衝突噴流場に形成された乱流予混合火炎および
乱流非予混合火炎の構造と NO_x 排出特性*吉田 亮^{*1}, 小谷良信^{*1}, 廣瀬宏一^{*2}Structure and NO_x Formation Characteristics of Turbulent Premixed Flame
and Turbulent Nonpremixed Flame Produced by Opposed Jet Burner

Akira YOSHIDA, Yoshinobu KOTANI and Koichi HIROSE

Turbulent nonpremixed (diffusion) flames are employed in many industrial burners or practical combustors, because they are stable over a wide range of turn-down ratio. With currently increasing concern for pollutant emissions, these flames have become unamenable because in general the combustion process is difficult to be controlled to reduce emissions of NO_x and soot. In the present study, turbulent nonpremixed flame was produced in a highly turbulent flow field achieved by an opposed jet burner. It was found that with gas sampling technique, emission characteristics and mixture fraction profiles of this flame were same as those of the premixed flame due to rapid mixing of fuel and air. This fact suggests that the opposed jet combustion reduces the pollutant emission from Diesel engines and gas turbines.

Key Words: Pollutant, Diffusion Combustion, Combustion Products, Premixed Combustion, Nonpremixed Flame, Distributed Reaction Zone, NO_x

1. はじめに

工業的には安定範囲が広く、バーナ構造が比較的単純な非予混合(拡散)火炎が用いられることが多いが、局所的に高温・高濃度場ができやすく、 NO_x 、すすなど汚染物質の排出制御が難しいということがあり、一部では予混合燃焼化への動きもある。一方で、燃焼器の小形化に伴う燃焼の高負荷化は、航空機用ジェットエンジンや産業用ガスタービン等に限らず、最近では民生用燃焼機器(給湯器、暖房器具等)の著しい小形化のためにその要求は高まっているが、それに伴う燃焼温度の上昇のために低 NO_x 化が極めて困難な問題となっている。

一般に NO_x は、LNG といった窒素化合物を含まない燃料の燃焼過程では空気中の N_2 と O_2 の反応により生成されるサーマル NO_x が主体である。そのため火炎温度を下げることで低 NO_x 化に対して効果的であり、それを行う方法として燃焼温度の制御が比較的容易な予混合燃焼がすでに実用化の域に達してい

る⁽¹⁾。しかしながら、予混合火炎は本質的に安定範囲が狭く、また逆火のおそれがあり、実際には安定性の広い拡散火炎と組合せた燃焼方式が多い。

現在工業的に使用されている高負荷燃焼器のほとんどは乱流燃焼を用いているが、乱流燃焼現象は完全には理解されていないのが現状である。工業用予混合燃焼器では、その大半がしわ状層流火炎が形成されていると考えられるが、こうした燃焼器をさらに高負荷化するうえで注目されるのが分散型火炎である。しかし分散型火炎は、未燃混合気の乱れが強く、かつ乱れのスケールが小さい場合に形成されるが、実際の燃焼器でこの火炎が形成されるほど強い乱れは用いられておらず、分散型火炎構造を明らかにした研究は極めて少ない⁽²⁾。また、取扱いの面で優れる拡散火炎あるいは非予混合火炎においては、燃料と酸化剤の拡散・混合過程に及ぼす乱れの影響、あるいはそれによって火炎構造がどのように変化するのかについては、実用的にも燃焼学的にも非常に興味深い。

最近になって、対向噴流バーナによって極めて強い乱れを伴った高速の未燃混合気中に安定な乱流予混合火炎が形成され、混合気噴流速度によって分散型火炎、またはしわ状層流火炎から分散型火炎への遷移火炎が形成されることが明らかになった^{(3)~(5)}。また、このバ

* 原稿受付 1997年4月28日。

^{*1} 正員、東京電機大学工学部 (〒101 東京都千代田区神田錦町2-2)。^{*2} 東京電機大学大学院。

バーナを用いて、分散型火炎における NO_x の排出特性について詳細に調べられてきた⁽⁶⁾。しかし、このバーナは水冷されているという点で、 NO_x の生成に及ぼすバーナ壁面での熱損失の影響を無視することができない。

そこで本研究では、セラミック製の対向噴流バーナ⁽⁷⁾を用い、形成される乱流予混合火炎の構造と NO_x の排出特性について明らかにした。さらに、本研究では高強度乱流中に形成される乱流非予混合火炎について注目し、対向噴流バーナ中に乱流非予混合火炎を形成させ、燃焼生成物の排出特性および燃焼場における混合の状態について明らかにした。

