

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：24403  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18H01626  
研究課題名（和文）燃料濃度場・速度場同時計測による超音速縦渦混合過程の解明と混合促進法の提案

研究課題名（英文）Clarification of Supersonic Mixing of Streamwise Vortices by Simultaneous Measurement of Fuel concentration and Velocity, and Propose of Mixing Enhancement

研究代表者  
新井 隆景（Arai, Takakage）  
大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10175945  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：LIF（レーザ励起蛍光法）とPIV（粒子追従速度計測法）を組み合わせ、スクラムジェットエンジン開発に必須の超音速混合技術の確立と超音速乱流混合過程の解明を行った。申請者らは、ヨウ素のLIF画像をPIVの粒子画像と見なすことで、濃度場と速度場の同時計測を可能とする手法を提案した。この手法を用いて、擬似燃料ガスの流動と主流ならびに混合促進に用いる超音速縦渦の流動との関係を明らかにした。さらに、混合促進を谿るために、後退角を付与した超音速縦渦発生装置を考案し、その有効性を明らかにした。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

スクラムジェットエンジンは極超音速飛行を可能とする空気吸い込み式エンジンで、このエンジンが開発されれば、完全再使用型で有翼のスペースプレーンが可能となる。そのためには、超音速燃焼を実現する必要があり、超音速流中での燃料の混合促進が最重要課題である。本研究は、燃料濃度場と超音速速度場の同時計測を行うことで、燃料混合場の理解と混合促進法を提案することを目的としたものである。燃料濃度場と速度場の同時計測は、LIF法とPIV法を組み合わせる新たな手法を提案し、実現した。その手法を用いて、後退角を持った超音速縦渦発生装置の提案を行い、超音速混合に適していることを示した。

研究成果の概要（英文）：LIF (laser-induced fluorescence) and PIV (particle-induced velocimetry) were combined to establish a supersonic mixing measurement technique and to clarify the supersonic turbulent mixing process, which is essential for the development of scramjet engines. The authors proposed a method that enables simultaneous measurement of the concentration and velocity fields by considering the LIF image of iodine as the particle image of PIV. Using this method, the relationship between the flow of pseudo-fuel gas, the free stream and supersonic streamwise vortices used for mixing enhancement was clarified. In addition, a supersonic streamwise vortex generator with a swept angle was devised and its effectiveness was clarified in order to enhancement mixing.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：超音速混合 スクラムジェットエンジン 再使用型宇宙往還機

## 1 . 研究開始当初の背景

SCRAM ジェットエンジン ( Supersonic Combustion RAM Jet Engine ) の実現に向けた技術課題として超音速乱流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、縦渦が作る変動場の利用が提案されている . 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混合を行うこと、である . 超音速縦渦による混合を有効に利用するためにはこの縦渦の挙動などについて理解する必要がある . これまで、申請者らは、超音速縦渦の発生デバイスとして圧縮ランプと膨張ランプからなるデバイスを提案し、その形状が、超音速縦渦の挙動に及ぼす影響について、PIV を用いて調査してきた . その結果、縦渦の崩壊挙動に影響を及ぼすことが明らかになりつつある . 混合の観点からは、混合が進むにつれて、流れ場が一様になると考えられるので、超音速縦渦の作る循環や速度欠損は速やかに減少することが望ましい . 一方、燃料の濃度計測に関しては、申請者らは、熱線を用いる方法や LIF を用いる方法を行っている . しかし、どのような流れ場、噴射状態が速やかな混合や、広範囲の燃料の拡散に寄与するのかは、依然として、解明されていない . したがって、縦渦の流れ特性が混合、特に、燃料混合にどのような影響を及ぼすかを明らかにするためには、種々の流れ場で、燃料の濃度場と速度場 ( 縦渦の流れ場 ) を同時に計測し、その関係を特定することが重要である .

## 2 . 研究の目的

上述のように、スクラムジェットエンジンの実現には、燃器内の流れ場だけでなく、燃料の混合の様相 ( 濃度分布 ) を明らかにし、流れ場との関連を解明することが重要である . 本研究では、SCRAM ジェットエンジン内の流れ場と燃料濃度場を測定し、縦渦の流れ特性が混合、特に、燃料混合にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする . 本研究課題で提案するような、縦渦を用いて超音速混合を行うような場合、流れ場と燃料の濃度場の同時計測ができれば、混合に都合のよい流れ場の提案、すなわち、燃料噴射デバイスの提案ができることになる . さらに、乱流混合現象の物理的解明にもつながり、工学的、学術的意義は大きい .

