

# 間欠燃料噴射を利用した燃焼場の検討

磯部佑介<sup>\*1</sup>, 山本和弘<sup>\*2</sup>, 山下博史<sup>\*2</sup>, 上島光浩<sup>\*3</sup>

## A Study on Combustion Field with Intermittent Fuel Injection

Yusuke ISOBE, Kazuhiro YAMAMOTO<sup>\*4</sup>, Hiroshi YAMASHITA,  
and Mitsuhiro UEJIMA

<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, (the を削除) combustion field with intermittent fuel jet has been investigated. A combustor consists of inner central fuel nozzle and surrounding air nozzle. To reveal an effect of fuel injection, (the を削除) ratio of fuel injection time to (the を削除) total period ( $R$ ) is changed. When (the を削除) fuel supply rate is kept constant, (the を削除) fuel injection velocity is increased at larger  $R$ . In experiments, NOx concentration was measured. The fuel is propane. To discuss (the を削除) flame structure and flame characteristics in detail, numerical simulation was conducted. The fuel injection time and velocity were changed to in the range of  $R = 0.14, 0.20, 0.33$ , and  $1.0$ . A flame index was obtained to examine (the を削除) premixed and non-premixed combustion regions. The so-called jet diffusion flame is formed at  $R = 1.0$ . Experimental results show that, the combustion area is very fluctuating by intermittent fuel injection. As  $R$  is decreased, EINOx is reduced. Based on numerical simulation, by decreasing  $R$ , the flame region is detached at the burner port. In this case, some of the fuel is re-ignited in burned gas area of high temperature. At this condition, it is found that fuel and air are mixed to form (the を削除) premixed combustion zone, with lower flame temperature. Hence, the low level of NOx emission by intermittent fuel injection is explained by this partial premixing effect of fuel and air.

**Key Words:** Diffusion Combustion, Gaseous Fuel, Burner, Pollutant, Combustion Products.

### 1. 緒 言

一般に予混合燃焼においては、当量比を量論よりも小さくすることによって火炎温度を低下させ、比較的容易にNOx排出量を低減できる。一方非予混合燃焼（拡散燃焼）は、燃料流量と空気流量によって求められる総括当量比を小さくしても、量論の位置で火炎が形成されることから火炎温度を制御できず、低NOx燃焼を行うことは困難である。そこで、これまでにNOx排出量を抑制するために様々な方法が検討されてきた<sup>(1)</sup>。例えば、急速混合燃焼<sup>(2)(3)</sup>、浮き上がり噴流燃焼<sup>(4)(5)</sup>、振動燃焼<sup>(6)</sup>等が挙げられる。また我々の研究グループでも、旋回流火炎の保炎機構に

着目し、低NOx燃焼を実現するため一連の研究を行ってきた<sup>(7)(8)</sup>。この旋回噴流燃焼器を用いると、燃料が噴射されてから着火するまでに燃料と酸化剤を部分的に予混合させ、これにより低NOx燃焼が可能であることがわかってきた。

本研究においては、低NOx燃焼を実現する新たな試みとして、燃料を常温の空気中に間欠噴射する燃焼方式について検討を行った。燃料の噴射比（燃料の噴射期間／噴射周期）を変えて、NOx濃度の測定を行い、低NOx燃焼が可能であることを確認した。また、ビデオ撮影とOH発光の検出により火炎を観察したところ、燃料を間欠に噴射すると火炎が大きく変動することがわかった。そこで、間欠噴射による燃焼場を詳しく検討するため、間欠噴射の燃焼場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調べた。

