

平行空気流中の液面燃焼における障害物の効果*

大八木 重治*¹, 細田 亨*², 吉橋 照夫*³Effects of Obstacle on Film Combustion of Methanol
in a Parallel Air Stream

Shigeharu OHYAGI, Touru HOSODA and Teruo YOSHIHASHI

The term "film combustion" means the diffusive combustion of fuel gas evaporated from a condensed fuel surface with an oxidizer gas flowing along the surface. The present study aims to gain a fundamental understanding of the effects of separated flow created by an obstacle on stabilization and structure of the diffusion flame. As an obstacle, a rod with diameter d is placed upstream of the fuel surface with its axis perpendicular to the flow direction. The distance L from the fuel surface to the axis of the rod as well as the main stream velocity U_∞ is varied to change the effects of the separated flow on the fuel surface. It is found that under appropriate conditions, a flame moves forward from the fuel surface and is stabilized behind the rod. A map is obtained which describes the state of flame stabilization in the U_∞ - L plane. Distributions of temperature and main species concentration are measured to elucidate the heat and mass transfer processes in the flame.

Key Words: Combustion, Diffusion Flame, Methanol, Separated Flow

1. 緒 言

燃料液面上を酸化剤気体が平行に流れるとき境界層中に形成される拡散火炎の問題は Emmons⁽¹⁾ の先駆的研究以来燃焼学の基本問題として数多くの理論的実験的研究の対象になってきた。Hirano ら⁽²⁾ はアルコール液面上拡散火炎について、詳細に温度分布、速度分布を調べ、火炎の空気力学的熱力学的構造を明らかにした。著者らのグループ⁽³⁾ は、メタノール液面上層流境界層熱焼について火炎の熱的構造を調べるとともに液面からの燃料蒸発率を詳細に測定し、火炎領域の熱および物質伝達過程について考察し、Emmons⁽¹⁾ の境界層燃焼理論の適用範囲を示した。Emmons の理論は火炎の全体的な構造や移動過程を良く表せるが、フレームシートが凝縮相燃料の最上流端に付着すると仮定しているため火炎先端部の安定機構を議論することはできない。梅田ら⁽⁴⁾ はこの点に着目し気体燃料噴射による平板境界層燃焼について先端部の安定性について議論している。火炎安定化の問題は実際的にも重要

な課題であり、乱流場での問題も興味深い。Raghunandan ら⁽⁵⁾ は、気体燃料噴射による境界層燃焼について酸化剤流中におかれた障害物によって形成されるはく離流中での燃焼に着目し熱伝達過程について考察している。本研究では、はく離流の先端部の安定性と燃料液面上の熱および物質伝達過程に及ぼす影響を調べる目的で、壁面近傍速度分布を人為的に乱す障害物を火炎上流に設置し火炎の安定状況の観察と安定火炎の火炎構造を調べた。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を図1に示す。風洞は、出口が490 mmを一辺とする正方形、主流の乱れは1~2%で、1 m/sから10 m/sまでの風速を出すことができる。1 mの助走部をつけて、燃焼部が接続されている。燃焼部底面には、長さ100 mm、幅300 mm、深さ10 mmの燃料トレイ(ジュラルミン製)が取付けられており、オーバーフロー付き燃料供給系により液面を一定に保つよう燃料が供給される。燃料としては、メタノールを使用した。障害物としては、直径 $d=5$ mmの円柱(銅パイプ)を図2のように流れと直角方向に液面前方の底面上においた。実験条件としては、主流速度 U_∞ を1~5 m/s、障害物設置距離(液面先端から円柱軸まで

