ステップ後流において燃料噴射した場合の保炎実験*

武部昌志^{*1}, 塚本達郎^{*2}
長谷川進^{*3}, 新岡嵩^{*3}Flame Stabilization in Case of Fuel Injection
at Downstream of Backward-facing StepMasashi TAKEBE, Tatsuro TSUKAMOTO,
Susumu HASEGAWA and Takashi NIIOKA

The blow-off velocity of a flame stabilized in recirculating flow of a backward-facing step in a two-dimensional air duct is obtained experimentally. The fuel injection slit is located at the downstream of the step whose heights are 0, 10 and 20 mm. The fuels employed are methane, propane, hydrogen and city gas, and the air velocity can be changed from 1 to 60 m/sec. The results show that the backward-facing step extends the blow-off velocity with increase in the velocity of fuel, and that this effect is more remarkable in the higher step height. The blow-off velocity nondimensionalized by the burning velocity can be expressed in a uniform manner, i. e., independent of fuel, by the heat release flux. Furthermore, it is ascertained experimentally that heat loss across the combustor wall apparently does not influence the blow-off velocity in this configuration. Also, the velocity fields are measured by LDV.

Key Words: Flame Holding, Flame Stability, Blow-off, Step Flow, Recirculating Zone

1. 緒 言

近年、超音速飛行を可能にするエアブリージングエンジンに大きな関心が集まっている。このようなエンジンでは燃焼室内が高速となっており、高速気流中において火炎の吹飛びを防ぎ、燃焼器内で定常的な燃焼を維持することが必要とされる。

高速気流中で定常的に火炎を安定させるためには、例えば、流れ場の中に燃料がもつ固有の燃焼速度と同じ程度の低流速領域を設ける必要がある。気流中に鈍頭物体を入れる方法があるが、高速流中では圧力損失が大きく適当でない。ここで扱うステップ流れ場は圧力損失は小さく、再循環領域は低速域をもつので適切とされてきた^{(1)~(10)}。しかし、その保炎機構がよく調べられていないため、どのような燃料噴射が最適かわからない。例えば、ステップ上流あるいはステップの上端から空気流中に垂直に噴射する方式は、混合も良好で、火炎が安定して燃焼負荷率が大きくなる

が^{(1)~(4)(6)(8)}、圧力損失がやはり大きくなり、ラムジェットエンジンなどでは不利と思われる。

そこで、本研究ではステップ後方の底面から燃料を噴射した場合の火炎安定性を実験的に調べた。ステップ後方における燃料噴射について、圧力分布や濃度分布測定⁽⁴⁾、燃料噴射を分散させたときの性能について実験および数値計算⁽⁶⁾⁽⁷⁾、活性化エネルギー漸近解析⁽⁹⁾など、近年詳細に調べられている。しかし、いずれも保炎のメカニズムについて明解に説明されているとは言い難く、特に流れの特性時間と反応時間の競合についての議論がいつそう与えられるべきであると考えられる。本報告では、問題を簡単化するため、まず、亜音速空気流に種々の燃料を噴射して、火炎安定および吹飛び限界についての実験を行った。さらに、燃焼室壁面の熱損失による吹飛びの影響やLDVでステップ背後の流速分布の測定を行って、吹飛びのメカニズムを考察した。

2. 実験装置および方法

実験装置の全系統図を図1に示す。送風機からの空気流は、整流筒、絞りノズルおよび長方形断面のステップをもつ二次元燃焼室を通り、排出される。整流筒は断面300 mm×300 mmの正方形で、整流のための

* 平成2年11月27日 第28回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成3年7月31日。

^{*1} 学生員、東北大学大学院。

^{*2} 正員、東京商船大学商船学部 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)。

^{*3} 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

金網 10 枚を 100 mm 間隔で入れた。なお、実験は、常温常圧の空気流のもとで行った。

実験に用いた燃焼器は、図 2 に示すように、断面は 70 mm×100 mm の長方形で長さは 480 mm である。ステップはノズル出口端から 50 mm 下流に位置し、燃焼室の両側面には火炎観察および写真撮影のために厚さ 10 mm のパイレックスガラスを備えつけた。燃焼室の底面に取付けた燃料噴出口は、ステップから 63 mm の距離に位置しており、燃料は主空気流に直角方向にスリットから噴出する。この燃料出口スリットは奥行き長さ 62 mm、幅 1.4 mm にした。

