軸対称衝突噴流場のよどみ流領域に形成される
Edge Flameの消炎特性*鳥飼 宏之^{*1}, 松尾 亜紀子^{*2}
植田 利久^{*2}, 溝本 雅彦^{*2}Blowoff Characteristics of Edge Flames in the Stagnant Region
of an Axisymmetric Impinging JetHiroyuki TORIKAI, Akiko MATSUO,
Toshihisa UEDA and Masahiko MIZOMOTO^{*3}^{*3} Keio University, Department Mechanical Engineering,
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Blowoff characteristics of methane-air and propane-air edge flames are experimentally investigated by using the newly proposed burner that utilizes the stagnation region of an axisymmetric impinging jet. In the burner, "edge flame without premixed flame" can be formed as a hole in the diffusion flame, and, by changing the hole diameter as a parameter, the diffusion flame can be gradually turned from a pure diffusion flame to the diffusion flame with a hole. In the present study, the observation of flame shapes and the blowoff processes, and the measurements of the blowoff and separation limits have been performed. As a results, it is found that the blowoff and separation limits of the diffusion flames with a hole show qualitatively same tendencies with a pure diffusion flame, that is, the flames with a hole have critical stagnation velocity gradients for blowoff and separation phenomena, beyond which the flame can never be stabilized or existed. Especially, the critical stagnation velocity gradient for blowoff of "edge flame without premixed flame" decreases as the hole diameter is increased, and always shows lower value than that of a pure diffusion flame. Finally, it is clarified that Peclet number which is a ratio of the characteristic diffusion time to the characteristic convection time, is an important parameter for edge flame's blowoff process, and the transition of the blowoff process from blowoff without separation to blowoff with separation occurs at a constant Peclet number.

Key Words: Combustion Phenomena, Diffusion Combustion, Partially Premixed Flame, Edge Flame, Stagnation Flow, Axisymmetric Impinging Jet

1. 緒 言

Edge flameは燃料と酸化剤が部分予混合化される領域に形成される火炎先端であり⁽¹⁾, 拡散火炎の基部, 可燃性固体表面上を伝ばする火炎の先端部分, また, 乱流拡散火炎などの局所消炎で生じる火炎の端として観察される。その火炎特性は, 拡散火炎の消炎機構^{(2)~(8)}, 可燃性固体表面上の火炎伝ば機構⁽⁹⁾, 乱流拡散火炎の部分予混合火炎のモデリング⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾などの問題を考えるうえで重要な役割を果たす。Edge flameの概観は, その前方に存在する部分予混合領域での流体の滞留時間 τ_{res} の大きさによって変化する。 τ_{res} が十分に大きい場合, 部分予混合が十分に行われ Edge flameは予混合火炎を伴う Edge flame (Edge flame with premixed flame)として形成される。予混合火

炎を伴う Edge flameは一般に Triple flameと呼ばれ, 浮上がり火炎の基部⁽⁵⁾などで観察される。他方, τ_{res} が極めて小さい場合, 部分予混合は十分に行われず, Edge flameは予混合火炎を伴わない Edge flame (Edge flame without premixed flame)として形成される⁽⁴⁾。予混合火炎を伴わない Edge flameは付着火炎の基部⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾, 可燃性固体表面上を伝ばする火炎の基部⁽⁸⁾などで観察される。このように, Edge flameは燃焼条件により火炎形状を大きく変化するため, その火炎特性も燃焼条件により変化することが十分に考えられる。しかし, それらはいまだに明らかにされていない。特に Edge flameの消炎特性はバーナの設計・操作に関連して非常に重要であり, 明らかにすべき点の一つである。また, Edge flameの消炎過程で観察されるはく離現象 (Separation phenomena)も検討する必要がある⁽¹²⁾⁽¹³⁾。はく離現象とは火炎のバーナからの消炎または浮上がりの条件付近で, Edge flameの一部が局所的に消炎または振動を伴った不安定燃焼を示す状態をいう。この現象は多くのバーナで

