噴流拡散火炎における渦と火炎との相互作用に基づく浮上がり現象*

野田 進^{*1}, 林 貴文^{*2}
田中 宏徳^{*2}, 小沼 義昭^{*1}Lifting Phenomena due to Vortex-Flame Interactions
of Jet Diffusion FlamesSusumu NODA^{*3}, Takafumi HAYASHI,
Hironori TANAKA and Yoshiaki ONUMA^{*3} Toyohashi University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Tempaku, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

Lifting phenomena caused by vortex-flame interactions have been investigated about diluted-propane jet diffusion flames forced by a speaker installed at the bottom of a fuel tube. Open jet diffusion flames were formed on a co-flow burner composed of the inner fuel tube and an outer air tube. Two type nozzles of rim thickness of 1 mm and 0.2 mm were set at the end of the fuel tube for each experiment and the effects of the rim thickness on the flame stability were investigated. Artificial vortices were imposed in the fuel flow through the speaker excitation to make clear vortex-flame interactions. The schlieren and OH radical imaging techniques were employed to unveil the interactions. Experiments in terms of the difference of rim thickness revealed that the ratio of the rim thickness to the quenching distance is important for lifting criteria as proposed by Takahashi and Schmoll, because the ratio of unity determines the limitation of whether the end of the flame base being in or out the recirculation zone behind the rim. Moreover, it revealed that the vortex-flame interactions are able to become the trigger of lifting, though the effect to lifting was questionable so far.

Key Words: Diffusion Combustion, Lifting Criteria, Lifted Flame, Flame Stability, Vortex, Flame Stretch, Visualization

1. 緒 論

拡散火炎の浮上がりおよび吹飛び現象は火炎の安定性の観点から極めて重要である。この現象は一般の燃焼器において広く観察されるため、これまで多くの研究が行われてきた。特に、火炎の浮上がり基準に対する研究およびその解釈に関する論争は乱流拡散火炎が層流火炎片の集合(フレームレットモデル)として扱えるか否かという議論に対して大きな影響を与えてきた。その考えの一つは最大燃焼速度と気流速度との釣合いを基準とする考え⁽¹⁾⁽²⁾であり、もう一つは火炎伸長を基準とするもの⁽³⁾である。前者は拡散火炎を予混合火炎と同様に扱うもので、拡散火炎が可燃範囲の薄い混合層を伝ばすると考えるものである。一方後者は拡散火炎の基部においては、対向流拡散火炎と同様に、反応と拡散が釣り合う反応帯とそれによって分離された対流-拡散域からなる拡散火炎構造を基本とし、火炎の浮上がりが火炎伸長に基づく消炎によってもたらされると考えるものである。

Pitts⁽⁴⁾は拡散火炎の不安定現象に関する詳細なレビューを行い、これまでに提案されてきた不安定現象に対するモデルあるいは解釈が十分に一般化されたものではないことを指摘し、さらなる研究の必要性を説いた。Takahashiら⁽⁵⁾はこのような研究状況を考慮したうえで、バーナ火炎を対象に系統的な実験を行い、拡散火炎の浮上がり基準について、極めて一般的な解釈を与えた。その基準はノズルリム厚さ δ (リム後流の循環流の大きさを示す代表寸法)が消炎距離 d_q よりも薄く($\delta < d_q$)、火炎基部先端が循環流の下流に形成される場合には気流速度と最大燃焼速度の釣合いで浮上がりが決定され(タイプI)、逆にリム厚さが消炎距離よりも厚くなり($\delta > d_q$)、火炎基部先端が循環流中に形成される場合には燃料噴流の遷移点で発生する火炎の消炎が浮上がりをもたらす(タイプII)とした。さらに、タイプIIの場合、循環流中の混合気の燃料濃度が周囲流の流速に依存することを示し、周囲流速が増加した場合にはその混合気が希釈されることによって火炎が浮き上がることを明らかにした(タイプIII)。

一方、著者らは噴流拡散火炎の燃料流をスピーカで加振し、周期的な渦を火炎中に形成し、渦と火炎との相互作用の解明を行ってきた⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。このとき、スピーカの供給電圧を一定にし、加振周波数を上げていくと、