2. 実験装置および方法

本研究で使用した対向噴流バーナの基本的な構造は、これまでに報告されてきたもの⁽³⁾⁻⁽⁷⁾と変わらない。図1に予混合火炎を形成させるために用いられたバーナの断面図を示す。同一軸上に12 mmの間隔で対向して設置された内径10 mm、長さ500 mmの2本の混合気供給管から等量の未燃混合気が吹出し衝突する。供給管内の流れは十分に発達した乱流であり、乱流噴流が高速で衝突することにより、強い乱れを伴った衝突噴流場が形成される。供給管内には外径3 mmのインナロッドが挿入されており、噴流が環状に

なることにより衝突噴流場が安定に保たれる。空気流に再循環領域が形成されるのを防ぐために、供給管出口はベルマウス形状に加工されている。また形成される火炎と周囲大気との混合を防ぐために、供給管出口には直径160 mmの平板が取り付けられ、その材質はバーナ上下方向の熱損失をできるだけ抑えるためにセラミックスとした。

非予混合燃焼時は、図1の円内に示されるようにインナロッドの代わりに内径2 mm(外径3 mm)の管が装着され、ここに燃料、その外側の管(内径16 mm)に空気をそれぞれ供給する。バーナ中央でそれぞれが衝突することによって強い乱れを伴った複雑な衝突噴流場が形成される。空気供給管および燃料供給管の間隔はそれぞれ14 mm、6.6 mmとし、燃料供給管の出口には金網(#30)が取り付けられている。

座標系は、いずれもバーナ中央を原点とし軸方向を X 軸、半径方向を R 軸としている。なお、燃料には工業用純プロパン(純度97%)を用いた。予混合燃焼では、当量比および混合気供給管断面で見積もった未燃混合気の噴流速度 V_f をそれぞれ変化させ、さらに線径0.1 mmのPR 40-20熱電対を用いて測定された燃焼場の平均温度 T をもとに、これらのパラメータが NO_x の排出特性に及ぼす影響について調べた。非予混合燃焼では、燃料と空気の供給流量比より計算される全体の空気比 λ を1.0に固定して、空気供給管断面で見積もった空気噴流速度 V_a を変化させ、形成された乱流非予混合火炎の燃焼生成物の排出特性および燃焼場の混合状態について明らかにした。

本研究で用いたガス採取・分析系を図2に示す。吸引口0.8 mmの水冷式ステンレス製プローブを用いて燃焼ガスをサンプリングし、化学発光法方式、非分散形赤外線吸収式、磁気圧式によるそれぞれの分析計によって $\text{NO}_x(\text{NO}+\text{NO}_2)$ 、 CO および CO_2 、 O_2 の濃度を測定した。また、先端に100 μm のオリフィスを

Fig. 1 Opposed jet burner (for premixed flame)

Fig. 2 Gas sampling and analysing system

もつ石英製プローブを用いてガスサンプリングを行い、TCD(Thermal Conductivity Detector)検出器をもつガスクロマトグラフによる成分濃度の測定も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 対向噴流火炎の光学的観察 図3(a), (b)に対向噴流火炎の直接写真を示す。図3(a)は混合気噴流速度 $V_j=19.9$ m/s, 当量比 $\phi=0.95$ の場合に形成される乱流予混合火炎, 一方図3(b)は空気噴流速度 $V_a=10.3$ m/s, 空気比 $\lambda=1.0$ の場合に形成される乱流非予混合火炎である。写真の縮小率は異なるが両者とも火炎の時間平均的な形状は環状である。火炎の内径は図3(a), (b)それぞれ20 mm および28 mm であり, 外径は56 mm および62 mm である。 V_j および V_a を増加するといずれの火炎とも内径は変化しないが, 外径は徐々に増加する。

図4(a)~(d)は, いずれも $\lambda=1.0$ において V_a が5.2 m/s, 10.3 m/s, 15.2 m/s および19.9 m/s の場合に形成される乱流非予混合火炎のシュリーレン写真である。本バーナで形成される乱流予混合火炎のシュリーレン写真は, 文献(5)に載せてある。いずれの V_a においても, 燃料の吹出し口近傍の燃料噴流中に存在する渦のスケールは非常に小さく, これによって急速に燃料と空気の混合が行われているものと考えられる。噴流速度の最も小さい $V_a=5.2$ m/s の場合でも, 火炎帯全体のシュリーレン像は, 通常のしわ状層流火炎に比較してあまり鮮明ではない。噴流速度が増加するにつれてシュリーレン像はさらに不鮮明となる。このことは燃焼領域に存在する密度勾配がしわ状

