再循環域に吹出しを伴う同軸噴流予混合火炎に関する研究*

伊藤 献一^{*1}, 宋 圭根^{*2}

Premixed Double Concentric Jets Flame with Gas Injection in Recirculation Zone

Kenichi ITO and Kyukeun SONG

Air, fuel gas and fuel-air mixture injection into a recirculation zone formed behind a thick burner rim were examined. Flame stability limits, residence times in the recirculation zone and inflow ratios of injected gas were measured. Flame stability limits were widened by fuel or mixture injection. Mixture injection was most effective. The length of the recirculation zone and residence time in the recirculation zone with injection coincided with these without injection. Inflow ratios of the injection gas in the recirculation zone were about 80% irrespective of the injection rate or mixture strength of the injected gas.

Key Words: Combustion, Jet Flame, Recirculation Zone, Gas Injection, Flame Stability Limits, Residence Time, Mass Exchange

1. 緒 論

高負荷連続燃焼器において高速気流中で火炎安定化をはかる一つの方法に気流中の一部に循環流を形成させることがある。ガスタービン用の予混合予蒸発燃焼器では tube and disc 形, disc and duct 形などの Bluff-body 形保炎器が用いられている⁽¹⁾, これらではいずれも再循環域が利用されている。厚肉バーナに保持される同軸噴流火炎は Bluff-body と同じ概念で保炎にバーナリム後流の再循環域が利用される。

Winterfeld⁽²⁾ は Bluff-body 後流火炎の保炎機構に対し, 保炎器後流の再循環域と外部流との間の物質交換, エンタルピー交換によって火炎が安定されることを指摘し, 再循環域内での滞留時間, 再循環域の形成による物質交換過程を提示している。一方, 伊藤ら⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ は同軸噴流火炎において再循環域の構造を実験的に調べ, 再循環域内の実質空気比が保炎性に大きく影響をおよぼすことを示している。また, 辻ら⁽⁶⁾ は Bluff-body 保炎器において火炎安定性に吹出しの効果があることを示している。これらのことから, 再循

環域内の空気比を制御することによって保炎特性を制御することが可能と考えられ, 本研究では予混合同軸噴流火炎において, 再循環域に対して気体吹出しを行い, 吹出しが火炎安定性, 火炎形状, 再循環域内の実質空気比におよぼす影響を明らかにした。さらに, 再循環域と外部流との物質交換モデルにより再循環域内の理論平均空気比を予測し, 実験値とを比較して, 吹出し流量の再循環域への流入量および流入割合を求めた。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置の概略を図1に示す。使用燃料は市販 LPG (C_3H_8 純度 97.8 Vol %) である。燃料は一次空気と予混合され, 燃焼筒 (内径 100 mm) の軸中心に置かれた円管バーナに導かれ流速 U_{mix} で噴出する。バーナのまわりを同軸環状に平行空気が流速 U_2 で流れる。バーナ管は黄銅製で内径 8 mm, 先端リム厚さは 5 mm であり, バーナリム中央に幅 1 mm の同軸スリットが設けられ, ここから再循環域に気体吹出しが行われる。吹出し気体は空気, 燃料, あるいは, 混合気であり, 吹出し流量は任意に調節できる。再循環域およびその周辺においてガス組成を分析した。試料ガスの採取には内径 0.3 mm の石英管ガス採取ブ

* 昭和 62 年 3 月 7 日 北海道支部 28 期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 5 月 14 日。

^{*1} 正員, 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区 13 条西 8)。

^{*2} 正員, 北海道大学大学院。

ロープを使用し、ガスクロマトグラフにより定量分析した。分析結果から空気比の分布が求められた。再循環域に関しては、その長さ (l_{RZ}) および滞留時間 (τ_{re}) の測定を行った。 l_{RZ} 測定には、等温流 (非燃焼時) の場合は線香煙、火炎流では食塩水をトレーサとして用い外径 0.8 mm のステンレス管からトレーサを吹出した。トレーサが上流、下流双方に拡散する位置を l_{RZ} とした。 τ_{re} の測定はトレーサ法により行った。トレーサは等温流では線香煙、火炎流では食塩水を用い、トレーサの濃度減衰を等温流では Ne-He ガスレーザ光の散乱光、火炎流では Na の炎色により求めた。トレーサは、しゃ断弁を経てバーナリム面上の小孔から再循環域に吹出した。