燃焼室内空気流速 U (m/s) は、1~60 m/s の範囲で変化させた。ステップの高さ h が、ステップがない場合 ($h=0$ mm) と 10 mm と 20 mm の場合の 3 種類の実験を行った。おのおののステップ高さについて、燃料口の位置 l を種々変えるべきであるが、重要と考えられるのは、図 2 の燃料口が主流空気流の再付着点(再循環領域長さ)より右にあるか左にあるかであり、

図 1 実験装置の概略図

図 2 ステップ燃焼室

それはステップ高さを変えることによっても可能である。本報告では、燃料口の位置を固定し、ステップ高さを変えた。燃料として、水素(純度 99.99%)、メタン(純度 96%)、プロパン(純度 96%)および都市ガス(水素 45%、メタン 21%、一酸化炭素 4%、ブタン 4%、二酸化炭素 14%、窒素 9%、酸素 2%) の 4 種類を用いた。

任意の燃料流速 v について、空気主流速 U を大きくしていき、火炎の形状の変化を観察するとともに、吹飛び限界の空気主流速 U_c を測定した。また、ステップ後方における流速分布をレーザドップラー流速計(LDV)を用いて測定した。使用したレーザはアルゴンレーザで、その出力は 4 W である。受光部については、前方散乱とし、散乱粒子として酸化マグネシウムを用いた。

3. 実験結果

最初に、 h を変えたときの v と U_c の関係を図 3、4 および図 5 に示す。図 6 は、ステップによる保炎の一例を示した写真である。図 7 には火炎の位置を図示した。図 3 に示した h が 0 mm の場合には、 v の小さい領域を除く大部分の領域で、 U_c の値はほぼ一定であることがわかる。

また、図 4 に示した $h=10$ mm の場合では、 U_c は v とともに増加するが v がある値以上になると U_c の値にばらつきが多くなる。このとき、図 7 (a) に示したように、燃料噴出口から上流側を A 領域、下流側を B 領域とすると、 v が小さい領域では火炎がステップに引き寄せられた状態〔図 7 (b)〕からそのまま A 領域内で吹き飛び、 v が大きい領域では B 領域で火炎が保持された状態〔図 7 (c)〕から吹き飛ぶのが観察された。A 領域内で吹き飛びが見られる v の範囲は、 U_c が v とともに増大する領域に対応し、B 領域内で吹き飛びが起こるときは v を大きくしても U_c はあまり変化し

図 3 燃料流速と吹飛び空気流速の関係 ($h=0$ mm)

ない傾向がある。一般的に、 v が小さいときは $h=20$ mm の場合、 v が大きくなると空気流速をブロックした $h=0$ mm の場合の傾向になることを意味している。

図5に示した $h=20$ mm ではどの燃料の場合でも、 v と U_c との間に比例関係が見られ、火炎はステップに引き寄せられた状態から吹き飛び、 U_c は v とともに増加する。 $h=10$ mm と 20 mm の結果から、火炎がステップに引き寄せられた状態が保炎において有利な状態であることがわかる。 h が高くなることによって U_c が増大するのは、 h が高いほど再循環領域（ステップ後流）の流速が低下するためである。

次に、図3および図5において4種類（水素、メタン、プロパンおよび都市ガス）の燃料別に比較すると、 $h=0$ mm (図3)では水素の U_c がかなり高く、メタン、プロパンおよび都市ガスはほぼ同じ値を示した。 $h=20$ mm (図5)ではプロパンの U_c が、他の燃料に比べて大きくなっている。 $h=0$ mm では、表1に示す燃焼速度が大きいほど U_c も大きくなっているが、 $h=20$ mm では、燃焼速度の小さいプロパンの U_c が大き

