層流平板境界層拡散火炎の流体力学的構造*
(第2報, 実験的検討)植田 利久^{*1}, 大島 朗^{*2}
斎藤 直樹^{*3}, 溝本 雅彦^{*1}Aerodynamic Structure of a Laminar Boundary Layer Diffusion Flame
over a Horizontal Flat Plate
(2nd Report, Experimental Analysis)Toshihisa UEDA, Akira OOSHIMA,
Naoki SAITO and Masahiko MIZOMOTO

Experimental investigations on an aerodynamic structure of a laminar boundary layer diffusion flame over a horizontal flat plate have been performed. Effects of gravitational force and velocity gradient of free stream velocity have been discussed. When a fuel (methane) is injected upward, the velocity around a flame zone is locally accelerated, and the velocity gradient at the wall is increased as compared with that of isothermal flow. On the other hand, when a fuel is injected downward, the velocity is retarded, and the velocity gradient at the wall is decreased in not only a downstream region of the leading flame edge but also the upstream region. This reveals that the gravitational force varies the local pressure distribution not only in a downstream region of the leading flame edge but also in the upstream region. It is also elucidated that the velocity gradient of free stream velocity varies the velocity profiles in a boundary layer.

Key Words: Boundary Layer, Diffusion Combustion, Velocity Distribution, Diffusion Flame, Laminar Flow, Gravitational Force, Free Stream Acceleration

1. ま え が き

平板上に形成される境界層内に、平板を多孔質板とし、その多孔質板より燃料を一様に吹き出すことにより形成される拡散火炎、いわゆる平板境界層拡散火炎、に関する研究は、固体燃料(固体推進剤、石炭、あるいはオイルサンド、など)の表面燃焼や、液体燃料の表面燃焼などに関連して、多くの研究が行われてきた^{(1)~(11)}。水平空気流中に、壁面より燃料を上向きに吹き出した際に形成される拡散火炎については、今日までに、火炎付近の流速が主流流速をうわまわる速度のオーバシュートが観察される⁽¹⁾⁽²⁾など、火炎形成により、独特の流体力学的構造を示すことが明らかにされてきた。その原因としては、重力の影響⁽³⁾、気体の膨張⁽⁴⁾、主流加速の影響⁽⁵⁾⁽⁷⁾、境界層内の局所的な圧力変化⁽²⁾などが提唱されてきた。そこで、著者らは、それらの影響を独立に検討するために、数値解析的手法を用いて検討を行い、火炎形成による境界層内の局所圧力

変化、重力、主流加速が速度分布に与える影響を定性的に明らかにした⁽⁶⁾。その結果は、それまでに行われていた実験結果を定性的に説明することができたが、重力の影響や、主流加速の影響を総合的に判断するためには、対応する実験結果に不十分な点が見られた。たとえば、重力の影響に関してみると、Ramachandra-Raghunandan⁽⁷⁾が、燃料を下向きに吹出した場合の実験を行っているが、構造を検討するうえでもっとも重要な、火炎帯付近ならびに火炎帯と壁面との間の速度が測定されていないこと、また、主流加速と主流圧力こう配の関係に関する検討に不備があることなど、不十分な点が多い。そのため、流体力学的構造として重要な壁面速度こう配については、まったく検討されていない。

そこで、本報では、火炎基部近傍の流体力学的構造への重力および主流加速の影響について実験的検討を加える。特に、従来まったく報告のない、火炎基部近傍、壁面と火炎の間、および壁面速度こう配に与える重力と主流加速の影響に着目し、それぞれの影響を詳細に検討する。