## 3 . 研究の方法

申請者らがこれまで開発してきた縦渦導入デバイスに燃料噴射孔を付け、擬似燃料としてヘリウムを噴射し、LIF ( レーザ励起蛍光法 ) と PIV ( 粒子追従速度計測法 ) を組み合わせ超音速混合場の濃度場と速度場の同時計測を行う . その結果を用いて、超音速混合に適した燃料噴射デバイスの提案と超音速乱流混合機構の解明を行う .

## 4 . 研究成果

(1) LIF 画像を PIV 計測法の画像データとして取り扱うことによる濃度・速度同時計測法を提示し、その有効性を確認した . 具体的には、ヨウ素ガスを含む空気を擬似燃料として、超音速流中に噴射し、ステレオ PIV システムの光源 ( ダブルパルスレーザー ( Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 ( 波長 532 nm ) , 発振パルス幅 10 ns ) ) を使用してヨウ素ガスの蛍光を 2 台のカメラで捕らえ、ステレオ PIV システムで解析した . その結果、ヨウ素ガスの分布の動きをとらえることができ、その動きから速度ベクトルを算出することができた . この速度ベクトルの妥当性を検証するために、同様のシステムを用いて、噴出空気内にステアリン酸の微粒子 ( PIV システムの標準トレーサー ) を混入させ、PIV システムを用いて同様の測定を行った . その結果、混合が進んだ下流では ( 噴射位置から 40 mm 下流 ) , 速度ベクトルの相関が 99% となった . すなわち、LIF 画像を PIV 計測法の画像データとして取り扱うことによる速度場の測定が可能であることが示された . 同時に LIF 画像の明暗の強度はヨウ素ガスの濃度に相対的に比例すると考えられるので、濃度分布の測定や擬似燃料の存在領域の同定が可能であることが示された .

(2) 流れ場の計測では、PIV システムのヴェージョンアップを行い、2 枚の画像を得る間隔を従来の 2 分の 1 として、0.2  $\mu$ s とした . その結果、データロストの確立が減少し、流れの平均場だけでなく、乱流強度の評価が可能となった . 上記のシステムを用いて、超音速縦渦混合層の流れ場を計測した . その結果、乱流混合が盛んにおこなわれている箇所は縦渦の外縁で、主流とのせん断層であることが判明した . なお、本システムは流れの 3 成分について測定可能であり、旋回成分の乱れについても同様であることが分かった . 特に、主流方向の乱れ度については、熱線流速計によっても検証された . 縦渦の崩壊と混合に関しては、循環の減少と乱流強度の変化に関係があり、循環が減少するにつれて、乱流強度も減少し、渦崩壊が生じていることを示した .

(3) 燃料の超音速混合を考えるうえで、主流と燃料噴射の相対関係は重要である . そこで、垂直噴射と平行噴射を比較し、特に、超音速縦渦を用いた混合機構について調査した . 平行噴射の場

合、本実験では、縦渦領域に沿って噴射されるので、擬似燃料は縦渦の外縁から内部に向かって縦渦領域内に速やかに拡散する様相が捉えられた。しかし、擬似燃料の存在領域は、ほぼ縦渦内に限られることが判明した。このことは、縦渦内の速度の遅い領域を保炎領域として利用できる可能性を示しているが、燃焼領域が流路全体にならないことを意味する。一方、縦渦生成デバイスの上流から流れに垂直に擬似燃料を噴射した場合には、擬似燃料は、平行粉噴射に比べて流路全体に分布するが、縦渦領域に内部にはわずかしが混合しなかった。すなわち、垂直噴射は燃焼領域を拡大させる可能性があるが、保炎には、別の機構を考える必要がある。さらに、垂直噴射の場合には、噴射による圧力損失も問題になる。垂直噴射と平行噴射を併用することも考えるべきである。