\*原稿受付 2009年 月 日。

<sup>\*1</sup>名古屋大学（〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町）。

<sup>\*2</sup>正員、名古屋大学大学院工学研究科。

<sup>\*3</sup>正員、東京都立産業技術高等専門学校。

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

## 2. 実験装置および実験結果

**2-1 実験装置** 本研究で使用した燃料間欠噴射の実験装置を図1に示す。燃焼室、燃料および空気の供給系からなっている。燃焼室は一辺50mmの正方形断面、高さ600mmの直方体の縦型で内壁は断熱材で内張りされている。また燃焼室側壁に観察窓として一枚の石英ガラスを設置した。上壁中心に内径30mmの排気口がある。コンプレッサーから供給された空気は、一辺50mmの正方形断面、高さ490mmのダクト中に多孔板と金網を設置した整流部を通り、燃焼室に送られる。一方燃料のプロパンガスは、燃焼室側壁に取り付けられた高速応答電磁弁を経て、内径2.0mmのステンレスノズルから連続あるいは間欠に空気流に対して平行に噴射される。燃料流量の設定は浮き子式（フロート式）流量計で行った。燃料を間欠噴射すると流量変動と共に減圧弁から電磁弁までの管内圧は変動するが、噴射周期が70msと短いために流量計はこの変動に追従せず一定の指示値を示す。この状態で、燃料ノズル出口から噴出した時間平均流量をガスメータで測定し、噴射比を変化させた場合にも燃料流量が一定であることを確認した。間欠燃料噴流の着火は、燃料ガスを間欠噴射した後、ガスライターにより形成された火炎をノズルリム近傍に近づける方法を取った。なお、着火確認後にライターは脱着した。

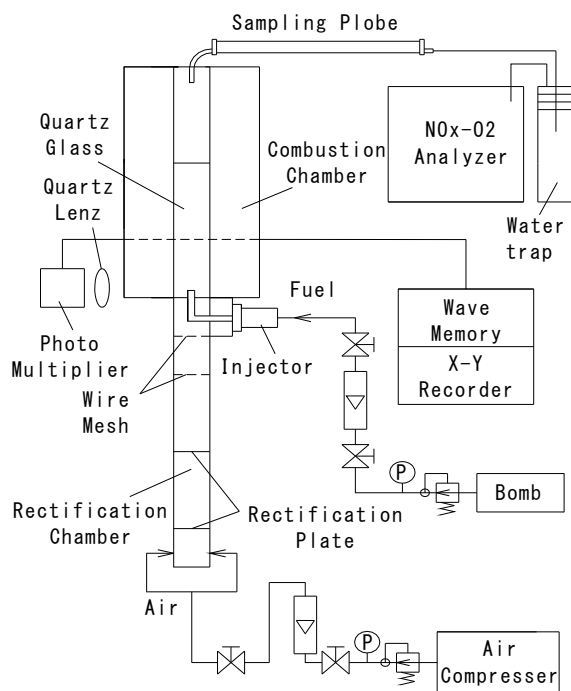


Fig.1 Experimental apparatus

今回、燃焼場について検討するためOH発光の測定を行った。燃焼時に発生した紫外域のOH発光は、石英レンズにより集光し、金属干渉フィルターを通過した後、フォトマルチプライヤによって検出され、その信号はウェーブメモリに記録される。なお、OH発光の測定視野はノズル先端から下流方向に50mm程度である。排気ガス中のNO<sub>x</sub>濃度の測定は、燃焼室排気口中心部に外径10mmのガスサンプリングプローブを挿入して行った。排気口断面でガス組成が一様であることを確認している。サンプリングパイプは内径2mmのステンレス製で、温水で冷却することにより採取したガスの反応を凍結させた。NO<sub>x</sub>濃度は化学発光法により測定を行い、使用したガス分析装置は、NOA7000（島津製作所製）である。