* 原稿受付 2000年12月19日。

^{*1} 慶應義塾大学大学院 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

E-mail: mizomoto@mech.keio.ac.jp

観察されているにもかかわらず検討されている例は非常に少ない。

これまでに著者らは軸対称衝突噴流場を利用した独自のバーナを用いて Edge flame について実験的に検討を行ってきた⁽¹⁴⁾。前報では、衝突噴流場の壁噴流領域を利用して予混合火炎を伴わない Edge flame から予混合火炎を伴う Edge flame への遷移過程を検討し、Edge flame の火炎特性の一端を明らかにしている。本報では、衝突噴流場のよどみ領域を利用したバーナを用い、予混合火炎を有さない Edge flame の消炎、はく離について検討する。このバーナは円形ノズル、衝突平板をもつ。そして、その平板に多孔質板を埋め込み、燃料を噴出することで拡散火炎を形成する。このとき多孔質板中央に金属円板を埋め込み燃料の噴出を一部止めることで、火炎に Edge flame を Hole として形成する。そして、その金属円板直径をノズル直径より小さく設定することで、Edge flame をよどみ流中に形成することができる。このバーナはバーナリムが存在しないことから、流れ場が噴流拡散火炎に比べて単純である⁽²⁾⁽³⁾。また火炎が軸対称に形成されるため、二次元火炎として形成される境界層拡散火炎のような End flame を有さない⁽⁸⁾。さらに、多孔質板に埋め込む円板直径をパラメータとして変化させることにより、Hole 直径を任意に変化させ純拡散火炎から Hole を有する拡散火炎へと火炎形状を変化させることができる。純拡散火炎は火炎構造が単純であり、また消炎条件から総括的な化学反応速度を見積もることができる^{(15)~(19)}。本研究のバーナは、その純拡散火炎と Edge flame をほぼ等しい流れ場に形成するため、両火炎の比較・検討が容易にできる。

本報では、上記のバーナで形成される Hole を有す

る拡散火炎の火炎形状および消炎過程の観察結果について述べる。そして、その消炎限界、はく離限界を純拡散火炎と比較・検討することで、予混合火炎を伴わない Edge flame の消炎特性を明らかにする。さらに、現象の特性時間の概念を用いて Edge flame の消炎、はく離現象について検討する。

2. 実験装置および方法

バーナの概略を図1に示す。ノズル直径は40 mm、ノズル-衝突平板間距離は30 mm とし、よどみ流が安定に形成されるようにした。衝突平板に埋め込む多孔質板は青銅製焼結金属、汙過精度20 μm 、厚さ10 mm とした。多孔質板と Hole 形成のために多孔質板に埋め込む金属円板の寸法を表1に示す。金属円板直径 d_i は徐々に変化させ、純拡散火炎から Hole を有する拡散火炎へ現象が連続的に変化するようにした。多孔質板外径 d_o は噴出部表面積が一定となるように d_i の値によって変化させた。燃料はメタンおよびプロパンを用いた。燃料流量はキャピラリ流量計によって測定された。燃料噴出速度 v_f [cm/s] は流量を噴出部表面積で除した値とした。本バーナの流れ場はよどみ流と同様によどみ速度こう配に依存すると考えられるため、実験結果をよどみ速度こう配で整理した。その値は衝突平板近傍で得られるよどみ流線上の速度分布から算出した。そして速度分布は燃料を噴出しない非燃焼場で定温度型熱線流速計(KANOMAX 1010)を用いて測定した。はく離限界および消炎限界は以下のように測定した。はじめに、 v_f を固定し比較的低い空気流速で安定な火炎を形成する。その後、空気流速を徐々に増加し目視によって火炎形状の変化を観察する。そして、Hole の一部にはく離が生じたときのよどみ速度こう配 a_s [s^{-1}] をはく離限界 (Separation limit) とし、火炎全体が消滅したときのよどみ速度こう配 a_q [s^{-1}] を消炎限界 (Blowoff limit) として測定した。それらの測定は一つのパラメータに対し5~30回程度繰返して行なわれた。

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Specifications of center disk and porous plate and classification of type of blowoff process

Diameter of center disk d_i [mm]	0.0	1.0	3.0	5.0	10.0
Outer diameter of porous plate d_o [mm]	40.0	40.0	40.1	40.3	41.2
Type of blow-off process Fuel: CH ₄	A	A	A	B	B
Type of blow-off process Fuel: C ₃ H ₈	A	A	B	B	B

A: Blowoff without separation, B: Blowoff with separation.