(a) Turbulent premixed flame ($\phi=0.95$, $V_j=19.9$ m/s)

(b) Turbulent nonpremixed flame ($\lambda=1.0$, $V_a=10.3$ m/s)

Fig. 3 Direct photographs of opposed jet flame

層流火炎よりも小さいことを意味している。したがって, ここで形成されている火炎の構造は, しわ状層流火炎が微細渦によって破壊され, 明確な火炎面が存在せず, 分散型火炎に近いものと考えられる。

3.2 乱流予混合火炎の燃焼生成物排出特性

混合気噴流速度 $V_j=19.9$ m/s および当量比 $\phi=0.95$ の条件で形成された乱流予混合火炎の上下の平板の中央 ($X=0$ mm) において, 半径方向に測定された平均温度および化学種の濃度分布を図5(a), (b)に示す。ここでは NO_x を NO および NO_2 とし, NO_2 濃度はコンバータを介した化学発光法方式の分析計で測定される $\text{NO}_x(\text{NO}+\text{NO}_2)$ 濃度から, NO 濃度を差引いて求めている。

NO_x 濃度は, 火炎帯から燃焼ガス領域にかけて単調に増加する。火炎帯内での NO 濃度は低く, わずかながら中央付近で極大を示している。しかし, 火炎帯

(a) $V_a=5.2$ m/s

(b) $V_a=10.3$ m/s

(c) $V_a=15.2$ m/s

(d) $V_a=19.9$ m/s

Fig. 4 Schlieren photographs of nonpremixed flame

(a) Distributions of mean temperature, NO_x , NO and NO_2 (b) Distributions of O_2 , CO_2 and CO

Fig. 5 Distributions of temperature and chemical species in premixed flame

外縁から燃焼ガス領域にかけてその濃度は、 NO_2 の還元および 1900 K 程度に保たれる燃焼ガス中での NO の生成により、急激に増加する。

$V_j = 20 \text{ m/s}$ 付近では、瞬時温度の測定の結果⁽⁵⁾ より火炎帯の未燃混合気側ではしわ状火炎の特徴をもつことが明らかにされている。そのためこの領域では変動温度は高く、高温の燃焼ガスと未燃混合気が存在する。このような場での水冷式プローブによるサンプルガスの採取では、高温のサンプルガスが急冷される際に生成される HO_2 ラジカルによる NO の NO_2 への酸化が指摘されている⁽⁶⁾。したがって、この領域における NO および NO_2 の濃度分布は、あくまでも定性的なものとするべきであるが、実際には火炎帯内でかなりの NO が生成されていると考えられる。

O_2 および CO_2 濃度は、火炎帯内で R の増加とともにそれぞれ減少および増加し、火炎帯外縁でほぼ一定値に達する。また、この値は平衡計算により求められた平衡値にほぼ一致する。

CO 濃度は、火炎帯内で極大を示した後、 R 軸に沿ってゆっくりと減少する。これは CO の酸化反応が主たる燃焼反応に比べ遅いためであり、燃焼ガス領域で

Fig. 6 Effect of equivalence ratio on NO_x concentration

の CO の酸化とともに CO_2 濃度は若干増加する。

図 6 は $V_j = 10 \text{ m/s}$, $X = 0 \text{ mm}$ の条件の下、火炎帯外縁で測定された NO_x 濃度を ϕ に対してプロットしたものである。なおそれぞれの ϕ に対し、未燃混合気中に窒素を富化し、火炎最高温度 T_{max} が一定となるように調節した。図 6 中に示されたいずれの T_{max} に対しても、 NO_x 濃度は ϕ の増加とともに増加し、 ϕ が燃料過濃側で最大となることが確認できる。特に T_{max} が 1700 K の場合には、 NO_x 濃度のピークは顕著に現れ、約 $\phi = 1.3$ に存在する。これは量論混合比付近で最大となるゼルドヴィッチ機構ではなく、プロンプト機構によって生成される NO_x の特徴である。

