横風を受ける水素噴流拡散火炎に関する研究*

(第1報, 安定限界と火炎形状)

後 藤 登^{*1}, 湯 浅 三 郎^{*1}

Hydrogen Jet Diffusion Flame in a Cross Flow

(1st Report, Stability Limits and Flame Shapes)

Noboru GOTOH and Saburo YUASA

The combustion characteristics of hydrogen jet diffusion flames on a flat plate in a cross flow were experimentally studied. It was found that stability limits and shapes of the flame were affected strongly by the air stream velocity U_e of the cross flow. In this experiment, when U_e was slower than 9.5 m/s, there existed critical injection velocities of hydrogen U_j at which a hole appeared on the front side of the flame at the transition point from laminar to turbulent. As the hydrogen injection velocity U_j was increased further, the hole became larger and finally the flame was lifted, not to blowout. When U_e was increased more than 9.5 m/s, flames with a hole were formed as soon as hydrogen was injected. When U_e was increased more than 16 m/s, the flame occurred to blowout. No flame stabilized at the air stream velocities over than 21 m/s. The effect of U_e and U_j on the flame shapes was also investigated. It was cleared that the momentum ratio of the air stream to the hydrogen jet was the most important parameter determining the flame shapes.

Key Words: Combustion, Hydrogen Diffusion Flame, Cross Flow, Stability Limits, Flame Shapes

1. 結 言

水素燃料は、その優れた特徴である大きな燃焼速度、幅広い可燃範囲、大きな発熱量のため、これまでの石油燃料用燃焼器に比べて高負荷で高い安定性をもつ燃焼器設計を可能にすると考えられている。例えば、ガスタービンエンジンに水素燃料が用いられる場合には、従来の石油燃料用燃焼器と比べて燃焼器を小形にでき、燃焼負荷率を大きくすることが可能になるであろう。また、従来の石油燃料用燃焼器においても、水素のパイロット火炎を備えて火炎の安定性を向上させれば高負荷燃焼が可能になると考えられる。これらの燃焼器において、水素はおそらく噴流火炎の形でもちいられ、水素火炎は何らかの形で横風の影響を受ける流れ場に形成されることが予想される。したがって、例にあげたような燃焼器を開発するためには、最も基本的な、直交した横風を受ける水素噴流火炎の安定性についての基礎的な知識が必要になるであろう。

これまでに横風を受ける火炎に関する研究は、主に Brzustowski ら^{(1)~(3)} と Kalghatgi⁽⁴⁾ により噴流拡散火炎に対して行われた。Brzustowski らの一連の研究

は、石油関連の施設において可燃性廃ガスを大気中に放出して形成される火炎を対象として、安全性の観点から主に火炎の形状、大きさ、火炎からの熱ふく射を調べたものである。しかし、火炎の安定性については調べられていない。Kalghatgi は炭化水素系燃料を用いて、横風が吹飛び限界に与える影響を調べた。そして吹飛び限界は燃料の種類が違っても、無次元化した横風流速と燃料噴射速度で整理すると1本の安定曲線上にのることを示した。しかし、水素に対する安定限界は調べられていない。

著者らは、上に述べたような燃焼器内の流れ場を最も単純化したものと考えられる、平板より垂直に噴出した水素燃料が横風を受けるような場を用いて、水素噴流火炎の安定性に関する研究を始めた。今回は、第1段階としてこの火炎の安定限界を調べ、火炎の形状の変化を観察した。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略を図1に示す。本装置は、送風機からの空気を十分に整流して噴出するための風洞（出口寸法：200×50 mm）と、燃料噴射管を取付けた平板とから主に成っている。この平板は先端をなめらかにした厚さ3 mm のアルミニウム合金板（130×200 mm）

