

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04841

研究課題名(和文) 濃度・質量流束変動の同時熱線計測による混合能評価と超音速混合遷移機構の解明

研究課題名(英文) Estimation of mixing ability by simultaneous hot-wire measurement of concentration and mass flux fluctuation and clarification of supersonic mixing transition

研究代表者

坂上 昇史 (Sakaue, Shoji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70244655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、熱線流速計による混合能評価法の確立と、縦渦による超音速混合において3次元的な乱流変動により異種流体間の接触面積が飛躍的に増大する混合遷移機構の解明を目的とした。熱線流速計については、濃度と質量流束が既知の流れが得られる超音速ノズルを用いた校正システムを構築し、空気流について有効性を確認した。なお、混合気を用いた場合に空気流とは異なる挙動を示し、その原因を明らかにすることは出来なかった。縦渦による混合遷移については、実験と数値計算により、縦渦自身の不安定性や入射する衝撃波によりヘアピン渦構造が形成され、このヘアピン渦による乱流運動エネルギー生成により乱流状態に至ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した熱線回路は300kHz以上の応答周波数帯域を持ち、超音速ノズルを用いた校正システムを組み合わせることにより、超音速流中の高周波数変動を精度よく計測可能である。この熱線流速計による計測結果とPIVシステムによる計測結果を比較することで、本研究で使用したPIVシステムにより速度変動の空間分布が統計的に計測可能であることを確認した。さらに、この実験結果との比較により数値計算の精度と再現性を検証するとともに、混合遷移機構の詳細について知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a simultaneous measurement of mass flux and concentration using hot-wire anemometer and to clarify the mechanism of mixing transition due to supersonic streamwise vortices.

The hot-wire measurement requires the calibration using a flow of known concentration and mass flux. We have designed and constructed the supersonic calibration system, and confirmed its effectiveness in the measurement of air flow. Also, we have carried out the experiment and the numerical simulation of the flow field with streamwise vortices generated in supersonic wind tunnel. The results have clarified that the mixing transition of the supersonic streamwise vortices is achieved due to the hair-pin like vortex structures formed in its breakdown process and the Reynolds stress generated by the hair-pin vortex causing momentum exchange between freestream and vortex region.

研究分野：航空宇宙流体力学，乱流遷移，超音速乱流，流体計測法

キーワード：航空宇宙流体力学 超音速乱流 超音速混合遷移 熱線流速計 混合計測

1. 研究開始当初の背景

スクラムジェットエンジン (Supersonic Combustion Ram Jet Engine) 実現のための技術課題の1つに、超音速混合促進技術が挙げられる。スクラムジェットエンジンは極超音速飛行時に動作可能とするため、燃焼器内に取り込んだ空気を亜音速まで減速せず超音速状態で燃焼を行う。燃焼器の長さ (1 m 程度と想定される) と気流速度から、気流の燃焼器内停留時間は 1 ms 程度であり、この短時間の間に吸入空気と燃料を混合・燃焼させる必要がある。しかし、超音速流中では、攪乱の移流マッハ数が 0.6 を超えると圧縮性の影響により攪乱の成長が抑制され、2次元混合層のように流れに対して垂直の回転軸を持つ渦構造による混合能は著しく低下する。このため、超音速流中で異種流体を速やかに混合させる方法として、流れと同じ方向に回転軸を持つ縦渦の利用が提案されている。

縦渦の役割は、まず、大規模な渦運動により主流流体を縦渦内に取り込み、次に、縦渦の崩壊に伴って生じる3次元的小スケールの乱流渦により異種流体間の接触面積を飛躍的に増大させることである。超音速流中に形成された縦渦が乱流化する場合、縦渦の循環 Γ と動粘性係数 ν に基づく Γ/ν が 10^4 を越える領域で、変動のパワースペクトル分布に Kolmogorov の $-5/3$ 乗則に従う領域が現れることを実験的に確認している。この $-5/3$ 乗則に従うスペクトル分布を示す流れ場は十分発達した乱流状態にあり、それゆえ、混合遷移が起きて混合能も優れているはずであるとの判断から、できるだけ循環の大きな縦渦の生成を目指した研究を行っている。図1に示す圧縮斜面と膨張斜面からなる縦渦導入デバイスによって超音速流中に形成される縦渦の挙動を非混合流の場合について調べた結果、縦渦の循環やスケールは斜面の角度によって変化し、圧縮斜面に後退角を付与することでより循環の大きな縦渦が生成されることを確認している。

