベルの混合を迅速に達成するには乱流を利用することが有効であるが、超音速流中では、圧縮性の影響により亜音速流における混合層のような横渦による乱流混合は著しく抑制される。例えば、圧縮性混合層では、攪乱の移流マッハ数 $M_c$ が0.6を超えると横渦に起因する攪乱の成長率は著しく低下する。さらに移流マッハ数が大きくなると、横渦に代わって圧縮性の影響が緩和される斜め渦や斜行渦といった縦渦成分を持つ攪

乱が混合層の乱流遷移における支配的構造となる。したがって、超音速流中での混合促進手法としては、圧縮性を緩和する流れ方向に回転軸を持つ縦渦の利用が有効であると考えられている。事実、縦渦を用いた超音速燃焼実験では、燃焼器内の圧力上昇特性から評価した燃焼性能が、縦渦を導入しない場合と比べて格段に優れていることが示されている。

超音速混合促進における縦渦の役割は、まず、その大規模な連行作用により主流の空気を縦渦領域内に取り込み、次に、小スケールの乱流渦へ崩壊するのに伴って空気と燃料の接触面積を増大させることである。渦による混合は、渦の循環 $\Gamma$ と動粘性係数 $\nu$ で定義される渦レイノルズ数 $Re_\Gamma = \Gamma/\nu$ がおおよそ $10^4$ を越えると乱流混合が維持される混合遷移“mixing transition”状態になることが提唱されており、超音速縦渦による混合促進においても、できるだけ循環が大きくかつ速やかに崩壊する縦渦が適していると考えられる。この考えを検証すると共に、より効率的な混合促進制御を達成するためには、超音速縦渦の生成から混合遷移状態に至る過程における乱れの発生やその性質に関する知見が必須である。しかし、超音速縦渦の挙動に関する研究の多くは、渦の平均運動とそれに基づく遷移レイノルズ数の評価、発達した乱流状態における変動強度などに焦点を当てており、生成から崩壊に至る過程で発生する攪乱の挙動については、実験的にその詳細を明らかにすることが困難であることから、十分に解明されているとは言い難い。

このような背景のもと、本論文は、超音速縦渦の生成・発達・崩壊過程において生じる組織構造とそれが引き起こす混合遷移機構を実験と数値計算の両面から解明することを目的として行った。本研究では、圧縮斜面と膨張斜面からなる壁面設置型の縦渦対導入デバイスにより超音速流に導入した縦渦を研究対象とした。超音速縦渦に関する研究では、実験と数値計算の両面からアプローチした研究例は少ないなか、本研究は、数値計算の精度検証とその結果を用いて流れ場の詳細に調べ、これまで未解明であった超音速縦渦の乱流混合を支配する組織構造とその役割を解明し、スクラムジェットエンジン開発に有益な知見を得た。論文の構成は以下のようになっている。

第1章では、超音速縦渦を用いた混合促進制御に関する研究の現状と問題点について述べ、本研究の背景と目的を明確にしている。

第2章では、本研究の解析対象を明確にし、解析に使用した実験装置と実験方法、また実験では把握困難な超音速縦渦の生成から崩壊に至る流れ場を詳細に調べるために行った数値計算法について述べている。

第3章では、超音速混合を支配する組織構造を特定することを目的に、超音速縦渦の生成・崩壊過程の流れ場を実験および数値計算を用いて明らかにした。実験は、主流マッハ数 $M_\infty = 1.8$ の超音速風洞下壁に縦渦対導入デバイスを設置し、シュリーレン可視化法、ステレオPIV計測、オイルフロー法および熱線流速計を用いて行った。縦渦の循環を変化させて流れ場の混合特性を変化させるために、縦渦対導入デバイスの圧縮斜面には後退角 $\theta$ を付与し、 $\theta = 90^\circ$ （後退角無し）、 $80^\circ$ 、 $70^\circ$ とした。シュリーレン可視化法の結果から、縦渦の崩壊過程で周期的な明暗模様の組織構造が観察され、後退角が小さくなるにつれて、明暗の流れ方向のスケールや強度が大きくなることを確認した。また、PIV計測によると、今回研究対象とした後退角の範囲では、後退角を小さくするほど循環が大きくなることが確認された。下流域では後退角による循環の差異は見られず、後退角が小さいほど速やかに崩壊した。後退角が小さいほど循環が大きい理由を考察するため、オイルフロー実験および数値解析を行った。オイルフロー実験の結果、後退角が小さいほどスケールの大きい縦渦が形成され、また膨張斜面から圧縮斜面背後に回り込む流れのspan方向成分が大きくなることが確認できた。さらに詳細に縦渦生成過程を調べるため、RANSによる定常解析を行い、後退角が小さいほど旋回渦のスケールおよび旋回速度の大きい縦渦が形成されることが確認され、これが循環の増加に寄与していることが明らかになった。最後に、後退角による超音速縦渦の崩壊過程の違いを考察するため、熱線により流れ場の変動計測を行った。質量流束の変動実効値は主流縦渦間の剪断層において大きく、活発な乱流混合が観察された。また、縦渦外縁の剪断層では、シュリーレン法で確認された周期的な組織構造による変動と考えられるスペクトルピークが確認され、後退角が小さいほどその変動が大きいことがわかった。後退角が小

