

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月12日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360081

研究課題名（和文） 擬似衝撃波による混合促進機構の解明

研究課題名（英文） Investigation of Mixing Enhancement Mechanism Caused by Pseudo-Shock Wave

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：デュアルモードラムジェット燃焼器などの擬似衝撃波が存在する超音速内部流れにおいて、主流中に噴射した気体燃料の混合が著しくかつ非等方的に促進される機構を解明するために、粒子画像速度計（PIV）及び平面レーザー誘起蛍光法（PLIF）による速度場及び噴射気体濃度場の計測を行うと共に、数値シミュレーションを行い実験結果と比較した。その結果、擬似衝撃波が壁面付近の乱れを著しく強化し、それにより噴射気体の混合が促進されることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Mixing of fuel injected into supersonic internal flow with a pseudo-shock wave, which appears in the combustor of a dual-mode ramjet engine, is significantly and non-isotropically improved. In order to clarify the mechanism of this mixing enhancement, injectant concentration and velocity distributions were measured using a particle image velocimetry (PIV) and a planar laser-induced fluorescence (PLIF), respectively. In addition, numerical simulations were carried out to understand the flowfield. As a result, we found that the pseudo-shock wave produced strong turbulence near the wall and it enhanced mixing of the jet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：圧縮・非圧縮流，擬似衝撃波，乱流混合，レーザー計測，Large Eddy Simulation

## 1. 研究開始当初の背景

超音速内部流れが壁面境界層と干渉して、多数の衝撃波を作り超音速に減速する擬似衝撃波は、将来の宇宙輸送機や極超音速機用のデュアルモード・ラムジェットエンジンにおいて支配的役割を果す。

同エンジンは、飛行マッハ数7付近で、作動を亜音速燃焼モードから超音速燃焼モードに切り替え、広い速度範囲で高性能を発揮しようとするエンジンである。流入した空気は、空気取入口での斜め衝撃波による圧縮に続いて、燃焼による加熱が誘起する擬似衝撃波

によりさらに圧縮され、燃焼反応が促進される。また、擬似衝撃波は流れを攪乱し燃料と空気の混合を促進する。このため、エンジン内の流れと燃焼モードは、擬似衝撃波、混合、燃焼の干渉が支配する。すなわち、十分な強さの擬似衝撃波が形成できず燃焼が不十分な場合には、正味推力を発生できない。一方、過度の発熱があり圧力が上がりすぎた場合には、擬似衝撃波が分離部から空気取入口へ侵入し、エンジン不始動を引き起こす。このように擬似衝撃波を伴う流れ場と燃焼モード遷移の関係は同エンジンの性能と直接的に関連するが、十分解明されたとは言いがたい。従って、擬似衝撃波を伴う流れ場内の混合促進機構及び擬似衝撃波の上流到達距離についての詳細な検討は、同エンジンの性能予測上極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、擬似衝撃波を伴う流れ場における噴射気体の混合促進機構を実験及び数値シミュレーションにより解明することである。また、擬似衝撃波の長さについても検討を行う。

## 3. 研究の方法

上記目的を達成するため、濃度場を平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) で、速度場を粒子画像速度計 (PIV) で計測し、数値シミュレーション結果と比較考察する。具体的には次の5項目を実施する。

- (1) 一般化した蛍光比法の検証
- (2) トレーサ追従遅れ補正法の適用拡大
- (3) 一般化した蛍光比法と粒子遅れ補正 PIV 法による擬似衝撃波内噴射流れの濃度と速度の定量計測
- (4) (3)の計測と数値シミュレーションの結果を用いた、擬似衝撃波内部の混合促進機構解明
- (5) 擬似衝撃波長さに関する新たな相関式の提案・検証

## 4. 研究成果

まず、従来の擬似衝撃波発生・制御用手動弁を、PDI 制御のステッピングモータ駆動フロープラグに代え、擬似衝撃波の発生および位置設定を安定に行えるようにした。上記各項目で得られた成果は以下の通りである。

### (1) 一般化蛍光比法の検証

空気を噴射した場合に、一般化蛍光比法とプローブ採取ガス分析で得た平均モル分率分布を比較し、良い一致を得た (図1)。また、平均密度分布算出、空気以外の噴射気体への適用、パルス噴射への適用、2つ以上の