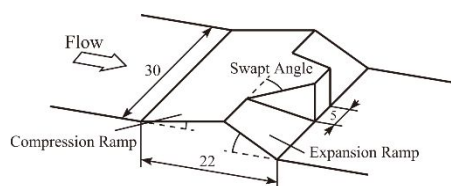


図1 縦渦導入デバイス

一方、混合の観点からは、実際に燃料を流れ場中に導入し、その混合・拡散過程を計測して混合能を評価する必要があると考え、熱線流速計を用いた濃度・質量流束の同時計測システムの開発に取り組んできた。熱線流速計は点計測であることから、変動の構造に関する情報を得ることは容易ではないが、時間・空間分解能から超音速流中での変動の強度やスペクトルなどの定量的情報を得ることに適しており、また、超音速乱流混合場の計測に熱線流速計を用いた場合、乱流強度 (速度変動) だけでなく混合状態 (濃度変動) の瞬時信号が同時に得られ、混合場の定量的な把握が可能であることから、その意義は極めて大きいと考えられる。

2. 研究の目的

スクラムジェットエンジンの高性能化には、超音速流中での燃料と空気の迅速な混合と、その正確な評価が不可欠であり、本研究は、混合能評価の確立と、3次元的小スケールの乱流変動により異種流体間の接触面積が飛躍的に増大する混合遷移機構の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 熱線流速計による混合評価

熱線による濃度・質量流束計測の原理は、気体による熱伝導率の違いにより、同じ質量流束の流れでも、次式で表される熱線の熱損失 HLR が異なることである。

$$HLR = A(c) + B(c) (\rho u)^n \quad (1)$$

$A(c)$, $B(c)$, n は、校正により定める熱線固有の係数であり、 ρu と c は計測点での質量流束と濃度を表す。熱損失特性の異なる2本の熱線を用いて近似的に同一点を計測すれば、式(1)を連立させることでそれぞれの熱損失から質量流束と濃度が計測可能である。熱線計測には一般に定温度型熱線回路が使用されることから、熱線流速計による混合場の計測は、そのほとんどが亜音速流に限られている。そこで、図2に示す、応答周波数帯域 350 kHz の定電流型熱線流速計を用いて超音速混合場の定量計測法の確立を目指す。熱線計測には、予め既知の流れ場を用いた校正が必須であるが、小型超音速ノズルに混合気を導入することで、濃度と質量流束が既知の超音速流れが得られる校正システムを使用する。

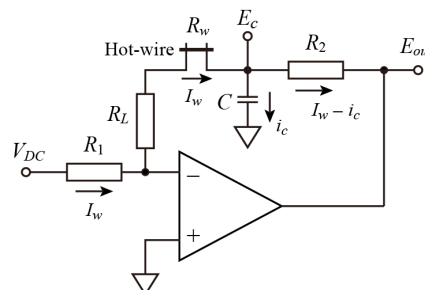


図2 定電流型熱線回路

(2) 超音速縦渦を用いた混合遷移機構

図 1 に示す縦渦導入デバイスにより超音速流中に形成された縦渦による混合遷移について、実験と数値計算により調べる。実験には、前述の定電流型熱線流速計とともに、定量化シュリーレン法や 3 次元 PIV システムを使用し、縦渦の強さ(循環)やスケール、縦渦の不安定性や崩壊特性について調べ、縦渦の混合能と渦レイノルズ数、熱線計測によって得られる $-5/3$ 乗スペクトルの成り立つ周波数帯域幅の関係を明らかにする。さらに、実験では計測が困難なデバイス近傍や縦渦の崩壊から混合遷移に至る流れについて、実験条件に合わせた CFD 解析を行い、超音速混合遷移機構に関して考察する。

