論 文

CONTRIBUTED PAPERS

スクラムジェット用二分割ストラットの保炎性能向上^{*1}

Improvements of Flame-Holding Characteristics of a Scramjet Strut Divided into Two Parts

内 海 政 春^{*2}・小 林 秀 昭^{*3}

Masaharu UCHIUMI, Hideaki KOBAYASHI,

長 谷 川 進^{*3}・新 岡 嵩^{*3}

Susumu HASEGAWA and Takashi NIIOKA

Key Words: Scramjet Engine, Flame-Holding, Strut, Supersonic Combustion

Abstract

Flame-holding experiments of newly devised struts for the scramjet engine were carried out in supersonic airflow of Mach number 1.5. The basic configuration of struts consists of two parts into which a general strut with steps was divided at steps. The intervening space between those two parts can be changed and hydrogen gas is issued from the rear end of the front strut to the intervening space. Based on the flame-holding mechanism explained in authors' preceding reports, three improvements were made in order to widen the flame-holding region: (1) To introduce much air into the intervening space, fuel hydrogen was partially premixed by air. (2) Also, air was taken in from intake slits provided on the front strut against supersonic airflow. (3) On the contrary, in the case of the large intervening space, to prevent excess air to entering into the intervening space, recess was equipped around the fuel port. It was found that, according to the overall equivalence ratio in the intervening space, three techniques were quite reasonably worked and the flame-holding regions were widened.

1. 結 言

宇宙利用が活発に推進されつつある中、そのための輸送システムとして専らロケットが用いられているが、空気吸込みエンジンによる比推力向上を図った打上げ能力増大の期待も高まっている。その推進システムの一形態として飛行マッハ数5~6以上で飛躍的に比推力が大きいスクラムジェットエンジンが有用であるとされている¹⁾ スクラムジェットエンジンの実用

化には、空気と燃料の混合及び燃焼を促進して燃焼室長さを抑え、しかも空気取入口との干渉を生じない燃焼器を設計することや、燃焼室内へ流入する空気流のどのような条件においても確実な着火と火炎保持の安定な領域の確保が必要であり、そのために、燃焼室壁から燃料噴射するだけでなく、流れの中に燃料噴射を伴った保炎器を設置するなどの方法が考えられている。

本研究の前報^{2,3)}では、保炎器として主流方向に前後に二分割したストラットを用い、その保炎特性及びその保炎機構について述べた。本論文では、その保炎機構に基づき、部分予混合の保炎特性、空気吸込みストラットを用いた保炎特性、さらにリセスを備えたストラットの保炎特性を調べ、より一層の保炎性能の向上を試みた結果について述べる。

2. 実験装置及び方法

本研究で使用した超音速燃焼試験設備⁴⁾は、大気放出ブローダウン方式で、アルミナ系セラミックスペール蓄熱器により乾燥空気は加熱されて約20秒間の超音速燃焼試験が可能である。本実験時風洞の作動条件は、主流全圧0.25~0.3 MPa、空気流全温300~800 Kで、超音速ノズル出口直径は135 mmであり、試験観測部における空気流のマッハ数は1.5の一定値とした。そのときの静圧は0.065~0.08 MPaである。燃料には水素ガスを用いた。

試験部に挿入される供試二分割ストラットは奥行260 mmの二次元形状で、その形状と寸法を第1図に示す。燃料は前方ストラットの背面のスリット(幅1.2 mm、図面奥行方向の長さ40 mm)から空気流に対して平行に噴射され、火花点火による強制着火によ

^{*1} 平成6年11月25日原稿受理

^{*2} 宇宙開発事業団

^{*3} 東北大学流体科学研究所

第1図 二分割ストラットの形状と寸法

第2図 燃焼時の直接写真

り、第2図に示すように、前後のストラットに挟まれた領域（以後、間隙燃焼領域あるいは単に間隙領域と呼ぶ）および後方ストラットの後流に燃焼領域が形成される。着火に用いた火花点火装置は、エネルギーが16 J、毎秒6回のスパークが可能な容量形スパークプラグを用いた。前方ストラットの後端から約3 mm上方の位置で点火させ、着火確認後、スパークを止めてすばやく75 mm上方へ引き上げて流れに乱れを生じないようにした。