2. 実験装置および方法

2・1 テスト部 本研究に用いた実験装置のテスト

* 昭和61年12月4日 第24回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成元年12月1日。

*¹ 正員、慶応義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

*² 松下住設機器(株) (〒639-11 大和郡山市筒井町800)。

*³ 学生員、慶応義塾大学大学院。

ト部を図1に示す。このテスト部の上流部には、整流部、ノズル、が接続されており、下流部に設置された吸込み形ブロワにより吸込まれてくる空気流は、低乱れな一様流となって、テスト部に供給される。テスト部入口断面の幅は50 mmであり、二次元火炎が形成されるに十分な幅を有し、高さは180 mmであり、火炎が形成された場合においても、主流部(速度が一樣な部分)が十分とれるような高さを有している。テスト部底面の一部には、焼結ステンレス製の多孔質板(表面50 mm×100 mm, 厚さ5 mm, ろ過精度70 μ m)が設置されており、燃料(メタン)が一様に吹き出されるようになっている。座標系は、多孔質板上流端中央を原点に、図1に示すように定義する。また、壁面上部は、主流方向の圧力こう配を任意に変化できるように、可変式壁面と、吸引装置とが取替え可能となっており、必要な速度こう配に応じて、随時最適なほうを用いた。また、このテスト部全体は、180°回転が可能であり、重力に対する燃料吹出しの方向を反転させることができる。

2・2 流速測定 流速測定には、5 mW ヘリウムネオンレーザを光源とするレーザドップラー流速計を用いた。得られた信号は、カウンタタイプの信号処理器により処理され、流速を得る。本実験では、流れの方向性を検知するための、ブラッグセルなどは使用しなかったが、流れが層流であることから、速度の絶対値

は1 cm/s程度までの低い速度の測定が可能であった。散乱粒子としては、酸化チタン粒子を用いた。また、境界層全域での流速測定が可能のように、散乱粒子は、空気流だけでなく、図1に示す散乱粒子添加パイプを通して燃料にも添加された。ただし、測定された速度が、空気流に起因する流れのものか、燃料に起因する流れのものを明確にするために、散乱粒子は、空気流または燃料に別個に添加され、同時に添加することはしなかった⁽⁹⁾。

3. 実験結果

3・1 実験条件の設定 本研究では、主流の条件として、基準主流速度 U_∞ と主流速度こう配 DU をとる。基準主流速度としては、境界層から十分離れた $(x, y) = (0, 60)$ における速度をとる。また、図2に、主流速度こう配の設定の一例として、燃料を上向きに吹き出した場合を示す。図2より明らかなように、本研究が対象とする火炎基部付近の主流領域 ($-10 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$) では、主流の x 方向速度分布をほぼ直線的に設定することができる。そこで、主流速度こう配は、図2の各測定値を直線近似した際のこう配とした。燃料の条件としては、燃料流量を多孔質板表面積で除した値を燃料吹出し速度 v として用いる。図3に、安定限界の一例として、可動壁面を多孔質壁面と平行に設置した場合の結果を示す。ただし、この場合、主流加速は、上向き吹出しの場合、 $DU = 0.65 \text{ (m/s)/m}$ 、また、下向き吹出しの場合、 $DU = 0.80 \text{ (m/s)/m}$ であった。安定限界は、 v を一定とし、 U_∞ を変化させ、火炎が不

図1 テスト部

図2 主流速度分布

安定となる条件として測定された。火炎が不安定となる条件は、ある範囲に分布するため、安定限界の測定は、同一の v に対して数度行い、その平均値を○印で示した。また、分布の範囲を斜線で示した。図3(a)は、燃料を上向きに吹き出した場合を示す。主流速度 U_∞ と燃料吹き出し速度 v を調節することにより、安定した二次元火炎を得ることができる。この状態から、 U_∞ を増加させるか、または、 v を減少させると、火炎基部が振動する不安定となる。その不安定の開始点を示したものが図3(a)である。この安定限界時の U_∞ の値は、 v の増加とともに増加しており、その結果は、Hiranoら⁽¹⁾や著者ら⁽¹⁰⁾の従来の研究と定性的に一致している。また、燃料を下向きに吹き出した際の安定限界を図3(b)に示す。安定状態の火炎から、 v を一定にして U_∞ を徐々に増加させると、火炎基部が振動を開始する不安定な火炎となる。本報では、この安定限界を主流高速側の安定限界と呼ぶ。逆に、 v を一定にして U_∞ を減少させると、火炎全体が前後に移動を繰返す不安定な火炎となる。この安定限界を主流低速側の安定限界と呼ぶ。主流高速側の安定限界は、燃料を上向きに吹き出した際の安定限界に対応するものであるが、主流低速側の安定限界に対応する不安定は、燃料を上向きに吹き出した場合には見られない。以上の結果より、火炎安定限界は、燃料を上向きに吹き出した場合と燃料を下向きに吹き出した場合とでは、まったく異なった様子となっていることがわかる。同様な結果は、Ramachandra-Raghu-nandan⁽⁷⁾によっても得られており、燃料の吹き出し方向の違いによる安定限界の違いは境界層燃焼に見られる一般的な特徴であると考えられる。また、燃料吹き出し速度を増加させると、火炎基部は安定化されるが、火炎全体は微動するようになるた