孔から噴射された気体のそれぞれの平均モル分率測定等への展開を行った。さらに、多数の瞬時 PLIF 画像を統計処理し、噴射気体濃度の変動強度や噴射による濃度場の大規模乱流構造を捉えた濃度変動の2点空間相関 (図2) 等を求めた。

これらの成果により、トレーサの混入割合が異なる2つ以上の圧縮性流れが混合する場合の、平均モル分率及び平均密度を PLIF により定量的に計測する方法を確立することができた。また、これまで実験データが非常に少ない噴射気体の濃度変動について、空間相関も含むデータを得ることができた。これらの結果は、最近この種の流れへの適用が進みつつある Large Eddy Simulation の妥当性検証にも極めて有用である。

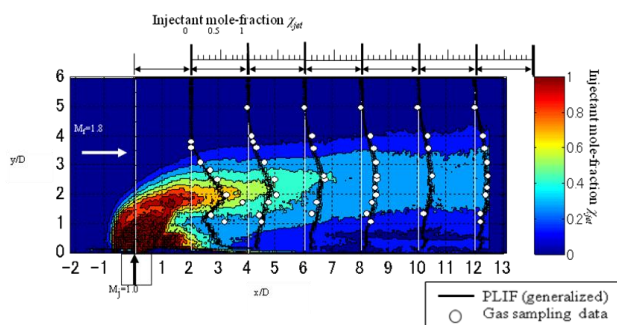


図1 一般化蛍光比法で求めた噴射気体の平均モル分率分布 (ガス分析との比較)

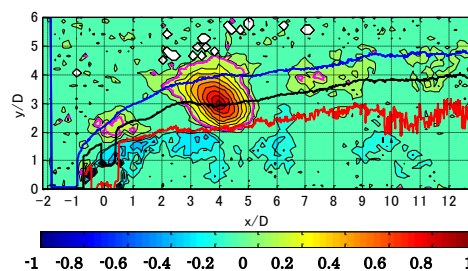


図2 噴射気体濃度変動の空間相関

### (2) トレーサ追従遅れ補正法の適用拡大

トレーサ粒子と気流の相対レイノルズ数及び相対マッハ数が非常に小さい場合に成り立つ Stokes 抗力則に代わり、両パラメータの広い範囲で使える Henderson 抗力則を用いれば、より高精度の補正ができることを確認した (図3)。これにより PIV, PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡速度計), LDV (Laser Doppler Velocimetry: レーザ・ドップラ一流速計)等の粒子をトレーサとする速度計測法全般に適用できる、トレーサ粒子の追従遅れ補正法の有用性が実証された。

更に、主流と噴流の総温及びガス種が同じ場合に、平均速度分布と(1)で得た平均密度分布から、断面内の平均静圧分布を求めることができることも示した。

しかし、変動速度測定に対してはトレーサ

遅れ補正が定式化されていないため、本実験では補正なしでの測定を行うこととした。

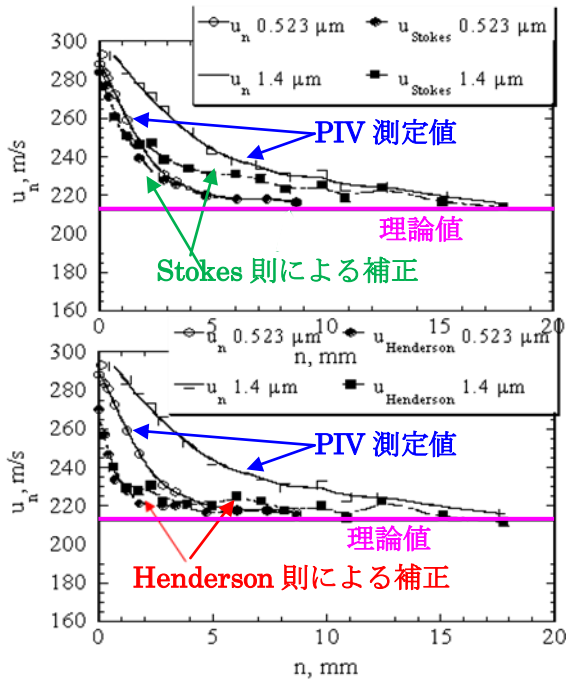


図3 衝撃波通過時のトレーサ遅れの補正

(3) 一般化蛍光比法と粒子遅れ補正 PIV 法による擬似衝撃波内噴射流れの速度と濃度の定量計測

速度3成分を同時測定できるステレオPIVを導入し、まず平板境界層の乱流統計量を求め(図4の◆, ◆, ◆), 他の測定結果及び直接数値シミュレーション結果(他の記号及び線)と比較して定量的な一致を確認した。

