

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06605

研究課題名(和文) 超音速乱流混合過程のマッハ数依存性解明と混合促進法の開発

研究課題名(英文) Clarifying Mach Number Effect for Supersonic Mixing and Developing Mixing Enhancement Device

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：スクラムジェットエンジンを実用化するためには、広い飛行マッハ数、特に高マッハ数で作動することが求められる。本研究は、高マッハ数における超音速乱流混合促進法の開発を目的とした。超音速縦渦の崩壊には、その縦渦で形成される循環の値が大きく関係し、高マッハ数では導入される循環値が小さく、崩壊が遅れることが明らかになった。その結果を受け、ランプ形状の縦渦発生装置に後退角を付けることを提案し、実験と数値シミュレーションを行った。その結果、循環の大きさは後退角で変化し、後退角が小さいほど循環は大きく、崩壊も早いことが分かった。以上より、後退角を付与した本縦渦導入装置は高マッハでも有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：For supersonic mixing enhancement in scramjet engine, streamwise vortices and its breakdown seem to be the most advantageous. In order to increase the mixing performance, it is important to introduce streamwise vortices which have larger circulation, and to enhance breakdown of them.

In the present study, we examined supersonic mixing field which is generated by ramp injector which has swept ramp angle, by Schlieren flow visualization, oil flow, and stereoscopic PIV method. It was confirmed that strength of streamwise vortices becomes stronger and they breakdown rapidly as the swept ramp angle decreases. And, we conducted the numerical simulations for the flow around the swept ramp device. The results clearly showed that the scale of the vortex region and the magnitude of the rotating speed increased as the swept ramp angle decreased. Finally, the swept ramp device which is proposed in the present study is effective for supersonic mixing on the case of the higher flight Mach number.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：スクラムジェット 超音速混合 混合促進 超音速縦渦 渦崩壊

### 1. 研究開始当初の背景

スクラムジェットエンジン(超音速燃焼ラムジェットエンジン)を実用化するためには、広い飛行マッハ数、特に高マッハ数で作動をすることが求められる。その開発には、基盤技術である超音速混合促進の進展が極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、高マッハ数における超音速乱流混合過程の解明と促進法の開発を行い、超音速燃焼器の設計指針を得ることを目的とする。これらは、スクラムジェットエンジンに関係する超音速混合問題だけでなく、超・極超音速飛行時や宇宙往還機の大気圏再突入時に重要な問題となる境界層の乱流制御に関しても、有効な指針を与える。

### 3. 研究の方法

PIV, 流れの可視化, 熱線流速計, LIF および数値計算による超音速縦渦混合場を評価する。後退角を付与した縦渦導入装置の性能を前述の手法で評価する。

### 4. 研究成果

(1) 超音速縦渦の形成・崩壊に与える後退角の影響をシュリーレン可視化法, ステレオPIV法, オイルフロー法を用いて調べた。シュリーレン法より、後退角が小さくなるにつれて渦輪構造を示していると考えられるデバイス下流の明暗縞の波長が大きくなり、また輝度の変動実効値分布より強い乱流場が発生していると考えられる結果を得た。ステレオPIV計測より y-z 断面の平均速度分布を算出し、後退角が小さくなるにつれ縦渦の旋回速度は大きく、旋回流が存在する領域も広がることを示した。これらの効果により後退角が小さくなるにつれ上流側の循環は大きい下流側では後退角間で循環に差は見られず、崩壊の早さが異なることを示した。後退角が小さくなるにつれ縦渦の旋回速度は大きく、旋回流が存在する領域も広がることはわかったが、装置の都合上計測断面が一番上流でもデバイス下流  $x = 20$  mm であり、後退角による循環を大きくする詳細なメカニズムは PIV 法では調べることができない。後退角の効果を調べるために行ったオイルフロー法によって後退角が小さくなるほどスパン方向速度が誘起されていることを定性的に把握した。