* 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3月25日。

¹ 正員、埼玉大学工学部 (☎338 浦和市中下大久保 255)。

² パイオニア(株) (☎350 川越市山田西町 25-1)。

³ 埼玉大学工学部。

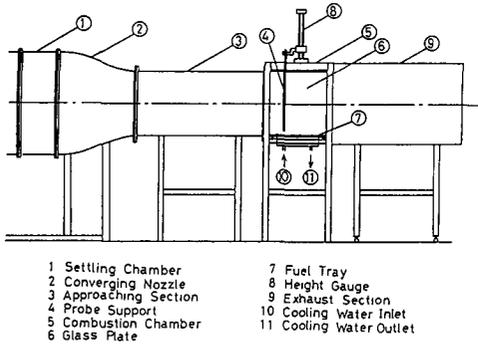


図 1 実験装置の概要

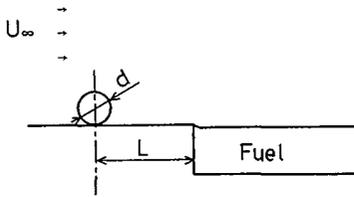


図 2 障害物の位置

の距離 L を 5~30 mm まで変化させ、火炎の状態を観察した。その後、いくつかの代表的条件の火炎構造、すなわち平均温度分布、および安定化学種 (CO_2 , CO , H_2O , O_2 , N_2 , CH_3OH) 濃度分布を測定した。温度の測定には、素線径 50 μm の Pt/Pt-Rh 13% の熱電対 (触媒性を防ぐための被覆および熱放射の補正は行っていない) を用い、安定化学種の濃度測定についてはガスクロマトグラフ (島津 GC-8 AIT) によった。

燃焼実験にはいる前に流れの状態を定温度形熱線流速計 (ハヤカワ, Model HC-30) によって測定した。燃料液面先端部の鉛直方向の速度分布を障害物なしの場合と $L=10$ mm に障害物をおいた場合について測定した。障害物なしの場合、主流速度 1 m/s から 3 m/s まではほぼ層流形速度分布、4, 5 m/s が乱流形速度分布 (3 m/s の場合の風洞吹出し口から液面先端までの距離を代表長とするレイノルズ数は 2.09×10^5) となっている。障害物のあるときは底面から障害物の高さ付近まで速度欠損が見られるが境界層厚みについては障害物なしの場合とあまり変わらなかった。図 3 に主流速度がほぼ 2 m/s の場合の速度分布を示す。

3. 結果および考察

3.1 火炎の安定状態 障害物を液面より L だけ前方に固定し、主流速度を 1 m/s 以下の状態から徐々に増加させたときの火炎の安定状態を、横軸に障害物

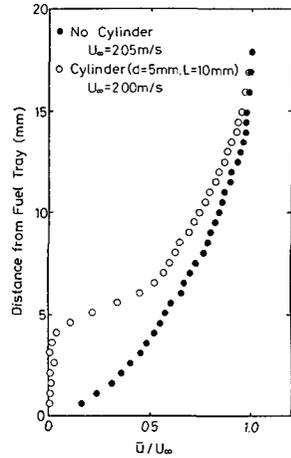


図 3 非燃焼時液面先端部における速度分布

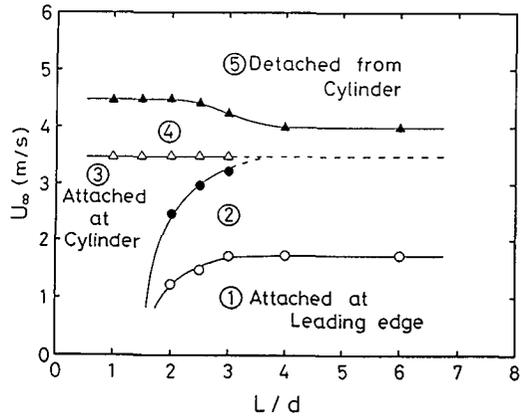


図 4 火炎の安定曲線 ($d=5$ mm)

直径で無次元化した障害物設置距離 L/d 、縦軸に主流速度 U_∞ をとって図 4 に示した。領域①は、火炎が液面先端 (やや上流側) に付着した状態であり、②は、火炎先端が液面先端より上流側に部分的に運動している状態、③は、火炎が障害物後端部に付着し安定している状態、④は、火炎が障害物から部分的に離れ振動している状態、⑤は、火炎が完全に障害物より離れ (10 mm 程度) 激しく振動している状態である。つまり、1 m/s のときは、 L が小さいと火炎は、液面上流に遡り障害物後端部に付着する。これは、障害物の後流の速度欠損領域で、平均速度がほとんど零のため、拡散や循環流領域の非定常な渦運動によって燃料分子が上流に運ばれ、火炎を形成しているものと考えられる。 L を大きくすると後流の影響が小さくなり火炎は障害物より離れ液面先端部で安定化する。主流速度を上げる

と、後流の影響する領域が広がるため③の領域が若干広がる。また、はく離流の影響が強まり液面先端部では安定し難くなり部分的に振動する。障害物に安定した状態からさらに速度を上げると、障害物の位置に無関係に約 3.5 m/s で火炎は障害物後端部より吹き飛び始める。これは、障害物後端部での平均速度のこの配が大きくなることによる吹き飛びである。 $L/d > 3$, すなわち障害物設置距離が 15 mm より大きくなると領域③は見られなくなり、火炎の障害物への付着は見られず、全体的にも障害物位置の影響が見られなくなる。図 4 中の破線は、領域②と④を分けているが、同じ振動的遷移領域でも②では、液面先端部を起点とした緩やかな振動であるのに対し、④では、周期の短い激しい振動である。