3. 結果および考察

3・1 火炎形状 本研究で形成されるメタン-空気拡散火炎の直接写真を図2(a)～(e)に示す。すべての火炎が軸対称火炎として形成される。図2(b)の $d_i=1$ mmの火炎では、その形状が純拡散火炎[図2(a)]とほとんど変わらず Hole を視認できない。ただし、消炎条件付近では火炎中心にぼやけた暗点が形成された。図2(c)の $d_i=3$ mmの火炎も、金属円板上を火炎が覆い明確な Hole は形成されない。これは d_i が比較的小さいために、燃料が金属円板上を拡散し火炎が覆ったものと考えられる。ただし、金属円板を覆った火炎の発光輝度は周囲の発光輝度に比べわずかに

(a) Pure diffusion flame ($d_i=0$ mm)

(b) Diffusion flame with $d_i=1$ mm

(c) Diffusion flame with $d_i=3$ mm

(d) Diffusion flame with $d_i=5$ mm

(e) Diffusion flame with $d_i=10$ mm

Fuel: Methane, $\nu_f=2$ cm/s, $a=46$ s⁻¹

40mm

Fig. 2 Perspective views of diffusion flames with and without a hole

に低下している。また、 $d_i=3$ mmの火炎は消炎付近において Hole が形成された。図2(d)の $d_i=5$ mmの火炎では Hole が明確に形成される。この火炎では ν_f が大きくよどみ速度こう配が比較的小さいときのみ、火炎が金属円板上を覆った。図2(e)の $d_i=10$ mmの火炎も Hole が明確に形成され、その Hole 直径が $d_i=5$ mmの火炎より大きいことがわかる。 $d_i=10$ mmの火炎ではつねに Hole が形成された。最後に、すべての火炎のはく離、消炎条件近くで形成される Hole 直径は d_i の大きさにほぼ等しくなった。

次に図3(a), (b)に側方から火炎を観察した場合の直接写真を示す。図3(a)の純拡散火炎では全体にわたって平たんな火炎形状を示す。他方、図3(b)の $d_i=10$ mmの火炎では下流の火炎形状が純拡散火炎と変わらない(写真両端)。それに対し、火炎先端は下方へ湾曲したフック形状を示す[図3(b)の写真中央]。このフック形状の湾曲は d_i の増加とともに大きくなる。また図3(b)から、本バーナで形成された Edge flame は予混合火炎を伴わない Edge flame であることがわかる。これまでの d_i と形成される火炎形状の関係は、燃料をプロパンとしてもほぼ同様であった。

このように、軸対称衝突噴流場のよどみ領域を利用した本バーナでは、燃料噴出部の一部に金属円板を埋め込むことで予混合火炎を伴わない Edge flame を Hole として安定に形成することができる。また、埋め込む金属円板直径 d_i をパラメータとして変化させることにより、純拡散火炎から Hole を有する拡散火炎へと火炎形状を変えることができる。

3・2 消炎過程

次に消炎過程について述べる。 ν_f が十分大きい場合、二つの消炎過程を示す。一つは、安定時の火炎形状を保ったまま瞬間的に消炎する。これを Type A とする。Type A は対向流拡散火炎の消炎過程と同様である。他方は、あるよどみ速度

(a) Pure diffusion flame ($d_i=0$ mm)

(b) Diffusion flame with a hole ($d_i=10$ mm)

Fuel: Methane, $\nu_f=4$ cm/s, $a=46$ s⁻¹

Fig. 3 Direct photographs of diffusion flames with and without a hole from an end view

こう配で Hole にはく離が生じた後、よどみ速度こう配の増加とともに残りの火炎が瞬間的に消炎する。これを Type B とする。Type B の典型的な消炎過程を図 4(a)～(d) に示す。図 4(a) は安定火炎である。その状態からよどみ速度こう配を増加すると、Hole の一部にはく離が生じ、そして、その部分の火炎面が下流方向へ押し流される結果、図 4(b) に示すような火炎形状となる。さらによどみ速度こう配を増加すると、はく離は周方向へ広がり、その領域を増大する[図 4(c)]。ただし、図 4(b)、(c) の火炎はよどみ速度こう配が変化しなければ、はく離領域の大きさを変化させないまま燃焼を維持する。よどみ速度こう配をさらに増加すると、はく離領域は図 4(d) に示す程度まで広がり火炎は瞬間的に消炎する。ここで ν_f が十分大きい場合に各 d_i で観察されたメタン、プロパン火炎の消炎過程を表 1 に示す。表 1 から、 d_i が小さい場合

