圧力こう配のある流れ場における火炎の安定性および保炎* (円柱による保炎特性と後流渦構造の関係)

石野 洋二郎^{*1}, 山口 誉起^{*2}, 大岩 紀生^{*2}

Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow (Relationship between Flame Stability and Eddy Structure behind a Circular Cylinder)

Yojiro ISHINO, Shigeki YAMAGUCHI and Norio OHIWA

An experimental study is made on turbulent diffusion flames stabilized by a circular cylinder in a divergent flow. In this paper, stabilization characteristics and flame structure are examined by varying the divergent angle of duct. The fuel used is a commercial grade gaseous propane supplied by exudation from a sintered metal smoothly embodied in the backward stagnation region of the rod. It is found that the positive pressure gradient greatly influences the eddy structure behind the rod, and that two different kinds of combustion patterns exist at the blowoff limit depending on the divergent angle of the duct. They are distinguished by their wake structures: one associated with Karman vortex shedding, the other without it. Also, the blowoff velocity in the former is found to be higher than that in the latter.

Key Words: Diffusion Combustion, Flame, Wake, Bluff-Body, Flame Stabilization, Divergent Flow, Blowoff, Karman Vortex

1. 緒 言

一様流中あるいは等断面積管内流中に乱流火炎を確立するために用いる代表的流れ形態の一つに物体後流がある。この流れ形態の特性はすでに十分把握されているので、非燃焼流れ場と燃焼流れ場との比較検討により、確立された乱流火炎の基本的特性に関して、数多くの重要な結果が報告されている。しかし、広がり流れ場のように正の圧力こう配が存在する場合には、その圧力こう配が流体力学的特性にはもちろんのこと、化学反応を伴う流動場の熱と物質の輸送過程にも影響を及ぼし、乱流火炎の特性を支配すると考えられるにもかかわらず、そのような燃焼場を取扱った研究はほとんど見られない。また実用面においても、燃焼器の高負荷・高性能化を指向する結果、燃焼室の流路形状の変化に伴う圧力変化の影響も考慮する必要が生じている。このような観点から、圧力こう配のある物体後流に形成される乱流火炎について、その挙動および基本的特性を研究することは意義があるものと考えられる。

そこで本研究では、まず、これまで数多くの研究がなされている円柱^{(1)~(7)}を抵抗物体として用い、その後方岐点部から燃料をしみ出させて得られる乱流拡散火炎を対象とした。本論文では、広がり角可変の二次元風洞を用いて、流路広がり角に伴う保炎特性と付着火炎の構造の変化を実験的に調べた。

2. 実験装置および方法

測定部の詳細、円柱保炎器設置位置および座標軸を図1に示す。上下の制約壁は、円柱設置断面における流路高を $H=80\text{ mm}$ と一定に保ちつつ、広がり角 2α を -4° から $+18^\circ$ の範囲で任意に設定することが可

図1 測定部の詳細と座標

* 平成2年3月10日 中国四国支部第28期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年5月25日。

*¹ 学生員、名古屋大学大学院 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

*² 正員、名古屋工業大学。

能である。保炎器としては、直径 $d=12, 20$ mm および 28 mm の 3 種類の円柱直径を用意し、ブロック比 $BR (=d/H)$ を $0.15, 0.25$ および 0.35 と変化させた。円柱保炎器の構造と諸寸法を図 2 に示す。円柱の長さはいずれも流路幅と等しく 80 mm である。直径 $d=28$ mm および 20 mm の円柱には、長さ 78 mm・幅 5 mm・厚さ 10 mm の焼結金属(公称炉過精度 $70 \mu\text{m}$)が埋め込まれており、この部分を後方岐点に向けて、燃料(家庭用 LPG, プロパン純度 96.4%)をしみ出しによって供給する。一方、直径の小さい $d=12$ mm の円柱[図 2(c)]の場合には、焼結金属の代わりに多孔板($\phi 0.3 \times 77$ 個, 2 列)を用いた。なお、本実験における燃料供給平均速度は、吹消え時の主流流速に比較して、十分小さい。