火炎が障害物に付着する現象は、予混合気体のプラフボディによる保炎現象と似ている。非予混合系では、通常、保炎位置は燃料と酸化剤の接触開始点後方付近になるが、障害物によって接触点を燃料供給部より前方に移動させ、火炎を安定化させることができることを示している。

また、火炎の安定には表面せん断応力によって生じる液体内の流動が影響することも考えられるが、図 3 からわかるように液体表面の速度は十分小さく、その影響は小さいものと考えられる。

3・2 温度分布 障害物を $L=12.5$ mm ($L/d=2.5$) においた場合の温度分布を、主流速度 1, 3, 5 m/s に対して、障害物のない場合と比較してみる。図 5 は障害物のない主流速度 1 m/s の場合、図 6 は障害物の

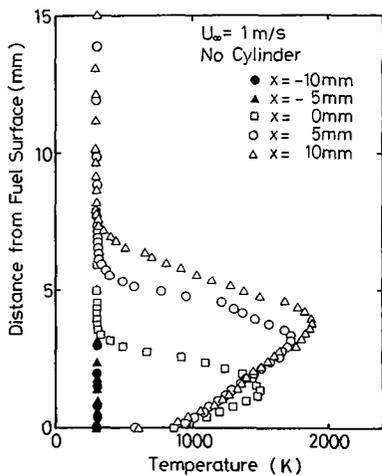


図 5 温度分布 ($U_\infty=1$ m/s, 障害物なし)

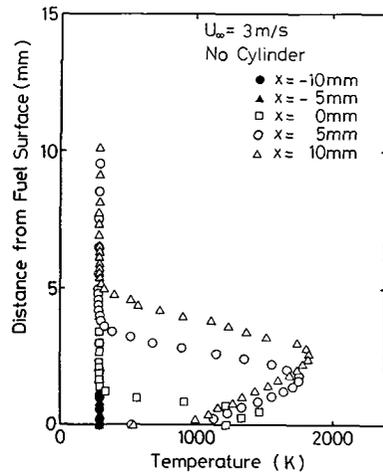


図 7 温度分布 ($U_\infty=3$ m/s, 障害物なし)

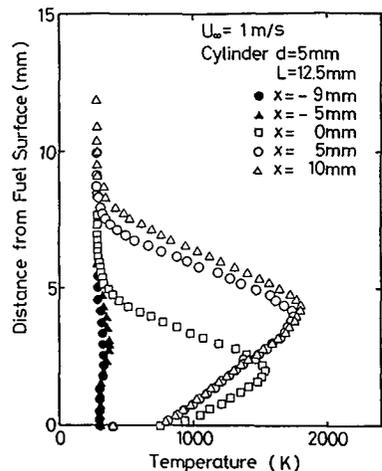


図 6 温度分布 ($U_\infty=1$ m/s, 障害物あり)

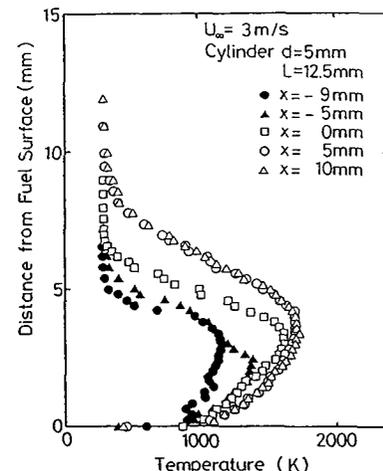


図 8 温度分布 ($U_\infty=3$ m/s, 障害物あり)

ある場合である。ここで図6中に示す x は、液面先端からの距離でマイナスは上流側である。縦軸は燃料液面(液面先端と上流側についてはトレイ表面)から鉛直方向の距離である。火炎はほぼ各 x で最高温度の位置に存在し、どちらの場合も液面先端前方にはほとんど火炎帯は存在せず、 $x=0$ mm から 5 mm の間で急激な火炎高さの増大が見られるが、5 mm から 10 mm ではその増加率が特に障害物がある場合減少する。障害物のあるほうが全体的に火炎高さが増し、温度が主流温度に戻る位置も高くなっている。このことは障害物によって生じた流れの影響で表面付近温度こう配が減少し、表面における伝導熱流束が減少していることを意味している。図7, 8 に主流速度 3 m/s の場合の障害物なしとありについて温度分布を示す。この場合、

