

旋回噴流燃焼器のすすとNO_xの測定および 数値解析による火炎構造の検討*

金川裕司^{*1}, 山本和弘^{*2}, 大島久治^{*1}, 山下博史^{*2}, 上島光浩^{*3}

Soot and NO_x Measurement in a Cyclone-jet Combustor and Numerical Simulation on Flame Structure

Yuji KANAGAWA, Kazuhiro YAMAMOTO^{*4}, Hisaharu OSHIMA,
Hiroshi YAMASHITA, and Mitsuhiro UEJIMA

^{*4} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, we measured soot and NO_x in a cyclone-jet combustor. A laser induced incandescence (LII) technique was applied to obtain instantaneous soot concentration. As for NO_x emission, premixed and non-premixed combustion were examined with changing equivalence ratio. To discuss the flame structure and flame characteristics in detail, numerical simulation on a jet diffusion flame was conducted. The location of ignition point was moved to discuss the effect of mixing between fuel (propane) and air in combustor. The flame index was obtained to estimate the premixed and non-premixed combustion region. The mixedness was also examined to distinguish the region of lean or rich premixed mixture. Results show that, when the air volume rate is increased, EINO_x in non-premixed combustion is reduced to the level of premixed combustion. The soot is not detected when the equivalence ratio is less than 2. Based on numerical simulation, the degree of propane and air mixing is increased when the location of the ignition point is moved downstream. Resultantly, the local equivalence ratio is decreased with lower flame temperature. Hence, the low level of NO_x emission in a cyclone-jet combustor is explained by this partial premixing effect of fuel and air.

Key Words : Diffusion combustion, Gaseous Fuel, Burner, Pollutant, Combustion Products

1. 緒 言

一般に、拡散燃焼は実用燃焼器に広く用いられている燃焼形態であるが、燃料と酸化剤をあらかじめ混合して燃焼させる予混合燃焼とは異なり、燃料流量と空気流量から与えられる総括当量比を小さくしても、量論的位置で火炎が形成されるため火炎温度を制御できず、低NO_x燃焼が困難である。そこで、NO_x排出量を抑制するために様々な方法が検討されてきた。例えば、濃淡燃焼^{(1)~(4)}、炉内循環渦を利用した燃焼^{(5)~(8)}、振動燃焼⁽⁹⁾などが挙げられる。また最近では、管状火炎バーナを利用した燃料と酸化剤の急速混合によるNO_x抑制

技術の検討が行われている^{(10)~(12)}。

一方、我々の研究グループでは、旋回噴流燃焼器を用いて一連の研究を行ってきた^{(13)~(18)}。小沼らは、この燃焼器を用いて特に拡散燃焼に関する実験を行っており、燃料と酸化剤（空気）を別々に供給した拡散燃焼でも、予混合燃焼と同程度のNO_x排出特性を示すことを指摘した^{(19)~(21)}。この現象は次のように考えられる。旋回噴流燃焼器では、燃焼器底部にある旋回流ノズルによってリング状のパイロット火炎ができる。このパイロット火炎は主噴流に火種を供給し、燃焼領域は下流にいくほど次第に噴流の中心部へと拡大していく。したがって、燃料と空気を別々のノズルから供給しても着火までに時間的な遅れがあるため、燃料と空気の混合が促進され（部分予混合化）、予混合燃焼と同程度の低NO_x燃焼が可能になるというものである。しかしながら

*原稿受付 2007年 月 日。

^{*1}名古屋大学大学院（〒464-8603名古屋市千種区不老町）。

^{*2}正員、名古屋大学大学院工学研究科。

^{*3}正員、東京都立産業技術高等専門学校。

E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp.

実験によって計測できるデータには限りがあるため、旋回噴流燃焼器における予混合化や、火炎構造についての詳細な議論は不十分であった。また、すす濃度の測定は行っておらず、低NO_x燃焼が可能となってもすすの排出も同時に抑制できているかどうかは不明であった。

そこで本研究では、旋回噴流燃焼器を用いて形成される燃焼場のすす濃度の計測をレーザー誘起赤熱法 (Laser Induced Incandescence ; LII) により行った。NO_x 測定も行い、これまでの実験結果と比較した。また、旋回噴流燃焼器を模擬した噴流拡散火炎の数値解析を行い、火炎構造と燃焼特性を調べた。特に、着火源としたパイロット火炎の位置、総括当量比、空気流量などが燃焼場に与える影響について検討した。

2. 実験装置および実験結果

2・1 旋回噴流燃焼器 本実験で用いた旋回噴流燃焼器を図1に示す。旋回噴流燃焼器は円筒形で、側壁底部に内径4.0mmの2本の旋回流ノズルがあり、底部中心に主噴流ノズルが設置されている。主噴流ノズルの拡大図を図2に示すが、燃料と酸化剤(空気)の供給部については、内径2.0mmの燃料噴出口5個と、内径3.5mmの空気噴出口4個を直径20mmの主噴流供給口の内部に均等に配置した構造になっている。また、どの実験条件においても旋回流ノズルからは当量比0.7の予混合気を15 l/min (出口平均流速10 m/s) で流入させた。

