

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560739

研究課題名（和文） 超音速縦渦崩壊過程の解明と超音速混合への応用

研究課題名（英文） Supersonic Streamwise Vortices Breakdown and Its Application for Supersonic Mixing

研究代表者

新井 隆景 (ARAI TAKAKAGE)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：10175945

研究成果の概要（和文）：

スクラムジェットエンジンに関連して、壁面近傍に縦渦が導入された超音速混合場の基本的な流れ場を、シュリーレン法、PIV、熱線を用いた濃度・質量流束同時測定法等で捉え、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た。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た。数値計算では、超音速縦渦の不安定性について調査し、マッハ数依存性等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

For supersonic mixing enhancement, large scale streamwise vortices seem to be the most advantageous. In SCRAM jet (supersonic combustion ramjet) engine, the device which introduces both the large scale streamwise vortices and fuel into supersonic flow needs to be installed on the chamber wall to alleviate the heavy aerodynamic and heat load, so that, it must have the high ability to mix the fluids in near-wall and chamber center regions efficiently. In the present study, we made effort to clarify the mixing performance of such wall-mounted ramp injectors and flow field including the breakdown process of supersonic streamwise vortices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：超音速混合，超音速縦渦，スクラムジェット，不安定性，渦崩壊

## 1. 研究開始当初の背景

SCRAM ジェットエンジン (Supersonic Combustion RAM Jet Engine) や COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) の実現に向けた技術課題として超音速流体混合技術が挙げられる。超音速流中では移流マッハ数が

0.6 を超えると圧縮性の影響により流れ方向に垂直な回転軸を持つような2次元の渦構造の成長は著しく抑制され、混合能はきわめて低く抑えられる。このような理由から、超音速流中で速やかに異種流体を混合させるためには流れ場に人為的に変動を導入し、自

然な状態では発生し得ない乱流場を作り出すことが必要となる。

このような技術的課題に対し、縦渦がつくる変動場の利用が提案されている<sup>(2)</sup>。縦渦の役割は大きく2つあり、(1)縦渦の大規模な運動により主流の流体を混合場に多く取り込むこと (2)縦渦の作り出す乱流渦によって異種流体間の接触面積を増加させ速やかな分子レベルでの混合を行うこと、である。

縦渦による混合を有効に利用するためには縦渦の挙動などについて理解する必要があるが、これらの点については不明な点が多い。

## 2. 研究の目的

申請者らはこれまで、超音速混合場の混合評価方法の開発、それをを用いた超音速混合場の評価、さらには種々の噴射形態における混合評価を行い、超音速流中の噴流が作り出す縦渦が混合機構のキーであることを明らかにしてきた。そこで本研究では、超音速流中に生成された縦渦の崩壊過程を実験と数値計算の表面からより詳細に明らかにし、その結果を超音速混合促進に応用することを目的とする。さらに、縦渦の挙動は境界層の性質に極めて重要な働きをすると考えられるので、縦渦を利用した境界層制御法の開発指針を得ることも視野に入れる。これらはスクラムジェットエンジンの開発のみならず極／超音速飛行体（航空機、宇宙機）の開発に資するものである。

## 3. 研究の方法

(1) PIV、流れの可視化および数値計算による縦渦崩壊過程の解明

超音速縦渦対を圧縮ランプと膨張ランプにより壁面近傍に生成し、その崩壊過程を詳細に観察計測する。

(2) 2線熱線プローブを用いた混合評価方法の開発

超音速流れ場において熱線出力のヘリウム濃度依存性と質量流束（レイノルズ数に関係）依存性を応用して、高時間分解能の濃度、質量流束同時測定法を開発し、縦渦を用いた超音速混合場を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 混合促進技術の改良に必須な濃度の時系列計測手法を確立した。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。すなわち、濃度・質量流束の計測原理、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。また、計測精度向上に関して具体的な改善方法についても触れた。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申請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小スケールの混合場まで計測でき、画期的な計測手法であると言える。

(2) 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。申請者が開発した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すことができたと言える。

(3) 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ため、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。(2)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  $Re > 104$  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たことで、混合状態を制御するための指針を示すことができたと言える。

(4) 数値計算では、超音速縦渦の線形安定性について調査し、マッハ数依存性を明らかにするとともに、衝撃波と縦渦の干渉現象を明らかにし、超音速縦渦を混合促進に用いる場合の指針を得た。

以上、要するに、スクラムジェットエンジンの開発に重要な知見を与えることができた。さらに、超音速乱流混合機構の詳細を明らかにしているので、圧縮性流体力学の発展に寄与すること大である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Arai, S. Sakaue, H. Hayase, T. Hiejima, T. Sunami and M. Nishioka, Streamwise Vortices Introduced by "Hyper-Mixer" on Supersonic Mixing, AIAA Paper 2011-2342, 査読有, 2011, 1-8.
- ② R. Saito, S. Araki, S. Sakaue, T. Arai, H. Taguchi, T. Kojima, and H. Kobayashi, Mixing Enhancement on the Afterburner with Fuel Injection Struts for Hypersonic Vehicle, AIAA Paper 2011-2328, 査読有, 2011, 1-8.
- ③ Kondo, S. Sakaue and T. Arai, Measurement Method of Mass Flux and

Concentration in Supersonic Mixing by Hot-Wire Anemometry, International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences, 査読有, Vol. 2, No. 1, 2010, 15-26.