なっている。

以下では、燃料について統一的に整理できる方法を考え、保炎のメカニズムを調べることにする。

4. 考 察

上述の燃料による U_c の相違から、再循環領域における保炎は、おのおのの燃料の燃焼熱、密度、燃焼速度などに密接に関係していると思われる。燃焼の場はかなりの希薄混合比であるから、燃料量の増大によって混合比が大きくなり、燃焼温度が上昇するため、 U_c も大きくなると考えられる。また再循環領域の温度が同じであれば、その他の因子としては燃料固有の燃焼速度が影響すると考えられる。そこで、横軸 v の代わりに単位面積、単位時間あたりの発熱可能な熱量

表 1 燃料の物性値⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

	Burning velocity S_u (m/s)	Heat of combustion Q (J/kg) $\times 10^{-7}$	Density ρ (kg/m ³) $\times 10$
Hydrogen	1.9	12.0	0.832
Methane	0.37	4.99	6.655
Propane	0.43	4.63	18.34
City gas	0.61*	2.54	7.768

* Estimated value

図 4 燃料流速と吹飛び空気流速の関係 ($h=10$ mm)

図 5 燃料流速と吹飛び空気流速の関係 ($h=20$ mm)

図 6 吹飛び寸前の写真

図 7 吹飛び直前の火炎形状

$q(=\rho Qv)[J/(m^2 \cdot s)]$ (発熱流束と名付ける) をとり、縦軸は U_c の代わりにおのおのの燃料の燃焼速度 Su で除した値 U_c/Su をとって整理したものが図 8, 9 である。ここで説明した整理方法によれば、燃料の種類が違ってもおおむね一つの曲線で整理できることがわかる。

図 8 ($h=0$ mm) では q の小さい領域を除いて、どの燃料を用いても U_c/Su が一定値をとる傾向が見られる。これは、全体の流れや火炎の大きさより、火炎基部が燃料口に付着し得るかどうかが吹飛びするかどうかで決定されるからである。火炎基部は、燃料口から若干離れているので、燃料と空気が予混合されているとみなしてよく、予混合火炎の伝ば速度、すなわち燃焼速度だけで決定される。燃料流速に比べれば空気流速は十分に大きいので、おおむね燃料流速に無関係に限界空気流速は決定されるはずである。

図 9 ($h=20$ mm) では、燃料によらず、ある一定の傾きをもった直線上に並ぶ傾向が見られ、 q の増加、つまり v の増加に伴い U_c も大きくなり、保炎効果が

図 8 発熱流束 q と U_c/Su の関係 ($h=0$ mm)

図 9 発熱流束 q と U_c/Su の関係 ($h=20$ mm)

大きくなるのがわかる。つまり、燃料流量を大きくして発熱量を大きくすると、再循環領域の温度が上昇し、保炎効果が増すものと考えられる。

図 10 に、 h が 20 mm、燃料が都市ガスの場合のステップ背後の流速分布を示す。流路幅の中央を測定面とした。図 10 中の点線は火炎形状の概略、ベクトルはその中心の位置での流速の方向と大きさを示す。また実線は、測定結果をもとに推定した流線である。図 10(a) は $U=2.5$ m/s の場合で、火炎は図 10 のように特異な形状をした層流火炎になり、ステップから離れて存在する。このときの主流付着点は、燃料噴射がないときは燃料口より上流に位置している。燃料の噴出により流れは極めて複雑になり、燃料噴射口の上流と下流に図 10 のようないくつもの渦が形成される。ステップ後流における燃料噴射のため、流れは複雑になるが、主流速が十分に小さいため、どの場所においてもダムケラ数は十分に大きい。したがって、燃料の流線にほぼ沿って火炎が形成され、燃料噴射口の上方に鋭いくぼみをもった形状となった。ステップ直後の流速は非常に小さく、LDV 測定が困難であったことと、必ずしも定常的ではなかったため、明確な流線を描き難い。

図 10(b) は、 $U=9.2$ m/s の場合で、燃料噴射がなければ付着点は噴射口の下流に位置する場合である。このときは火炎は乱流火炎の状態、燃料噴射口の周辺に大きな再循環領域が形成される。火炎もステップまで引き寄せられ、火炎がステップと燃料噴射口の間になく存在しなくなる。