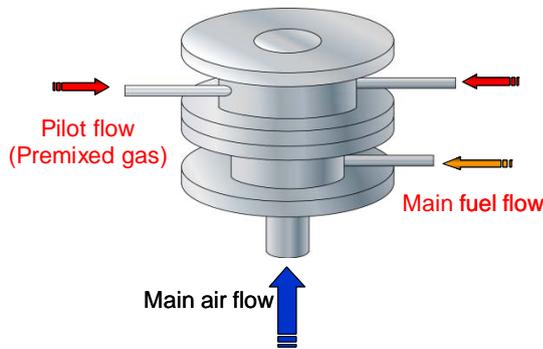


Fig.1 Cyclone-jet combustor

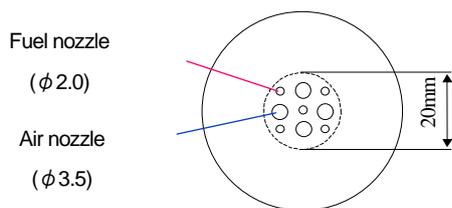


Fig.2 Main jet nozzle

2・2 計測方法 すす濃度の測定は、レーザー誘起赤熱法 (LII) により行った。その概略を図3に示す。光源にはNd:YAG レーザ (Spectra-Physics 製 GCR-230) の第2高調波 (波長 $\lambda=532$ nm) を用いた。レーザの出力は400 mJ/pulse である。2枚のシリンドリカルレンズによりレーザをシート状にしてバーナ中心軸上に照射し、2次元の計測を行った。検出系にはイメージンテンシファイア付き CCD カメラ (浜松ホトニクス製 C8484) を用いた。信号はパソコンに取り込み、データの解析を行った。CCD カメラの画素数は1024×1024 である。レンズにはバンドパスフィルター (透過中心波長450nm, 半値幅50nm) を取り付けた。イメージンテンシファイアのゲート幅は火炎からの自発光等のノイズを除去するため、50ns に設定した。座標は、燃焼器出口の中心を原点とし、高さ方向にz 軸、半径方向にr 軸をとる。測定範囲は $143\text{mm} \leq z \leq 177\text{mm}$, $-17\text{mm} \leq r \leq 17\text{mm}$ とし、撮影の空間分解能は $33\mu\text{m}$ である。

一方、燃焼ガス中のNO_x濃度測定には、NO_x測定装置 (Yanaco 製 ECL-88A) を使用した。

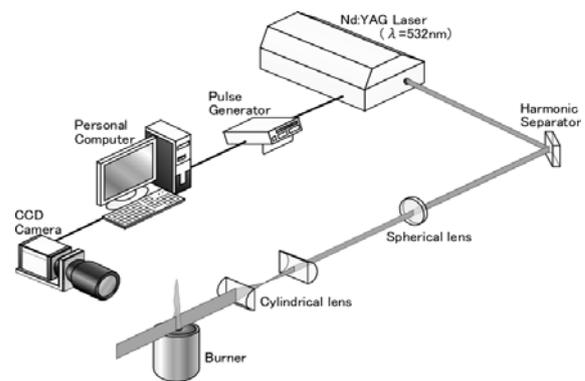


Fig.3 Schematics of LII setup

2・3 実験結果 図4にすすから得られた LII の信号強度の2次元画像を示す。それぞれ、空気流量 $Q=40$ l/min 一定とし、燃料と空気の流量から算出される総括当量比 ϕ は3, 4, 5の条件である。異なる時刻に計測された瞬時の画像を各条件について2つ示している。これによると、すすの存在領域は偏在しており、その時間変動も大きいことがわかる。また、総括当量比が大きいほど LII 信号も強くなった。一般に LII 信号はすすの体積分率にほぼ比例するので、総括当量比が大きくなるほどすすの濃度も高くなることがわかった。次に、空気流量を $Q=30, 40, 50, 60$ l/min とし、総括当量比を変化させて画像内の LII 信号の最大値を調べ、燃焼場のすす濃度に

ついて検討した。その結果を図5に示す。各条件で100枚の画像を撮影し、各画像のLII信号強度の最大値を平均したものを出している。これによると、空気流量が小さい $Q=30\sim 40\text{ l/min}$ では比較的多くすすが出ていた。また、総括当量比が大きいほどすすからのLII信号強度は大きくなるが、総括当量比が2以下ではすすはほとんど出ていないことがわかった。