(a) Stable flame at $a = 107 \text{ s}^{-1}$

(b) Separated flame at $a = 116 \text{ s}^{-1}$

(c) Separated flame at $a = 128 \text{ s}^{-1}$

(d) Separated flame near blowoff condition ($a = 136 \text{ s}^{-1}$)
Fuel: Methane, $\nu_f = 7 \text{ cm/s}$, $d_i = 10 \text{ mm}$

Fig. 4 Blowoff process of the diffusion flame with a hole (Type B)

火炎は Type A を示し、 d_i が増加すると Type B を示すことがわかる。そして、Type B を示す最小円板直径 $(d_i)_c$ は、プロパンに比べメタンのほうが大きい値を示すことがわかる。最後に、Hole を有した拡散火炎では ν_f が小さい場合、はく離を生じた火炎が多孔質板上を周方向へ伝ばし、リング状の多孔質板上を回転しながら消炎するという消炎過程も観察された。しかし、本報ではその詳細は取扱わない。

3・3 純拡散火炎の消炎限界 図 5 にメタン、プロパン純拡散火炎の消炎限界 a_q を示す。 ν_f が小さい場合、 ν_f のわずかな増加に伴い a_q が急激に増加することがわかる。そして、 ν_f が十分に大きくなると、 a_q はほぼ一定値に収束する。これは、 ν_f が十分に大きい場合、 ν_f をいかに大きくしてみても火炎を安定に形成することのできない臨界よどみ速度こう配 $(a_q)_c$ が存在することを意味している。これらの結果は、定性的また定量的にも多孔質円筒の前方よどみ領域を用いた対向流拡散火炎の研究^{(15)～(19)}と等しい。したがって、 ν_f が小さい場合の消炎は、火炎と固体壁面との相互干渉に起因して生じる熱的消炎 (Thermal quenching) である。この消炎は火炎が多孔質板近傍に形成され、火炎と固体壁面の相互干渉が生じるために起こる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。他方、 ν_f が十分大きい場合の消炎は、火炎の総括的な化学反応速度の有限性に起因して生じる吹消え (Extinction) である。この消炎は火炎が固体壁面から離れて形成されるため、火炎と固体壁面との干渉がない状態で生じる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

ここで、拡散火炎の消炎を支配するパラメータであるダムケラ数 Da を以下のように定義する。

$$Da = \tau_a / \tau_r$$

τ_a は空気力学的特性時間、 τ_r は化学反応特性時間である。また、 τ_a はよどみ速度こう配の逆数とする。従来、反応速度の有限性に起因する純拡散火炎の消炎は、酸化剤と燃料の組合せに対しある一定の Da で生じる

Fig. 5 Blowoff limits of pure diffusion flames ($d_i = 0 \text{ mm}$)

ことが知られている。そのため、吹消え時の τ_a を測定することで、 $(\tau_r)^{-1}$ つまり総括的な反応速度を評価することができる。そして、 $(\tau_r)^{-1}$ に比例する $(a_q)_c$ の値は、燃料と酸化剤の組合せに対する総括的な反応速度の大きさを示すものと考えることができる。このことは、図5において、 $(a_q)_c$ の値がメタンに比べ反応性の高いプロパンのほうがより大きな値を示すことからわかる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾。

このように、本バーナで形成される純拡散火炎は

Fig. 6 Blowoff and separation limits of diffusion flames with a hole

v_f の変化に伴い熱的消炎または吹消えという二つの消炎を明確に区別することができ、また酸化剤と燃料の組合せに対する総括的な化学反応速度の大きさを評価することができる。

3.4 Hole を有する拡散火炎の消炎限界およびはく離限界 Hole を有する拡散火炎の消炎限界 a_q およびはく離限界 a_s を示す。図6(a-1)～(a-4)にメタン火炎、図6(b-1)～(b-4)にプロパン火炎の各限界を示す。図6から、各火炎のすべての a_q そして $d_i = 3$ mm のメタン火炎の a_s [図6(a-2)]を除くすべての a_s が、純拡散火炎と定性的に等しい振る舞いを示すことがわかる。その結果、 v_f が十分に大きい場合、Hole を有する拡散火炎においても v_f をいかに大きくしても安定な火炎を形成・維持できない消炎およびはく離に対する臨界よどみ速度こう配 $(a_q)_c$ 、 $(a_s)_c$ が存在することがわかる。ただし、 $d_i = 3$ mm のメタン火炎の a_s については、 v_f の増大とともにやがて a_q と一致する。これは $d_i = 3$ mm のメタン火炎の消炎過程が3.2節で述べた Type B から Type A へ変化することを示している。この変化は目視観察からも確認できる。