実験にあたっては、主流流速 $U^*[\text{m/s}]$ と燃料流量 $Q_f[\text{NL/min}]$ を設定して火炎を形成させ、火炎構造の目視観察、直接写真およびシュリーレン写真撮影と保炎限界の測定を行う。本実験では、測定部入口平均流速 $U[\text{m/s}]$ に対して、円柱によるブロック効果の補正を行い、 $U^* = U/(1 - BR)$ で算出される値を主流速度 $U^*[\text{m/s}]$ とした。また、シュリーレン写真の撮影には 2 枚の凹面鏡($\phi 200$)から成る Z 形光学系を採用し、それに通常の形式のナイフエッジ、あるいはリング状ナイフエッジ⁽⁸⁾を組合せた。このリング状ナイフエッジは、中心に位置する小円透明部とそれを取り巻

(a) $d=28$ mm($BR=0.35$) (b) $d=20$ mm($BR=0.25$) (c) $d=12$ mm($BR=0.15$)

図 2 円柱保炎器の構造と諸寸法

く 6 個のリング状透明部(最大径 14 mm)とから構成され、あらゆる方向の微細な密度変化を把握するのに有利である。

(a) $d=28$ mm($BR=0.35$) (b) $d=20$ mm($BR=0.25$) (c) $d=12$ mm($BR=0.15$)

図 3 吹消え速度に及ぼす燃料流量の影響

3. 実験結果および考察

3.1 保炎限界 図3(a), (b)および図3(c)に, それぞれ $d=28$ mm (BR=0.35), 20 mm (0.25) および 12 mm (0.15) の円柱を用いた場合の吹消え速度 U^*_{bo} の変化を, 広がり角 2α をパラメータとして示す. 横軸は燃料流量 Q_f を表す. 図3によれば, BR=0.15 の場合には, 燃料を多孔ノズルから供給しているため均一な吹出しが得にくく, 測定結果に比較的大きなばらつきが生じているが, いずれの円柱に対しても, 燃料流量の増加に伴って吹消え速度が増加すること, および燃料流量の増加に伴って吹消え速度に飽和の傾向があることがわかる.

つぎに, 燃料流量を一定に保って広がり角 2α を変化させたときの U^*_{bo} の変化を, 一例として, $d=28$ mm (BR=0.35) の場合を図4に示す. 図4から Q_f =一定の条件下では, 吹消え速度は広がり角の増加とともに減少し, その減少の割合は, 網目を付した $2\alpha=9^\circ$ 前後の角度で不連続に変化することがわかる. しかも, この不連続帯の始まりが燃料流量の増加に従い, 小さな広がり角のほうへ徐々に移行している. そこで, この不連続帯の中心となる広がり角を臨界広がり角と呼び, $2\alpha_{cr}$ と表示して変化の様子を分類すれば, $2\alpha < 2\alpha_{cr}$ の範囲(亜臨界域)では 2α の増加に伴って U^*_{bo} は直線的に減少し, 一方, $2\alpha > 2\alpha_{cr}$ の領域(超臨界域)では, 2α の値にかかわらずほぼ一定となる. したがって, 単純に吹消え速度の大小のみに着目して保炎性を比較すると, 亜臨界域で形成される火炎のほうが優れ

図4 吹消え速度に及ぼす広がり角の影響

た燃焼状態を有し, 本実験の範囲内では, 広がり角が小さいほど高速流での保炎が可能となる. なお, 本論文には示さなかったが, BR=0.25 および 0.15 の場合には, ブロッキング比の減少とともに臨界広がり角の値が増加するという傾向が見られる. しかし, いずれの場合にも, 吹消え速度 U^*_{bo} はそれぞれの $2\alpha_{cr}$ を境界として図4と同様の挙動を示す. そこで以下では, 現象の特徴をわかりやすく説明するために, 広がり角の影響が最も強く現れると考えられる BR=0.35 の流れ条件を代表として取り上げ, 広がり角を増大させたときの円柱後流の渦構造と付着火炎の挙動との対応関係を瞬間シュリーレン観察することによって把握し, この保炎特性の変化を調べることにする.