一方、測定された NO_x 濃度について検討する。燃料と空気を別々に供給する拡散火炎の実験では、空気を $Q=30, 100, 150, 200, 240\text{ l/min}$ で流入させ、総括当量比は $\phi=0.6\sim 1.0$ とした。比較のため、予混合火炎についても測定を行った。この場合、空気流量 $Q=100, 150, 200, 240\text{ l/min}$ とし、当量比 $0.6\sim 1.0$ の予混合気を図2の空気ノズルのみから流入させた。図6に得られた EINO_x の結果を示す。ここで EINO_x とは燃料1kgあたりに排出される NO_x 排出量を示している。これによると、予混合燃焼の場合は空気流量を増やしても NO_x 排出量に大きな変化はないが、拡散燃焼の場合は NO_x 排出量が減少し、予混合燃焼の NO_x 排出量に近づくことがわかる。この傾向は、小沼らの旋回噴流燃焼器の実験結果⁽¹⁹⁾と同様であった。今回は特に、空気流量の少ない条件である $Q=30\text{ l/min}$ での実験を新たに行った。これによると流量が少ないほど総括当量比を小さくした場合の EINO_x の減少量が緩やかになることがわかった。

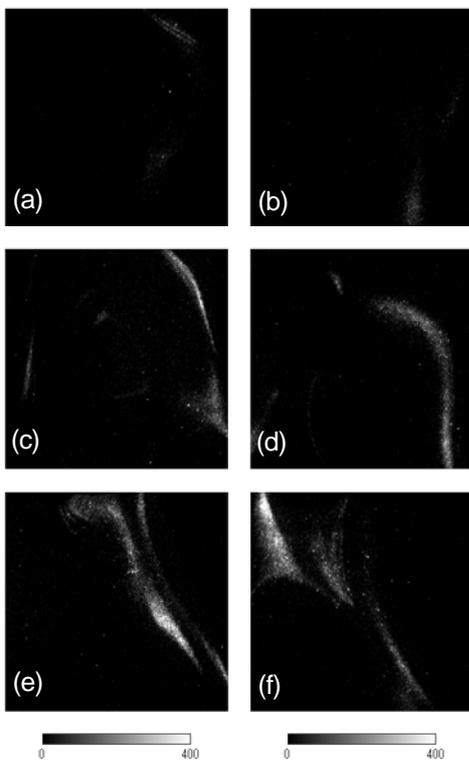


Fig. 4 Image of LII signal for $Q=40\text{ l/min}$; (a)(b) $\phi=3.0$, (c)(d) $\phi=4.0$, and (e)(f) $\phi=5.0$

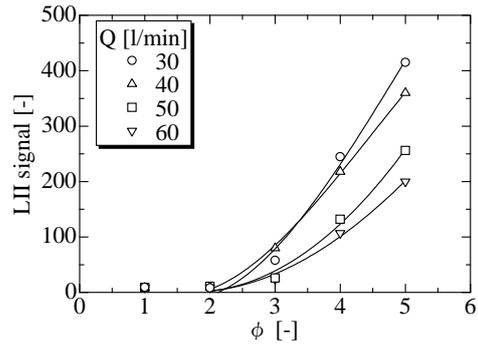


Fig. 5 LII signal at different equivalence ratio

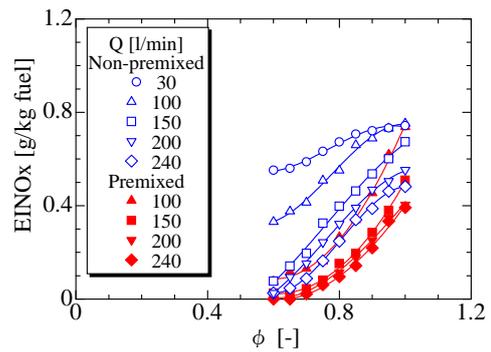


Fig. 6 NO_x emission in premixed and non-premixed combustion

3. 解析モデルおよび数値計算方法

これまでに行った実験では、計測できるデータに限りがあるため、旋回噴流燃焼器における予混合化や、火炎構造についての詳細な議論はできなかつた。そこで、旋回噴流燃焼器を模擬した噴流拡散火炎の数値解析を行い、火炎構造と燃焼特性を調べることにした。本研究で用いた解析モデルを図7に示す。座標系は2次元軸対称の円筒座標系とした。燃料ノズル中心を原点とし、半径方向に r 軸、軸方向に z 軸をとる。計算格子は、 r 方向に105の等間隔格子、 z 方向に241の不等間隔格子を用いた。計算領域は r 方向に20mm、 z 方向にはノズル先端から250mmとした。

解析方法は、他の文献⁽¹²⁾⁽¹³⁾と同様であるので、ここではその概要を述べる。基礎方程式は、連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式および化学種の保存式と状態方程式である。この際、以下の4つの仮定を用いた。

- (1) 燃焼場は軸対称とし、外力は考慮しない
- (2) 混合気は理想気体とする
- (3) 圧力拡散、温度拡散を無視する
- (4) エネルギー方程式において粘性散逸、放射、Dufour効果、圧力仕事を無視する

