261 スクラムジェット燃焼器内混合場におけるPSP計測

松本 尚之○(東北大), 富岡 定毅(航技研), 池田 裕二(神戸大)

Unsteady Pressure Measurements with PSP.

Masashi MATSUMOTO, Sadatake TOMIOKA and Yuji IKEDA

ABSTRACT

The mixing fields within a scram-jet combustion chamber are visualized using pressure sensitive paint (PSP) as an oxygen sensor. The experiments are performed in a small supersonic wind tunnel at the National Aerospace laboratory - Kakuda Research Center (NAL-KRC). The main stream mach number is 2.4, and the dynamic pressure ratio between the injected gas and the main flow are 0.3, 0.7, 1.1 and 1.5. Three fuel injection nozzles are used; air and O_2 is injected from these nozzles. The results show that the jet has its own independent flow structure, and that little mixing of gas occurs between the flow structures created by each nozzle.

Keywords: Pressure Sensitive Paint, Scramjet Combustor, Fuel Mixing

1. 緒論

次世代の宇宙往還機の推進機関として、スクラムジェットエンジンが注目されている。このエンジンでは、衝撃波の発生による圧力損失や、温度・圧力の回復による構造への負担を低減するために、燃焼器入口においても気流は超音速に保たれる。このため、燃焼器内は大流速・低温・低圧という点火には厳しい条件がそろい、特に全温の低い領域では点火限界がエンジンの作動範囲を制限する。

こういったスクラムジェットエンジンの燃焼室内の流れ場構造を詳細に調べるために、富岡等⁽¹⁾⁽²⁾や北谷等⁽³⁾は後ろ向きステップ／垂直噴射孔を有する超音速燃焼器を用い、流れ場の三次元性が点火限界におよぼす影響を調べている。こういった燃焼器ではFig.1に示すような複雑な流れ場が構成されていると考えられている。著者等もより詳細な計測を実施するために、感圧塗料 (PSP:

Pressure sensitive paint) を用いて壁面静圧分布を計測してきた。⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

北谷等は壁面に設けられたガス採取孔より燃焼室内のガスを採取し、噴射ガス分布を計測した。その結果、再循環領域内で流路中央部分と側壁側で噴射ガス濃度が大きく異なることを報告しており、3つの噴射孔のうち、中央と側壁側で噴流形態が異なっている可能性がでてきた。

ただし、ガス採取孔は模型製作上の問題からあまり多数設けることができず、詳細な計測が行えたわけではなかった。一方、PSPは分子センサとしての特性から壁面上に無数の計測点を取ることが可能である。しかも、本来酸素濃度センサでもあり、3つの噴射孔から噴射されるガスのうち一つを酸素に切り替え、酸素をトレーサとして用いることにより、壁面近傍における噴射ガスの振る舞いを可視化する事が可能であると考えられた。そこで、PSPを酸素濃度センサとして用いることにより、より詳細な計測を試みた。

Fig.1 Flow characteristics model behind backward-facing step.

Fig.2 Test section with backward-facing step and PSP sheet.

2. 実験装置

実験には航空宇宙技術研究所角田宇宙推進技術研究センター所有の小型超音速風洞を用いて実施した。Fig.2に示すように、測定部は入口断面が $94.3\text{mm} \times 51\text{mm}$ 、主流マッハ数2.4であり、高さ(h)=6mmの後ろ向きステップを有する。ステップの下流24mm(4h)の位置には直径 $\phi 6\text{mm}$ の燃料噴射孔が中心軸上および左右($\pm X$ 方向)に30mmずつはなして合計3カ所設けられている。天板はアクリルで製作し、流路全体が可視化可能となっている。中央および壁側の噴射孔はそれぞれ独立にガスを供給することが可能であり、空気・窒素・酸素・ヘリウム・水素を供給することができるが、今回は空気および酸素を作動流体として用いた。噴射ガスは噴射孔出口で音速となるように設定され、主流と噴流の動圧比は0.3, 0.7, 1.1および1.5とした。

PSPは色素として460nm近辺に励起波長を持つルテニウム錯体(Ru(bpy)およびRu(bath-phen))を用いた。Ru(py)は溶媒としてメチルアルコールを用い、溶媒に溶かした後、吸着層であるTLCシート(シリカゲル60)をその溶液に浸し、色素を吸着した後自然乾燥した。Ru(bath-phen)の場合は溶媒としてジクロロメタン、吸着層としてアルミ酸化被膜を用いた。色素を吸着した吸着層はステップ下流の噴射孔周辺(燃料噴射孔ブロック)に添付した。

色素の励起光源にはルテニウム錯体の励起に適した青

Fig.3 PSP measurement configuration.