- ④ A. Kondo, H. Hayase, S. Sakaue and T. Arai, Effect of Expansion Ramp Angle on Supersonic Mixing using Streamwise Vortices, AIAA-2009-7314, 査読有, 2009, 1-6.
- ⑤ A. Kondo, S. Sakaue and T. Arai, Fluctuation of Mass Flux and Concentration on Supersonic Mixing using Streamwise Vortices, AIAA Paper AIAA-2008-2535, 査読有, 2008, 1-8.

[学会発表] (計 15 件)

- ① 新井隆景、田口秀之、舞田正孝、舞田正孝、日本における極超音速機開発のシナリオと海外開発動向、日本航空宇宙学会第 41 期通常総会及び講演会(年会)、2010 年 4 月 15 日、東京大学 山上会館(東京)。
- ② 早瀬裕輝、坂上昇史、新井隆景、須浪徹治、西岡通男、超音速縦渦対の循環が混合に及ぼす影響、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 9 日、北海道大学(札幌)。
- ③ 堀井真吾、坂上昇史、新井隆景、西岡通男、矩形断面を有する超音速ノズル壁境界層の不安定性、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 11 日、北海道大学(札幌)。
- ④ 比江島俊彦、高マッハ数における縦渦の線形不安定性と非線形発達、日本流体力学会年 2010、2010 年 9 月 11 日、北海道大学(札幌)。
- ⑤ 齋藤亮祐、坂上昇史、新井隆景、田口秀之、小島孝之、小林弘明、ストラット型燃料噴射器の後流、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 9 日、北海道大学(札幌)。
- ⑥ 比江島俊彦、超音速縦渦と斜め衝撃波の干渉による渦崩壊について、第 23 回数値流体力学シンポジウム、2010 年 12 月 22 日、仙台市民会館(仙台)。
- ⑦ H. Hayase, A. Kondo, S. Sakaue and T. Arai, Effect of Incoming Boundary Layer Characteristics on Breakdown of Supersonic Streamwise Vortices for Supersonic Mixing, AJCPP2010, 2010 年 3 月 5 日, Miyazaki.
- ⑧ 坂上昇史、堀井真吾、新井隆景、西岡通男、超音速ノズル境界層に生じる横流れ不安定性、第 58 回理論応用力学講演会、2009 年 6 月 9 日、日本学術会議(東京)。
- ⑨ 近藤暁、早瀬裕輝、坂上昇史、新井隆景、

超音速縦渦の挙動に及ぼす循環の影響，  
日本流体力学会年会 2009，2009 年 9 月 4  
日，東洋大学（東京）。

- ⑩ 樋上惠亮，坂上昇史，新井隆景，西岡通男，横方向汚染による超音速境界層の乱流遷移，日本流体力学会年会 2009，2009 年 9 月 3 日，東洋大学（東京）。
- ⑪ 坂上昇史，堀井真吾，新井隆景，西岡通男，超音速ノズル境界層に生じるストリーク構造と横流れ不安定性，日本流体力学会年会 2009，2009 年 9 月 4 日，東洋大学（東京）。
- ⑫ 比江島俊彦，空間的に発達する圧縮性縦渦の安定性と数値計算，日本流体力学会年会 2009，2009 年 9 月 4 日，東洋大学（東京）。
- ⑬ 比江島俊彦，超音速流中にある非対称楔翼の後流と衝撃波の干渉，第 23 回数値流体力学シンポジウム，2009 年 12 月 18 日，仙台市民会館（仙台）。
- ⑭ 近藤暁，坂上昇史，新井隆景，縦渦が導入された超音速混合場の濃度・質量変動計測，日本流体力学会年会 2008，2008 年 9 月 4 日，神戸大学（神戸）。
- ⑮ 比江島俊彦，圧縮性非粘性縦渦の線形不安定性，日本流体力学会年会 2008，2008 年 9 月 7 日，神戸大学（神戸）。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新井 隆景 (ARAI TAKAKAGE)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：10175945

### (2) 研究分担者

坂上 昇史 (SAKAUE SHOJI)  
大阪府立大学・工学研究科・助教  
研究者番号：70244655

### (2) 研究分担者

比江島 俊彦 (HIEJIMA TOSHIHIKO)  
大阪府立大学・工学研究科・助教  
研究者番号：60316007