**2-2 間欠噴流火炎の挙動** 図2と図3は燃料を間欠に噴射させたときの燃料噴射の履歴とOH発光の測定結果の一例である。上の波形は電磁弁駆動信号、下の波形はOH発光検出器の出力波形（火炎を検出すると下方に信号が出力する）を示す。ここで $t_1$ は燃料の噴射期間、 $t_2$ は噴射停止期間、 $t_3$ は噴射周期であり、 $R(=t_1/t_3)$ を噴射比と定義した。今回は、燃料流量 $Q_f=130$  ml/min、空気流量 $Q_a=201$  /minを一定（標準状態換算値）とし、燃料の噴射期間と噴射比を変えて実験を行った。図2は $t_3=50$ ms、 $R=0.5$ の結果である。OH発光によれば、燃料噴射直後に燃焼が開始しており、着火遅れが存在しない。また、この場合には後述する連続燃焼時に比べてNO<sub>x</sub>排出量はほとんど低減しないことがわかった。一方、図3は $t_3=50$ ms、 $R=0.14$ の結果である。OH発光を見ると、着火遅れ時間 $\tau$ （ $=17.7$ ms）が存在しており、この間に燃料と空気が混合して燃焼しているものと推察された。この場合のNO<sub>x</sub>排出量は、連続燃焼に対して約20%低減した。

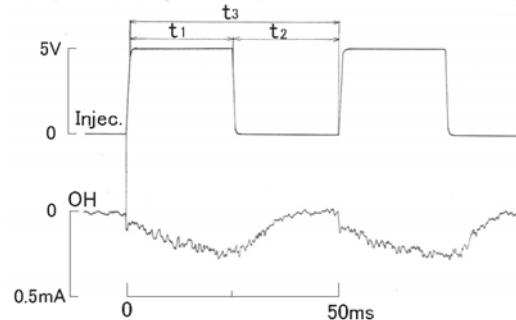


Fig.2 Fuel injection and OH emission ( $R=0.5$ )

次に、火炎の直接撮影を行った。今回対象とした火炎は変動が非常に大きいため、目視観察では火炎全体の挙動を完全に把握することができない。そこで、ビデオカメラにより撮影を行った。 $t_3=40\text{ms}$ 、 $R=0.125$ の場合に撮影された間欠燃焼の様子を図4に示す。撮影された画像によれば、いわゆる噴流火炎のように燃料噴出部に火炎が付着する場合もあるが、浮き上がり火炎や下流で再着火する様子が撮られている。

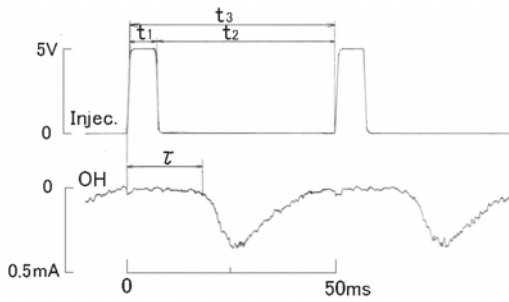


Fig.3 Fuel injection and OH emission ( $R=0.14$ )

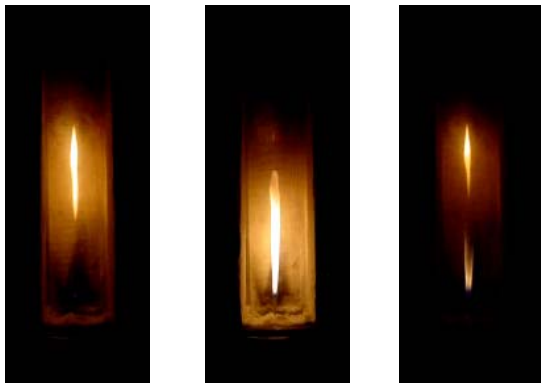


Fig.4 Flame images by video camera ( $R=0.125$ )

**2・3 NOx 排出量の挙動** 次に、燃焼場から排出される NOx 排出量の測定を行った。なお、NOx 濃度測定に先立ち、間欠噴流火炎が完全燃焼する範囲を調べている。本報においては CO 濃度が 300ppm 以下で、さすが全く観測されず安定した燃焼が行われている場合のデータのみを採用している。 $Q_f=130\text{ml/min}$ 、 $Q_a=20\text{l/min}$  一定で噴射周期  $t_3$  の影響を調べた。図5に噴射期間  $t_1$  により整理した NOx 排出量を示す。ま