(2) 実験では計測困難な縦渦対導入デバイス近傍の流れ場を調べるために支配方程式として RANS を用いた数値計算を行った。解析対象は主流マッハ数 1.8 の縦渦対導入デバイス周りの流れとし、後退角  $\theta$  は  $\theta = 90^\circ$ ,  $70^\circ$  で行った。計算結果により  $\theta = 90^\circ$  の場合に比べて  $70^\circ$  の場合、渦領域のスケールと旋回速度が大きくなるが、これは圧縮斜面から膨張斜面に吹き下す横流れが後退角によって強くなるからであるとの結論を

得た。後退角が小さいほど上流の循環が大きくなった理由は、この後退角の効果により縦渦のスケールと旋回速度が大きくなるからであることが分かった。また縦渦導入時にほぼ同スケールで、スパン方向速度を寄与しない場合の縦渦と比較することで、後退角を付与した場合の旋回速度増加により下流での縦渦の成長率が大きくなることを示した。

(3) 縦渦の崩壊過程を調べるために行った熱線計測の結果を示した。計測は渦中心である  $z = 2, 6, 8$  mm で固定して高さ方向に位置を変えて行った。得られた質量流束の変動実効値分布より、変動は縦渦主流間の剪断層で最も大きく、同時に平均質量流束分布の方さ方向勾配が最も大きい位置にほぼ一致することを示した。また質量流束変動のスペクトル分布より、質量流束変動の最も高い y 位置での卓越周波数が全ての後退角で第 3 章のシュリーレン画像で確認した明暗縞構造の波長とほぼ一致しており渦輪構造を熱線計測で捉えていることを示した。その卓越周波数におけるスペクトルは後退角が小さくなるほど高くなることから強い渦輪が形成されていることを示し、それが後退角の小さい場合に縦渦の崩壊が早くなる原因であると考えた。また計測最下流位置である  $x = 60$  mm では全ての後退角において縦渦内部で小スケール渦に崩壊していることを Kolmogorov の  $-5/3$  乗則から示した。

### 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 6 件)

1. S. SAKAUE, S. SHICHIRI, Y. TSUKAZAKI, K. HASHIMOTO, T. ARAI, Breakdown of Counter-Rotating Supersonic Streamwise Vortices Generated by Swept Ramp Injector, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.16, 2018, 172-176. (査読有)
2. T. Hiejima, Onset conditions of vortex breakdown in supersonic flows, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 840, 2018, R1. (査読有)
3. T. Hiejima, Streamwise vortex breakdown in supersonic flows, Physics of Fluids, Vol.29, 2017, 54102. (査読有)
4. T. Hiejima, Heoretical analysis of streamwise vortex circulation induced by a strut injector, Physical Review Fluids, Vol.1. 2016, 054501. (査読有)
5. T. Hiejima, Effects of streamwise vortex breakdown on supersonic combustion, Physical Review E, vol. 93, 201, 2016, 043115. (査読有)
6. T. Hiejima, Instability of isolated

hollow vortices with zero circulation, Physics of Fluids, vol.28, 2016, 044104. (査読有)

[学会発表] (計 24 件)

