

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360377

研究課題名(和文) PIV・LIFの同時計測によるスクラムジェット燃焼器内の混合メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of Mixing Mechanism in A Scramjet Combustor Using Combined PIV-LIF Measurement System

研究代表者

河内 俊憲 (Kouchi, Toshinori)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40415922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、現在、世界各国で研究開発が進められている超音速旅客機やスペースプレーン用の推進機関として期待されているスクラムジェットエンジン内の燃料の混合状態を計測する新しい手法の開発を世界に先駆けて行った。この計測法により、これまで超音速流では計測が困難であった渦拡散流束と呼ばれる乱流渦に起因する燃料拡散を計測できるようになった。この計測装置をエンジンを模擬した流れ場に適用し、渦拡散流束を計測した結果、これまで数値シミュレーション等で用いられてきた勾配拡散モデルが、エンジン内の燃料混合に対しても十分適用可能であることを明らかにした。これらにより今後エンジンの研究・開発が促進されると期待される。

研究成果の概要(英文)：Scramjet engine is one of the promising candidates as a propulsion system for hypersonic flight vehicles and space planes. We developed a combined stereoscopic Particle Image Velocimetry (PIV) and acetone Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) measurement system, to evaluate turbulent eddy diffusion flux in the combustor, which physically means the averaged transport due to turbulent fluctuations. We applied this measurement system to a transverse jet in a Mach 2 supersonic flow with/without pseudo shock wave, simulating the scramjet combustor. The system successfully measured the eddy flux in the flowfield. These quantitative data provided insight into the fundamental physics of the supersonic mixing.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学・航空宇宙流体力学

キーワード：推進工学 航空宇宙工学 混合促進 超音速燃焼 スクラムジェットエンジン

1. 研究開始当初の背景

アメリカの X-51 計画に代表されるように現在、国内外で超音速旅客機やスペースプレーン用の推進機関としてスクラムジェットの研究が行われている。このエンジンは既存のジェットエンジンより遥かに高いマッハ数域で作動し、燃焼器内の流速でさえ超音速となる。そのため噴射した燃料の滞在時間は極めて短く、燃料の迅速な混合が不可欠である。このような理由からエンジンの実現・性能の向上には、エンジン内における噴流の乱流混合メカニズムを解明し、エンジン設計のための簡便な工学式を構築することが重要となる。

これまでスクラムジェットにおける燃料の混合評価は、ガス採取により行われてきた。この方法では、ガス分析に必要なガスを採取するのに数秒の時間を要する。これは超音速流れにおける特性時間よりも遥かに長く、計測された値は時間平均値となる。このような場合、例えば全く混合していない空気と燃料が交互に採取管に吸引されても、混合ガスが連続的に吸引されても、その違いを区別することは出来ない。そのため、これら既存の方法に変わる「流れの瞬時値」に基づく混合評価手法の開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、瞬時の速度場を得られる粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV) と瞬時の濃度場を得られるレーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence: LIF) を組み合わせた計測システムを構築し、噴射ガスが誘起する瞬時の速度変動と濃度変動を同時に計測する。そして、これらの変動量から渦拡散流束を評価し、噴流混合の工学モデルを構築すると共に、速度・濃度変動の相関等を調べることで、超音速流れやスクラムジェット内に見られる擬似衝撃波が存在するような流れにおける噴流混合のメカニズムの解明を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、スクラムジェット内の瞬時の速度・濃度場に基づいた噴流混合の工学モデルを構築、またそれらの相関量から混合メカニズムを解明するため、以下に示す順序で研究を進めた。

(1) PIV-LIF 同時計測システムの構築

ステレオ PIV とアセトン LIF を組み合わせた瞬時速度・濃度の同時計測システムを構築する。

(2) 実験によるデータ取得

構築した同時システムを、超音速流中の垂直噴流に適用し、瞬時速度・濃度を計測する。条件としては主流マッハ数 2.0 で噴射ガ

スに空気(炭化水素燃料模擬ガス)やヘリウム(水素燃料模擬ガス)を使用する。また非燃焼場において超音速燃焼を模擬した流れ場を形成し、その流れ場における実験データの取得も行う。