た図6は、噴射比  $R$  で整理した結果である。 $t_3$  一定で  $t_1$  を短くすると EINOx は低下する傾向を示した。また、 $R$  が 0.2 より小さくなると EINOx が急激に低下し、その減少傾向は  $t_3$  が長い方が顕著であることがわかる。燃料の噴射量を一定として噴射期間を短縮させた場合は、噴射期間が短いほど噴射速度が増加するため、結果的に周囲の空気との混合が促進されるものと思われる。同時に、図4の火炎写真からもわかるように、燃料を間欠噴射しているため部分的に火炎が消失し、噴出された燃料と空気が燃焼する前にある程度混合することも考えられる。

ただし、実験で測定できるパラメータに限りがあるため、今回 NOx 低減が明らかとなった燃料間欠噴射の燃焼場について十分な考察ができない。そこで、間欠噴射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。

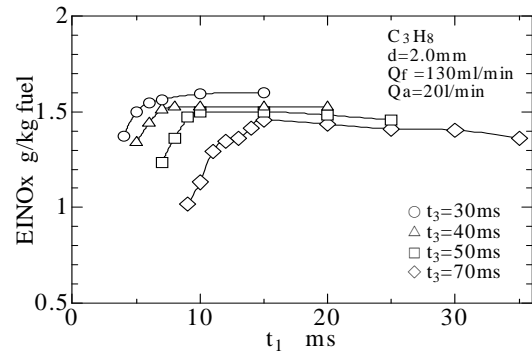


Fig.5 Variations of EINOx with fuel injection time  $t_1$  at different injection period  $t_3$

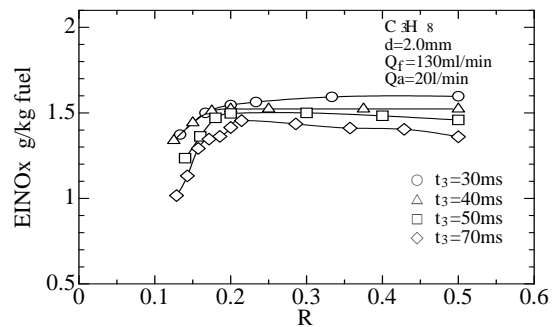


Fig.6 Variations of EINOx with fuel injection ratio of  $R$  at different injection period  $t_3$

### 3. 解析モデルおよび数値計算方法

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 91 格子、 $z$  方向に 401 格子の不等間隔格子

を用いた。計算領域は $r$ 方向は28.5mm,  $z$ 方向は燃料と空気のノズル先端から308mmとした。

解析方法の詳細については、他の文献<sup>(9)(10)</sup>と同様であるのでここでは省略するが、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理想気体の状態方程式を用いる。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) 圧力拡散と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、輻射、Dufour効果、圧力仕事を無視する

これらの仮定を用いて支配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<sup>(11)</sup>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 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 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。まず図7の流入部であるが、同軸に設定した燃料ノズルと空気ノズルがあり、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57mmのノズルから酸化剤として空気を流入させる。このとき、両ノズル間のリム厚は0.3mmとした。計算の初期段階では火炎を形成させるためにバーナー基部に着火源を置き、その後着火源をはずした。また、図の左側は軸対称境界とし、右側面は断熱壁境界、出口は自由流出境界とした。

燃料と周囲空気の各流速条件は実験値を基に設定した。空気流速は、実験時の空気流量 $Q_a = 20 \text{ l/min}$ に相当する $U_a = 0.134 \text{ m/s}$ 一定とした。一方、熱線流速計により計測した間欠噴射時における速度の時間履歴を燃料の流入条件に用いた。ただし実験と同様、噴射比 $R$ を変えた場合でも、燃料流量 $Q_f = 130 \text{ ml/min}$ 一定とした。 $R$ が0.14, 0.20, 0.33, 1.0のとき、燃料噴射速度 $U_f$ はそれぞれ4.82m/s, 3.45m/s, 2.07m/s, 0.69m/sである。また燃料の噴射周期 $t_3 = 70 \text{ ms}$ とすると、噴射期間はそれぞれ、 $t_1 = 10 \text{ ms}$  ( $R = 0.14$ ),  $14 \text{ ms}$  ( $R = 0.20$ ),  $23.3 \text{ ms}$  ( $R = 0.33$ ),  $70 \text{ ms}$  ( $R = 1.0$ )となる。ちなみに、 $R = 1$ のときは、燃料を連続的に吹き出す連続燃焼である。また、いずれも燃料と空気の流入温度は300Kとした。