め、より安定な火炎を得るためには、安定限界内で燃料吹き出し速度は低いほど好ましい。

以上の結果より、燃料を上向きに吹き出した場合と下向きに吹き出した場合とでは、安定な火炎を得るための燃料吹き出し速度と主流速度を同一に合せることは極めて困難であることがわかる。そこで、本研究では、燃料を上向きに吹き出した場合と、下向きに吹き出した場合それぞれにおいて、燃料吹き出し速度が低い状態で、安定範囲内にある火炎に対して実験を行うこととした。設定条件は、燃料を上向きに吹き出した場合には、主流速度こう配 DU にかかわらず、 $U_\infty=0.5$ m/s、 $v=0.008$ m/s とし、また、下向きに吹き出した場合には、 $DU=0$ (m/s)/m の条件では、 $U_\infty=1.2$ m/s、 $v=0.008$ m/s とした。

3・2 速度分布に及ぼす重力の影響 速度分布に及ぼす重力の影響を検討するために、燃料を上向きに吹き出した場合と下向きに吹き出した場合の速度分布を測定する。この際、主流速度こう配の影響を除くために、主流速度こう配は、 $DU=0$ (m/s)/m とし、測定は、火炎基部の上流および下流部を含むように、 -10 mm $\leq x \leq 20$ mm とする。

3・2・1 燃料を上向きに吹き出した場合 図4に、燃料を上向きに吹き出した場合の速度分布を示す。縦軸 η は、式(1)に示すように、境界層厚さを基準にした無次元 y 方向距離を示し、また、横軸は、主流速度で無次元化した流速を示す。

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{(\nu \cdot x_0)}} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

(ν : 動粘性係数, x_0 : 境界層の仮想原点)

燃焼の影響を明確にするために、未燃状態で吹き出しを行った場合の速度分布の測定を行った。吹き出し気体としては、実験の安全性を考慮して空気を用い、燃焼実験時のメタンと同一の吹き出し速度で吹き出した。本研究では、吹き出し比(燃料吹き出しの質量流束/主流空気流の質量流束) β は、 $\beta=0.01$ 以下と小さく、吹き出しが境界層速度分布に与える影響は小さいと考えられる。また、等速度で吹き出した場合、メタン吹き出しの場合の吹き出し運動量は空気の場合よりも小さく、メタン吹き出しが境界層速度分布に与える影響は、本実験で測定された空気吹き出しの場合よりも、さらに小さいと考えられる。したがって、本研究においては、空気吹き出しの場合を未燃状態でのメタン吹き出しの場合とみなして検討することができると思われることから、空気吹き出しの場合を未燃時の吹き出しの場合として図4中に示した。また、等温流の層流境界層速度分布の理論解であるブラジウス解⁽¹¹⁾を実線で示した。

図3 安定限界

図4中、△および○印は、空気流中に添加された粒子による測定値であることを示す。すなわち、燃料を上向きに吹き出した場合、境界層全域の流速分布は、空気流中に添加された粒子により測定が可能であった。