障害物により火炎安定位置が変化したため温度分布も大きな違いを見せている。すなわち、障害物をおくことにより $x=-9$ mm の位置で火炎がトレイ表面からほぼ 3 mm の高さに存在し、 x の増加とともにいったん下がりさらに液面先端近くで上昇し、液面上方 ($x>0$) ではほぼ一定の高さである。この分布から、障害物後方のはく離流により液面から蒸発した燃料がエントレインされ予混合気体を形成し、障害物上部で火炎を安定させていることが推察される。火炎はトレイ上で流れに沿っていったん下降するが液面上では燃料が供給されるため上昇する。液面上では低速領域が長く続くため x 方向への変化がほとんどなくなる。障害物のない場合に比べて火炎高さ、温度変化領域の高さ、表面熱流束の大きさおよび x 方向への変化において大

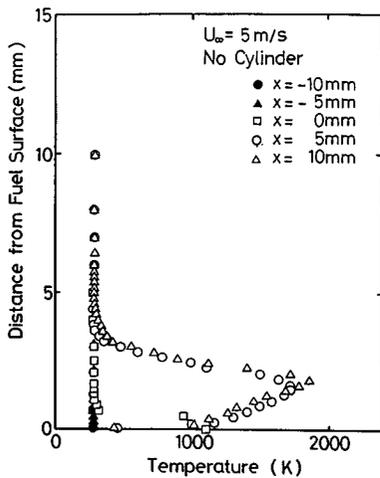


図9 温度分布 ($U_{\infty}=5$ m/s, 障害物なし)

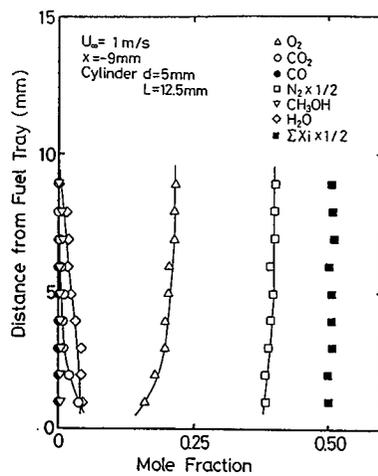


図11 濃度分布 ($U_{\infty}=1$ m/s, $x=-9$ mm, 障害物あり)

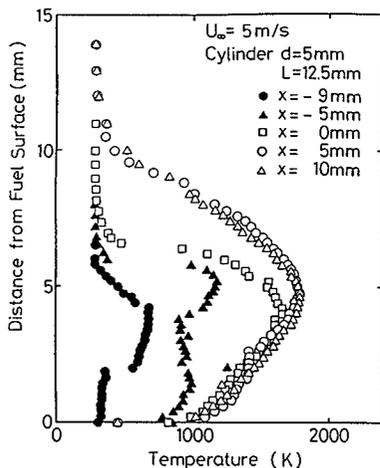


図10 温度分布 ($U_{\infty}=5$ m/s, 障害物あり)

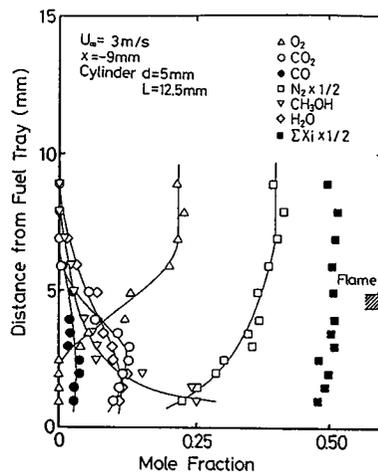


図12 濃度分布 ($U_{\infty}=3$ m/s, $x=-9$ mm, 障害物あり)

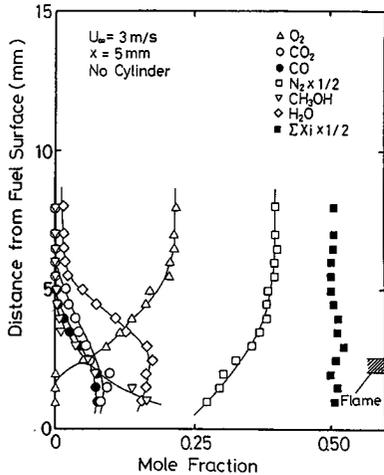


図 13 濃度分布 ($U_{\infty}=3 \text{ m/s}$, $x=5 \text{ mm}$, 障害物なし)