このように Hole を有する拡散火炎の消炎・はく離が純拡散火炎と定性的に等しい傾向を示すことから、 v_f が小さい場合の消炎・はく離は、火炎と固体壁面との相互干渉に起因して生じていると考えられる。そして、 v_f が十分に大きい場合の消炎・はく離は、予混合火炎を伴わない Edge flame の火炎帯における総括的な化学反応速度の大きさに限界値が存在することによって起因して生じる消炎および局所的な消炎と考えられる。

このように、本バーナで形成された予混合火炎を伴わない Edge flame は、消炎・はく離現象に対して部分予混合の影響をほとんど受けず、純拡散火炎と同様

Fig. 7 Relation of critical stagnation velocity gradients with disk diameters

な伝ば性の影響を考慮する必要のない消炎特性を示すと考えることができる。

3・5 金属円板直径と消炎の関係 本節では d_i と $(a_q)_c$ との関係を考察する。 $u_f=20$ cm/s のときの消炎限界の値を $(a_q)_c$ とする。その結果を図7に示す。また同時に $(a_s)_c$ も示す。

図7から燃料種に関係なく純拡散火炎の $(a_q)_c$ が最も高い値を示し、 d_i の増加つまり Hole 直径の増加に伴い減少してゆくことがわかる。3・4節で示したように Hole を有する拡散火炎も純拡散火炎と同様の消炎特性を示すことから、ある一定の Da で消炎が生じていると思われる。そのため、純拡散火炎の Da の議論と同様な考えに基づき Hole を有する拡散火炎の $(a_q)_c$ は予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な化学反応速度の大きさに依存していると考えられる。図7でつねにメタン火炎より反応性の高いプロパン火炎のほうがより大きな $(a_q)_c$ を示していることから、 $(a_q)_c$ の値が予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な化学反応速度の大きさに依存して決まっていると考えられる。したがって図7の結果は、Hole 直径が増加すると予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な反応速度は減少することを示していると考えられる。

次に、予混合火炎を伴わない Edge flame の $(a_q)_c$ が純拡散火炎に比べ小さい値を示すことについて考える。これは、図8の概念図に示した各火炎の火炎構造の違いを検討することにより理解できる。図8に示す予混合火炎を伴わない Edge flame は、純拡散火炎と異なる火炎構造を有し火炎面方向に熱輸送が存在する。この火炎先端における火炎面方向の熱輸送は純拡散火炎と比較した場合、予混合火炎を伴わない Edge flame に対して付加的な熱損失と考えられる。この付加的な熱損失の存在により予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な反応速度が純拡散火炎に比べて低下し、Hole を有する拡散火炎の $(a_q)_c$ は純拡散火炎の $(a_q)_c$ に比べ低い値を示すと考えられる。この

Fig.8 Illustrations of flame structures for a pure diffusion flame and a diffusion flame with a hole

ように、本研究の対象とする予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な化学反応速度は、燃料と酸化剤の組合せのほか付加的な熱損失によって決定される値であることがわかる。また先の Hole 直径の増加に伴う $(a_q)_c$ の減少は Edge flame の火炎構造に関連していると考えられる。そのため今後の研究において火炎構造と Edge flame の消炎特性との関係について詳細に検討することで、その原因を明らかにしたい。

最後に、プロパン火炎の $d_i=3, 5, 10$ mm そしてメタン火炎の $d_i=5, 10$ mm でははく離が生じる。図4に示すようにはく離が生じると End flame が形成され、周方向への熱損失が予混合火炎を伴わない Edge flame に対しさらに付加されることが予想される。しかしながら、図7に示すように $(a_q)_c$ の変化ははく離の有無に関係なく、連続的かつ単調に減少している。したがって、消炎に対する上述のようなはく離の影響は小さいものと考えられる。

3・6 Hole を有する拡散火炎の消炎現象とはく離現象の関係 本研究の火炎ははく離を伴わない消炎 (Type A) とはく離を伴う消炎 (Type B) の二通りの消炎過程を示す。それら消炎過程を分けるはく離現象の生成原因をペクレ数 $Pe^{(20)}$ を用いて燃焼場の安定性を検討することから明らかにする。また消炎過程が変化するときの Pe の決定のされ方についても考察する。