3. 実験結果および考察

3-1 火炎存在領域および火炎形状 火炎存在領域は混合気流速 U_{mix} と空気比 ϕ により表される。燃料希薄および過濃側において火炎が完全に消失した時を吹消えとし、それぞれ上限および下限とした。火炎は上限線と下限線とに囲まれた領域に存在する。図 2 は吹出しを伴わない場合の火炎存在領域、図 3～5 は吹出しを伴う場合の火炎存在領域を示す。吹出し流量は燃料の場合 4 mL/s、空気の場合 25 mL/s、混合気は 29 mL/s であり、予混合気流量のおよそ 1/5～1/50 に

相当する。この時の吹出し流速 U_{inj} はそれぞれ 0.1, 0.61, 0.7 m/s である。

火炎形状は火炎基部における火炎面の位置により、内周炎③、外周炎④、主火炎が吹き飛んでいるバーナ口上炎⑤、そして、正常火炎とバーナ口上炎を繰返す振動炎⑥、また、混合気吹出しによりバーナリム上に形成される補助火炎⑦の 5 種に分類した。図 2～5 にこれらの出現領域を示した。いずれの場合においても内周炎、外周炎、振動炎、バーナ口上炎は観察される。気体吹出しの有無を比較すると、空気吹出し (図 3) では火炎の出現領域が吹出しなしの場合 (図 2) とほぼ一致し、火炎安定範囲もほとんど変わらない。燃料吹出し (図 4) では上限吹消え最大混合気流速 U_{mix} が大きくなり、火炎安定範囲が広がる。図 4 の条件と同じ吹出し燃料流量で、しかも、空気流量を図 3 と同じに設定し、混合気吹出しを行った場合 (図 5)、吹消え時の U_{mix} は燃料吹出し時よりもさらに大きくなり、火炎安定範囲が大きく広がる。

3-2 火炎安定範囲におよぼす吹出し流量の影響 二次空気流速を一定 ($U_2 = 26.8$ m/s) とし、吹出し流量を変化させた場合の火炎安定範囲への影響を調べた。その結果を図 6～8 に示す。図 6 は空気吹出し流量 q_{inj} を変化させた場合であるが火炎安定範囲はほとんど変化しない。図 7 は吹出し燃料量を変化させた結果で、 q_{inj} の増加によって、火炎安定範囲は広がる。図 8 に示したのは混合気吹出しの場合で、このとき吹出し混合気流量は空気流量を 25 mL/s 一定にして、燃料を変化させた。火炎安定範囲は燃料割合が増すほど広くなり、補助火炎も発達する。 $\phi_{inj} = 0.13$ の混合気吹出しでは実験範囲の U_{mix} に対して補助火炎の吹消えは生じなかった。

これらのことから、気体吹出しの作用はつぎのように考えることができる。すなわち、本実験の吹出し流

図 1 実験装置

図 2 火炎存在領域 (吹出しなし)

図 3 火炎存在領域 (空気吹出し)

図 4 火炎存在領域 (燃料吹出し)

図 5 火炎存在領域 (混合気吹出し)

図 6 空気吹出しの影響

図 7 燃料吹出しの影響

図 8 混合気吹出しの影響

(a) 吹出しのない場合 (b) 吹出しの場合

図 9 バーナリム後流の流れの様子

速の範囲や吹出し位置では再循環域を大きく破壊することはなく、また、再循環域に直接吹出し気体が入流するのでなく、いったん、二次空気側に流れ、二次空気側から交換層⁽³⁾を通し再循環域内に流入する。このため、空気吹出しの場合、吹出しを伴わないときと二次空気側からの全空気流入量は同じになる。一方、燃料、あるいは、混合気を吹出した場合は、吹出し気体が再循環域内に流入され保炎性が強化される。とくに、混合気を吹出した場合には、再循環域内の空気比の変化による保炎性の向上に加えて、吹出し混合気によって形成される補助火炎が再循環域内にエンタルピーを供給する効果をもつため、大きく火炎安定範囲が広がると考えられる。図9に吹出し気体の流れを模式的に、吹出しのない場合と比較して示す。