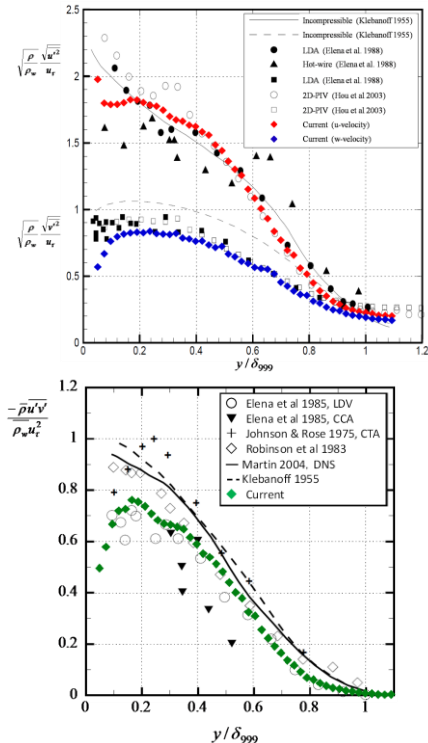


図4 ステレオPIVで測定した超音速境界層の速度変動強度(上)とレイノルズ応力(下)

辺長  $H = 30 \text{ mm}$  の正方形断面流路内を流れるマッハ 2.0 の超音速空気流中でステレオPIVにより測定した主流方向平均速度分布の擬似衝撃波(PSW)の有無による違いを図5に示す。

次に変動速度データから、速度変動強度(図6)や速度変動の空間相関等を得た。その結果、擬似衝撃波の発生によりダクトの壁面付近の速度変動強度が著しく強まることが分かった。この強い変動強度の領域を通じて噴射気体の乱流輸送が進むとすれば、従来観測された非等方的な混合促進を矛盾なく説明できる。

これらは擬似衝撃波を伴う流れへの噴射という非常に複雑な流れ場において、初めて測定された体系的な平均及び変動速度データであり、デュアルモード燃焼場における乱流混合の解明に貴重な役割を果たすものである。

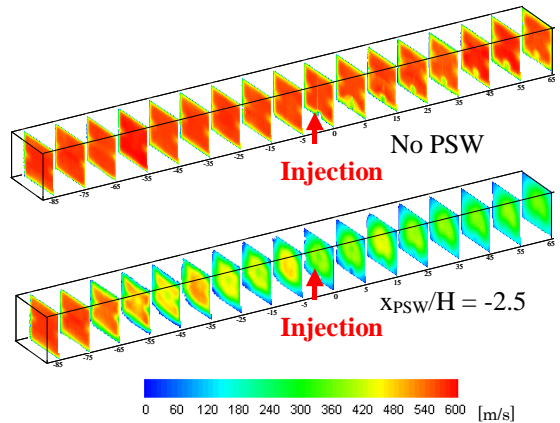


図5 擬似衝撃波による平均速度分布の変化

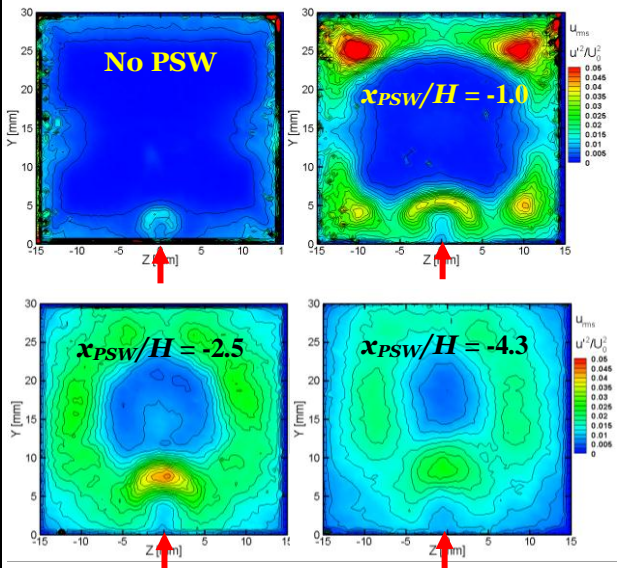


図6 擬似衝撃波先頭位置  $x_{PSW}$  による主流方向速度変動強度分布の変化( $x/H = 0.5$  断面)