* 原稿受付 2000年1月14日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学工学部 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院。

E-mail: noda@mech.tut.ac.jp

燃料噴出速度を増加した場合と同様に、火炎の浮上がり現象を得た。この場合の浮上がり現象について、火炎基部先端への火炎伸長効果が火炎の浮上がりをもたらす可能性を指摘した⁽⁷⁾が、このような火炎基部先端の消炎に基づく浮上がり現象について、Takahashiらは強く疑問視しており、さらなる検討が必要と思われる。また、この浮上がり現象はTakahashiらが分類した火炎消炎に基づくタイプIIの浮上がりと類似しているが、著者らの予測とタイプIIの浮上がりとの関連は明らかでない。そこで、本研究では2種類のリム厚さのノズルを用い、燃料流をスピーカで加振した場合に生ずる噴流拡散火炎の浮上がり現象について、可視化解析からその原因について検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 図1に実験装置を示す。燃焼装置は同軸タイプのものであり、中心に燃料管、その周囲に空気流のための周囲管を垂直上向きに設置した。燃料管の先端に、燃料ノズルとして、ノズル出口内径 $d=12$ mmの縮流ノズルを設置した。また、火炎安定性へのリム厚さ δ の影響を明らかにするために、リム厚さが1 mm(ノズルI)と0.2 mm(ノズルII)の2種類の燃料ノズルを用いた。また、ノズルリムの厚肉部はノズルI, IIに対し、ノズル先端がそれぞれ約30°および15°の鋭角となるように切り落とした。また、両ノズルともノズル出口速度分布が平坦となるように、直径比2.3で絞られている。燃料管の下部には燃料流を音響励起するために、スピーカ(4 Ω , 10 W)を設置した。周囲管の先端に出口内径110 mmの縮流ノズルを設置した。また、周囲管の流路途中にハニカムを設け、整流を行っている。燃料はプロパン・窒素混合気(体積比1:1)である。周囲気体は空気である。

2.2 実験方法 本研究ではシュリーレン法によ

る可視化およびOHラジカル発光像の撮影を行った。まず、瞬間シュリーレン撮影および連続シュリーレン撮影について説明する。瞬間シュリーレン撮影は実験条件すべてについて行い、連続シュリーレン撮影は付着火炎が浮き上がる過渡現象を撮影した。本実験で利用したシュリーレン撮影法は光源、ピンホール、2枚の凹面鏡、ナイフエッジ、カメラからなる。瞬間シュリーレン撮影では、ストロボスコープ(菅原研究所, MS-230 A)の単一発光(発光時間2 μ s)を用い、スチルカメラで撮影した。また、連続シュリーレン撮影では、光源としてストロボスコープの連続間欠光(発光時間2 μ s)を用い、撮影にはイメージンテンシファイア(I. I.)付き高速度ビデオカメラ(フォトン, FAST-CAM-ultima)を用いた。また、ストロボスコープと高速度ビデオカメラの同期はディレイジェネレータ(Stanford Research Systems, DG 535)を用いて行った。

OHラジカルからの発光像の撮影については、干渉フィルタ(中心波長308 nm, 半値幅10 nm)を取付けたICCDカメラ(浜松ホトニクス, C 5909)を用いて行った。OHラジカル発光強度は反応 $\text{CH} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{CO}$ によるOHラジカルの生成速度に比例する。また、CHラジカルは炭化水素の反応過程で少量生成されることから、OHラジカル発光像は酸素の存在する反応初期もしくは希薄混合気における反応領域を示すものと解釈できる⁽⁹⁾。

2.3 実験条件 実験条件を表1に示す。燃料噴出速度は4 m/sであり、周囲空気流速は0.3 m/sであ

Table 1 Experimental conditions

NO.	Fuel	Exit Velocity (m/s)	Re	Excitation Frequency (Hz)	
				Case I	Case II
1	$\text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$ (Volumetric ratio=1)	4	5800	0	0
2				80	78
3				300	-----
4				500	-----