* 原稿受付 平成3年10月3日。

^{*1} 正員、東京都立科学技術大学（〒191 日野市旭丘6-6）。

で、風洞出口部下端より上方 40 mm の位置に流れと平行に置き、その先端より 35 mm 下流で主流の中央位置に燃料噴射管を、噴射口と平板の上面とが同一面になるように取付けた。燃料噴射管は内径 1 mm、長さ 113 mm であり、噴射管出口の内側エッジにバリがないように十分注意して加工し、噴射管の軸が平板に対して正しく直角になるように設置した。

燃料噴射管を取付けた平板上の、噴射口位置における水素を噴出しないうきの速度分布の代表的な例を図 2 に示す。図 2(a) は平板の上方 2.5 mm における水平方向の速度分布で、十分に一様性が保たれていることがわかる。図 2(b) は平板からの高さ方向の速度分布である。この図 2(b) より境界層の厚さは 1 mm 以下であり、ブラジウス解⁽⁵⁾ とほぼ一致している。図 3 は、主流流速 U_e を変化させたときの噴射口の上方 3 mm と 57 mm の位置における乱れ強さを示している。乱れ強さは十分に小さく、かつ主流の大きさに依存せずほぼ一定である。これらより、平板近くの流れ場は燃料噴射管を取付けた影響をほとんど受けていないことが確認された。また本風洞によって、主流流速 U_e は約 20 m/s までの範囲では十分に様な速度分布が得られることを確認した。

本研究では燃料噴出速度 U_j は、燃料流量と噴射口面積より求めた平均速度を用いた。安定限界は目視観察により決定した。火炎長さなどの寸法は火炎側面からの直接写真により測定した。実験では、はじめに主

流流速を所定の値に設定して燃料に着火し、つぎに燃料噴出速度を増減させて火炎の様子を調べる方法をとった。

3. 実験結果と考察

3・1 安定限界 図 4 は、主流流速に対する直交水素噴流拡散火災の安定限界を示したものである。図 4 中の $\uparrow/\downarrow$ は U_j の増減する方向を意味する。この安定限界曲線で示される最も大きな特徴は、火炎の安定限界の様子が $U_e \approx 9.5$ m/s と 16 m/s 付近を境にして大きく異なっていることである。以下、 U_e が 9.5 m/s より小さい場合と 9.5 m/s と 16 m/s の間、16 m/s より大きい場合とに分けて火炎の安定限界を説明をする。

(1) $U_e < 9.5$ m/s の場合 $U_e < 9.5$ m/s の代表的な例として $U_e = 5$ m/s の場合を説明する。図 5 は、 $U_e = 5$ m/s の場合において、水素の噴出速度を増加していったときの代表的な火炎の形状を直接写真とシュリーレン写真とで示したものである。また、図 6 は特徴的な火炎の基部を斜め前方より撮影した写真である。

U_j が小さいところでは噴射口に付着した層流火炎が形成されるが、主流の影響を受けて下流に向かうにつれて噴流軸は主流方向にたおれてくる。 U_j を増加すると通常の噴流拡散火炎と同様に層流から乱流への遷移点が見れる〔図 5(a)〕。この遷移点は U_j の増加にし

図 1 風洞出口部

図 2 平板上の主流の速度分布

図 3 水素噴出位置における主流の乱れ強さ

図4 安定限界

たがい噴射口に近づいてくる。さらに U_j を増加すると、主流に面している側の遷移点付近の火炎面の一部に、あたかも孔が開いたようで火炎が形成されていない透明な部分ができる〔図6(a)〕。本論文では以後この現象を“孔開き”と呼ぶ。同様な現象が、同軸水素噴流拡散火炎の場合において竹野ら⁽⁶⁾により報告されている。竹野らは、噴流が層流から乱流に移るとその部分で火炎面を通しての熱や物質の輸送速度は著しく増加するが、一方化学反応速度は一定であるから発熱とのバランスがとれなくなり、火炎温度が低下してある限界をこえると燃焼反応が維持できなくなってその部分に孔が開く、と説明している。本実験でも $U_e = 0 \text{ m/s}$ の場合、すなわち横風を受けない水素噴流拡散火炎の場合に、同様な現象が起こることを確認している。横風を受ける場合の孔開き現象も基本的には同軸噴流の場合と同じであると考えられる。しかし同軸噴流の場合の孔開きは孔の位置が火炎面の円周上を回転して不安定であるのに対して、横風を受ける火炎では主流との前方よどみ点の位置より動かず非常に安定している〔図5(b)〕。このことは、前方よどみ点で輸送速度が極大となることを示唆している。孔開きが生じる前後のシュリーレン写真〔図5(a), (b)〕を比較すると、孔開きが発生すると噴射口より下流の火炎と平板の間に規則的なしま模様が生じ、温度の高い領域が形成されていることがわかる。これは遷移点付近の流れ場に変化が生じたことを意味するが、詳細については今後の課題である。