また、PLIF 測定から噴射気体の平均モル濃度分布 (図 7) を求め、擬似衝撃波が存在する場合、噴流がより深く主流に貫通することも明らかにした。

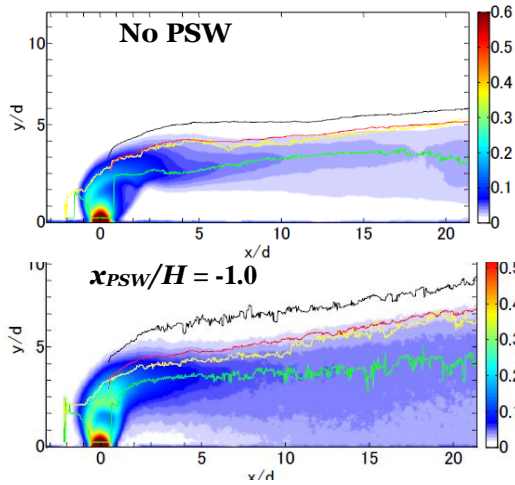


図 7 擬似衝撃波の有無による平均噴流モル濃度分布の変化

(4) 上記計測と数値計算結果を用いた、擬似衝撃波内部の混合促進機構の解明

当初の計画では、数値的手法としてレイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式(RANS)シミュレーションを行う予定だったが、Large Eddy Simulation(LES)のプログラム開発が進み、擬似衝撃波なしの場合について、計算と PLIF の結果を比較し、噴射気体濃度の平均値、変動強度、変動の空間相関で良い一致を得た。また、乱流構造を支配する大規模渦構造も捉えた。

擬似衝撃波がある場合に LES を適用するため、周囲及び出口の境界条件について検討を行い、噴射を伴わない擬似衝撃波流れをシミュレートすることができた。その結果は、速度及び圧力の平均及び変動特性の実験値と比較して妥当な一致が得られた。

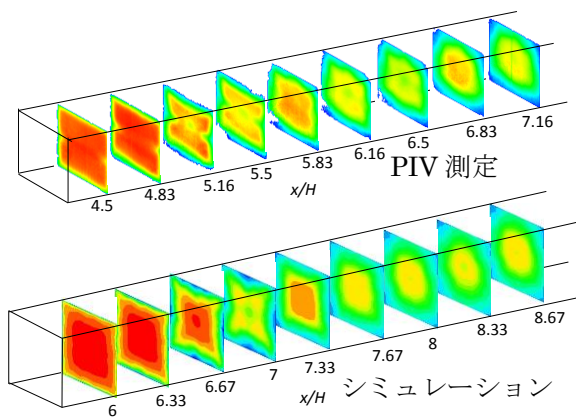


図 8 擬似衝撃波を伴う流れ場の平均速度の実験(上)とシミュレーション(下)の比較

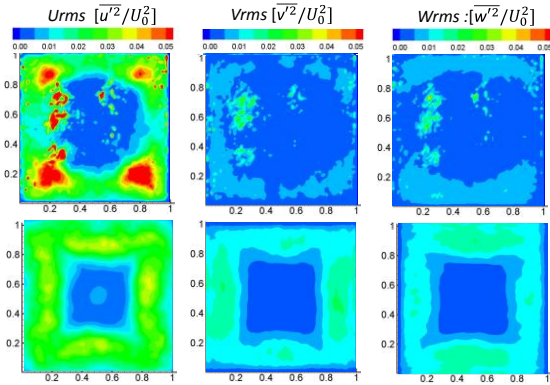


図 9 擬似衝撃波を伴う流れ場の速度変動の実験(上)とシミュレーション(下)の比較

さらに、噴射気体の乱流拡散の方向と大きさを直接的に表す乱流拡散流束を計測する新たな手法を考案し、LES の結果と比較を行った。この手法は、PIV のトレーサ粒子を主流と噴流の両方に混入した場合と、噴流のみに混入した場合の条件付き速度分布を計測し、いくつかの仮定の下で両条件での速度差から乱流拡散流束を求めるものである。図 10 に、擬似衝撃波のない場合について、この方法で求めた噴射気体の拡散流束を LES の結果と共に示す。両者は定性的に一致するのみならず、定量的にも同程度の大きさとなっており、PIV のみを用いて乱流拡散流束のある程度見積もることを可能とした。図 11 に、この手法で求めた擬似衝撃波がある場合の噴射気体の乱流拡散流束分布を示す。