色LED(日亜化学NSPB300A 中心波長470nm)を444個使用した。励起光は側壁に設けられた照射窓から測定部に照射した。信号光はシャープカットフィルタを用い、励起光成分を除去した後、 1024×1024 ピクセルの12bitCCDカメラ(浜松ホトニクスC4742-95-12NR)で撮影し、その後PCを用い処理した。実験装置の概要をFig.3に示す。

PSPを添付した燃料噴射孔ブロックには燃料噴射孔以外に静圧計測孔およびガス採取孔が合計で22点設けた。取得された校正用の圧力データおよび酸素濃度データを元に、in situ法によりPSP信号をの物理量に変換した。なお、PSP可視化データから酸素濃度分布を算出する際は、壁面近傍ガス温度は供試体温度と等しいとして、実験室温を代表温度として用いた。

3. 実験結果

3つの噴射孔すべてから空気を噴射した場合の圧力分布をFig.4に示す。流れはすべて右から左であり、右側に後ろ向きステップが存在する。なお、壁面近傍の渦の方向・強さを確認するために、もっとも下流のガス採取孔の一つから空気を噴射した。

噴射孔前面には主流と噴流が干渉して生じる三次元弧状衝撃波が境界層に入射することによって生じる馬蹄形の高圧部が存在する。この高圧部には馬蹄形の剥離渦が存在し逆流が生じていると思われる。噴射孔下流には剥離により生じる低圧部が存在する。噴射孔間では二つの馬蹄形高圧部が衝突し、後ろ向きステップに向かって逆流している。噴射孔よりガスを噴射する前に後ろ向きステップ下流に存在した大きな剥離渦は、この馬蹄形渦により3つに分割される。

動圧比(R_q)を増やすに従い噴射孔前面の馬蹄形の高圧部の圧力は上昇し、下流側の剥離域の圧力は低下する。下流から噴射した空気により可視化される低圧部は、動圧比が小さい場合は流れに平行であるが、動圧比を大きくするに従い角度を持ってくる。これは馬蹄形の高圧部に存在する渦が強くなってきているためと考えられる。

3つの噴射孔を比較してみると、すべての動圧比で中央噴射孔前面の高圧部がもっとも圧力が高い。一方下流を見ると、いずれの動圧比においても、側壁側噴射孔下流の低圧部の方が中央噴射孔下流の低圧部より、圧力が低くなっており、中央と側壁側で噴流の形状が異なっているように思われる。

この噴射孔の位置による噴流形態の違いを確認するために、噴射ガスを中央のみ酸素に変更した場合のPSPによる可視化結果がFig.5である。Fig.5では動圧比は0.7とし、ガス採取孔から採取したガスを分析することにより、圧力分布ではなく、酸素濃度分布を示している。壁面近傍の酸素濃度は $X = \pm 15\text{mm}$ で大きく異なっており、中央の噴射孔から噴射された酸素は中央付近に独自の流れ構造を持ち、壁側にはほとんど混合していかないことがわかる。後ろ向きステップからの距離 $Z=4\text{mm}$, 10mm , 16mm の酸素濃度分布をFig.6に示す。後ろ向きステップ直後まで、中央の噴射孔から噴射された酸素は側壁側の噴流に

(a) $Rq=0.3$

(b) $Rq=0.7$

(c) $Rq=1.1$

(d) $Rq=1.5$

Fig.4 Pressure distributions.

より構成された流れ構造に混合していない。

一方、端側の噴射孔からのみ酸素を噴射した場合の酸素濃度分布をFig.7に示す。中央噴射孔の場合と同様に端側噴射孔により構成される流れ場構造の中でのみ酸素濃度が上昇している。しかし、他の二つの噴流により構成される流れ場構造には酸素ガスは混入していない。 $Z=4\text{mm}$, 10mm , 16mm の各断面における酸素濃度分布をFig.8に示す。中央噴射孔から酸素を噴射した場合と同様に酸素噴流により構成される流れ場構造にのみ酸素が多く含まれ、他の噴流構造には混ざらない。しかし、後ろ向きステップ下流の再循環領域に含まれる酸素濃度は、端側の噴射孔から酸素を噴射した場合の方が高濃度である。

4. まとめ

PSPを用いてスクラムジェット燃焼器内混合場の圧力分布を計測した。その結果、中央の噴流と両側の噴流で流れ場の構造が異なるらしいことが確認できた。

さらに、酸素をトレーサとして用いることによりそれぞれの噴流によって構成される流れ場構造がそれぞれ独立しており、お互いにガスの出入りがほとんどないことがわかった。

また、中央から噴射した場合より、端側の噴射孔からガスを噴射した方が再循環領域に流入する噴射ガスは増えることがわかった。

5. 謝辞

Fig.5 Visualized oxygen fraction distribution.
(Air-O₂-Air)

Fig.7 Visualized oxygen fraction distribution.
(O₂-Air-Air)

Fig.6 Spanwise oxygen distribution in recirculation region.
(Air-O₂-Air)

Fig.8 Spanwise oxygen distribution in recirculation region.
(O₂-Air-Air)

実験に当たっては航技研角田平岩氏, 神戸大学倉谷氏
にいろいろご助力いただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

- (1) Tomioka, S. et al., Auto ignition in a supersonic combustor with perpendicular injection behind backward-facing step. AIAA-97-2889
- (2) Zamma, Y. et al., Similarity parameters of pre-ignition flowfields in a supersonic combustor. AIAA-97-2890
- (3) Kitadani, H. et al., Relation between injection conditions and flowfield in scramjet combustors. AIAA-98-3127
- (4) 松本尚之 他, 後ろ向きステップを有する超音速燃焼器における流れ場のPSP計測, 航空宇宙学会北部支部講

演会講演論文集(2000)

(5) Matsumoto, M. et al., PSP measurement of a jet injected behind a backward-facing step in a supersonic stream. 9th. International Symposium on Flow Visualization, 2000.

(6) 松本尚之 他, 垂直噴流を伴う後ろ向きステップ流れのPSP計測, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集