U_j の増加とともに孔の直径は大きくなり、火炎はリム全体に付着した小さな火炎とリムから離れて浮いているような大きな火炎とに分かれ、それらが棒状の

図5 火炎形状 ($U_e = 5 \text{ m/s}$)

火炎でつながっているような形になる。そして、ある限界 U_j をこえるとリム全体に付着した火炎が突然なくなり、浮いた火炎より突き出た棒状の火炎の先端だけがリムの下流端に付着する状態になる〔図5(c), 6(b)〕。本報ではこの現象が起きることを棒状化とし、この火炎を棒状火炎と呼ぶことにする。この棒状火炎は孔開きの位置とは反対側の主流との後方よどみ点の部分に形成される。さらに U_j を増加させると、リムに付着している棒状の火炎の下端はだんだん細長くなり、ついにはこの棒状の火炎もなくなる。このように本実験では火炎基部のすべてがリムより完全に離れた状態を浮上がりとした。浮上がり前後のシュリーレン写真〔図5(c), (d)〕を見比べてみると、火炎と平板の間に見られていた高温領域は火炎が浮き上がるとなくなっていることがわかる。 $U_e < 9.5 \text{ m/s}$ の場合には、 U_j を音速まで増加しても噴射口から火炎基部までの浮上がりの高さがわずかに高くなるだけで吹飛びは起こらなかった。これらの棒状火炎およびそれから伸びた火炎〔図6(b)〕と、浮上がり火炎との形状を直接写真とシュリーレン写真とによって詳細に観察した結果、孔が開いた火炎の基部前方の部分は、通常の浮上がり火炎基部の形状と非常によく似ていること、その部分の形状および平板からの高さは本論文で定義した浮上がりの前後においてほとんど変化しないことがわかった。また棒状火炎は、平板上の水素噴射口の下流側の一点において平板から約 0.5 mm 離れて平板上の境界層内に付着し、その点より未燃噴流の主流に対する後方よどみ領域にそって、平板上約 10 mm の位置に定在している火炎の主要部分まで伸びた形で形成されている。浮上がりが生ずると棒状火炎は完全に消

失した。これらの特徴から、棒状火炎が形成されている噴出速度のときの火炎においては〔図6(b)〕、基部前方は、通常の噴流拡散火炎の浮上がり火炎と同様の機構で空間に安定化されており、他方、棒状火炎そのものは、未燃噴流の後方よどみ領域に形成された予混合気が燃焼している火炎であり、噴射口の下流端に付着していると推測することができる。

一方、火炎が浮き上がっている状態から U_j を減少させていくと、まず浮上がり火炎基部から噴射口までの高さが低くなっていく。そして、ある U_j 以下になると浮き上がった火炎基部の後方よどみ点から噴射口に向かって棒状の火炎が突然形成される。この U_j の大きさは燃料を増加させるときに棒状火炎ができる U_j とはその大きさおよび U_e に対する傾向が異なることがわかった。さらに U_j を減少させると、 U_j を増加させた場合とは違って、孔開き火炎の段階を経ずに直接リム全体に付着した孔のない火炎ができる。本論文ではこの現象を再付着と呼ぶ。