3.2 燃焼状態の遷移 図5に, 吹消え近傍の状態にある火炎の瞬間シュリーレン写真を示す. このとき, 全方向の微細な密度変化をとらえるため, 同心のリング状ナイフエッジ⁽⁸⁾を用いた. 燃料流量は $Q_f=2$ NL/min, ブロッキング比は BR=0.35 ($d=28$ mm) であり, 広がり角および主流流速は図5(a) ($2\alpha, U^*$) = $(0^\circ, 34$ m/s), 図5(b) ($15^\circ, 22$ m/s) である. 図5(a)によれば, 円柱後流に火炎が安定化されている場合でも, 平行流路のときには流れ場にカルマン渦列が存在し, これが円柱背後への外部空気流の流入〔図5(a)中に矢印で示す〕を促進し, 燃焼状態および火炎

(a) 平行流路 ($2\alpha=0^\circ, U^*=34$ m/s)

(b) 広がり流路 ($2\alpha=15^\circ, U^*=22$ m/s)

(BR=0.35, $d=28$ mm, $Q_f=2$ NL/min)

図5 吹消え近傍の火炎の瞬間シュリーレン写真

(near b. o. は吹消え近傍を示す, $BR=0.35$, $d=28 \text{ mm}$, $Q_f=2 \text{ NL/min}$)

図 6 流速および広がり角の変化による燃焼形態の遷移

形状に対して強い影響を及ぼしているように見える。一方、広がり流路 ($2\alpha=15^\circ$) の場合 [図 5 (b)] には、カルマン渦放出を伴う燃焼形態は認められない。こうした広がり角の相違によるカルマン渦列の発生・消滅といった現象は、非燃焼空気流の場合にも観察されている⁽⁹⁾ので、広がり流れの有する大きな特徴の一つと考えられる。そこで本研究では、簡単化のため、カルマン渦放出を伴う燃焼形態をカルマン渦燃焼、カルマン渦放出を伴わない場合を非カルマン渦燃焼と呼び、区別することにする。

つぎに、さらに多くの条件下での燃焼状態について調べるため、主流流速を $U^*=10, 22$ m/s、および吹消え速度近傍に設定した場合の火炎の瞬間シュリーレン写真の撮影と、目視による吹消え直前の火炎の挙動の観察を行った。図 6 に、円柱直径を $d=28$ mm、燃料流量を $Q_f=2$ NL/min とし、広がり角を $2\alpha=-3^\circ$ から $+18^\circ$ まで 3° ごとに变化させた場合の火炎のシュリーレン写真を示す。また、図 7 に、これらの写真観察に基づく判別結果と、吹消え直前の燃焼状態の目視観察結果をまとめて示す。図 7 には、さらに、燃焼状態がカルマン渦燃焼であると予想される領域に網目模様を付した。図 6 および図 7 によれば、亜臨界域 ($-3^\circ \leq 2\alpha \leq 6^\circ$) で形成された火炎が、 10 m/s から 22 m/s への主流速度の増加により非カルマン渦燃焼 (●印) からカルマン渦燃焼 (○印) へ遷移すること、超臨界域 ($12^\circ \leq 2\alpha \leq 18^\circ$) においては燃焼形態の遷移はなく、吹消え近傍の主流速度まで非カルマン渦燃焼が維持されることがわかる。さらに図 7 から、吹消え時の燃焼形態が $2\alpha < 9^\circ$ の範囲ではカルマン渦燃焼 (○印)、 $2\alpha > 9^\circ$ の範囲では非カルマン渦燃焼 (●印) であり、この境界となる角度 $2\alpha=9^\circ$ が、3・1 節で述べた臨界広がり角 $2\alpha_{cr}$ に等しいことがわかる。これにより、亜臨界域・超臨