図4(a)に、 $x = -10$ mmにおける速度分布を示す。空気吹出しの場合、速度分布は、ブラジウス解とよい一致を示している。また、火炎を伴う場合、速度分布は、ブラジウス解に定性的に一致しているが、全体にわずかに速くなっている。図4(b)に、 $x = 0$ mmにおける速度分布を示す。火炎基部は、 $(x, y) = (1 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$ 程度に位置していることから、この位置は、火炎基部直前となる。 $x = -10$ mmと同様、空気吹出しの場合、ブラジウス解とよい一致を示しており、また、火炎を伴う場合は、境界層全体の速度が、ブラジウス解よりわずかに速くなる分布となっている。図4(c)に、 $x = 10$ mmにおける速度分布を示す。この位置は火炎基部より下流に位置し、吹出しおよび火炎の影響を直接受ける。空気吹出しの場合、速度分布全体は、ブラジウス解によく一致しており、速度分布全体に及ぼす吹出しの影響は小さいことがわかる。火炎を伴う場合、火炎帯付近で局所的な加速が見られる。この局所加速は、Hiranoら⁽¹⁾⁽²⁾の研究にも見られる境界層燃焼の特徴的な速度分布であり、著者らの数値解析⁽⁸⁾による予測とも定性的に一致する。図4(d)に、 $x = 20$ mmにおける速度分布を示す。空気吹出しの場合、速度分布はブラジウス解に一致している。火炎を伴う場合、局所加速はさらに顕著となり、局所加速の最大値は主流速度の約1.2倍に達し、典型的な速度のオーバーシュ

ートの分布となっている。以上示したように、吹出しを伴う場合、速度分布は吹出しのない場合とほとんど変化しないが、火炎が形成されると、火炎帯付近で速度は局所的に加速する。

壁面速度こう配について見ると、火炎基部より上流側では、火炎を形成しない場合とほぼ同程度であるが、火炎基部より下流側では火炎のない場合よりも増加している。このことより、この流れ場は、火炎形成により、はく離が生じにくくなり、安定化されたと考えることができる。

3・2・2 燃料を下向きに吹き出した場合 図5に燃料を下向きに吹き出した場合の速度分布を示す。図5中、△および○印は、空気流中に添加された粒子による測定値を、▲および●印は、燃料に添加された粒子による測定値であることを示す。図5(a)に、 $x = -10$ mmの速度分布を示す。空気吹出しの場合、速度分布は、ブラジウス解にほぼ一致しているが、火炎を伴う場合は、ブラジウス解から大きくはずれた分布となっている。燃料を上向きに吹き出した場合とは反対に、流速は空気吹出しの場合に比べて全体的に減速しており、境界層厚さも増している。また、分布形状は、 $\eta = 4$ 付近に変曲点を持つ分布となっている。壁面より $\eta = 1.8$ 程度までの間は、粒子密度が低下し、実質的に流速が測定されなかった。これは、その領域では、流速がきわめて遅いため、単位時間あたりに、レーザドップラー流速計のレーザ交差部(測定体積)を通過する粒子数が減少し、実質的に測定が困難であったためである。すなわち、この領域の速度はきわめて遅くなっており、壁面速度こう配は、ブラジウス解に比べて、き

[$U_{\infty} = 0.5 \text{ m/s}$, $\nu = 0.008 \text{ m}^2/\text{s}$, $DU' = 0(\text{m/s})/\text{m}$. —: Blasius⁽¹¹⁾
 [○: with flame, △: without flame (air injection)]