(3) LES 計算との比較

実験と同条件にてラージ・エディ・シミュレーション (Large Eddy Simulation: LES) 計算を行う。得られた計算結果を実験値と比較し、速度・濃度場の平均量、また乱流エネルギーやレイノルズ応力といった乱流統計量の比較を行う。またモデル化において最も重要な渦拡散流束に関しても比較を行う。これらの比較を通じて、実験結果を補完すると共に、計算結果の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) PIV-LIF 同時計測装置の開発

本研究で超音速流中で PIV-LIF 同時計測を行い、速度変動 3 成分と濃度変動の同時計測を行う。この同時計測は亜音速流中では適用実績があったが、超音速流中では各 PIV, LIF 計測が単独でも難しく、同時計測は行われた実績がない。本研究ではまずこれらを可能にする同時計測装置の確立を行った。図 1 に確立した実験装置の概要図、図 2 に写真を示す。本研究では、速度の計測にステレオ PIV を採用し、噴流濃度の計測にはアセトン LIF を採用した。当初の研究計画では LIF トレーサに PIV に使用するグリーンレーザで励起可能な NO<sub>2</sub> を使用する予定であったが、蛍光発光が弱いこととそれに伴うのイメージ・インテンシファイア使用の煩雑さを避けるため、トレーサをアセトンとした。またそれに伴い、PIV 用のトレーサ粒子と LIF 用のアセトンを両方添加できるシーディング装置の開発を行った。

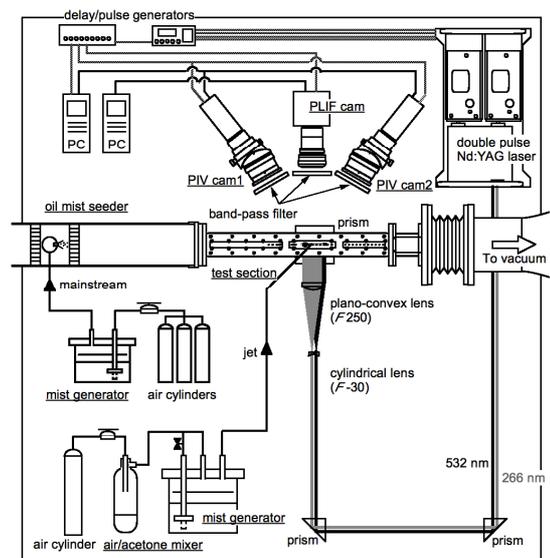


図 1 実験装置の概要図

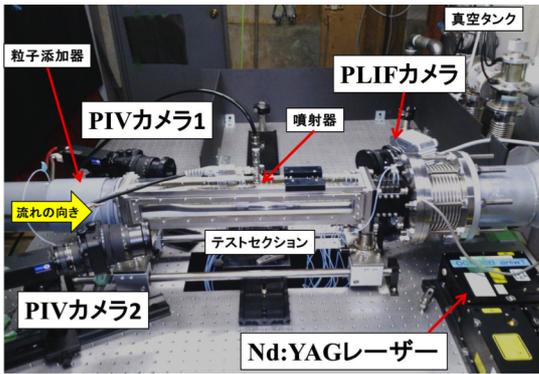


図2 PIV-LIF同時計測装置と超音速風洞

## (2) 渦拡散流束の計測

構築し得られた瞬時速度と濃度から変動量を算出し、両者の積をとってアンサンブル平均を行うことで渦拡散流束を算出した(図3)。図より渦拡散流束は、流れ方向・高さ方向とも噴射孔出口近傍で非常に高い値をとっていることが分かった。これは主にバレル衝撃波外縁に発達する噴流大規模構造の移流によるものである。 $x/D > 4$ でも渦拡散流束の値の傾向は、噴射衝撃波近傍のそれと定性的に同じである。噴流外縁におけるこれら領域も噴流の大規模構造の移流によるものである。