図4の安定限界からわかるように、 $U_e < 9.5 \text{ m/s}$ では孔開き火炎が形成されることが最も大きな特徴の一つである。孔開き火炎が起こる U_j は主流の影響を強く受け、 U_e の増加とともに急激に減少し、 $U_e = 10 \text{ m/s}$ 付近では孔開き火炎は形成されない。孔開き火炎が完全な棒状火炎に発達する U_j も主流の影響を強く受け、 U_e の増加にしたがって急激に小さくなり同じく $U_e = 10 \text{ m/s}$ 付近で $U_j = 0 \text{ m/s}$ となる。すなわち $U_e > 10 \text{ m/s}$ ではリム全体に付着した火炎はできず、 U_j の小さいところで水素を噴出すれば始めから棒状火炎が形成されることになる。しかし、浮上がり火炎になる U_j は U_e の変化によらずほぼ一定で主流の影響はほとんど受けていない。

一方、 $U_e < 3 \text{ m/s}$ での様子は若干異なり、この範囲では孔開きは生じ U_j とともに若干直径は大きくなるが、棒状火炎には至らない。このことは、この流速範囲では横風の影響は少なく、基本的には同軸噴流拡散火炎と同様な挙動をすることとなる。ただし、孔開きの位置やその発生時の U_j などに対する横風の影響は残っている。また、浮上がり火炎より U_j を減少させると $1 < U_e < 3 \text{ m/s}$ ではすぐに孔開き火炎ができ、さらに U_j を小さくすると再付着に至る。 $U_e < 1 \text{ m/s}$ では棒状火炎も孔開き火炎もできずに再付着に至る。これは通常と同軸噴流拡散火炎と全く同じ挙動であり、横風はもはや火炎の振舞いに影響を与えなくなる。

(2) $9.5 \text{ m/s} < U_e < 16 \text{ m/s}$ の場合 $9.5 < U_e < 16 \text{ m/s}$ の代表的な例として、 $U_e = 15 \text{ m/s}$ の場合を説明する。図7は、 $U_e = 15 \text{ m/s}$ の場合において、水素の

図6 火炎基部の形状

噴出速度を増加していったときの代表的な火炎の形状を直接写真とシュリーレン写真とで示したものである。この主流流速領域の場合には、 U_j が小さいところにおいてもすでに火炎は図7(a)に示すように火炎の一部がリムの下流側に付着するような形になり、通常の噴流拡散火炎に見られるようなリム全体に付着した火炎はできない。図6(c)にその部分の拡大図を示す。このときの火炎基部の輪郭は比較的鮮明である。この火炎のシュリーレン写真によると、噴流の主流に面した側にはスケールの小さい乱れの未燃噴流が見られ、噴射口の下流端からは付着した火炎によるスケールの大きな乱れが発生している様子が認められる。 U_j を増加すると火炎基部がぼやけてきて、やがてリムに付着した部分が間欠的にリムから離れるようになる。さらに U_j を増加させると火炎基部は完全にリムから離れ浮上がり火炎が形成される。シュリーレン写真によると、火炎が浮き上がると平板に接していた高温領域は平板より離れ、火炎と平板との間に主流が流れ込んでいる様子が観察される〔図7(b)〕。さらに噴出速度を増加させて音速になっても火炎は吹き飛ばずに存在する。逆に、浮き上がった状態から U_j を小さくしていくと火炎基部の一部が間欠的にリム下流端に付着するようになり、さらに U_j を小さくすると火炎の一部分がリム下流端に付着した安定な火炎になる。これ以下の U_j では火炎の形は変化せず、特に $U_e > 13 \text{ m/s}$ の場合にはある限界の U_j で吹消えを起こすことがわかった。