これらの仮定を用いて上記の方程式を有限体積法により離散化する。なお、圧力と速度の連成にはSIMPLE法²⁴⁾を適用した。対流項には一次風上差分法、時間積分には一次精度陰解法を適用した。時間刻みは $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ sとし、SOR法による繰り返し計算を行った。

次に境界条件について説明する。図7に示すように、以下の3つの流入部が存在する。まず、①燃料ノズルと②空気ノズルは同軸に設置されており、中心に位置する内径2mmのノズルから燃料としてプロパンを、その外側の内径5mmのノズルから酸化剤として空気(Air1)を流入させる。このとき、両ノズル間のリム厚は0.3mmとした。また③として周囲から空気(Air2)が流入する。これは、計算を安定化させるためである。図7の左側は軸対称境界とし、右側面および出口は自由流出境界とした。また後述するが、本研究では旋回噴流燃焼器に用いられるパイロット火炎の代わりに着火源を配置し、その格子点ではプロパンの断熱火炎温度2268Kを与えた。実際のパイロット火炎は2本の旋回流ノズルにより形成されるが、燃焼器底部で環状の火炎となっているためパイロット火炎も軸対称の火炎とした。

また計算条件としては、酸化剤の空気(Air1)をQ=10, 20, 30 l/minで流入させ、燃料は各空気流量に対して総括当量比が $\phi = 0.4 \sim 1.0$ となるように流入させた。ただし、周囲流の空気(Air2)はどの条件においても0.3m/sで一定とした。また、いずれも流入温度は300Kとした。

比熱などの物性値は、JANAF table²⁵⁾の値を参考に温度の4次多項式近似式で与えた。輸送係数に関しては、SmookeらのSimplified Transport Model²⁶⁾を適用した。また、化学反応機構としてWestbrookのプロパン-空気系の総括一段不可逆反応²⁷⁾を用いた。

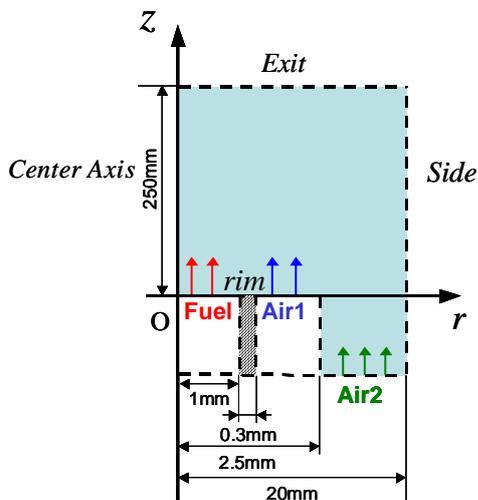


Fig. 7 Analytical model and coordinate

4. 計算結果および考察

4・1 着火源位置の影響 前述のように、小沼らは旋回噴流燃焼器を用いた場合の低NOx燃焼のメカニズムを、着火までに燃料と空気の混合が促進されたためであると推察した^{(19)~(21)}。そこで、燃料や空気の流入条件を固定し、着火源の位置を変更することで、火炎構造に与える影響について検討した。

図8に着火源の位置を半径方向に $r=1.3$ mm一定とし、軸方向には $z=10$ mm, 60mm, 100mmと変化させた場合の温度分布の結果を示す。また、どの条件においても空気を $Q=10$ l/min ($u_{air1}=11.3$ m/s), 総括当量比 $\phi=1.0$ ($u_{fuel}=2.23$ m/s)で流入させた。着火源を下流に移動させると、火炎の先端位置も同様に下流へ移動していることがわかる。また、着火源が上流にある場合の方が火炎が活れていることがわかる。これはおそらく燃料と空気の流入速度が異なることから、速度せん断層の影響が上流部では大きいためであると考えられる。

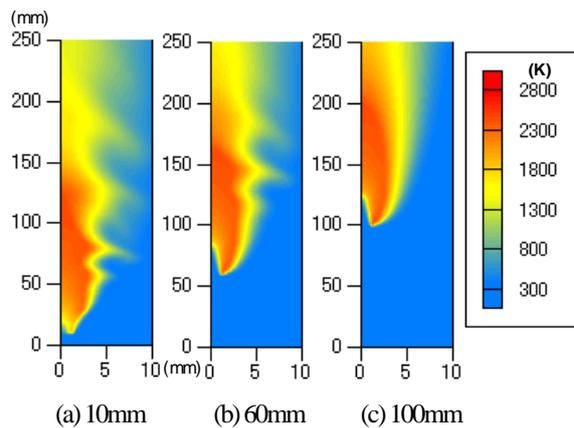


Fig. 8 Temperature profile at different ignition point

4・2 Flame index と Mixedness 今回は着火源を下流へ移動させたことから、火炎の上流では燃料と空気が混合され、火炎構造も一般の拡散火炎とは異なっていると考えられる。そこで、Yamashitaらが提案した以下のようなFlame index およびMixedness⁽²²⁾⁽²³⁾の値を算出して、図8で得られた燃焼場について検討した。