はじめに、 Pe は次のように定義する。

$$Pe = \tau_d / \tau_c$$

ここで τ_d は分子拡散の特性時間、 τ_c は対流の特性時間である。二つの特性時間のうち現象に対し効果的な特性時間のメカニズムが現象を支配する。上記の Pe はシュミット数 Sc とレイノルズ数 Re の積としても考えることができる。したがって、分子拡散が効果的で Pe が小さい系では Re も小さくなるので、流れのじょう乱は粘性により減衰される。その結果、現

Fig.9 Relation of Peclet number with the blowoff process of the diffusion flame with a hole

象は安定に保たれる。他方、対流が効果的で Pe が大きい系では Re も大きくなるため、流れのじょう乱は減衰せず現象は不安定となりやすくなる。

次に、各特性時間を以下のように定義する。

$$\tau_d = \delta^2/D, \quad \tau_c = 1/a$$

ここで δ は分子拡散の代表寸法、 D は燃料-空気の相互拡散係数である。 δ は Hole 直径とし d_i を用い、 τ_c はよどみ速度こう配の逆数とし消炎現象では $(a_q)_c$ 、はく離現象では $(a_s)_c$ を用いる。結果を縦軸 Pe 、横軸 d_i として図 9 に示す。横軸は、Type B の消炎過程を示す最小の円板直径 $(d_i)_c$ で無次元化している。

図 9 から Pe により燃料種に関係なく消炎、はく離の各現象を、それぞれ統一的に整理できることがわかる。これは消炎およびはく離現象が τ_d, τ_c の大きさに依存し生じていることを表している。さらに、図 9 に示したある一定の $(Pe)_c$ (一点鎖線) で Type A から Type B への変化が生じていることがわかる。そこで、 $Pe < (Pe)_c$ 、 $(Pe)_c < Pe$ の場合に分けおの物理的な状況を考察する。

(1) $Pe < (Pe)_c$ の場合、火炎に形成された Hole の現象に対し τ_c に比べ τ_d が効果的であり、分子拡散の効果が支配的な系 (Diffusion dominated system) になっていると考えられる。つまり、じょう乱が生じても減衰するため流れは安定であり、Edge flame の熱物質拡散は強い影響を受けない。そのため Edge flame の燃焼強度は空間的に均一な状態を保ち、はく離が生じず消炎すると考えられる。ここで、燃焼強度は Edge flame の最高火炎温度、総括的な化学反応速度等の大きさに対応した燃焼状態を表現している。

(2) $(Pe)_c < Pe$ の場合、Hole での現象に対し τ_d に比べ τ_c が効果的であり、対流の効果が支配的な系 (Convection dominated system) になっていると考えられる。そのためじょう乱は減衰せず Edge flame に影響を及ぼし、燃焼強度が空間的に不均一になると考えられる。その結果、火炎の全体消炎が生じる前に燃焼強度の比較的弱い Edge flame の部分からはく離つまり局所的な消炎が生じると考えられる。

以上の議論から、はく離現象は Edge flame の燃焼強度に、じょう乱に対する燃焼場の安定性が影響した結果、生じていると考えられる。

次に、 $(Pe)_c$ の決定のされ方について検討する。ここで、その生成原因からはく離限界を安定限界 (Stability limits) と定義する。他方、消炎限界は 3・5 節で述べたように反応速度限界 (Reaction rate limits) であり純拡散火炎の吹消え限界 (Extinction limits) といえる。それらを図 9 に実線と破線で示す。図 9 から

$Pe < (Pe)_c$ では、

Reaction rate limits < Stability limits

そして、 $(Pe)_c < Pe$ では、

Reaction rate limits > Stability limits

となっていると考えられる。つまり $Pe < (Pe)_c$ のある $d_i/(d_i)_c$ の Edge flame が消炎する場合、火炎は Stability limits の前に Reaction rate limits に達する。その結果、消炎過程は Type A となる。他方、 $(Pe)_c < Pe$ のある $d_i/(d_i)_c$ の Edge flame は、Stability limits に達した後に Reaction rate limits に達し消炎する。そのため、消炎過程は Type B となる。このように、消炎過程の変化は Reaction rate limits と Stability limits の大小関係の変化として説明される。この考えに基づけば、 $(Pe)_c$ は Reaction rate limits と Stability limits が一致するときであることがわかる。したがって、 $(Pe)_c$ の値は、Hole 直径を代表寸法とした τ_d と予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な反応速度に依存した τ_c との比によって決定されることになる。このことは反応性が高く拡散係数が小さいプロパン火炎の $(d_i)_c$ が、メタン火炎に比べより小さい値を示すことからわかる。最後に、 $(Pe)_c$ の値は本研究の結果では $117 < (Pe)_c < 202$ の範囲に存在すると予想される。