図4の安定限界の一つの大きな特徴は、浮上がりの限界が $U_e \approx 9.5 \text{ m/s}$ を境にして大きく変化することである。しかし、 U_j を一定 (例えば 450 m/s) に保って U_e を増加させても、この限界付近で、火炎基部全体の高さや基部前方の火炎 (前述したように通常の噴流拡散浮上がり火炎と類似した部分) の形状はほとんど変化せず、ただ棒状火炎のみが存在できなくなるだ

けである。このことは、この浮上がり限界の不連続的な変化は、リム後方の火炎の付着機構が $U_e \approx 9.5 \text{ m/s}$ を境にして、不連続的に変化することを示唆している。さらに、この臨界の主流流速は、リムに一樣に付着する火炎が形成されなくなる、すなわち、水素を噴出すればただちに棒状火炎となる限界と一致するものと推測されるが、その原因は現在不明であり、今後の課題である。

(3) $U_e > 16 \text{ m/s}$ この範囲での火炎の様子は基本的には $9.5 < U_e < 16 \text{ m/s}$ の場合と同じであるが、 U_j が大きなところで吹飛びが起こり、 U_j が小さなところで吹消えが起こり火炎が存在できる U_j に範囲ができるようになる。この領域では、 U_j を増加させても間欠的な浮上がりはなく、とがっていた火炎基部先端が丸みをおびてくる。このような状態の火炎を浮上がり火炎とした。浮上がり火炎に対して U_j をわずかに大きくすると火炎は吹飛びを起こす。火炎が浮き上がる U_j と吹飛びが起こる U_j の間隔は U_e が増加するにしたがって小さくなり、 $U_e > 20 \text{ m/s}$ では浮上がりとはほぼ同時に吹飛びを起こすようになる。また、棒状火炎が形成されている状態より U_j を減少させてゆくとある限界で吹消えを起こす。吹消えを起こす U_j は U_e の増加とともに大きくなり、 U_e が 21 m/s 付近では吹飛びであるのか吹消えであるかの明確な区別ができず、同時に発生する状態となる。これ以上の U_e では直交噴流火炎は平板上には形成されないことがわかった。

3・2 火炎形状 図8に、噴射口中心から火炎先端までの水平方向の距離を火炎長さ L_x とし、平板から火炎上側の最も高い位置までの垂直方向の距離を火炎高さ L_y としたときの水素噴射速度に対する火炎長さと火炎高さの関係を示す。図8中の矢印は特徴的な形状の火炎 (孔開き火炎、棒状火炎、浮上がり火炎) が現れる点を示している。

(a) $U_j = 53 \text{ m/s}$ (b) $U_j = 228 \text{ m/s}$ 図7 火炎形状 ($U_e = 15 \text{ m/s}$)

図8 火炎の長さ高さ

U_j に対する L_x の変化の様子は火炎が吹飛びを開始する $U_e=16$ m/s 付近を境にして異なる。まず $U_e < 16$ m/s では、いずれの U_e に対しても L_x は U_j とともに増加し最大値をとったのちにほぼ一定となる。この傾向は通常と同軸噴流拡散火炎の場合と同じである。また、火炎が浮上がりを開始すると L_x はわずかに減少する傾向が見られる。つぎに $U_e > 16$ m/s では安定限界からわかるように火炎が存在できる限界の範囲が U_j にあり、その範囲内において L_x は U_j の増加とともに増加し、火炎が浮上がりを開始する付近で最大となる。いずれの場合も U_j が同じならば、 L_x は全般的に見ると U_e とともに増加することがわかる。

一方、 L_y は、いずれの領域の U_e の範囲でも U_j とともに単調に増加するだけであり、また、 U_j が同じならば U_e が大きいほど L_y は低くなることがわかる。すなわち火炎高さは、火炎に孔開きや棒状火炎などの特徴的な形状が現れることによる影響を受けていない。これは、逆に言えば火炎高さそのものは噴流と主流との運動量の関係によって支配されることを示している。