さいほど縦渦の崩壊が早い原因は、縦渦外縁に形成される組織構造により強い変動場が生成され、主流縦渦間で活発な乱流混合が行われるためであると明らかにした。

第4章では、第3章で確認した超音速縦渦の崩壊過程における周期的な組織構造に関する知見を得ることを目的に、超音速縦渦による乱流混合場を対象に数値計算を行い、まず、計算精度を検証するため対応する実験結果と比較した。その結果、平均の流れ場についてステレオ PIV 法による実験結果と比較すると、流れに垂直な計測断面内の平均速度分布については、格子精度や定常・非定常解析に関わらず、実験結果をおおよそ再現できることを確認した。この平均速度分布から渦レイノルズ数  $Re_T$  を評価すると、縦渦の崩壊過程にある渦レイノルズ数の減少過程において、細かい格子 (Case2) による LES による非定常解析の結果は実験結果とほぼ一致するが、RANS による定常解析や粗い格子 (Case1) による LES 解析の結果はそれらに比べて大きく、攪乱の有無だけでなく格子精度により流れ場を十分に解像できないことを確認した。次に、速度変動実効値についてステレオ PIV 法による実験結果と比較すると、Case2 の格子による解析結果は変動分布の傾向をおおよそ再現できていたのに対し、Case1 の格子による結果は変動領域が小さく正しく変動を捉えることができていないことを確認した。また、瞬間の流れ場についてシュリーレン法による可視化結果と比較して、Case2 の格子による非定常解析から得られる変動のスケールは実験で観察される変動のスケールと一致することを確認し、実験結果をほぼ再現できていると判断される結果を得た。さらに、実験ではその詳細を明らかにできなかった変動の構造について非定常解析結果から考察し、この変動が縦渦対をつなぐ形で形成されるヘアピン状の渦構造であり、これが周期的に生成・発達と崩壊を繰り返すことを明らかにした。

また、得られた数値計算結果をもとに、超音速縦渦の生成・崩壊過程において生じる組織構造と乱流変動の詳細について、速度変動や乱流エネルギー生成などの観点から考察した。その結果、以下のことを明らかにした。縦渦対導入デバイス近傍では、デバイスの圧縮斜面から膨張斜面に吹き下ろす流れにより縦渦対が形成される。初期形成段階の縦渦対は比較的安定であるが、デバイスの圧縮斜面後縁から流出する剥離剪断層の不安定性に起因する速度変動によりレイノルズ応力が生じる。このレイノルズ応力と平均剪断層による乱流運動エネルギー生成により剥離剪断層内の攪乱が成長し、縦渦対と融合してヘアピン状の渦構造を形成する。形成されたヘアピン状渦構造は、その誘起速度場によりイジェクション・スイープ運動を引き起こし、縦渦領域の境界で生じるレイノルズ応力により、主流と縦渦領域内との運動量交換を活性化する。また、縦渦領域内でも速度変動の増加とヘアピン状渦構造による縦渦の非定常な揺らぎにより、乱流運動エネルギー生成が増大して攪乱が成長し、乱流混合が活発になる。その後、デバイスで発生した衝撃波の入射に伴うバロクリニックトルクにより、縦渦やヘアピン状渦構造の崩壊が促進されることを確認した。

第5章では、本研究で得られた主要な成果を総括している。

## 審査結果の要旨

本論文では、次世代極超音速輸送機の推進機関として有望視されているスクラムジェットエンジン開発における重要な技術的課題の1つである超音速混合促進制御に縦渦を用いる場合について、これまで未解明であった超音速縦渦の乱流混合を支配する組織構造とそれによる乱流変動特性を明らかにすることを目的に、超音速縦渦の生成から発達・崩壊に至る過程を実験と数値計算により詳細に調べている。実験結果と計算精度と実験の再現性を検証された数値計算結果から、超音速混合促進制御とスクラムジェットエンジンの開発に関して有益な以下の研究成果を得た。

- (1) 超音速混合促進に有効な循環の大きな縦渦を生成する方法として、縦渦対導入デバイスの圧縮斜面に後退角を付与する方法を提案し、その効果と有効性を検証した。
  - ・ 後退角を小さくするほどスケールおよび回転速度の大きい縦渦が形成されて循環が増加しかつ速やかに崩壊すること、主流と縦渦の間の変動が大きく活発な乱流混合が行われ縦渦の

崩壊が促進されることを明らかにした。

- ・ 縦渦の崩壊過程において、周期的な明暗模様組織構造がシュリーレン可視化画像によって観察され、後退角が小さいほどその流れ方向のスケールや強度が大きくなることを確認した。
- (2) 縦渦の崩壊過程で観察された周期的な組織構造について、LES (Large Eddy Simulation) による非定常解析により、その生成・発達過程と乱流変動特性について考察した。
- ・ 周期的な組織構造は、縦渦導入デバイスの圧縮斜面後縁から流出する剥離剪断層の速度変動によりレイノルズ応力が発生し、剥離剪断層内の攪乱が成長して縦渦対と融合することで形成されるヘアピン状の渦構造であり、これが周期的に生成・発達と崩壊を繰り返すことを明らかにした。
  - ・ 超音速縦渦の崩壊過程では、縦渦内部における縦渦の旋回運動に伴う不安定性と、縦渦外縁に形成されたヘアピン状渦構造の頭部で生じるイジェクション運動と脚部で生じるスウィープ運動による運動量交換によって攪乱が発達し、乱流混合が活発化することを明らかにした。

以上の研究成果は、スクラムジェットエンジン開発における超音速混合促進制御だけでなく、超音速流の遷移予測や乱流制御に必須の超音速流を直接乱流遷移に導く組織構造の解明に貢献するものであり、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。学位論文審査委員会は、本論文の審査および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。