空気主流速が低い場合は、主流と再循環領域の接触面も比較的安定しているが、高速になると、火炎の乱れ具合から類推されるように、接触面が面とは言えない状態となり、両領域の間で乱流混合が生じていると考えられる。したがって、再循環領域内では、相当量の

図 10 ステップ背後の流速分布

空気が再循環される高温燃焼ガスと混合し、床面に沿って主流と反対方向に流れている。この流れは、燃焼噴射口からの燃料ガスと混合しながら壁面に沿って上流に逆戻り、燃焼するが、もともと燃料流量は空気流量に比べて十分に小さいので、希薄燃焼状態にある。

図5において、燃料流量と共に吹飛び限界空気流速が大きくなるのは、希薄燃焼だからである。燃料流量を大きくしていくと、火炎温度も上昇し、再循環されてくる空気流温度も上昇することになる。したがって、保炎効果も大きくなるが、主流速度を大きくして、再循環される空気流速も大きくなると、燃料噴射口とステップの間のA領域だけで燃焼反応を完結することが困難になろう。最終的には、火炎は存在できなくなり、吹き飛んでしまうことになる。

ステップの高さ h が 10 mm のときは縦軸に U_c/Su をとり、横軸に q をとって同様にまとめてみたが、かなりのばらつきが見られた。図8 ($h=0$ mm) あるいは図9 (20 mm) はそれぞれの保炎の性状で決定されるのに対し、 $h=10$ mm の場合は、そのどちらかに条件に応じて変わるためであると考えられる。実際、低燃料流速の場合は、 $h=20$ mm のときと同じように図7に示すA領域の側で火炎が最終的に吹き飛び、高燃料流速の場合は、 $h=0$ mm のときと同じB領域の側で吹き飛ぶことが観察されており、燃料流速によって吹き飛びの機構が異なっている。

なお、本実験では、燃焼効率を調べておらず、もっぱら再循環領域における火炎の保持に着目している。保炎にとっては、燃焼領域あるいは火炎の基部の安定が最も重要であることによる。しかし、本実験では、吹き飛び近くで再循環領域以外には火炎は存在せず、噴出された燃料の大部分が燃焼していないのではないかと考えられ、再循環領域より下流については今後の課題である。

火炎の吹き飛びは、ステップ付近の壁面による熱損失に大きく影響することが懸念される。今回実験に使用した燃焼器の材質は、側面のパイレックスガラスを除いて、すべて黄銅である。そこで、ステップおよびその後部の床面を熱伝導率の小さいセラミックス（材質はアルミナ）に変えて、火炎の吹き飛びの実験を行った。用いたセラミックスの熱伝導率 ($\lambda=25.122$ W/(m·K)) は黄銅のおおむね 1/2 である。

図11は、セラミックス燃焼器を使用したときの実験結果である。燃料はメタンとプロパンの場合について、 h が共に 20 mm である。セラミックス燃焼器の実験結果は、黄銅燃焼器の実験結果と一致しており、これまで使用してきた黄銅燃焼器は熱損失が小さく、

火炎の吹き飛びにほとんど影響を与えていない。本実験では、高温の燃焼領域が下床面やステップから十分に離れていることによると考えられる。

5. 吹き飛びメカニズムの補足考察

図8および図9の整理方法について別の角度から若干考察してみよう。Potter⁽¹³⁾ は、対向する二つの円管の一方から空気、一方から燃料を噴出させて、衝突面近傍に形成される拡散火炎が、対向流速を上昇させたとき、消炎 (extinction) する状態を調べた。対向流速を大きくすることによって、物質輸送時間を減少させることができ、化学反応時間と比較できる大きにすることができる。すなわち、ダムケラ数を小さくできる最も基礎的かつ純粋な系として知られている。ダムケラ数が小さくなって、反応時間が不足したときに消炎に至る。彼らは、横軸には、理論化混合気の予混合火炎における燃焼質量流速をとり、縦軸に、消炎のときの質量流速をとって、二つの間に比例関係があることを示した。すなわち、二つの比をとると一定値をもつことになる。