本論文では、噴流の中心軸を火炎中心とし、中心軸は、火炎側面からの直接写真により求めた。図9は、噴射口からの無次元水平距離を $X = x\rho_e^{1/2}U_e/d_j\rho_j^{1/2}U_j$ 、平板面より火炎中心軸までの無次元高さを $Y = y\rho_e^{1/2}U_e/d_j\rho_j^{1/2}U_j$ 、噴流のレイノルズ数を $Re_j = \rho_j U_j d_j / \mu_j$ としたときの噴流火炎の中心軸の座標を無次元表示したものである。ここで d_j は噴射口の直径、 ρ_e, ρ_j はそれぞれ空気、水素の密度、 μ_j は水素の粘性係数でありいずれも常温での値を用いた。図9中の直線 $Y = 2.05X^{0.28}$ は、Pratte - Baines⁽⁷⁾ が、 1.2×10^3 と 8.3×10^3 の間の Re_j をもつ空気噴流に対して求めた実験式を、Hoehne - Luce⁽⁸⁾ が主流と密度の異なる気

図9 火炎中心軸の軌道

体を噴出したときの場合に対して運動量を考慮して修正した式である。また $Y = 2.5X^{0.5}$ は、Brzustowski⁽¹⁾ が噴射口近傍の火炎の中心軸に対して提案した実験式である。

著者らの実験結果は図9中の実験式よりやや大きくなっているが、全体的には実験式と同じ傾向を示す。 Re_j が一定であっても火炎の中心軸は必ずしも一致しなくわずかに差が生じ、 U_e が小さいほど Y が大きくなっており、等温で行った実験の結果とずれる傾向がある。これは浮力の影響によると考えられる。火炎噴射口近傍の中心軸は、等温実験の結果よりも Brzustowski らの結果に似た傾向を示している。いずれにしても横風を受ける本実験の水素噴流拡散火炎の火炎中心軸は、主流と噴流の運動量を考慮した無次元数で基本的には表せることがわかった。

4. 結 論

平板上に形成された横風を受ける水素噴流拡散火炎(噴射口径 1 mm)の安定限界と火炎形状を調べた結果

つぎのことが明らかになった。

横風を受ける水素噴流拡散火炎は主流流速 U_e の影響を強く受け、 $U_e > 21 \text{ m/s}$ では火炎は存在できない。この限界流速以下において、火炎の安定、形状の振舞いが異なる三つの領域が存在することがわかった。 U_e の遅い領域では、噴流の層流から乱流への遷移点の主流に面する位置に孔が開いた火炎が形成される。 U_e がより速い領域では、孔開き火炎は存在せず、 U_j の遅い場合から噴射口の一端より鳥の口ばし状に飛び出した棒状火炎ができる。またこの U_e の領域に入ると、火炎が浮き上がる限界の U_j の値が不連続的に小さくなる。最も U_e の速い領域では、基本的には棒状火炎が存在するが、 U_e の遅い領域とは異なって U_j を速くしても遅くしても火炎の吹飛びあるいは吹消えが起こる。

火炎の噴流軸は、主流と噴流の運動量を考慮した無

次元量で整理すると、未燃噴流の場合とほぼ一致する。

文 献

- (1) Brzustowski, T. A., Gollahalli, S. R. and Sullivan, H. F., *Combust. Sci. Technol.*, **11** (1975), 29-33.
- (2) Brzustowski, T. A., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **2** (1976), 129-141.
- (3) Botros, P. E. and Brzustowski, T. A., *Proc. 17th Symp. (INT.) Combust.*, (1979), 389-398.
- (4) Kalghatgi, G. T., *Combust. Sci. Technol.*, **26** (1981), 241-244.
- (5) 谷, 流れ学, (1972), 115, 岩波書店.
- (6) Takeno, T. and Kotani, Y., *Acta Astronaut.*, **2** (1975), 999-1008.
- (7) Pratte, B. D. and Baines, W. D., *A. S. C. E.*, HY6 (1967), 53-64.
- (8) Hoehne, V. O. and Luce, R. G., *A. P. I. Preprint*, No. 56-70 (1970).