界域を決定する主要因の一つが、吹消え時における燃焼形態の差異であること、保炎性の良否が吹消え時の燃焼形態に大きく依存することが確認される。したがって、円柱後流のよどみ領域からしみ出しによって燃料供給する本保炎方式では、亜臨界領域に火炎を確立させて、非カルマン渦燃焼からカルマン渦燃焼への形態遷移を利用することによって、より高い主流流速にまで保炎が可能となる。

3・3 吹消え機構 カルマン渦放出を伴う燃焼の燃焼機構および吹消え機構について調べるにあたって、特に火炎の形状と後流カルマン渦の干渉に着目した。そこで吹消え近傍の燃焼状態で、火炎の概形と後流渦構造の同時撮影を行った。結果を図 8 に示す。左側の写真は火炎の直接像を与え、右側の写真にはさらに後流渦構造のシュリーレン像が写し込まれている。ここで設定条件は、主流流速 $U^*=32$ m/s、燃料流量 $Q_f=2$ NL/min、 $BR=0.35$ および広がり角 $2\alpha=0^\circ$ である。また、撮影にあたっては、露出時間 S をカルマン渦放出周期の約 $1/10$ とし、 $S=1/2000$ s に設定した。なお、この 5 組の写真は連続して撮影されたものではなく、多数の写真の中から、カルマン渦放出の過程を良く表現していると考えられるものを選び出して 1 周期を構成させたもので、上から下へ位相が進行す

図 7 燃焼形態の判別結果

($BR=0.35$, $d=28$ mm,
 $Q_f=2$ NL/min, $2\alpha=0^\circ$, $U^*=32$ m/s)

図 8 火炎の概形と後流渦構造

図 9 非カルマン渦燃焼火炎

る。

図 8 から、それぞれの位相において、火炎の後端が渦塊(例えば図 8 中 A, B)の誘起速度により上側(A)あるいは下側(B)で交互に伸び、それが渦塊に巻き込まれている様子を見いだすことができる。ところが、 $1/2000$ s という短い露出時間であるにもかかわらず、撮影されている火炎の大部分が、円柱背後のほぼ円柱半径程度の厚さ全域にわたって絶えず存続し、あたかもこの火炎の塊が円柱と一体となって長円形の抵抗物体を形成しているように見える。したがってカルマン渦燃焼火炎の吹消えは、流入外部流による火炎の押しよけにより生じるのではなく、上述の後流循環領域を覆っている強固な付着火炎の消滅に起因すると考えられ、その消滅の要因として主流速度の増加に起因する混合作用の増大による局所当量比の減少、および流入空気による循環領域全域の冷却などが考えられる。

つぎに、カルマン渦放出を伴わない超臨界域における吹消え時の特徴を調べるため、図 9 に非カルマン渦燃焼火炎の瞬間直接写真 ($S=1/250$ s) を示す。火炎の設定条件は超臨界域の吹消え限界近くに位置し、 $U^*=21.6$ m/s, $Q_f=3.1$ NL/min, $BR=0.35$ および $2\alpha=15^\circ$ である。図 8 に比較してほぼ 1 オーダ長い露出時間で撮影されているにもかかわらず、非カルマン渦燃焼では循環領域の片側一部分のみに火炎が存在する。ところが目視観察によれば、絶えず上下に火炎の付着が確認されている。このことは、非カルマン渦燃焼では火炎が上下交互に不規則に偏在することを意味する。なお、図 9 の露出時間がカルマン渦燃焼の場合の渦放出周期と同程度であることを加味すれば、この火炎付着位置の変動が、時間的には比較的遅い周波数成分により構成されること、一方、空間的には燃料供給部を含む循環領域全体にわたる大規模な変動であることがわかる。このような状況では火炎の付着は脆弱であり、例えば円柱後流中心軸に沿って存在する弱い