4. 研究成果

(1) 熱線の濃度・質量流束校正

図 3 は、熱損失特性の異なる熱線として (a) 直径 3 μm と (b) 5 μm のタングステン線を用い、空気と He の混合気 (He 濃度 $c = 0\%$, 20%, 40%, 60%, 100%) に対して濃度・質量流束校正を行った結果の一例で、熱線の熱損失 HLR を質量流束の平方根に対して示している。図中の実線は、最小二乗法によるそれぞれの濃度に対する校正曲線である。個々の濃度において、熱線の熱損失は質量流束の平方根にほぼ比例することが確認できる。しかし、異なる濃度の校正曲線が交差している。これは、質量流束が等しく濃度が異なる場合に熱線の熱損失が等しくなることを意味し、前述の熱線の動作原理を考えると不合理である。事実、熱線の熱損失を、混合気による強制対流熱伝達を仮定して評価すると、異なる濃度の熱損失が交差することはない。また、校正曲線の勾配(式(1)の B)は、低濃度の場合、実験結果と良い一致を示すが、濃度が増すにつれて実験結果との差が大きくなることから、質量流束の評価に問題があると考えられた。小型超音速ノズルを用いた校正システムにおいて、混合気を節約するため、空気流の結果をもとに混合気を用いた流れのマッハ数を推定し質量流束を評価したが、実際に混合気を使用して流れを計測すると、He 濃度が高くなるに従ってノズル内の流れが空気の場合と異なることが確認された。しかし、残念ながら熱線計測に適した時期に COVID-19 の感染拡大に伴う大学のロックアウトが行われたため、十分に検証実験を行うことが出来ず、原因の特定と解決には至らなかった。

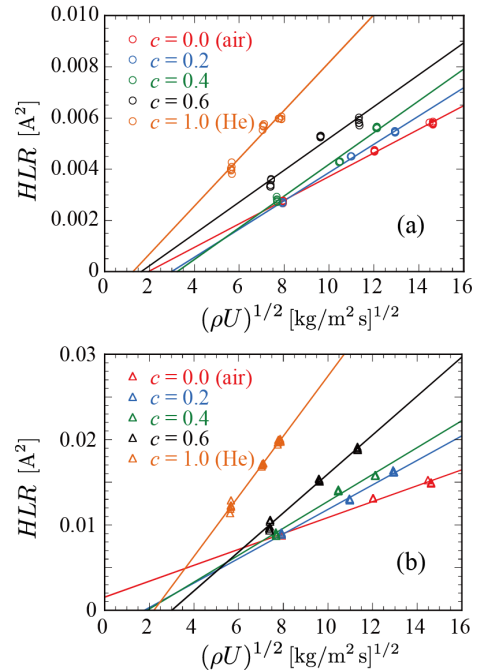


図 3 熱線の濃度・質量流束校正結果：
(a) 直径 3 μm , (b) 5 μm のタングステン線。

(2) 超音速縦渦の崩壊と混合遷移過程

前述のように、熱線流速計による混合計測手法を確立することは出来なかったが、空気流に対しては変動強度やスペクトル分布の計測などにおいてその精度と有効性を確認している。一方、縦渦による超音速混合場の速度計測に用いる 3 次元 PIV システムは、計測のサンプリングレートが 4 Hz と低いが、計測断面内の速度 3 成分を同時一括計測することが可能であり、多数の計測結果から統計的に変動強度が推定できれば、変動の空間分布が得られ、レイノルズ応力分布を推定できる可能性があると考えた。

図 4 は、同じ計測点における熱線流速計による質量流束 ρu (×) と PIV 計測による流れ方向速度 u (●) の比較である。(a) は平均分布、(b) は変動実効値分布であり、実効値は各計測点での局所平均値で無次元化している。熱線流速計による質量流束変動には密度変動が含まれるが、変動実効値分布は定性的、定量的にほぼ一致しており、本研究で使用した PIV 計測システムは、統計的ではあるが、速度変動の実効値分布を捉えることが出来ると判断される。