Flame index は火炎の燃焼形態を表す物理量で以下の式で定義される。

$$Gr_{FO} = \text{grad}Y_F \cdot \text{grad}Y_O \quad (q \geq 0.01q_{\max}) \quad (1)$$

Flame index は正であれば予混合火炎、負であれば拡散火炎を表し、絶対値が大きいほど反応速度が大きいことを示す。Mixedness は燃料と酸化剤の混合具合を表す物理量で、以下の式で定義される。

$$Z_{FO} = \frac{Y_O}{j} \left(\frac{Y_O}{j} \leq Y_F \right) = -Y_F \left(\frac{Y_O}{j} \geq Y_F \right) \quad (2)$$

ここで j は燃料に対する質量ベースの量論係数である。**Mixedness** はその位置における燃料と酸化剤の少ない方の質量分率で表されるため、正であれば過濃混合気を、負であれば希薄混合気を表し、絶対値が大きいほど可燃混合気の量が多いことを示す。

得られた **Flame index** の分布を図9に示す。これらと比較すると着火源の位置が $z = 10 \text{ mm}$ と上流にある場合は一部を除いて **Flame index** が負の値をとることから拡散火炎が形成されている。一方、着火源の位置を $z = 60 \text{ mm}$ とすると、**Flame index** が正となる予混合火炎の領域が拡大した。

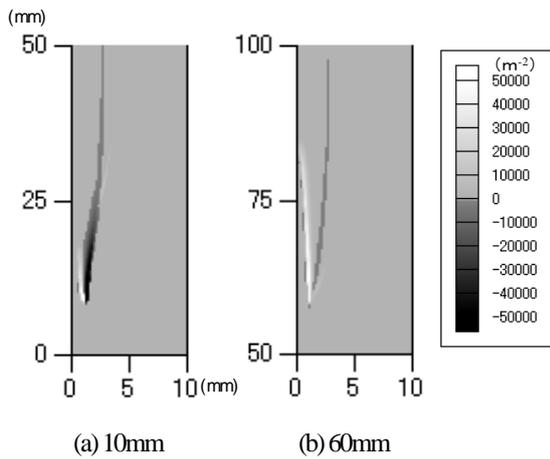


Fig. 9 Flame index profile

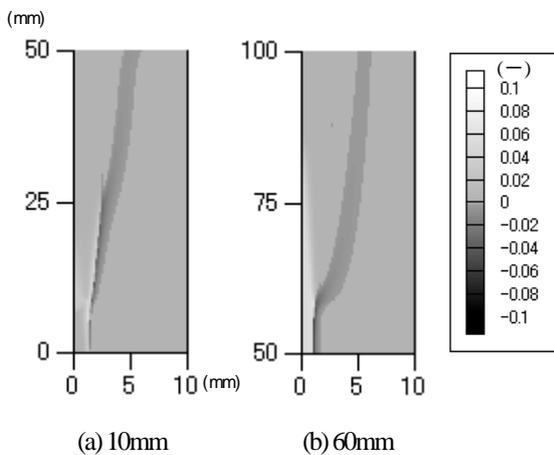


Fig. 10 Mixedness profile

また、**Mixedness** 分布を図10に示す。これによると、着火源位置が下流へと移動すると、火炎の上流で予混合気が形成され、その量も多くなっていることがわかる。**Flame index** および**Mixedness** の結果より、着火源を下流へ移動させることによって着火までに燃料と酸化剤の混合が促進され、予混合火炎の領域が広がっていることがわかった。

より詳細に火炎構造を検討するため、図9(b)、図10(b)の結果について、火炎先端付近における **Flame index** および**Mixedness** の半径方向分布を調べた。図11にその結果を示す。これによると、**Flame index** が正の値である予混合火炎の領域が二箇所あり、それに挟まれて **Flame index** が負の拡散火炎の領域が存在している。**Mixedness** の分布と比較して考えると、内側の予混合火炎は **Mixedness** が正の過濃予混合火炎であり、外側は **Mixedness** が負の希薄予混合火炎であることがわかる。したがって、二つの予混合火炎に挟まれた拡散火炎は、過濃予混合火炎で余った燃料と、希薄予混合火炎で余った酸素によって形成された拡散火炎であり、いわゆる **Triple Flame**⁽²²⁾ が形成されていることが確認できた。この **Triple Flame** は濃度勾配が存在する予混合気中に形成される火炎であることが知られており、旋回噴流燃焼器においても着火までに燃料と酸化剤の一部が混合(部分予混合化)していることが示唆された。