図4 燃料を上向きに吹き出した際の速度分布

わめて小さくなっているものと考えられる。図5(b)に、 $x=0\text{ mm}$ の速度分布を示す。空気吹出しの場合の速度分布は、ブラジウス解にほぼ一致している。燃料を吹き出した場合には、火炎基部は $(x, y)=(-2.5\text{ mm}, 2.5\text{ mm})$ 程度に位置していることから、図5(b)には、火炎位置が示されている。また、この位置は、多孔質板に設けられた粒子添加パイプより上流であるため、燃料側から添加された粒子では速度を測定することはできなかった。そして、火炎帯と壁面との間の速度分布は得られていないが、この範囲では、流速の低下と、火炎による膨張により、粒子密度が低下し、実質的に流速測定ができなかったものと考えられる。測定された範囲内の速度分布は、空気吹出しの場合も、火炎を伴う場合も、速度分布は、上流側($x=-10\text{ mm}$)の速度分布とほぼ同様な形状を示しており、火炎帯付近において、燃料を上向きに吹き出した際に見られたような局所的な加速は見られない。図5(c)に、 $x=10\text{ mm}$ の速度分布を示す。空気吹出しの場合も、火炎を伴う場合も、速度分布は、上流側の速度分布とほぼ同様な形状を示している。図5(d)に、 $x=20\text{ mm}$ の速度分布を示す。空気吹出しの場合も、火炎を伴う場合も、速度分布は、上流の速度分布とほぼ同様な形状をしているが、火炎を伴う場合、火炎帯付近で、わずかに局所的な加速が見られる。

壁面速度こう配について見ると、火炎基部の上流側、下流側ともに、壁面速度こう配は、ブラジウス解に比べて減少しており、火炎形成は燃料を上向きに吹き出

した場合とは、逆の効果を示している。

以上の結果を、燃料を上向きに吹き出した場合の結果と比較すると、火炎帯付近の速度分布は、吹き出しの方向、すなわち、重力、の影響がきわめて強いことがわかる。また、燃料を上向きに吹き出した場合には、速度分布は、火炎帯付近において局所加速を生じるなど、顕著な変化を示したが、火炎基部より上流側では影響は顕著ではなかった。他方、燃料を下向きに吹き出した場合には、速度分布は火炎を伴わない場合に比べて、境界層全域で変化し、また、火炎基部より上流部の速度分布も顕著な変化を示している。すなわち、燃料を下向きに吹き出した場合のほうが、境界層内の局所的な圧力変化が、上流部にまで広く及んでいると考えることができる。

本実験結果と著者らが従来行った数値解析⁽⁸⁾の結果を比較すると、実験結果では、速度分布は、さきにも述べたように、Blasius分布に比べて大きく減速した分布となっているのに対し、計算結果では、速度分布は、Blasius解より加速した分布になっており、その分布形状は、実験結果と大きく異なっている。この原因は、数値解析の際、 $x=-14.5\text{ mm}$ において、速度の境界条件としてブラジウス解を仮定したため、その境界条件の拘束により、本実験結果で示したような顕著な影響が、火炎基部より上流側に及ぶことができず、本実験で得られたような速度分布が予測されなかったものと思われる。すなわち、境界層拡散火炎の流体力学的構造を予測するには、重力による境界層内の局

[$U_\infty=1.2\text{ m/s}$, $\nu=0.008\text{ m}^2/\text{s}$, $DU=0(\text{m/s})/\text{m}$. — : Blasius⁽¹¹⁾]

(○, ● : with flame, △, ▲ : without flame (air injection))

図5 燃料を下向きに吹き出した際の速度分布

図6 速度分布に及ぼす主流速度こう配の影響

所的な圧力変化を、火炎上流部も含め十分広い範囲で考慮する必要があると思われる。また、Lavid-Berlad⁽³⁾は、燃料を下向きに吹き出した場合について、境界層近似を仮定した支配方程式を用いて、減速する速度分布を予測している。この結果は、火炎基部より下流側では本実験結果と定性的に一致しているが、境界層近似を適用したことにより、火炎基部より上流側へは火炎の影響は伝わらず、図5(a), (b)に示したような火炎基部上流側への火炎の影響による速度分布の変化は予測することができない。すなわち、本実験結果が示した流体力学的構造を本質的に表したのではないと考えることができる。以上の検討より、火炎基部近傍の流体力学的構造を正しく予測するためには、上流側への影響を考慮することのできる円形支配方程式を用い、上流側に十分広い計算領域を確保することが重要であると考えられる。