Fig. 2 Lift-off height as a function of excitation frequency

Fig. 1 Experimental apparatus

る。また、スピーカの供給電圧は3Vと一定にした。ノズルI, IIの実験に対応して、実験ケースI, IIとした。また、加振周波数の低い順にアラビア数字で番号付けをした。実験I-2における加振周波数80Hzと実験II-2の加振周波数78Hzは火炎が浮き上がる直前の周波数である。以下、図中の説明番号は実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 加振周波数に対する浮上がり高さの変化

図2に加振周波数に対する浮上がり高さの変化を示す。黒丸がケースI, 白丸がケースIIの結果である。また、ケースIにおける各加振条件のシュリーレン写真を図3に示す。ただし、図3のシュリーレン写真(I-1-a)と(I-1-b)は実験I-1における付着火炎と浮上がり火炎を示す。図2において、ケースIの場合、加振周波数を上げていくと、82Hzで浮上がり、さらに周波数を上げていくと、その浮上がり高さは減少し、500Hzで再付着する。逆に加振周波数を下げっていくと、浮上がり高さは元の経路をたどるが、浮上がり周波数以下においても、火炎は浮き上がったままとなる。ケースIIの場合、ケースIの場合とよく似た浮上がり現象を示すが、リム厚さの減少に伴い、わずかに不安定となり、浮上がり周波数は80Hzと減少し、また再付着周波数は550Hzに増加する。火炎が浮き上がった後の現象は既報⁽⁸⁾で明らかにしたように、燃料中に形成される渦輪と縦渦との相互作用に強く依存する。また、浮上がり周波数以下の浮上がりは本火炎が浮上がり現象のヒステリシス領域内に存在するためである⁽⁸⁾。図3(I-1-b), (I-3)のシュリーレン像からも確認される縦渦(図3中矢印)は渦輪の流れ方向への伸長に基づき発生するが、この縦渦の発生は渦輪間に存在する火炎伸長の効果を低下させ、火炎の上流への伝ばを促進する。このため、火炎の浮上がり高さは縦渦の発生する位置と一致する。また、浮上がり火炎の再付着現象は縦渦による安定化機構および加振周波数

に対応して形成される小さなスケールの渦輪列が希薄側に形成される火炎を上流に駆動するために生ずる。再付着に寄与する縦渦の存在は図3(I-4)のシュリーレン写真からは明らかではないが、レーザシート法による可視化で確認される⁽⁸⁾。

また、ノズルIIにおける浮上がり周波数の低下は、ノズルリム厚さが消炎距離よりも薄くなったためと考えられる。プロパン・空気量論混合気における消炎距離は1.28mmであるので⁽¹⁰⁾、本実験で使用したプロパン・窒素混合燃料(体積比1:1)の量論混合気の消炎距離もほぼ同程度と見積もることができる。また、循環流の下流方向長さはリム厚さ程度である⁽⁹⁾。したがって、ノズルIIの場合、火炎の形成される最上流端位置はリム後流に形成される循環流よりも下流位置となり、不安定性が増したと考えられる。この現象はTakahashiら⁽⁶⁾の浮上がり基準と直接関連している。彼らの実験結果によると、タイプIIの火炎の浮上がりはタイプIの浮上がりよりも高速の燃料噴出速度で発生する。したがって、タイプIIの火炎は安定であるといえる。これはタイプIIの火炎の場合、火炎基部先端が循環流に保持されるため、この循環流に存在する火炎が下流の火炎の着火源となるためと考えられる。図2で示されるノズルリム厚さの違いによる浮上がり周波数の変化はTakahashiらの浮上がり基準(ノズルリム厚さ δ と消炎距離 d_q の大小関係)に対する渦の影響を示しているといえる。

3.2 渦に基づく火炎の浮上がり現象 本火炎の浮上がり現象については、燃料噴出速度を一定とし、スピーカ加振により燃料流中の渦を制御した際に生ずる現象であるために、「1. 緒論」で述べたTakahashiら⁽⁶⁾の浮上がり基準タイプIIの乱れに基づく消炎による浮上がり現象に類似しているといえる。しかし、厳密にはスピーカ加振によって形成された渦に基づく火炎伸長によるものなのか、あるいは渦の回転に伴う気流速度の変化が火炎伝ば速度との釣合いを崩し、火炎の浮上がりをもたらしたものなのか明確ではない。特に、Takahashiらは噴流拡散火炎における付着火炎基部への火炎伸長の効果については強く疑問視しており、この点の解明が必要と思われる。