3. 供試セラミックス製ストラット

安定な燃焼を確保するためには、プラズマジェットの利用等もある。しかし、一般的には燃焼室内のどこかに亜音速燃焼領域を設ける必要があり、例えば燃焼室壁にリセスを設ける方法⁵⁻⁷⁾があり、本実験と定性的に極めて一致する現象であると考えられる。亜音速領域はできる限り広い方が望ましいが、圧力損失が大きくなる懸念がある。ここで考えたストラットは、文献等に見られるステップ付きストラットをステップの箇所で二分割したもので、間隔(L)があまり大きくない範囲では、二分割することによる圧力損失は極めて小さく抑えることができ、しかも亜音速燃焼領域を広くとることが可能になる。燃焼室内へ流入する空気流の条件に対応した保炎を確保するために、燃料噴射量を、空気主流に対して平行な量と垂直な量を調節する方法など考案されているが、このようにストラットを分割することにより、圧力損失を低く抑え、しかも両

者のストラット間の距離 L を適当に調節することで、燃焼モードの制御を可能ならしめる。すなわち、間隙領域及びその近傍の流れや混合状態を変化させて流入空気のある条件に適合した保炎も可能になる。本研究は、このような意図で設計されたストラットの保炎機構の解明や保炎性能を向上させることを意図としている。

ストラットの材質には、真ちゅう、ステンレス、セラミックが用いられた。超音速空気流を作るために空気加熱炉を用いているが、この中のペブルから発生する微粒子がストラット表面を超音速流で叩くため、金属製ストラットの場合は、前方ストラットの流れに対面しているところ、特に先端部分はガラガラになってしまう。また、一方、後方ストラットは、燃焼ガス流にさらされるため、5秒程度で赤熱してしまい、真ちゅう製のものは溶融してしまう。ステンレス製は破損はしないが、10秒以上になると第1図の奥行方向にたまるができ、適切でなくなる。

実用的には、後方ストラットからも燃料噴射を行って冷却することも考えられるが、ここではセラミック製について試験した。金属製のように加工性に優れているとは言えないが、最近、第1図程度のものは加工が可能なセラミックができた。もろい性質のため、取り付け時に破損させてしまうこともあるが、金属製で懸念された表面損壊や耐熱性などは全く問題とはならなかった。従って、本実験では、前方ストラットにステンレス製、後方ストラットにセラミック製が多く用いられた。

4. 保炎特性

第1図に示したストラットの保炎特性及び保炎機構の概念図をそれぞれ第3,4図に示す。ここで、保炎は間隙領域に安定な燃焼を確保できたときだけ可能で、後方ストラットの後流にだけ保炎できることはなかった。間隙燃焼領域についてだけ議論すれば良いことになる。前報^{2,3)}にも記したように、間隙領域の亜音速流と主流空気超音速流の間には強いせん断層が発達しており、激しい乱流混合が生じている。このため、間隙領域における燃料と空気の混合は相当に急速に進行し、燃料噴射口から若干離れたところでは、ほぼ予混合状態とみることができ。従って、この予混合状態のガスについての滞留時間と化学反応時間の競合が保炎するか否かを決するとしても考察できる。この競合状態は、間隙領域内のあらゆる点で異なるが、保炎するか否かは現象として二者択一であり、オーバーオールの滞留時間と化学反応時間で評価するのが適切と考えられる。

第3図に示すように、一定流量の燃料噴射に対して前後のストラット間の距離 L により、保炎性能が左右されることが示されている²⁾。すなわち、ある一定の燃料流量と空気温度について、距離 L を変化させると、二つの領域だけで保炎が可能であるという極めて特異な変化を示している。この保炎機構を説明したのが第4図であり、保炎の可否が反応物質の滞留時間 (τ_r) と化学反応特性時間 (τ_c) との競合、つまりダムケラ数 (τ_r/τ_c) により決定づけられ、滞留時間が化学反応時間より長い場合のみ保炎可能であることがわかった³⁾。なお、後方ストラットを除いて $L=\infty$ とした場合は、保炎できなかったため、第3図の右側にもう一つの限界があることになる。観察窓ガラスの直径が150 mmであり、 $L>60$ mmでは実験的には観測はできなかった。前報³⁾において、滞留時間及び化学反応特性時間のそれぞれについて測定を行い、この保炎機構の正当性について述べた。