壁面速度こう配についても重力の影響はきわめて顕著である。燃料を上向きに吹き出した場合、火炎形成により壁面速度こう配は、火炎基部より上流部では顕著な影響は見られないものの、火炎基部より下流では増加した。一方、燃料を下向きに吹き出した場合、火炎基部の上流側、下流側ともに、火炎を伴わない場合に比べて著しい減少が見られ、重力の方向により、逆の効果を示すことは明らかとなった。

3.3 速度分布に及ぼす主流加速の影響 図6に主流速度こう配の違いによる、速度分布の変化を示す。本研究の場合、重力の影響を零にすることはでき

ないため、燃料を上向きに吹き出した場合の結果を示す。主流速度こう配が正の場合、局所加速は顕著になり、また、負の場合には、やや顕著ではなくなる。この傾向は、定性的には著者らの数値解析⁽⁸⁾と同様の結果であり、主流圧力こう配が局所加速を増大させる因子であることが実験的に明確に示された。この結果は、Ramachandra-Raghunandan⁽⁵⁾⁽⁶⁾が狭い流路を用いた主流加速を伴う境界層燃焼の結果をうらづけるものである。

4. 結 論

層流平板境界層内に形成される拡散火炎を対象に、その流体力学的構造を実験的に検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 燃料を上向きに吹き出した場合、火炎帯付近に局所加速が見られたが、下向きに吹き出した場合には、見られなかった。また、燃料を下向きに吹き出した場合、速度分布は、火炎が存在する領域だけでなく、火炎基部より上流側でも大きく変化する。このことは、重力が境界層内の局所的な圧力分布を変化させ、火炎基部付近だけでなく、その上流部の速度分布をも変化させたものと考えられる。すなわち、重力は、境界層内の局所的な圧力変化を通して、火炎基部より上流部をも含む広い範囲にわたって流体力学的構造に影響を与えると考えられる。

(2) 壁面速度こう配についてみると、燃料を上向きに吹き出した場合、火炎を伴わない場合に比べて、火炎基部より上流側では顕著な影響は見られなかったが、火炎基部より下流側では、著しく増加した。一方、燃料を下向きに吹き出した場合、火炎基部の上流側、下流側ともに、火炎を伴わない場合に比べて、著しく減少した。すなわち、壁面速度こう配に対して、重力の方向は逆の効果を与える。

(3) 主流速度こう配は、主流速度こう配が正の場合には局所加速を強め、また、負の場合には弱めるなど、境界層内速度分布を変化させる。

本研究の一部は、昭和59年度文部省科学研究補助金奨励研究A(No. 59750047)の補助を受けて行った。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Hirano, T., Iwai, K. and Kanno, Y., *Astronaut. Acta*, 17-4, 5(1972), 811.
- (2) Hirano, T. and Kanno, Y., *Proceeding 14th Symposium (International) on Combust.*, (1973), 391. The Combustion Institute.
- (3) Lavid, M. and Berlad, A. L., *Proceeding 16th Symo-*

- sium (International) on Combust.*, (1977), 1557, The Combustion Institute.
- (4) 森・土方・宮内・池田, 機論, 48-430, B(1982), 1174.
- (5) Ramachandra, A. and Raghunandan, B. N., *Combust. Sci. Technol.*, 33-5/6(1983), 309.
- (6) Ramachandra, A. and Raghunandan, B. N., *Combust. Sci. Technol.*, 38-1/2(1984), 59.
- (7) Ramachandra, A. and Raghunandan, B. N., *Combust. Flame*, 58-2(1984), 191.
- (8) 植田・溝本, 機論, 52-483, B(1986), 3787.
- (9) Ueda, T., Mizomoto, M., Ikai, S. and Kobayashi, T., *Combust. Sci. Technol.*, 27-3/4(1982), 133.
- (10) 植田, 慶応義塾大学学位論文, (1982).
- (11) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th Ed., (1979), 137, McGraw-Hill.
-