図 5 は、PIV 計測による流れと垂直な断面の速度分布の一例である。(a) は平均速度分布で、背景色は流れ方向速度、矢印は断面内の速度ベクトルを示している。(b)~(d) は瞬間の計測結果から統計的に評価した各速度成分の変動実効値で、変動の大きな領域を赤、小さい領域を青で示している。流

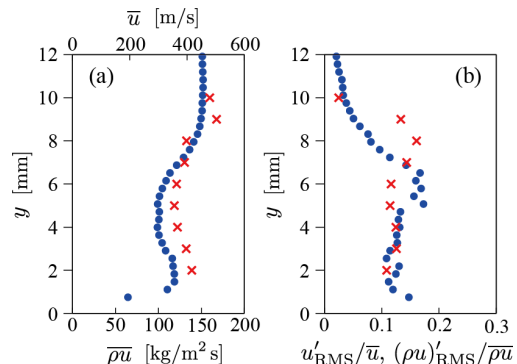


図 4 熱線流速計と PIV による計測結果の比較：
(a) 平均分布、(b) 変動実効値分布。

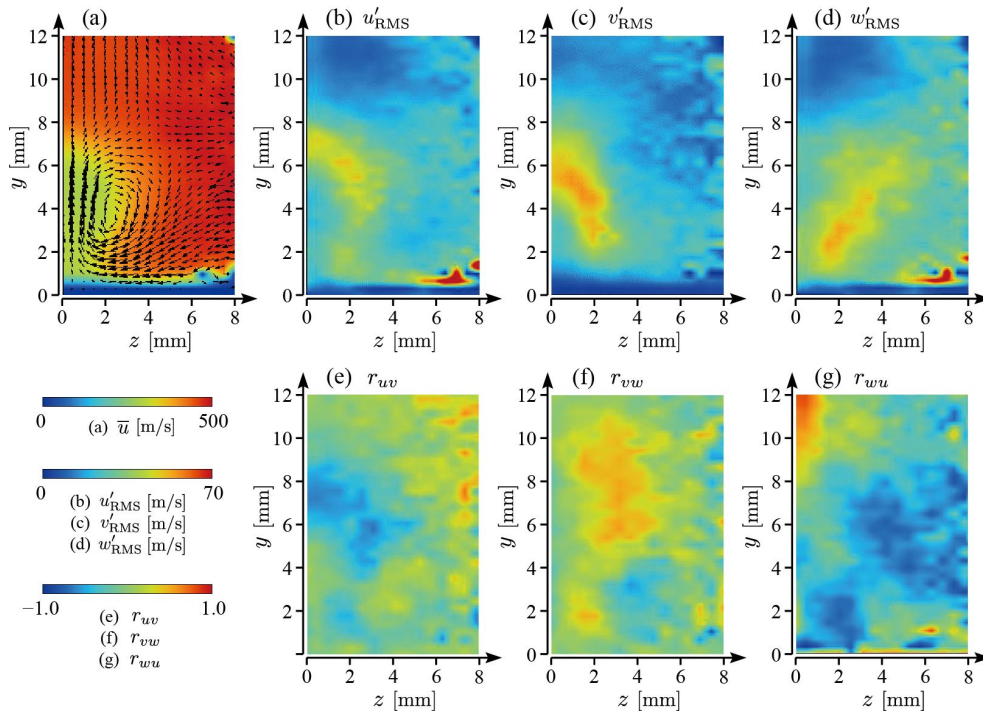


図5 ステレオ PIV による速度分布：(a) 平均速度分布，(b) ~ (d) 各速度成分の変動実効値分布，(e) ~ (g) 各速度変動間の相関係数の分布．

れ方向速度の変動実効値は平均速度分布で縦渦の外縁付近とみられる領域で、垂直方向、スパン方向の速度変動実効値は縦渦領域内で大きくなっていることがわかる。(e)~(g) は各計測点において速度成分間の相関を評価した結果で、速度変動に正の相関が強い領域を赤、負の相関が強い領域を青で表示している。(b)~(d) の変動実効値が大きい領域で相関係数が大きく、また、平均速度の空間勾配と相関係数の関係から、縦渦による速度欠損領域の剪断層や縦渦の旋回領域において正のレイノルズ応力が発生し、このレイノルズ応力の作用により主流と縦渦領域の運動量交換が活発となって変動エネルギーが生成され、攪乱が成長していると判断される。