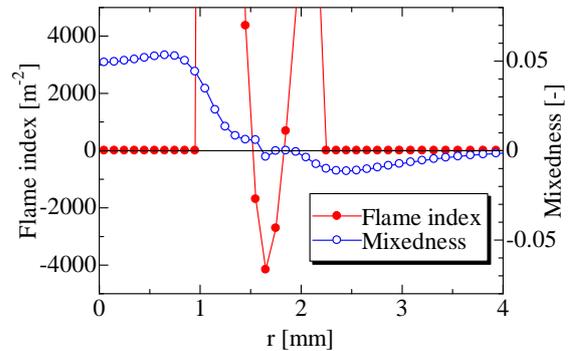


Fig. 11 Flame index and Mixedness ($z=60\text{mm}$)

4・3 流入条件の影響 続いて空気流量などの流入条件の影響について検討した。空気流量を $Q=10 \text{ l/min}$ で一定とし、総括当量比を $0.4 \sim 1.0$ に変化させた場合の解析を行った。また、どの条件においても着火源位置は $r=1.3\text{mm}$, $z=100\text{mm}$ とした。図12に温度分布を示す。空気流量を一定にして総括当量比を下げると、反応する燃料が少なくなるため、高温の領域が減少していることがわかる。これらの火炎先端の温度を

調べてみると、2398K、2289K、1933K となり、総括当量比を小さくするにつれて最高温度も低下した。

次に、総括当量比を $\phi=1.0$ で一定とし、空気を $Q=10, 20, 30$ l/min で流入させた場合の温度分布を図 13 に示す。その結果、火炎先端付近の温度は、2398K、2338K、2202K となり、同じ総括当量比であっても空気流量が大きくなるにつれて最高温度が低下した。

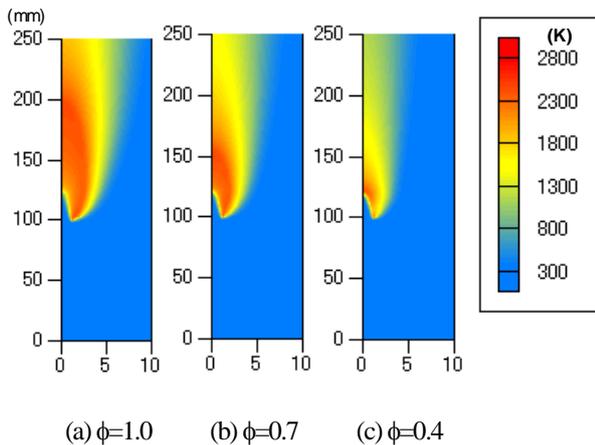


Fig. 12 Temperature profile at different equivalence ratio

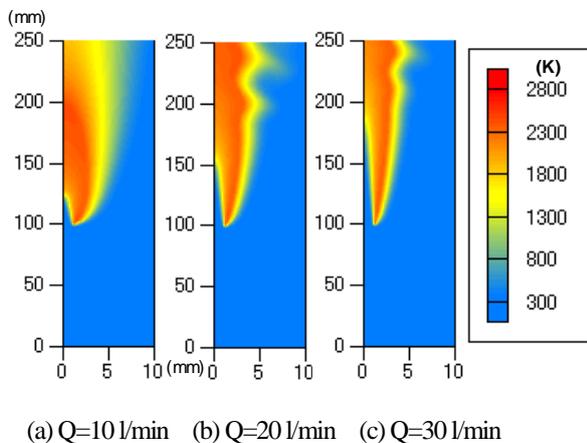


Fig. 13 Temperature profile at different air volume rate

同様に、空気を $Q=10, 20, 30$ l/min まで変化させ、総括当量比 0.4 ~ 1.0 としたときの火炎先端温度 T_f を求めた。その結果を図 14 に示す。これによると、どの総括当量比においても空気流量を大きくするにつれて火炎温度は低下した。本実験では、発生している NO_x の大部分がサーマル NO_x であると考えられる。したがって、図 6 の NO_x 排出量の実験結果において、同じ総括当量比であっても空気流量が大きい方が

NO_x 排出量が少ないという結果は、この火炎温度の低下により説明できるものと思われる。

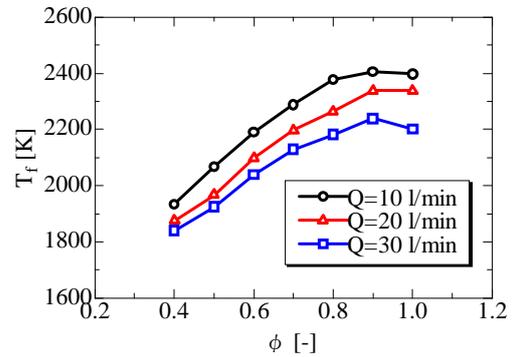


Fig. 14 Temperature of flame tip

4・4 局所当量比 この火炎温度が低下した原因を調べるために、火炎先端付近の温度が最大となる位置での局所当量比を調べた。局所当量比 ϕ_f は、温度が最大となった位置での窒素の質量分率を求め、混合分率 f を算出することで見積ることとした。空気流量は $Q=10$ l/min で一定とし、総括当量比を変化させた場合の火炎先端付近での最高温度とその位置における局所当量比の結果を図 15 に示す。これによると総括当量比が小さくなるにつれて局所当量比も低下した。