4. 結 言

軸対称衝突噴流場のよどみ領域を利用した新しいバーナを用いて Edge flame の消炎特性を検討した。このバーナは予混合火炎を伴わない Edge flame を Hole として形成し、その Hole 直径をパラメータとして変化させることができる。酸化剤として空気、燃料としてメタン、プロパンを使用し Hole を有する拡散火炎の火炎形状、消炎過程の観察、そして、消炎、はく離限界の測定を行った。そして、それらの結果から以下の結論を得た。

(1) Hole を有する拡散火炎は、Hole の大きさに関係なく純拡散火炎と同様の消炎特性を示し、消炎、はく離に対し臨界よどみ速度こう配を有することがわかった。特に、消炎で得られた臨界よどみ速度こう配の値は、Hole 直径の増加に伴い減少することがわかった。

(2) Hole を有する拡散火炎が示す消炎とはく離の二つの限界は、Hole 直径を代表寸法とした分子拡散の特性時間と消炎、はく離に対する臨界よどみ速度こう配の逆数を対流の特性時間としたペクレ数 Pe により、各限界ごとに統一的に整理できることがわかった。

(3) Hole を有する拡散火炎ははく離を伴わない消炎過程, はく離を伴う消炎過程の二つの消炎過程を示し, その消炎過程の変化が一定の $(Pe)_c$ で生じることがわかった。その $(Pe)_c$ の値は分子拡散の特性時間と予混合火炎を伴わない Edge flame の総括的な反応速度の大きさに依存した対流の特性時間との比によって決まると考えられる。

本研究の一部は, 文部省科学研究費基盤(C)(No. 10650224), そして, 谷川熱技術振興基金からの補助を受けて行われた。ここに記し謝意を表す。

文 献

- (1) Buckmaster, J. and Weber, R., *Proc. Combust. Inst.*, **26** (1996), 1143-1149.
- (2) Pitts, W. M., *Proc. Combust. Inst.*, **27**(1988), 809-816.
- (3) Takahashi, F. and Schmoll, W. J., *Proc. Combust. Inst.*, **23**(1990), 677-683.
- (4) Takahashi, F., Mizomoto, M. and Ikai, S., *J. Heat Transf.*, **110**(1988), 182-189.
- (5) Chung, S. H. and Lee, B. J., *Combust. Flame*, **86**(1991), 62-72.
- (6) Muniz, L. and Mungal, M. G., *Combust. Flame*, **111** (1997), 16-31.
- (7) Ueda, T., Ooshima, A., Saito, N. and Mizomoto, M., *JSME Int. J.*, **34**(1991), 527-532.
- (8) Ramachandra, A. and Raghunandan, B. N., *Combust. Sci. Technol.*, **36**(1984), 109-121.
- (9) 八島正明・平野敏右, 燃焼の科学と技術, **3**(1995), 29-40.
- (10) Shay, M. L. and Romney, P. D., *Combust. Flame*, **112** (1998), 171-180.
- (11) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Linan, A., *Combust. Flame*, **95**(1993), 276-290.
- (12) 竹内正雄・植田利久・甘利朋矢・溝本雅彦, 機論, **64** 626, B(1998), 3485-3490.
- (13) 植田利久・溝本雅彦・猪飼茂, 化学工学論文集, **8** 4 (1982), 448-454.
- (14) 鳥飼宏之・松尾亜紀子・植田利久・溝本雅彦, 機論, **67** 653, B(2001), 234-240.
- (15) Tsuji, H. and Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.*, **11** (1967), 979-984.
- (16) Ishizuka, S. and Tsuji, H., *Proc. Combust. Inst.*, **18** (1981), 695-702.
- (17) Tsuji, H. and Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.*, **12** (1969), 997-1005.
- (18) Tsuji, H. and Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.*, **13** (1971), 723-731.
- (19) Tsuji, H., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **8**(1982), 93-119.
- (20) Takahashi, F. and Katta, V., *Proc. Combust. Inst.*, **26** (1996), 1151-1160.