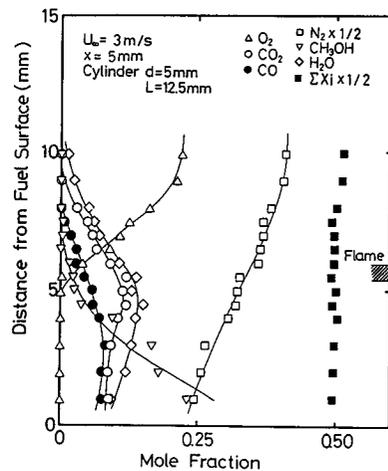


図 14 濃度分布 ($U_{\infty}=3 \text{ m/s}$, $x=5 \text{ mm}$, 障害物あり)

きな違いがみられる。主流速度 5 m/s の場合、図 9, 10 に示すように障害物がない場合境界層は 3 m/s の場合より薄くなり表面熱流束も大きくなるが、障害物をおいた場合逆に境界層が厚くなり、熱流束も小さくなる。火炎は障害物上部付近にあるが吹飛びにより不安定なため不自然な分布となっている。x=0 mm で火炎上部の温度こう配が大きいのはその付近の乱れが大きいからであろう。

3.3 濃度分布 図 11, 12 に主流速度 1 m/s および 3 m/s における障害物近傍 ($x=-9 \text{ mm}$) での安定化学種濃度分布を示す。1 m/s の場合は火炎が障害物に付着していないので各成分の濃度変化は少ないが、燃焼ガスの主成分である CO_2 と H_2O が表面付近に見られる。これは、温度分布でも見られたが液面先端付近の火炎中で発生した燃焼ガスが障害物の影響で上流に移動したものと考えられる。3 m/s では、液面から蒸発した燃料ガスが障害物により形成された循環流によって上流に運ばれて火炎を形成する。燃料は熱分解しながら火炎帯に拡散し、主流側から拡散してくる酸素と混合しながら反応する。同時に熱分解で生成した CO も酸化し CO_2 を生成する。図 13, 14 に 3 m/s, $x=5 \text{ mm}$ における障害物なしの場合とありの場合の分布を示す。表面におけるメタノール蒸気の濃度こう配は、表面における質量流束つまり局所質量燃焼速度に比例する。表面近傍の濃度こう配から推定すると、障害物による低速領域の存在により燃焼速度が減少することを示唆している。また、火炎帯付近での CO_2 と H_2O のモル比が大きく変化しているのは流れによる混合状態の違いに起因する。微量と考えられるため今回測定を行っていない水素、炭化水素、アルデヒド類

などの生成にも違いがあろう。

温度分布、濃度分布の測定から、火炎が障害物に付着し安定化するのには障害物によるはく離流により燃料蒸気が液面前方にエンタインされることの原因であること、また、障害物に安定した火炎では液面表面への熱流束および表面からの燃料の質量流束、したがって、燃料の蒸発速度も障害物がない場合より小さくなり、x 方向への変化もほとんどなくなることがわかる。このようなことを利用すれば液体燃料の燃焼速度を制御することが可能である。

4. 結 論

燃料液面に平行に空気が流れているときに形成される拡散火炎に対する障害物の影響を調べた結果以下のような知見が得られた。

(1) 主流速度および障害物と液面先端間の距離を変化させて火炎の安定状態を観察した結果、火炎が液面先端に付着する領域、障害物後端に付着する領域、障害物から離脱する領域が認められた。

(2) 障害物に付着する場合、液面から蒸発した燃料が障害物後方のはく離流にエンタインされ火炎が形成される。

(3) 障害物の存在によってできた液面付近の低速領域により、表面近傍における温度こう配、濃度こう配が減少しており、このことは、局所質量燃焼速度を減少させる効果を持つものと考えられる。

本研究の実施にあたり協力された当時本学学部生内本彰君(現日産)に深く感謝する。

文 献

- (1) Emmons, H. W., *Z. Angew. Math. Mech.*, **36**(1956), 60.
- (2) Hirano, T., ほか1名, *Proc 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1975), 379.
- (3) Ohyagi, S., ほか2名, *Proc ASME/JSME Thermal Eng. Conf.*, **4**(1983), 303.
- (4) 梅田・ほか2名, 第27回燃焼シンポジウム, (1989), 356.
- (5) Raghunandan, B. N., ほか2名, 第26回燃焼シンポジウム, (1988), 377.
-