通常の拡散火炎では、火炎が量論的位置で形成されるために、総括当量比を低下させても火炎付近の局所当量比はほぼ量論の値となり、それほど変化しないはずである。本解析では、着火源を燃料と空気のノズルからある程度離れた位置に配置しており、火炎より上流部で燃料と空気の一部が混合（部分予混合化）するため、総括当量比を低下させるとより希薄な混合気が形成され、局所当量比が低下して火炎温度が下がったものと思われる。

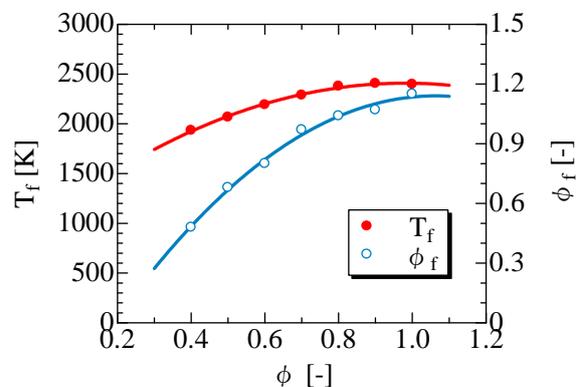


Fig. 15 Temperature of flame tip and local equivalence ratio at different equivalence ratio

一方図 16 は、総括当量比 ϕ を 1.0 とし、空気流量を変化させたときの火炎先端付近における最高温度と、その位置における局所当量比の結果である。これによると、空気流量を大きくすることによって局所当量比が低下していることがわかる。これは流速が大きくなるために、強い対流効果によって半径方向の濃度勾配が大きくなり、燃料と空気の混合が促進されたためであると考えられる。したがって、総括当量比が同じであっても空気流量を増加させると、燃料と空気の混合が進み、局所の当量比が低下して火炎温度が下がったものと思われる。

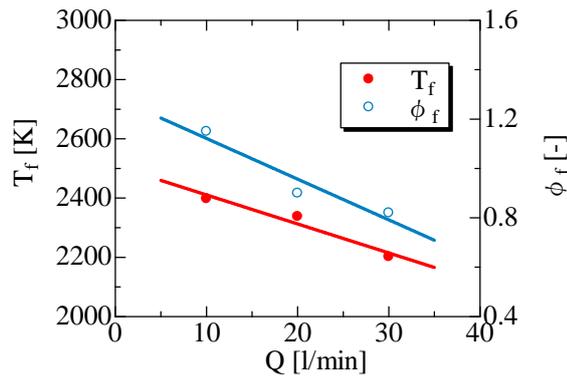


Fig. 16 Flame tip temperature and local equivalence ratio at different air volume rate

5. 結 言

旋回噴流燃焼器のすす濃度と NOx 排出量を計測した。また、旋回噴流燃焼器を模擬した噴流拡散火炎の数値解析を行い、火炎構造と燃焼特性について検討した。その結果、以下のことがわかった。

1. 拡散燃焼であっても空気の流量が多くなるほど予混合燃焼と同程度の NOx 排出特性を示す。また、すすの濃度場を LII 法により調べたところ、すすの排出量は総括当量比が 2 以下ではほぼゼロである。
2. 燃焼形態を表す Flame index および燃料と酸化剤の混合度合を表す Mixedness により火炎構造を調べたところ、着火源の位置を下流へと移動させると予混合火炎の領域が拡大する。
3. 空気流量を一定にして総括当量比を小さくすると、火炎先端付近の最高温度とその位置における局所当量比が共に低下する。
4. 総括当量比が一定の条件で空気流量を大きくすると、燃料と酸化剤の混合が促進され、火炎先端付近の局所当量比が低下し、火炎温度が低下する。