1. 小田哲平, 比江島俊彦, 縦渦導入型ストラットから生じる斜め衝撃波と縦渦の超音速燃焼場に対する効果, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会講演論文集, 2018, 大阪. (査読無)
2. 谷川大貴, 坂上昇史, 新井隆景, 弱い圧縮波に誘起される非定常境界層の乱流遷移の観察, 第 53 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2017, 名古屋. (査読無)
3. 七里真悟, 塚崎大, 坂上昇史, 新井隆景, Swept Ramp により作られる超音速縦渦混合場の観察, 第 53 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2017, 名古屋. (査読無)
4. 七里真悟, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速縦渦の形成・発達・崩壊について, 日本流体力学会年会 2017, 2017, 東京. (査読無)
5. 本田勲文, 塚崎大和, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速縦渦の崩壊に及ぼす循環と速度欠損の影響, 日本流体力学会年会 2017, 2017, 東京. (査読無)
6. 大井雅恭, 坂上昇史, 新井隆景, 西岡通男, 超音速流中の熱線に関する質量流束校正の簡便な方法, 日本流体力学会年会 2017, 2017, 東京. (査読無)
7. 橋本和真, 坂上昇史, 新井隆景, LIF 法と PIV 法を用いた超音速縦渦混合場の濃度場と速度場の相関, 第 54 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2017, 京都. (査読無)
8. S. SHICHIRI, Y. TSUKAZAKI, K. HASHIMOTO, S. SAKAUE, T. ARAI, Breakdown of Counter-Rotating Supersonic Streamwise Vortices Generated by Swept Ramp Injector, ISTS31, 2-17, 2017, Matsuyama, Ehime, Japan. (査読有)
9. 比江島俊彦, 超音速流中での渦崩壊の発生, 日本流体力学会年会 2017, 2017, 東京. (査読無)
10. 比江島俊彦, 小田哲平, 燃料噴射ストラットが作り出す縦渦と衝撃波が超音速燃焼に与える影響, 第 54 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2017, 京都. (査読無)
11. 比江島俊彦, 超音速縦渦の線形不安定モードの発達における非線形補間法の精度について, 日本流体力学会第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017, 京都. (査読無)
12. Y. Tsukazaki, S. Sakaue, T. Arai, Mach Number Effect on Breakdown of Streamwise Vortices in Supersonic Flow, 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, 2016, Takamatsu, Kagawa, Japan. (査読有)
13. 谷川大貴, 高島耕司, 坂上昇史, 新井隆景, 宮地徳蔵, 弱い圧縮波に誘起される非定常境界層の乱流遷移に関する研究, 流体力学会年会 2016, 2016, 名古屋. (査読無)
14. 七里真悟, 菅野創介, 坂上昇史, 新井隆景, 縦渦と超音キャビティ振動の干渉場に関する研究, 流体力学会年会 2016, 2016, 名古屋. (査読無)
15. 塚崎大和, 丸山駿太朗, 比江島俊彦, 坂上昇史, 新井隆景, 超音流中に導入した縦渦の崩壊特性について, 流体力学会年会 2016, 2016, 名古屋. (査読無)
16. 橋本和真, 坂上昇史, 新井隆景, LIF 法を用いた超音縦渦混合場の可視化, 流体力学会年会 2016, 2016, 名古屋. (査読無)
17. 大井雅恭, 津風呂俊輔, 坂上昇史, 新井隆景, 西岡通男, 乱流計測における定電流熱線の熱特性変化の影響, 流体力学会年会 2016, 2016, 名古屋. (査読無)
18. T. Arai, S. Maruyama, Y. Tsukazaki and S. Sakaue, The Effect of Swept Angle of Ramp Injector on Supersonic Mixing using Streamwise Vortices, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015, Kobe, Japan. (査読有)
19. T. Arai, S. Sugano, Y. Tsukazaki and S. Sakaue, Interaction between Supersonic Cavity flow and Streamwise vortices for Mixing Enhancement, 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2015, Glasgow, Scotland. (査読有)
20. 塚崎大和, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速流中に導入した縦渦の崩壊とマッハ数依存性, 日本流体力学会 年会 2015, 2015, 東京. (査読無)
21. 坂上昇史, 津風呂俊輔, 新井隆景, 西岡通男, 定電流形熱線の瞬間熱損失に基づく超音速乱流境界層の計測, 日本流体力学会 年会 2015, 2015, 東京. (査読無)
22. 丸山駿太朗, 坂上昇史, 新井隆景, Swept Ramp に誘起される超音速縦渦対の崩壊, 第 52 回関西中部支部合同秋期大会, 2015, 大阪. (査読無)
23. 野村亮介, 坂上昇史, 新井隆景, 超音速流による液体の微粒化と縦渦の干渉, 第 52 回関西中部支部合同秋期大会, 2015, 大阪. (査読無)
24. 津風呂俊輔, 坂上昇史, 新井隆景, 定電流熱線の瞬間熱損失に基づく超音速乱流計測, 第 52 回関西中部支部合同秋期大会, 2015, 大阪. (査読無)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 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・准教授  
研究者番号：70244655

### (3) 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