対向噴流バーナで形成される火炎の構造は V_j によって変化し、 V_j が 10~20 m/s の場合、火炎帯未燃混合気側ではしわ状火炎の特性をもち、一方火炎帯燃焼ガス側では分散型火炎構造をとる遷移火炎が形成される。したがって、火炎帯未燃混合気側では大きなスケールの渦の影響を受けると同時に小さなスケールの渦の影響も受けるが、火炎帯の内部構造はこれらの渦によって破壊されず、局所的に高温・高濃度場が形成されやすくなる。この場合 NO_x の生成は、一般に温度依存性の強いゼルドヴィッチ機構によるサーマル NO_x が支配的となるが、本バーナでは滞留時間が短いため、この領域でのゼルドヴィッチ機構による NO_x の生成量は少ないものと考えられる。一方、火炎帯燃焼ガス側ではいずれの V_j とも火炎帯は分散型構造で構成され、ここでは半径方向に伸長を受けたスケールの小さな渦によって混合が著しく促進されるた

Fig. 7 Effect of mixture velocity on NO_x concentration

め、局所的な高温・高濃度場は形成されず、したがってゼルドヴィッチ機構による NO_x の生成は抑制されると考えられる。その結果、図 6 に示されたように $V_j=10$ m/s の火炎帯で生成される NO_x は、プロンプト NO_x が支配的になったものと考えられる。

図 7 は $X=0$ mm において、 V_j を 10 m/s, 20 m/s および 30 m/s に変化させたときの火炎帯外縁で測定された NO_x 濃度を、 ϕ に対してプロットしたものである。 V_j の増加とともに測定された ϕ の範囲が狭くなるのは、火炎の安定範囲が狭くなるからである。しかしながら、いずれの V_j においても ϕ に対する NO_x 濃度の分布傾向はほぼ一致し、 ϕ が燃料過濃側で NO_x 濃度が最大となるプロンプト NO_x の特徴を示していることが確認できる。 $V_j=30$ m/s では、本バーナで形成される火炎は、火炎帯全域にわたって分散型火炎構造で構成されることから⁽⁵⁾、分散型火炎において NO_x の生成にはプロンプト NO_x 機構の寄与が支配的であるといえる。

3・3 乱流非予混合火炎の燃焼生成物排出特性

図 8(a), (b) は、対向噴流バーナで形成される乱流非予混合火炎の上下平板間 ($X=0$ mm) における化学種の半径方向の濃度分布を示す。なお実験の条件は、いずれも $\lambda=1.0$ 、図 8(a) は $V_a=5.2$ m/s、(b) は $V_a=15.2$ m/s である。

濃度分布の傾向は V_a によらずほぼ同じであり、まず未燃領域 ($R<14$ mm) において燃料噴流中に空気が拡散し、急速に混合が行われるために O₂ 濃度は上昇する。そして火炎帯内縁で O₂ 濃度は極大を示した後、 R の増加とともに減少し、それと同時に O₂ 以外

Fig. 8 Distribution of chemical species in nonpremixed flame

の燃焼生成物濃度が増加する。O₂ および CO₂ 濃度は、火炎帯外縁でほぼ一定値に達し、CO 濃度は火炎帯外縁付近で極大を示した後、燃焼ガス領域で CO₂ へと酸化されるために減少する。

NO_x 濃度は、火炎帯内縁から燃焼ガス領域にかけて単調に増加する。火炎帯内での NO 濃度はごくわずかであり、そのため火炎帯における NO_x は大部分が NO₂ である。3・2 節で述べたように、水冷式プローブを用いる場合はプローブ内での NO から NO₂ への変換が指摘されているために、NO および NO₂ の挙動については定性的と見たほうがよいであろう。

いずれにせよ、未燃領域を除いたこれらの化学種の濃度分布傾向は、図 5 に示された乱流予混合火炎のものと極めてよく類似していることがわかる。そこで燃焼場における燃料と空気の混合状態を定量的に把握するために、混合分率 f を導入した。 f の定義にはいくつかあるものの⁽⁹⁾、ここではサンプル容積中に占める燃料要素の質量分率として定義した。すなわち f は次式で表され、

$$f = (m_c + m_H) / m_{\text{mix}}$$

ここで、 m_i は原子 i の質量、添字の mix はサンプル容積中のすべての原子の質量を表す。なお f の算出には、ガスクロマトグラフによって測定される 13 成