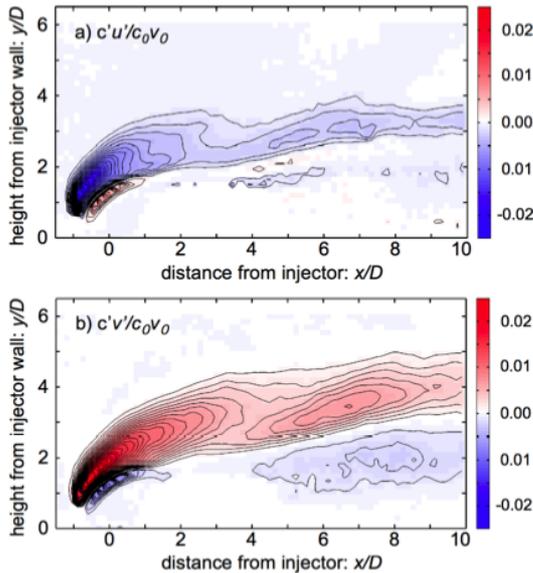


図3 マッハ2超音速流中に噴射された垂直噴流の渦拡散流束。a) 流れ方向成分。b) 高さ方向成分。

## (3) 噴射ガス種の影響

炭化水素燃焼模擬ガスである空気噴射の実験に加えて、水素燃料模擬ガスであるヘリウムを噴射した実験を行った。その結果を図4に示す。ヘリウム噴射ではその音速が速く、渦拡散流束値の流れ方向成分の値が、空気噴射と大きく変化することが分かった。

## (4) 擬似衝撃波形成に伴う変化

デュアルモード・スクラムジェットは、

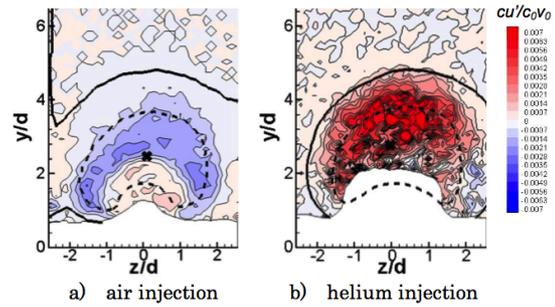


図4 噴射ガス種の渦拡散流束に対する影響。(流れ方向成分) a) 空気噴射, b) ヘリウム噴射。

燃焼が生じると、それに伴い燃焼器内の圧力が増加し、擬似衝撃波が生じる。本研究ではこの擬似衝撃波を生成し、位置をPDコントロールするフロープラグを開発し、それを試験部に取付、非燃焼の試験でも燃焼を模擬できる試験装置を開発した。そしてこのフロープラグを本試験装置に適用し、PIV-LIF同時計測を行った。その結果を図4に示す。

擬似衝撃波が噴流上流に形成されると、流れ場の瞬間的な速度変動・濃度変動が増加し、渦拡散流束の値は、擬似衝撃波がない場合と比べて非常に大きくなる。しかしながら、その分布の仕方等の定性的な様子は、擬似衝撃波の有無により変わらないことが分かった。

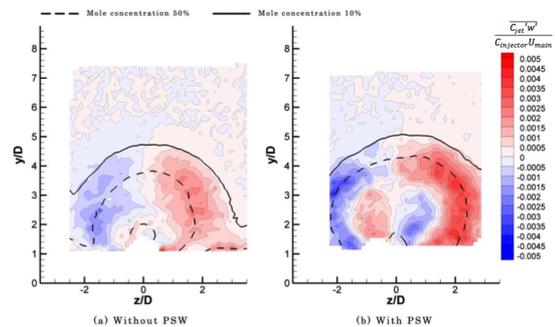


図4 擬似衝撃波が形成された場合の渦拡散流束(スパン方向成分)。a) 超音速流中, b) 擬似衝撃波が形成された流れ。

## (5) LESとの比較

前述の実験に加え、実験と同条件でLESを行い、実験結果の妥当正に関して検討を行った。図6にその結果を示す。図より、実験により計測された渦拡散流束は数値計算と定性的に良く一致しており、実験、数値計算両結果の妥当性が明らかとなった。

## (6) 混合モデル

以上のように得られた渦拡散流束からスクラムジェット燃焼器内の混合モデルについて検討を行った。図7は渦拡散流束ベクトルを噴流濃度分布図の上に重ねて示す。図より渦拡散流束ベクトルは濃度の高い方から低い方へ向いており、ほとんどの領域で等濃度線に直交していることが分かる。また等濃度

線が密な所ほど、値が大きいことから、実験データより超音速混合場の大部分の場所で勾配拡散モデルが成立することが明らかとなった。

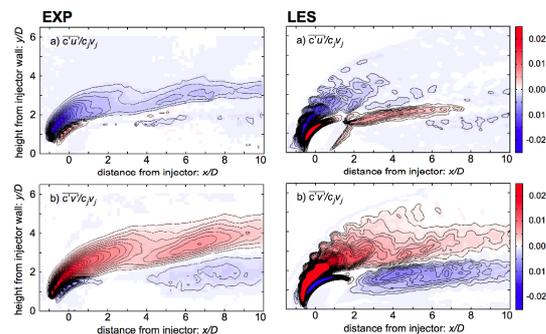


図6 実験とLESの比較. a) 実験, b) LES.