図9において、縦軸に上記の比をとった。本来なら、分子の U_c には、再循環領域内の燃焼領域の流速をとるべきであるが、その流速は主流速に比例するはずであるから、 U_c で代表させた。横軸には、4章に述べたように、再循環流空気の温度が大きな要素であるから、その指標として発熱可能な熱流束 $q=\rho Qv$ をとった。水素が他と比べて著しく密度が小さいため、 q の小さい領域に片寄り、しかも若干小さめになってはいるが、おおむね1本の直線で表現することができた。このように、ステップ後方の再循環領域に保持される火炎の吹き飛び現象は、対向流火炎の消炎 (extinction) と酷似したメカニズムであることが理解される。

図8のステップがない場合は、大略 q には無関係

図11 セラミックス燃焼器による U_c と q の関係

で、 Su にのみ U_c が依存すると考えられるので、予混合気の燃焼速度で火炎基部は律せられると見てよい。したがって、超音速流れとなつて、燃料噴射流前方に衝撃波ができればよいが、亜音速流れでは火炎保持は不可能である。しかし、ステップ流の場合は、図9のとおり、燃料流量の増大とともに、吹飛び流速はいくらでも大きくできるように見える。限られた長さ（燃料噴射口とステップ間距離）の中で次第に反応時間不足するように見えるが、上述したように、燃料流量の増大で、燃焼領域がより理論混合比に近づいて燃焼温度が上昇し、再循環される空気流温度も上昇することが、このように直線的に U_c が大きくなる要因になっている。

6. 結 言

ステップ後流において燃料噴射した場合の保炎、火炎の安定化の実験を行い、次のような結果が得られた。

(1) ステップがない場合には、燃料流速を増大させても、吹飛び限界空気流速はほとんど変わらず、限界空気流速を、燃料がもつ理論化混合燃焼速度で除した値 (U_c/Su) は、燃料によらずおおむね一定であった。

(2) ステップの高さが 20 mm では、横軸に、燃料が単位時間単位面積当たり可能な発熱量、縦軸に U_c/Su をとると、ほとんど直線的に増加する。燃料の種類によらず、ほぼ一直線上に整理できる。また、セラミックス燃焼器との比較により、壁面への熱損失の影響が小さいことがわかった。

(3) 流速分布の測定により、再循環領域が燃料流を空気主流と逆方向に導き、火炎をステップ方向へ引き戻す。吹飛びは、再循環空気流がステップと燃焼噴射口の間に形成された燃焼域を吹き飛ばすことで生じる。そのメカニズムは、拡散火炎の消炎 (extinction) に酷似している。

文 献

- (1) 河村, 機論, 35-269(1969), 127.
- (2) 河村・永田, 機論, 35-269(1969), 133.
- (3) 河村, 機論, 35-269(1969), 143.
- (4) 小室・村上・工藤・升谷・鎮西, 航空宇宙技術研究所報告, TR-918(1986).
- (5) Uevishi, K., Rogers, R. C. and Northam, G. B., AIAA-87-0089, *Proc. AIAA 25th Aerosp. Sci. Meet.*, (1987).
- (6) Uenishi, K., Rogers, R. C. and Northam, G. B., AIAA-87-1962, *Proc. AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propuls. Conf.*, (1987).
- (7) Diskin, G. S. and Northam, G. B., AIAA-87-2164, *Proc. AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propuls. Conf.*, (1987).
- (8) Prior, R., Fowler, D. and Mellor, A., AIAA-90-2453, *Proc. AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propuls. Conf.*, (1990).
- (9) Konczalla, M. (Meinkohn, D., ed.), *Dissipative Structures in Transport Processes and Combustion*, (1990), 51, Springer-Verlag.
- (10) Winterfeld, G., (Angelino, G., De Luca, L. and Sirignano, W. A., eds), *Modern Research Topics in Aerospace Propulsion*, (1991), 37, Springer-Verlag.
- (11) 疋田・秋田, 燃焼概論, (1971), 196, コロナ社.
- (12) Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd ed., (1986), 396, Academic Press.
- (13) Potter, A. E., Jr., and Butler, James N., *A. R. S. J.*, 29 (1959), 54.