3.3 再循環域の長さ (l_{RZ}) 図10に吹出しの有無による l_{RZ} の変化を等温流および火炎流において測定した結果を示す。 l_{RZ} は U_{mix} が増すと減少し、また、等温流、火炎流ともに吹出し量による影響はないことがわかる。

3.4 滞留時間 (τ_{re}) 図11に等温流において吹出しがない場合、 U_2 および U_{mix} に対する τ_{re} の測定

図 10 再循環域長さ

図 11 滞留時間 (U_2 および U_{mix} の影響)

結果を示す。 τ_{re} は U_2 および U_{mix} の増加により減少している。また、図12は吹出し量の影響をみたものである。吹出し量を変化させても τ_{re} には影響しないことがわかる。図13の火炎流においても吹出しによる τ_{re} は変化がないことが示される。

3.5 燃料拡散および再循環域内の平均空気比 本研究で対象としている同軸噴流火炎やディスクに保持される拡散火炎⁽⁷⁾において、保炎特性は再循環域における混合気と平行空気との混合過程に強く依存する。ここで、再循環域内の平均空気比を求め、吹出しを

伴う場合の保炎機構を検討する。図14に吹き出しの有無が燃料拡散状態におよぼす影響を等温流において調べた結果を示す。この実験では、燃料の代わりにCO₂を用いた。実験範囲内の吹き出し量の場合、再循環域内部の燃料濃度はほぼ一様であるとみなすことができる。したがって、再循環域内の平均空気比(ϕ_{RZ})を求めるのに再循環域内の一点の値をもって代表することができる。等温流では ϕ_{RZ} を求める代表測定点をバーナリム端から軸方向に3mm、内周端から半径方向に2.5mmの位置、また、火炎流では5, 2.5mmの位置とした。

図15および図16に等温流および火炎流の吹き出しがない場合と空気を吹き出した場合、図17には混合気を

吹き出した場合の再循環域内の平均空気比の測定結果を示す。等温流と火炎流両者の ϕ_{RZ} 曲線は空気を吹き出した場合と吹き出しがない場合とはほぼ一致しており、吹き出し空気は再循環域内の空気比に直接影響を与えていないことが明らかである。混合気を吹き出した場合は吹き出しがない場合より ϕ_{RZ} 曲線が濃くなり、吹き出しの影響が大きい。

3.6 物質交換量 吹き出しのない場合、再循環域と平行空気流および混合気流との物質交換は両者の境

図12 滞留時間(等温流での q_{inj} の影響)

図13 滞留時間(火炎流での q_{inj} の影響)

図14 燃料拡散の状況

図15 平均空気比(等温流, 空気吹き出し) 図16 平均空気比(火炎流, 空気吹き出し) 図17 平均空気比(混合気吹き出し)

界に存在するせん断層（交換層）を通して行われる。このメカニズムは、火炎流と等温流で同じと考えられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、ここで示した再循環域の平均空気比、再循環域の長さ、滞留時間によぼす吹出しの影響から混合メカニズムは吹出しの有無によって影響されないものと考えられる。すなわち、バーナリム後流域における再循環域に関する混合モデル⁽³⁾が本研究の場合にも適用できる。そこで、本研究ではまず等温流において解析を進め、吹出し気体の再循環域への流入割合を求める。再循環域における二次空気と混合気との物質交換の結果、再循環域の平均空気比はプロパンに対して次式で表される。

$$\phi_{RZ} = \frac{(q_{1a} + q_2)}{23.8 \cdot q_f} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q_{1a} 、 q_f は各々再循環域へ流入する混合気中の空気および燃料流量、 q_2 は平行空気側から流入する空気流量である。空気吹出しの場合、再循環域内の空気比が影響されないことから、吹出した気体は二次空気側に流れ、二次空気側から交換層を通し再循環域内に

流入するため、再循環域内での物質交換量 q_2 、 q_{mix} （混合気側交換量、 $= q_{1a} + q_f$ ）は吹出しがない場合と同じになる。したがって、