上記の保炎機構の確認を行いつつ、更にこの保炎機構に基づいて一層の保炎性能の向上が期待できる方策として、本研究では以下のような実験を行った。

- (1) 燃料である水素に空気を混入し当量比にして最小約2.4まで部分予混合化して間隙燃焼領域の当量比を変化させる。燃料過剰の場合に効果的になる。
- (2) 主流空気から間隙領域へより効率的に空気を取入れるための空気吸込み部を備えたストラットを考案し、(1)と同様、間隙領域の当量比を減少させる。
- (3) 燃料希薄の場合に間隙領域の当量比を大きくするため、前方ストラットの背面にリセスを設けたストラットを用いて主流空気の間隙領域への流入を抑制する。

5. 部分予混合化による保炎特性

前報³⁾において、距離 L に対する間隙領域における局所当量比の変化が第5図のように得られている。この時の測定条件は、水素の噴射流量が200 Nl/minであり、また、水蒸気の検出はできないドライサンプリングによる濃度測定のため非燃焼時の結果である。横軸は、燃料噴射口からの距離 X を L で除して無次

第3図 二分割ストラットの保炎特性²⁾ (水素ガス流量 200 Nl/min)

第5図 燃焼領域における各 L の局所当量比³⁾

第4図 保炎機構の概念図

第6図 部分予混合の保炎特性 ($L=15$ mm)

元化している。 L が短いときほど局所当量比は一般的に大きくなっていることがわかる。水素の最大燃焼速度を有する当量比は1.8であることから、 $L=15$ mmでは燃料過濃なために、また $L=50$ mmでは燃料希薄なために化学反応特性時間が延びているはずである。

部分予混合化実験では第1図に示したストラットを用い、燃料に空気を添加し、その添加流量を変化させて保炎特性を調べた。添加量は最大で水素と同量の200 Nl/minであり、このとき噴射混合気の当量比は約2.4まで下がる。第6図は $L=15$ mmにおける部分予混合の保炎特性である。水素の噴射流量200 Nl/minの条件下において、空気流の全温と添加した空気の流量とをパラメータとして保炎可能な点を○印で、保炎不可能な点を×印で表している。図中の黒い点は空気を添加していない場合の保炎限界である。この図から空気の添加量の増加に伴い、空気流の全温が低下しても保炎が達成されている様子がわかる。すなわち、 $L=15$ mmの場合、燃料である水素が過剰気味

であるので、空気混入によって間隙領域での当量比を小さくするように作用させることで保炎性能が向上している。

第7図は $L=30$ mmの場合である。空気の添加によって主流全温の低温域まで保炎範囲は拡大されることがわかったが、この場合は第3図からもわかるように、保炎限界に相当するところで、空気の添加量に対する保炎限界の傾向が明確に表れてこない。実験においても、全温が低い場合に保炎限界の再現性が悪くなっている。よって、 $L=30$ mmでは保炎の可否が極めて微妙な状況にあると考えられる。従って、保炎実験の再現性があまりよくない。

第8図は $L=50$ mmの場合で、空気を混入しなければ、もともと間隙領域では燃料希薄な状態にある。この場合には、空気の添加がない時（主流内の全温300 Kでも保炎可能）と比較すると、空気の添加により保炎範囲は縮小され、添加量の増加と共に保炎性能が低下していることがわかる。これは空気の添加の影響で間隙領域における当量比が一層小さくなり、化学反応特性時間が延びるため保炎はできなくなってしまう。

第6～8図より、燃料への空気の添加が、間隙領域での全体当量比を減少させ、結果的に化学反応特性時間が大きくなり、 L が小さく燃料過濃な場合に保炎性能を向上させる。これらの結果は、本実験で用いたストラットの保炎機構に関する従来の説明を立証しているし、次節のような新しいストラットの考案を促す。

6. 空気吸込み部を備えたストラットの保炎特性

前節の結果から、燃料過濃な状態の場合、間隙領域に空気を混入することによって全体当量比を小さくすることが有効であることがわかった。従って、 L の短い状態であっても当量比を調節することで火炎が保持できるはずである。実際のスクラムジェットエンジンを想定した場合、予混合気を形成することの困難性や危険性を考えると、部分予混合型は実現性の少ない方法ではあるが保炎機構を把握する実験に有効である。