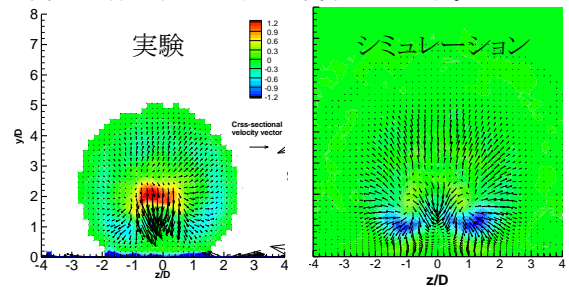


図 10 噴射気体の乱流拡散流束 (擬似衝撃波なしの場合)

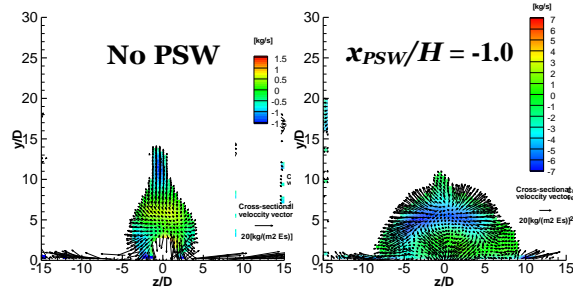


図 11 条件付き PIV 測定から得た噴射気体の乱流拡散流束 (擬似衝撃波の影響)

LESによって擬似衝撃波を伴う流れ場のシミュレーションが可能となったので、今後、そこに噴射を行った場合のシミュレーションを行い、(3)で取得した実験データと比較しながら、混合促進機構のさらなる解明を進めていく。

(5) 擬似衝撃波長さの新相関式の提案・検証  
擬似衝撃波長さについてのデータを集めた新たな相関式の検討を行ったが、これまでの所、広い実験条件範囲をカバーしてWaltrup- Billigの相関式を上回る精度を持つ相関式を見出すことができなかった。この項目は、他の項目の擬似衝撃波による混合促進機構の解明とは直接関連しないため、他項目を優先させ、それ以上の検討は行わなかった。

#### 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 9 件)

- ① B. Choi, K. Takae, T. Kouchi, G. Masuya,  
“Mean and Turbulent Velocity Field for Jet Injected into Supersonic Flow with Pseudo-Shock Wave,” *Journal of Propulsion and Power*, 掲載決定(巻号頁未定), 査読あり
- ② J. Watanabe, T. Kouchi, K. Takita, G. Masuya,  
“Numerical Study on the Turbulent Structure of Transverse Jet into Supersonic Flow,” *AIAA Journal*, **49**, 2011, 2057-2067, 査読あり
- ③ H. Takahashi, H. Oso, T. Kouchi, G. Masuya,  
M. Hirota, “Scalar Spatial Correlations in a Supersonic Mixing Flowfield,” *AIAA Journal*, **48**, 2010, 443-452, 査読あり

[学会発表] (計 38 件)

- ① S. Uramoto, S. Tsuru, T. Kouchi, G. Masuya,  
“Stereoscopic PIV Measurement of Supersonic Injection Flowfield and Its Error Analysis,” *Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010*, Miyazaki, Japan, Mar. 5, 2010
- ② G. Masuya, B. Choi, H. Yamauchi, T. Kouchi,  
“Influence of Velocity Field on Mixing in Pseudo-Shock Wave,” *19th International Symposium on Air Breathing Engines*, Montreal, Canada, Sep. 9, 2009
- ③ S. Koike, T. Tamura, G. Masuya, “Influence of Drag Coefficients and Velocity Fluctuation on PIV Correction Method,” *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, U.S.A., Jan. 5, 2009

[その他]

ホームページ等

<http://www.scramjet.mech.tohoku.ac.jp/lab/index.htm>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

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

##### (2) 研究分担者

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

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40415922

##### (3) 連携研究者

なし