Fig. 9 Radial distribution of mixture fraction

分の化学種濃度を用いた。

図9は、 $X=0$ mm, $\lambda=1.0$ の条件の下、 V_a が 5.2 m/s および 15.2 m/s における半径方向の f の分布を示したものである。なお、完全予混合状態での $\lambda=1.0$ に対応する f の値 f_{stoic} は 0.062 であり、図9中に破線で示した。いずれの V_a とも、未燃領域で R の増加とともに燃料と空気の乱流拡散が生じるために f は急激な減少を示す。そして $R=18$ mm 付近で f はほぼ f_{stoic} に達し、完全に均質な混合状態となつてから、その後 R 軸に沿って f は一定となる。注目すべき点は、燃焼反応が火炎帯内縁付近を除くほとんどの領域でまさに予混合火炎と同じ混合状態で行われていることである。

図10は、 $\lambda=1.0$, $V_a=5.2$ m/s における火炎帯内縁 ($R=14$ mm) および火炎帯外縁 ($R=32$ mm) での、 X 軸方向に対する f の分布を示したものである。燃料と酸化剤の乱流拡散領域に存在する火炎帯内縁では、 f は $X=0$ において極大を示す。一方火炎帯外縁では、 f は X 軸方向に依存せずほぼ f_{stoic} に達し、 X 軸方向に対し一次元的な分布をもつことが確認された。このことは、本バーナにおいて X 軸方向の混合が極めて速く、また図9に示された結果と合せることにより、空間的に均質に混合された場が形成されていることを示している。

通常、実用的に用いられているほとんどの非予混合火炎(拡散火炎)では、燃焼反応は燃料と酸化剤の拡散過程により両者の界面で行われる。一方、本バーナで形成される乱流非予混合火炎では、燃焼反応が行われる以前に急激な速度で燃料と酸化剤の乱流拡散が生じ、これらがほぼ均質に予混合化されているという点で、本質的に前者とは異なる。そのため、もはや燃料と酸化剤の界面といったものは存在しなくなり、非予

Fig. 10 Axial distribution of mixture fraction

混合火炎特有の局所的な高温・高濃度場は形成されない。したがって、図8に示された燃焼生成物の排出特性が、同バーナで形成される乱流予混合火炎のものに近くなったと考えられる。

このような乱流混合が極めて速い乱流非予混合火炎の特性を実験的に示した研究例は極めて少なく、また予混合燃焼に匹敵する排出ガス制御の可能性があるという点では、ディーゼルエンジンあるいはガスタービンの排気汚染物質低減に有効であろうと思われる。

4. 結 論

対向噴流予混合バーナを改良し、対向噴流非予混合火炎を形成することに成功し、以下の結論を得た。

- (1) 対向噴流予混合火炎では滞留時間が短いためにゼルドヴィッチ機構によるサーマル NO_x の生成量は少なく主にプロンプト NO_x によって生成される。
- (2) 対向噴流非予混合火炎においても生成される NO_x はおもにプロンプト NO_x を起源としている。
- (3) 対向噴流予混合火炎の火炎形状と対向噴流非予混合火炎の形状は全体の流量および当量比が等しい場合にはほとんど変化しない。
- (4) 混合分率より、対向噴流非予混合火炎では化学反応速度に比較して乱流混合が速いために、燃料と空気は別々に供給されているにもかかわらず、形成される火炎は予混合火炎と同様な構造をもつことが明らかとなった。これは分散型非予混合火炎の特徴といえる。
- (5) 排気汚染物質の制御が難しいディーゼルエンジンやガスタービン燃焼器でも分散型非予混合火炎を利用することにより排気ガスの清浄化が可能であることが示された。

文 献

- (1) 小沢靖, 日本ガスタービン学会誌, **23**-89(1995), 54-60.
 - (2) Katuki, M., Mizutani, Y., Yasuda, T., Kurosawa, Y., Kobayashi, K. and Takahashi, T., *Combust. Flame*, **82** (1990), 93-105.
 - (3) Yoshida, A., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1988), 1471-1478.
 - (4) Yoshida, A., Narisawa, M. and Tsuji, H., *Proc. 24th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1992), 519-525.
 - (5) 吉田亮・成澤道則・辻 廣, 機論, **58**-552, B(1992), 2571-2576.
 - (6) 吉田亮・成澤道則・辻 廣, 機論, **58**-553, B(1992), 2884-2889.
 - (7) 吉田亮・内倉隆久・伊藤仁・小谷良信, 第 32 回燃焼シンポジウム前刷集, (1994), 276-278.
 - (8) 堀守雄, 第 19 回燃焼シンポジウム前刷集, (1981), 287-289.
 - (9) Bilger, R. W. (Libby, P. A. and Williams, F. A., eds.) *Turbulent Reacting Flows*, Chapter 3, Topics in Applied Physics, (1980), 65, Springer-Verlag.
-