比熱などの物性値は、JANAF table<sup>(12)</sup>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 Model<sup>(13)</sup>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<sup>(14)</sup>を用いた。

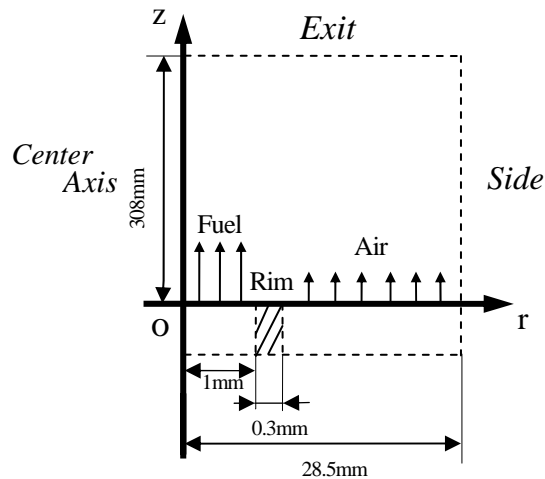


Fig. 7 Analytical model and coordinate

## 4. 解析結果および考察

### 4-1 火炎構造

まず、火炎構造について検討した。図8に噴射周期 $t_3 = 70 \text{ ms}$ , 噴射比 $R = 0.14$ の場合に得られた温度、プロパンの質量分率および熱発生速度の分布をそれぞれ示す。図は、間欠噴射挙動が規則的な周期変動になった時点での一周期における燃料の噴射開始から34ms経過したときの各分布である。比較のため、図9に $R = 1.0$ の連続燃焼の結果も示す。これらは定常状態のものを示している。まず $R = 1.0$ の連続燃焼では、燃料吹き出し部( $z = 0 \text{ mm}$ )に付着火炎が形成されており、いわゆる噴流拡散火炎の構造が見られた。一方、燃料を間欠噴射させると、図8(a)の温度分布から最高温度が連続燃焼の場合より180Kほど低くなることがわかった。また、図8(c)の熱発生速度分布によると火炎面には凹凸が多くなり、先端付近で一部の火炎が分離していることがわかる。

次に、火炎の非定常挙動について調べるため、図8と同条件で異なる時間における火炎構造を調べた。図10と図11に、温度およびプロパンの質量分率の分布に対する時間変化を示す。噴射周期は70msであり、図(a)~(c)は燃料の噴射開始からの経過時間がそれぞれ $t = 10, 34, 60 \text{ ms}$ の結果である。これらの図より、

間欠噴射した燃料は、まず噴射直後にノズル出口で着火し、その後時刻  $t=30\text{ms}$  前後において、前のサイクルで発生した下流の高温の既燃ガス領域に到達して再度着火していることがわかった。

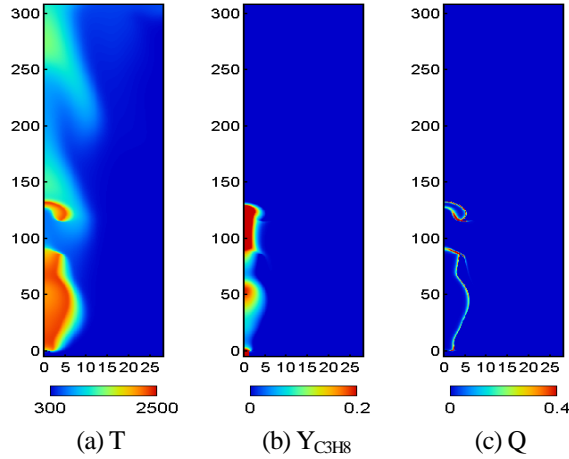


Fig.8 Distributions in intermittent combustion (R=0.14)