(4) 数値計算としては、衝撃波と超音速縦渦との干渉が調査された。計算手法としては、LES による非定常解析を行った。その結果、超音速縦渦に斜め衝撃波が入射することで、超音速縦渦に不安定波が誘起され、成長し、ヘアピンタイプの構造を作ることが示唆された。このヘアピンタイプの構造の発生周波数は実験と比較され、定量的にも定性的にもほぼ一致することが判明した。すなわち、超音速縦渦崩壊には衝撃波との干渉が重要な役割を示しているほか、ヘアピンタイプの構造がさらに小スケールの構造へ崩壊することが重要である。超音速単独渦の不安定性も直接数値計算で調査され、渦の強さや渦中心部の速度欠損が不安定性に及ぼす影響などが明らかにされた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Hiejima	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of specific structures occurring from hyper-breakable vorticity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Fluids	6. 最初と最後の頁 1701-1705
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5100643	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Hiejima	4. 巻 4
2. 論文標題 Compressibility effects of supersonic {Batchelor} vortices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 3903-3928
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.093903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Hiejima, T. Oda	4. 巻 32
2. 論文標題 Shockwave effects on supersonic combustion using hypermixer struts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Fluids	6. 最初と最後の頁 6104-6121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5128677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Hiejima	4. 巻 168
2. 論文標題 On the rapid breakdown of supersonic streamwise vortices with opposite sign double annular vorticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 220-229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2019.12.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Sakaue, M. Kamata, T. Arai	4. 巻 18
2. 論文標題 Turbulent Intensity in Supersonic Mixing Transition by Streamwise Vortices Fluctuation Measurements by Hot-wire Anemometer and PIV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan	6. 最初と最後の頁 258-265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.18.258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Hiejima	4. 巻 897
2. 論文標題 Helicity effects on inviscid instability in Batchelor vortices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Hiejima	4. 巻 32
2. 論文標題 How the circulation and axial velocity deficit in Batchelor vortices affect their disturbance growth?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 76107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0014192	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 M. Kamata, S. Sakaue, and T. Arai
2. 発表標題 Breakdown Process of Supersonic Streamwise Vortices in SCRAMJET Engine: Mass Flux Fluctuation Measured by Hot Wire Anemometer in Supersonic Mixing Region
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (Fukui, Japan, September, 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Arai, S. Sakaue, Y. Yamano, N. Tozaki, and K. Hashimoto
2. 発表標題 Concentration and Velocity Field of Supersonic Fuel Mixing by using LIF and PIV method.
3. 学会等名 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2019) (Gold Coast, Australia, December, 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田真由, 坂上昇史, 新井隆景
2. 発表標題 超音速縦渦の崩壊過程における乱流強度
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木下 颯, 鎌田真由, 坂上昇史, 新井隆景
2. 発表標題 超音速縦渦による混合遷移過程における乱流強度とその空間分布
3. 学会等名 第56回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井 单宇, 比江島 俊彦, 新井 景隆
2. 発表標題 鋭いノーズ形状を持つ極超音速飛翔体の先端に発生する熱流束の予測
3. 学会等名 第56回関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村 海斗, 比江島 俊彦
2. 発表標題 SRストラットの燃料噴射角度が超音速燃焼に与える効果
3. 学会等名 第33回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田真由, 新井隆景, 坂上昇史
2. 発表標題 超音速縦渦の崩壊における縦渦の循環, 速度欠損について
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018 (2018年9月, 大阪)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 矢橋卓朗, 坂上昇史, 新井隆景, 西岡通男
2. 発表標題 超音速空気・ヘリウム混合気流中で計測された熱線時定数に基づく熱線プローブの熱容量因子推定
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018 (2018年9月, 大阪)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 加藤陽介, 比江島俊彦
2. 発表標題 2次元超音速ジェットにおけるせん断渦とマッハ波の発生について
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018 (2018年9月, 大阪)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 小松 直登, 比江島俊彦
2. 発表標題 SLAU法を用いた超音速乱流境界層の数値計算
3. 学会等名 第55回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会 (11月, 名古屋)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 比江島俊彦
2. 発表標題 超音速 Batchelor 渦の発達におけるエントロピー変動の影響について
3. 学会等名 日本流体力学会第31回数値流体力学シンポジウム(12月, 東京)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 T. Hiejima
2. 発表標題 Development of linear unstable modes in supersonic streamwise vortices using a weighted essentially non-oscillatory scheme
3. 学会等名 10th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10) (Barcelona, Spain, July, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 T. Hiejima
2. 発表標題 Effects of thermodynamic profiles on developments of supersonic Batchelor vortices
3. 学会等名 The 12th European Fluid Mechanics Conference (EFMC12) (Vienna, Austria, Sep., 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 S. Shichiri, S. Yamanouchi, S. Sakaue, T. Arai
2. 発表標題 Interaction of Supersonic Streamwise Vortices and Incident Shock Wave
3. 学会等名 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJCPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下 颯, 諫山新平, 坂上昇史, 新井隆景
2. 発表標題 超音速縦渦の崩壊に及ぼすスケールと主流マッハ数の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 七里真吾, 山之内志穂, 坂上昇史, 新井隆景
2. 発表標題 Swept Ramp Injectorにより作られる超音速縦渦の形成・崩壊
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	坂上 昇史  (Sakaue Shoji)  (70244655)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授   (24403)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	比江島 俊彦  (Hiejima Toshihiko)  (60316007)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・講師    (24403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関