第9図に示したストラットは、このような観点に基づいて、第1図のストラットに改良を施し、主流の空

第7図 部分予混合の保炎特性 ($L=30$ mm)

第8図 部分予混合の保炎特性 ($L=50$ mm)

第9図 空気吸込み部を備えたストラットの形状と寸法

第10図 空気吸込み部を備えたストラットの保炎特性 ($L=10$ mm)

第11図 空気吸込み部を備えたストラットの保炎特性 ($L=20$ mm)

第12図 空気吸込み部を備えたストラットの保炎特性 ($L=50$ mm)

気を間隙燃焼領域に送り込むスリットを備えたものである。空気吸込み用スリットは幅1 mm、図面奥行方向に長さ40 mmであり、主流空気流方向とスリットの成す角度は20.6度である。その他の形状は、第1図のものと同一である。このストラットには、空気吸

込み部スリット先端に衝撃波が形成され易い。この衝撃波をシャドウグラフ法により可視化して挙動を調べてみると、前方ストラットのの前縁部に発生する斜め衝撃波に比べると弱いもので、スリット先端の空気吸込み口形状を工夫すれば圧力損失は少なくてすむと考えられる。また、シャドウグラフによると、 L の長短を問わず空気吸込み部を通過して間隙領域へと送り込まれる空气の噴流が観察できた。

第10～12図は、横軸が水素の噴射流量、縦軸が主流空气の全温とした時の第9図のストラットの保炎特性である。 $L=10$ mmの場合(第10図)は、空気吸込み部のないとき、この図中の範囲では保炎できなかった(第3図)。主流空气を吸い込んで間隙領域に空气が送り込まれることによって、第10図のような範囲で保炎が可能となった。水素噴射流量が200 Nl/min付近で最も保炎性能が良く、他の流量では空气の全温が高い場合に限って保炎されている。 $L=10$ mmの場合は、水素流量200 Nl/minが最も適度の空气が吸い込まれていることになる。

第11図に示した $L=20$ mmの場合では、図中の破線で示した領域が吸込み部のない場合で²⁾、実線で示した領域が吸込み部を備えたストラットの保炎範囲である。保炎範囲は、全体的に水素の噴射流量が増す方向にシフトしており、空気吸込みの効果が極めて大きいことがわかる。

一方、逆に $L=50$ mmの場合では、第12図に示すように空気吸込みの影響により保炎範囲は縮小されてしまう。水素噴射流量が200 Nl/min以下では、もはや空气の全温を上げてでも保炎できず、水素の噴射流量が300 Nl/min以上で、かつ全温が高い場合に限って保炎されるようになる。空気吸込みの効果は間隙領域の当量比を小さくすることに寄与しており、もともと燃料希薄であった $L=50$ mmでは、さらに希薄化されてしまうために化学反応特性時間が延び、保炎し難くなってしまふ。

$L=50$ mmというストラット間距離は大きすぎて、主流が若干後方ストラットの前面に突き当たっていると考えられる流速分布であり²⁾、圧力損失が大きくなると思われるので、二分割ストラットとしては L が50 mm以下が实际的である。つまり、主に L が小さい燃料過剰の場合、あるいは燃料流量を大きくしたい場合に空気吸込み部は有用である。

7. リセスを備えたストラットによる保炎特性

前後のストラット間の距離 L が長くなると共に、両者間に挟まれた燃料領域に流入する主流からの空气流量が増加し、燃料希薄な状態が生じやすくなって

る。しかし L が長くても、間隙領域での当量比を、反応にとって良好な状態、すなわち当量比を大きくすることによって、化学反応特性時間を短縮することが可能であれば、保炎性能を向上できると考えられる。そこで本節では、 L が長くても主流空気の流入を抑制することによって間隙燃焼領域が希薄化することを阻止することを考えた。第13図に示すように、前方のストラットの背面にリセスを備え、これにより局所当量比を大きくし、化学反応特性時間が短縮されることをねらって実験を行った。前節最後に、 L が長すぎると圧力損失が増大し、実際のでなくなると述べたが、リセスを設けることにより、 L が長くても実利用可能か検討する資料になるという配慮もある。