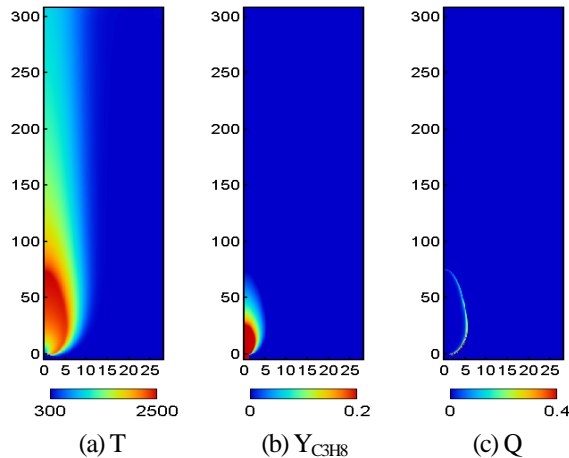


Fig.9 Distributions in continuous combustion (R=1)

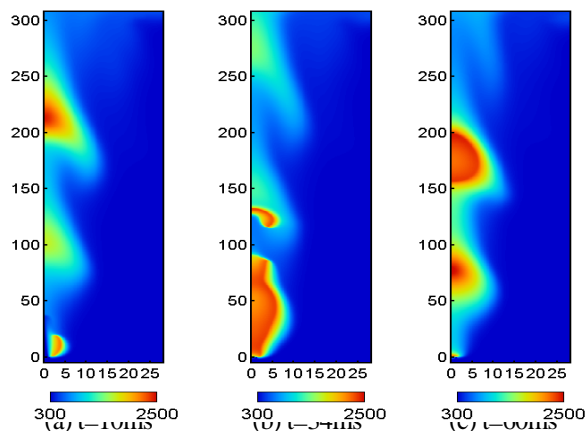


Fig.10 Distributions in temperature (R=0.14)

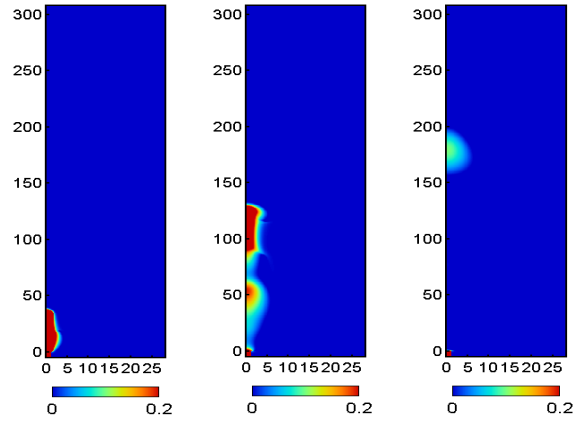


Fig.11 Distributions in propane mass fraction (R=0.14)

#### 4・2 Flame index OH 発光の測定結果である図2

と図3で述べたように、燃料を間欠で噴射すると条件によっては着火遅れ期間に燃料と空気の混合が起こる可能性がある。特に、図10および図11で示したように、火炎が下流の位置で再着火する場合には、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<sup>(9)(10)</sup>の値を算出して、火炎構造について検討した。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。Flame index が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くなることを示している。

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

得られた Flame index の分布を図12に示す。それぞれ図10、11で示した図(a)~(c)の分布に対応する時刻の結果を示している。これによると、ノズル出口で着火した火炎が拡散火炎であるのに対し、図12(b)の  $z=120\text{mm}$  付近において見られた火炎は、拡散火炎、希薄予混合火炎、過濃予混合火炎からなる、いわゆるトリプル火炎の構造を持つことがわかった。一方、Fig.10(c)および Fig.12(c)において、ノズル出口近傍に小さな拡散火炎が見られる。燃料を間欠噴射した場合、噴射しない時間帯でもノズル内 ( $z < 0\text{mm}$  の範囲) に燃料があり、その燃料が周囲空気に拡散して形成された火炎である。しかしながら、この火炎は非常に小さいため、次節で述べるように噴射比の違いによって生じる火炎構造の変化に対して影響を及ぼさないことを確認している。