逆流に起因して、火炎は容易に消滅し、吹消えに至るものと思われる。

4. 結 言

本論文では、広がり角可変の二次元制約流路に円柱を設置し、その後方よみ領域からの燃料のしみ出しによって乱流拡散火炎を形成させ、その火炎の安定性および抵抗物体による保炎特性に及ぼす主流圧力こう配の影響を実験的に調べた。得られた結果は、以下のように要約することができる。

(1) 広がり角の増大は、亜臨界域では吹消え速度み直線的に減少させ、超臨界域では一定にする。

(2) 亜臨界域では、主流の増速によりカルマン渦放出を伴わない非カルマン渦燃焼から、カルマン渦放出を伴うカルマン渦燃焼へと形態の遷移が生じる。超臨界域では燃焼形態の遷移はなく、非カルマン渦燃焼の形態で吹消える。すなわち、亜臨界域・超臨界域では、吹消え時の燃焼形態が異なる。

(3) カルマン渦燃焼の場合には、円柱背後に円柱半径程度の厚さの付着火炎が絶えず強固に存在し、あたかも円柱と火炎が一体となって長円形の抵抗物体を形成しているかのように見える。このためカルマン渦燃焼は高い保炎特性を示す。それに対して、非カルマン渦燃焼では円柱後流の火炎は不安定な状態にあり、その結果、吹消え速度は低く抑えられる。

なお本研究の実施に対して、本学学生 太田裕雄・白川正一郎・加藤敏寿・山本大介の諸君の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Davies, T. W. and Beer, J. M., *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, (1970), 631, The Combustion Institute.
- (2) Kundu, K. M., ほか 2 名, *Combust. Sci. Technol.* **17** (1977), 153.
- (3) Lewis, K. J. and Moss, J. B., *Proc. 17th Symp. (Int.) Combust.*, (1978), 267, The Combustion Institute.
- (4) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **101** (1979), 343.
- (5) Katsuki, M., ほか 3 名, *Proc. ASME-JSME Joint Conf.*, (1983), 175.
- (6) Yamaguchi, S., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **62-1** (1985), 31.
- (7) 伊藤・ほか 3 名, *機論*, **50-452** (1984), 1144.
- (8) 服部・渡辺, 火炎核のシェーレン撮影技術, 日本自動車部品総合研究所研究報告, SR-1 (1977), 39.
- (9) 石野・ほか 3 名, 第 26 回燃焼シンポジウム前刷集, (1988), 419.

討 論

〔質問〕 伊 藤 献 一〔北海道大学工学部〕

(1) 後流火炎について、詳細な観察結果から、燃烧状態を分類し、吹消え機構を論じておられることに敬意を表す。吹消え機構に関し、火炎構造のマクロな観察から推論しておられるが、変動要素は、後流域の局所的なより正確な観察がなされないと明らかにはならないと思う。ご意見を伺いたい。

(2) 圧力こう配がなぜ燃烧形態の違いをまねくのか、この点にふれていないがこれは根本的事項と考えるかいかがか。

〔回答〕 (1) 本論文では、研究の第1段階として、対象とする火炎の巨視的な特徴を把握し、それに基づいて吹消えの概要を推論したものである。ご指摘のように、後流域の詳細な観察の必要性は十分認めている。今後の課題にさせていただきたい。

(2) 物体の後流、噴流、せん断層は乱流火炎の基

本的な流れ場であり、一様な圧力場におけるこの3基本せん断流と火炎の関係は、これまで詳細に調べられてきた。しかし流れの方向に圧力こう配が生じたとき、これら3種の基本せん断流の成長が著しい影響を受けることは間違いない。この流れ挙動の変化が燃烧形態にいかなる影響を与えるかを解明するのが著者らの研究の意図である。かかる観点からすれば、本研究の課題に選んだ円柱の後流についても、まず圧力こう配が再循環領域の寸法の変化、生成、消滅などに与える影響を明らかにする必要があるが、本論文では、非燃烧時のシュリーレン観察結果(付1)に対応させて、燃烧時を巨視的に取扱ったものである。今後、さらに解析を進展させていく予定である。

(付1) 出口・ほか3名、機論, 56-523, B (1990), 803.