ストラットの形状と寸法は第13図に示した通りで、リセスの深さ10 mm、幅11 mm、図面奥行方向に長さ128 mmである。リセス以外の形状や寸法は、第1図に示したストラットと同様であり、第3図に示した保炎特性とに相違が見られれば、すべてリセス効果による影響であると考えて良い。

$L=50$ mm の場合は保炎範囲が広く、実験可能な範囲のほとんどで保炎可能であるので²⁾、保炎範囲の広がりを確認し難い。従って、燃料希薄領域で保炎できなかった $L=30$ mm について実験を行った。第14図に $L=30$ mm におけるリセスを備えたストラットの保炎特性を示す。予混合した場合の保炎特性でも述べたように、第1図のストラットによる $L=30$ mm

第13図 リセスを備えたストラットの形状と寸法

第14図 リセスを備えたストラットの保炎特性 ($L=30$ mm)

の保炎特性は、保炎の可否が極めて微妙な状態であり、全温と水素流量をパラメータとするマップ上では明瞭な保炎限界線は得られなかった。ところがリセスを備えることにより、主流空気の全温が高い領域において明瞭な保炎領域が現れている。主流空気の間隙領域への流入が抑制されて局所当量比が水素の最大燃焼速度を有する値に接近し、化学反応特性時間が短縮されるためと考えられる。

このように、リセスを備えることにより主流空気の流入を抑制し、間隙領域における当量比を幾分大きくして燃料希薄状態での保炎性能を向上させることができた。

8. 結 言

スクラムジェット用二分割ストラットの保炎性能の向上に関する実験により以下の知見が得られた。

- (1) 燃料に空気を添加し、部分予混合化することによって燃料過濃な状態と見なされていた領域の保炎性能を向上させることができた。逆に、燃料希薄な状態と見なされていた領域は、空気を添加することにより保炎領域が狭まることを確認した。
- (2) 空気吸込み部を備えたストラットを用いることにより、間隙領域に主流空気を送り込むことが可能であり、これによって燃料過濃状態の保炎性能を向上させることができた。
- (3) 間隙領域における当量比が小さい場合に、リセスを備えたストラットを用いて空気の流入を抑制することにより、間隙領域の当量比を増加させることができ、不安定な保炎特性を安定化することができた。

以上により、著者らが提唱する二分割ストラットの保炎機構が明確にされると共に、その保炎機構に基づいた各種方法によって保炎性能が一層向上することを確認できた。ここで述べた二分割ストラット及びその改良型は、このまま実用に供されるものではないが、その基本的形状と保炎機構の燃焼工学的根拠を示すことができた。

最後に、本研究は文部省科学研究補助金の交付を受けてなされたものであることを記し、謝意を表します。また、本研究を遂行するに当たり、石川島播磨重工業(株)の藤森俊郎氏、東北大学工学部学生及び大学院生の秋山勝哉君、阮炯明君、梅本俊行君に協力を頂いたことを付記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 鎮西信夫, 升谷五郎: スクラムジェット, 日本航空宇宙学会誌, **35** (1987), pp. 241-251.
- 2) Niioka, T., Terada, K., Kobayashi, H. and Hasegawa, S.: Flame Stabilization Characteristics of Strut Divided into Two Parts in Supersonic Airflow, *J. Propulsion and Power*, **11** (1995), pp. 112-116.
- 3) Uchiumi, M., Kobayashi, H., Hasegawa, S. and Niioka, T.: Flame-Holding Mechanism of a Newly Divided Strut for the Scramjet Engine, *Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **38** (1995), pp. 117-125.
- 4) 新岡 嵩, 長谷川進, 塚本達郎, 小林秀昭, 寺田謙一: 超音速燃焼試験設備, 東北大学流体科学研究所報告, **3** (1992), pp. 1-13.
- 5) Huellmantel, L. W., Ziemer, R. W. and Cambel, A. B.: Stabilization of Premixed Propane-air Flames in Recessed Ducts, *Jet Propulsion*, **27** (1957), pp. 31-34, 43.
- 6) Povinelli, L. A.: The Ignition Delay Concept for Recessed Flameholders, *Combustion and Flame*, **4** (1960), pp. 355-356.
- 7) Choudhury, P. R. and Cambel, A. B.: Flame Stabilization by Wall Recesses, *Eighth Int. Symp. on Combustion*, Williams and Wilkins, Baltimore, 1962, pp. 963-970.