そこで、火炎の浮上がり現象を詳細に検討するために、浮上がり直前の現象について検討した。ケースIにおける浮上がり直前の加振周波数80Hzの火炎(実験I-2)について、火炎基部のシュリーレン像とOHラジカル発光像を図4と図5に示す。それぞれ、燃料流中に形成される渦が火炎基部を通過する1周期の現象を示している。ただし、図4, 5とも瞬間撮影により

Fig. 3 Schlieren pictures of Experiment I

Fig. 4 Schlieren pictures of Experiment I-2

Fig. 5 OH radical pictures of Experiment I-2

得たものであり、比較的連続的な現象を表すように組写真としている。図4のシュリーレン像から、燃料中の渦はノズル出口すぐ下流において、1周期の間に線形的に成長していることがわかる。一方、 $x/d > 5$ の下流では渦輪の成長は低下し、渦輪間において三次元的な構造の発達が確認される。また、図4(I-2-b, c)において、燃料流中の渦の発達に伴い、周囲空気との間の密度層(高温層)の幅が薄くなり、火炎伸長効果が增大していることが確認される。渦による火炎への影響はOHラジカル発光像(図5)から、さらに明確となる。渦の発達初期[図5(I-2-a')]では、渦による火炎の膨らみ位置でOHラジカル発光強度は増加している。これは火炎伸長の増加が反応帯への反応物の拡散を促進するためで、このために反応が活発となるためである⁽¹¹⁾。さらに渦が発達すると、渦の膨らみ位置で局所的に消炎が発生する[図5(I-2-b')]。この現象は対向流拡散火炎の消炎機構から推測すると、火炎伸長に伴うスカラー散逸速度の増大に伴い、反応帯からの熱拡散が増加し、火炎が冷却されるためと考えられる⁽¹²⁾。ただし、メタン燃料を用いた同軸流拡散火炎において、Kattaら⁽¹¹⁾は渦による消炎を CH_3 の増加による停止反応 $\text{CH}_3 + \text{H} = \text{CH}_4$ を原因としており、本実験の消炎現象について、可視化結果のみではその原因を明確に特定できない。渦が通過するとその消炎位置

Fig. 6 OH radical pictures of Experiment II-2

Fig. 7 High-speed schlieren pictures of Experiment II-2 (Time interval is 2 ms)

は渦の下方に移動し、火炎伸長の低下に伴い、反応帯が回復する[図5(I-2-c', d')]. この局所消炎の現象は渦が通過するごとに繰返されるが、火炎の浮上がりの直接の原因とはならない。これは、ノズルのリム厚さが消炎距離よりも大きいために、火炎基部先端が循環流内に形成されているためと考えられる。このため、 $x/d < 1$ の火炎基部が安定しており、その火炎基部が消炎部の着火源となるためと考えられる。

次に、ケースIIの浮上がり時の火炎現象について、図6にOHラジカル発光像を、また図7に連続シュリーレン像を示す。ケースIIの場合、ケースIの場合のように局所消炎が安定して観察されることはなく、加振周波数80 Hzとなると、一瞬にして浮き上がる。このため、図6, 7は加振周波数を78 Hzから80 Hzに増加させながら撮影したものである。また、図6のOHラジカル発光像は目視観察あるいは高速度シュリーレン像の観察から、浮上がり現象をよく表すとして、瞬間撮影結果から抽出した組写真である。また、図7のシュリーレン像の時間間隔は2 msであり、さらに図7中に説明図を加えた。図6(II-2-a')から、渦の成長初期において、火炎伸長に基づく消炎が発生しているのが確認される。渦が下流に移動すると[図6(II-2-b')], さらに消炎部分は拡大する。これはケースIの場合とは異なり、火炎基部($x/d < 1$)の火炎が消失しているために、渦による火炎伸長効果が直接消炎部の拡大をもたらすものと考えられる。図6(II-2-c')は図6(II-2-b')に比べ、渦位置がわずかに下流に移動し