空気吹出しの場合：

$$\phi_{RZA} = \frac{(q_{1a} + (q_2 - \alpha q_{inj}) + \alpha q_{inj})}{23.8 \cdot q_f} \dots \dots \dots (2)$$

燃料吹出しの場合：

$$\phi_{RZF} = \frac{(q_{1a} + q_2 - \alpha q_{inj})}{23.8 (q_f + \alpha q_{inj})} \dots \dots \dots (3)$$

混合気吹出しの場合：

$$\phi_{RZM} = \frac{(q_{1a} + (q_2 - \alpha q_{inj}) + \alpha q_{inj}(1-x))}{23.8 (q_f + \alpha q_{inj} \cdot x)} \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 α は吹出し流量 q_{inj} 中の再循環域への流入割合、 x は吹出し混合気中の燃料割合である。図 18 および図 19 に燃料、混合気を吹出した場合、式 (3)、(4) による吹出し気体の全量が再循環域へ流入 ($\alpha=1$) するとした場合の理論平均空気化 ($\phi_{RZtheo.}$) と実験結果 ($\phi_{RZexp.}$) を重ねて示す。吹出しによる再循環域内の平均空気比は、理論平均空気比より常に大きい値を示しており、吹出し気体の一部は再循環域内に流入していないことを示している。この結果より吹出し

図 18 平均空気比（燃料吹出し）

図 19 平均空気比（混合気吹出し）

図 20 流入量（燃料吹出し）

図 21 流入量（混合気吹出し）

図 22 流入割合 (燃料吹き出し量の影響)

図 23 流入割合 (吹き出し量の空気比の影響)

流量の再循環域への流入量が求められる。一例を図 20 および図 21 に示す。図 20 は燃料吹き出し流量を変化させた場合、図 21 は混合気吹き出し流量を 30 mL/s 一定にし、その空気比 ϕ_{inj} を変化させた場合、吹き出した流量の再循環域への燃料流入量である。これらの結果において流入量には約 10% のばらつきが見られるが、これらの平均値をとって流入割合を q_{inj} および ϕ_{inj} に対して求めると図 22 および図 23 のようになる。両者とも流入割合はほとんど変わらない。このとき、いずれも α は約 80% であった。

4. 結 論

以上の結果を要約すると

(1) 火炎の安定範囲は空気吹き出しの場合には、吹き出しがない場合とほぼ変化しないが、燃料および混合気を吹き出した場合、吹き出しがない場合より広がる。とくに希薄限界が広がる。

(2) 少量の燃料、あるいは、燃料を含む混合気吹き出しにより火炎安定範囲を大きく拡大することができる。同じ燃料量を再循環域に供給するならば混合気として吹き出したほうが有効である。このとき、吹き出し燃料量が多いほど火炎安定範囲は広がる。

(3) 空気のみを吹き出した場合には、吹き出しがない

場合と再循環域内の平均空気比はほぼ一致し、再循環域の空気比に影響を与えない。これは吹き出し気体が再循環域内に直接入らず、二次空気側へいったん流れ、平行空気とともに再循環域へ流入するためと考えられる。

(4) 再循環域の長さ、および滞留時間はいずれも吹き出しの影響を受けない。このことは、混合気側、二次空気側双方から再循環域への物質交換量は影響されないことを意味し、従来の物質交換モデルの適用が可能となる。

(5) 再循環域へ流入する吹き出し気体の流入割合は実験範囲の q_{inj} , ϕ_{inj} に対して約 80% であった。

なお、本研究に際して協力のあった本学技官 山根清隆氏、学部生 門田茂君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Plee, S. L. and Mellor, A. M., *Combust. Flame*, 35 (1979), 61.
- (2) Winterfeld, G., *Proc. 10th. Symp. (Inter.) on Combust.*, (1965), 1265.
- (3) 伊藤・佐々木・深沢, 機論, 43-374 (昭 52), 3868.
- (4) 伊藤・佐々木, 機論, 44-383 (昭 53), 2478.
- (5) 伊藤・佐々木, 機論, 50-449, B (昭 59), 142.
- (6) 辻・岡野, 東京大学航空研究所集報, 3 (昭 37), 78.
- (7) Minx, E., *VDI Ber.*, 199 (1972), 78.