したがって、旋回噴流燃焼器における低 NOx 燃焼のメカニズムは、燃料と空気の混合が進むことで局所当量比が減少し、火炎温度が低下したことによるものであることが示唆された。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人 谷川熱技術振興基金平成 17 年度助成研究により行われたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Sogo, S., Homma, R. and Hase, K., NOx and CO Formation Characteristics in Rich-Lean Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.617, 290-297 (1998).
- (2) Watanabe, T. and Nakajima T., NOx Formation Characteristics in Lean-Rich Combustion (Numerical Steady-State Analysis of Laminar Lean-Rich Combustion Flames), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.66, No.643, 904-910 (2000).
- (3) Yasuda, H., Asato, K., Miyasaka, T., Hijikata, Y., Miyashita, T., Kurachi, S., Hagi, S., Umeda, Y., Characteristics of Combustion of Rich and Lean Flames (1st Report, Effects of Velocity and Air Ratio of Mixture Supplied into Boundary Region on Stabilization of Rich and Lean Flames), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.716, 1081-1088 (2006).
- (4) Yasuda, H., Asato, K., Miyasaka, T., Kurachi, S., Hagi, S., Umeda, Y., Development of Rich-Lean Flame Burner of High Performance by Controlling Boundary Region between Rich and Lean Flames, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.48, No.145, 241-249 (2006).
- (5) Claypole, T. C., and Syred, N., The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NOx Formation, *Proc. Comb. Inst.*, Vol.18, 81-89 (1981).
- (6) Terasaki, T. and Hayashi, S., The Effects of Fuel-Air Mixing on NOx Formation in Non-Premixed Swirl Burners, *Proc. Comb. Inst.*, Vol.26, 2733-2739 (1996).
- (7) Nakano, K., Onuma, Y., Noda, S., Inohae, J., An Experimental Study of Flame Characteristics of Jet Diffusion Flames in Cylindrical Furnace (1st Report, The Effect of Inner Diameter of Furnace on NOx Emmision Property), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.701, 303-309 (2005).
- (8) Noda, S., Inohae, J. and Saldi, Z. S., NOx emission characteristics of confined jet non-premixed flames, *Proc. Comb. Inst.*, Vol.31, in press.
- (9) Kegasa, A., Miyafuji, A., and Tsujishita, M., Application of Forced Oscillating Combustion of Burners for an Industrial Furnace (Evaluation of NOx Reduction Effect), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.675, 3219-3224 (2002).

- (10) Ishizuka, S., Hagiwara, R., Suzuki, M., Nakamura A., and Hamaguchi, O., Combustion Characteristics of a Tubular Flame Burner, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.65, No.639, 3845-3852 (1999).
- (11) Hagiwara, R., Okamoto, M., Ishizuka, S., Kobayashi, H., Nakamura A., and Suzuki, M., Combustion Characteristics of a Tubular Flame Burner for Methane, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.66, No.652, 3226-3232 (2000).
- (12) Munehiro, I., Okada, K., and Ishiduka, S., Development of Tubular Flame Burner for By-Product Fuel Gases in Steel Works, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.48, No.145, 250-256 (2006).
- (13) Yamamoto, K., Achiha, T. and Onuma, Y., A Study on Highly Turbulent Premixed Flames in a Cyclone-Jet Combustor (1st Report, Visualization of Flame Structure with Tomographic Images), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.65, No.637, 3185-3190 (1999).
- (14) Yamamoto, K., Achiha, T. and Onuma, Y., A Study on Highly Turbulent Premixed Flames in a Cyclone-Jet Combustor (2nd Report, Investigation on Flame Microstructure with an Electrostatic Probe), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.66, No.642, 585-590 (2000).
- (15) Yamamoto, K. and Nishizawa, Y., Flow Field and Structure of Highly Turbulent Premixed Flames, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.68, No.665, 238-245 (2002).
- (16) Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, Y., A Study on Highly Turbulent Premixed Flames in a Cyclone-Jet Combustor (3rd Report, Measurement of Turbulence Scale in Combustion Field by Slot-Correlation Method) *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.68, No.666, 603-609 (2002).
- (17) Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, Y., Persistence of Laminar Flamelet Structure Under Highly Turbulent Combustion, *JSME International Journal*, Series B, Vol.47, No.6, 408-415 (2003).
- (18) Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S. and Onuma, Y., PIV Measurement and Turbulence Scale in Turbulent Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.71, No.711, 2741-2747 (2005).
- (19) Onuma, Y., Yamauchi, T., Mawatari, K., Morikawa, M. and Noda, S., Low NO_x Combustion by a Cyclone-Jet Combustor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.66, No.642, 579-584 (2000).
- (20) Kinoshita, Y., Horie, T., Uejima, M. and Onuma, Y., The Influence of the Preheated Air on Low NO_x Combustion Using the Cyclone-Jet Combustor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.72, No.716, 1067-1072 (2006).
- (21) Kogure, T., Owada, Y., Hosino, Y., Uejima, M. and Onuma, Y., Premixing Combustion of Fuel Sprays by the Cyclone-Jet Combustor and NO_x Reduction, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.72, No.719, 1812-1817 (2006).
- (22) Yamashita, H., Shimada, M. and Takeno, T., A Numerical Study on Flame Stability at the Transition Point of Jet Diffusion Flames, *Proc. Comb. Inst.* Vol.26, 27-34 (1996).
- (23) Yamashita, H., Tsutsumitani, S. and Choi, N., Effects of Different Kinds of Fuel and Fuel Equivalence Ratio on Flame Structure of Triple Flame, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.65, No.630, 775-782 (1999).
- (24) Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Mcgraw-Hill, (1980).
- (25) JANAF thermochemical tables, Third Edition, (1985).
- (26) Smooke, M. D., Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames, *Springer-Verlag*, 1-28. (1991).
- (27) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames, *Combustion Science and Technology*, Vol.27, 31-43 (1981).