熱線流速計によるスペクトル分布やシュリーレン法による可視化により、縦渦領域に周期的な構造の発生が認められるが、実験的にこの変動構造の詳細を明らかにすることは困難である。そこで、実験条件に対応させた LES による数値計算を行った。図 6 は、ある瞬間の数値計算結果について、速度勾配テンソルの第二不変量 Q の等値面により渦構造を可視化したものである。等値面上のカラーマップは、その位置での主流方向速度の大きさを示す。図中矢印の位置にヘアピン状の渦構造が確認できる。このヘアピン渦構造は、デバイスによって流れ場中に導入された縦渦対に衝撃波が入射して変動が生じ、それが発達・重合して形成されたものである。このヘアピン渦構造は、下流に向かってスケールを増しつつ崩壊し、その過程で新たなヘアピン渦構造を生成することで、流れ方向に周期的な変動が生じていることが確認できる。ヘアピン渦構造の発生間隔や移流速度を数値計算結果から評価すると、シュリーレン画像に見られる明暗の周期的な縞模様の間隔や、スペクトル分布に見られる卓越周波数から評価させる変動の移流速度と一致することを確認した。さらに、ヘアピン渦構造と速度変動の関係について調べた結果、ヘアピン渦構造の周囲では壁近傍の低速流体が上昇するイジェクションと主流の高速流体が壁近傍へ下降するスイープが発生し、正のレイノルズ応力が作用して変動エネルギーが生成され、攪乱が成長して乱流状態に至ることを明らかにした。

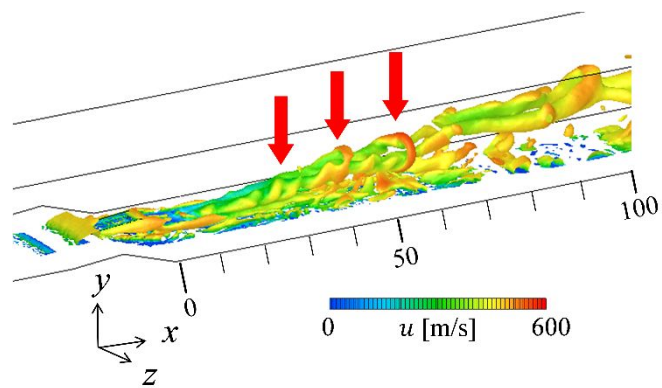


図6 LES による速度勾配テンソルの第二不変量 Q の等値面図。カラーマップは主流方向速度の大きさを表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 S. Sakaue, M. Kamata, T. Arai	4. 巻 18
2. 論文標題 Turbulent Intensity in Supersonic Mixing Transition by Stream-wise Vortices: Fluctuation Measurements by Hot-wire Anemometer and PIV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology 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 M. Kamata, S. Sakaue, T. Arai	4. 巻 -
2. 論文標題 Breakdown Process of Supersonic Streamwise Vortices in SCRAMJET Engine: Mass Flux Fluctuation Measured by Hot Wire Anemometer in Supersonic Mixing Region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 32nd International Symposium on Space Technology and Science	6. 最初と最後の頁 2019-a-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山之内志穂, 七里真悟, 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いて観察される変動の特徴
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
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2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 七里真吾, 山之内志穂, 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2020
4. 発表年 2020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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kamata, S. Sakaue, 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 (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 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

〔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	新井 隆景	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員教授	
	(Arai Takakage)		
	(10175945)	(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
---------	---------