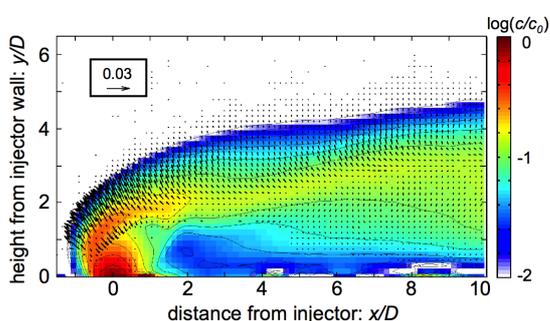


図7 噴射ガス濃度上に描かれた渦拡散ベクトル。(噴射ガス: 空気)

## 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9件)

- ① T. Kouchi, S. Yanase, Y. Oka, and G. Masuya, Combined Stereo-PIV and PLIF Measurements of A Transverse Jet in A Mach 2 Supersonic Flow, *APISAT2013* 06-04-1, 2013. 査読無
- ② T. Kouchi, G. Masuya, K. Hirano, A. Matsuo, and S. Tomioka, Supersonic Combustion Using a Stinger-Shaped Fuel Injector, *Journal of Propulsion and Power*, **29** (3), 639-647 (2013). [DOI: 10.2514/1.B34524] 査読有
- ③ J. Watanabe, T. Kouchi, K. Takita and G. Masuya, Characteristics of Hydrogen Jets in Supersonic Crossflow: A Large-Eddy Simulation Study, *Journal of Propulsion and Power*, in press **29** (3), 661-674 (2013). [DOI: 10.2514/1.B34521] 査読有
- ④ S. Uramoto, T. Kouchi, and G. Masuya, Turbulent Structure of Supersonic Flowfield with Transverse Injection, *Journal of Fluid Science and Technology*, **7** (2), 231-241 (2012). [DOI: 10.1299/jfst.7.231] 査読有
- ⑤ J. Watanabe, T. Kouchi, K. Takita and G. Masuya, Large-Eddy Simulation of Jet in Sup

-ersonic Crossflow with Different Injectant Species, *AIAA Journal*, **50** (12), 2765-2778 (2012). [DOI: 10.2514/1.J051550] 査読有

[学会発表] (計10件)

- ① T. Kouchi, S. Yanase, Y. Oka, and G. Masuya, Combined Stereo-PIV and PLIF Measurements of A Transverse Jet in A Mach 2 Supersonic Flow, The 2013 Asian-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Nov. 2013.
- ② 河内俊憲, 柳瀬眞一郎, 岡慶典, 升谷五郎, 超音速噴流場における乱流拡散の評価のためのPIV-LIF同時計測, 東京, 2013年7月.
- ③ 河内俊憲, 柳瀬眞一郎, 岡慶典, 升谷五郎, 超音速噴流場におけるPIV-PLIF同時計測による渦拡散流束の算出, 東京, 2013年7月.
- ④ 岡慶典, 李澤辰, 中野良祐, 河内俊憲, 升谷五郎, PIVとPLIF同時計測による超音速流中に噴射した気体の乱流拡散流束評価, 仙台, 2013年3月.
- ⑤ T. Kouchi, and G. Masuya, Quantification of Convection Velocity and Dominant Scale of Large-scale Structures by High-speed Schlieren Imaging, 49<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, July 2012.
- ⑥ S. Lee, J. Watanabe, T. Kouchi, K. Takita, and G. Masuya, Large-Eddy Simulation of Pseudo-shock Wave in a Square Duct, 18<sup>th</sup> AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies conference, France, Sept. 2012.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)  
岡山大学・自然科学研究科・准教授  
研究者番号：40415922

### (2) 研究分担者

升谷 五郎 (Masuya Goro)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：20271869

滝田 謙一 (TAKITA KENICHI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80282101

### (3) 連携研究者

富岡 定毅 (TOMIOKA SADATAKE)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・角田  
宇宙センター・領域サブリーダー  
研究者番号：50358553