ているが、ほぼ図6(II-2-b')の火炎を角度を変えて撮影した様子が見て取れる。火炎は消炎部分から浮き上がりつつある。図7の連続シュリーレン像から、ケースIIの場合の消炎に基づく浮上がり現象が確認される。図7(II-2-a, b)は渦による火炎伸長により、火炎基部の左側が消炎している。この状態は図6(II-2-a')のOHラジカル発光像で確認される渦による消炎を示していると考えられる。図7(II-2-c, d)は火炎基部の右部分が次の渦により火炎伸長を受け、消炎に基づき浮き上がる様子を示している。ケースIIの場合には、ケースIのような局所的な消炎が繰り返し発生する現象は観察されず、図6, 7の現象が一瞬に発生し、火炎は浮上がりに至った。ケースIIの火炎の場合、火炎基部先端は循環流の下流に形成されていると考えられるので、Takahashiらの浮上がり基準⁽⁵⁾を適用すると燃焼速度と気流速度の釣合いを考えるべきであるが、本結果はTakahashiらが疑問視した火炎基部先端への火炎伸長による浮上がりが存在することを示すものと考えられる。ケースIの場合においても、82 Hzの加振周波数で火炎は浮き上がるが、基本的にはケースIIの場合同様、火炎基部先端への渦による火炎伸長効果が火炎の浮上がりの原因であると考えられる。

Takahashiらが火炎の浮上がりの判定基準としたノズルリム厚さ δ と消炎距離 d_q は火炎基部先端に火炎伸長効果が作用する場合においても、図5, 6で示されるように火炎の安定性に重要であると考えられる。しかし、本実験のように火炎伸長効果が火炎基部先端に作用する場合にはこの火炎伸長が火炎の浮上がりの原因となるため、この効果に基づく浮上がり現象を考慮する必要がある。

4. 結 論

浮上がり現象におけるヒステリシス領域にある噴流拡散火炎について、燃料流をスピーカで加振し、燃料流中に渦を発生させ、渦と火炎との相互作用に基づく

浮上がり現象について、可視化解析から検討し、次の結論を得た。

(1) Takahashiら⁽⁵⁾が指摘したように、火炎の浮上がり現象はノズルリム厚さ δ と消炎距離 d_q が重要なパラメータである。ノズルリム厚さはリム後流の循環流の大きさを表す代表寸法であり、 $\delta > d_q$ は火炎基部先端が循環流内で保炎されることを表し、 $\delta < d_q$ は循環流の下流で保炎されることを表す。

(2) 噴流拡散火炎の浮上がり現象において、渦による火炎基部先端への火炎伸長は火炎の浮上がりの原因の一つである。

(3) 火炎基部先端がノズルリム後流の循環流に保炎されている場合($\delta > d_q$)、渦による局所消炎は火炎基部先端が消炎しない限り、火炎の浮上がりの直接的な原因とはならない。

文 献

- (1) Vanquickenbone, L. and van Tiggelen, A., *Combust. Flame*, **10**(1966), 59-69.
- (2) Kalghatgi, G., *Combust. Sci. Technol.*, **26**(1981), 233-239.
- (3) Peters, N. and Williams, F. A., *AIAA J.*, **21**-3(1983), 423-429.
- (4) Pitts, W. M., *Proc. 22nd Symp (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1988), 809-816.
- (5) Takahashi, F. and Schmoll, W. J., *Proc. 23rd Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1990), 677-683.
- (6) 野田進・小野寺勝昭・上高原廉樹・小沼義昭, 機論, **63**-606, B(1997), 711-717.
- (7) 上高原廉樹・野田進・小沼義昭, 第35回燃焼シンポジウム講演論文集, (1997), 60-62.
- (8) 野田進・上高原廉樹・小野寺勝昭・神谷重信・小沼義昭, 機論, **64**-617, B(1998), 283-289.
- (9) 水谷幸夫, 燃焼工学, (1994), 194, 森北出版.
- (10) Fristrom, R. M. and Westenberg, A. A., *Flame Structure*, (1965), 27, McGraw-Hill.
- (11) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M., *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1998), 1121-1129.
- (12) Peters, N., *Combust. Sci. Technol.*, **30**(1983), 1-17.