(a) t=10ms (b) t=34ms (c) t=60ms

Fig.12 Distributions in flame index (R=0.14)

**4・3 噴射比の影響** 次に、燃料の噴射比を変化させたときの火炎構造の違いを調べた。図 13 に噴射比  $R=0.14$ ,  $0.20$ ,  $0.33$  における温度分布を示す。時刻は  $t=34ms$  である。この温度分布によれば、 $R=0.14$  の場合は下流で再着火することが確認されたが、 $R=0.20$ ,  $0.33$  の場合は再着火が起きていない。今回の計算では、燃料の流量を一定にして噴射比を変えているため、噴射比が大きいほど燃料を噴射している時間は長くなり、燃料の噴射速度は小さくなる。したがって、燃料流速の小さい  $R = 0.20$ ,  $0.33$  の場合は付着火炎が形成され、燃料が下流の既燃ガスに到達する前に燃焼したものと思われる。一方、燃料の流速が大きい  $R=0.14$  の場合は、ノズル出口付近だけでは燃焼が完了せず、燃料が下流に到達して再着火したと考えられる。

火炎の非定常挙動についてさらに検討するため、火炎先端位置の時間変化を調べた。 $R=0.14, 0.20, 0.33, 1.0$

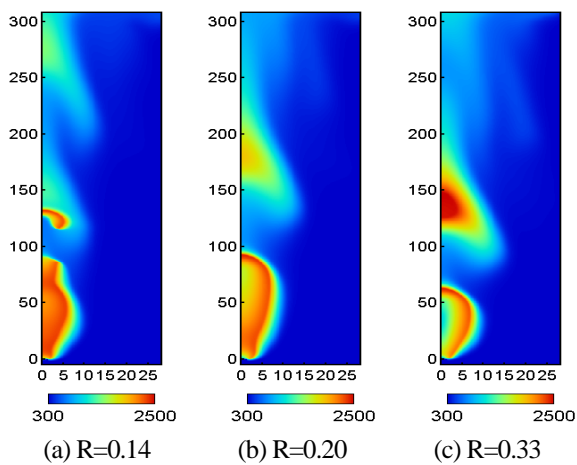


Fig.13 Distribution in temperature (t=34ms)

における火炎の先端位置を図 14 に示す。それぞれ、1 周期分を示している。ここで火炎先端位置は熱発生速

度が  $0.1 \text{ GW/m}^3$  以上となる中心軸上の最も下流の位置とした。また、横軸は燃料の噴射開始からの時刻を示している。連続噴射時である  $R=1.0$  の場合には火炎先端が約  $70\text{mm}$  の一定位置にあるが、燃料を間欠噴射した場合は大きな速度変化が生じるため、火炎の高さが大きく変動することがよくわかる。 $R=0.20$  と  $0.33$  の場合には、噴射した燃料がノズル出口近傍から燃焼して、一枚の連続的な火炎が形成された。ただし、噴射した燃料がすべて燃焼すると火炎高さが急激に減少した。一方  $R=0.14$  の場合は、 $t=30 \text{ ms}$  付近で未燃の燃料噴流が前のサイクルで発生した既燃ガスに到達して再着火し、火炎先端の位置が急激に増加している。

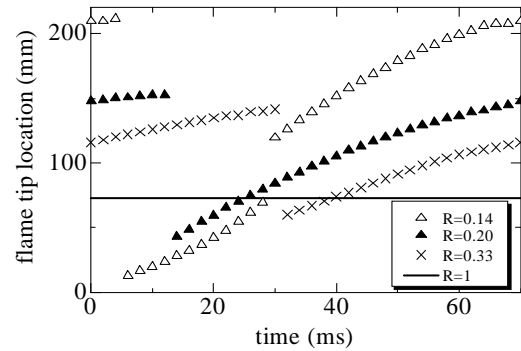


Fig.14 Time-variation of flame tip location

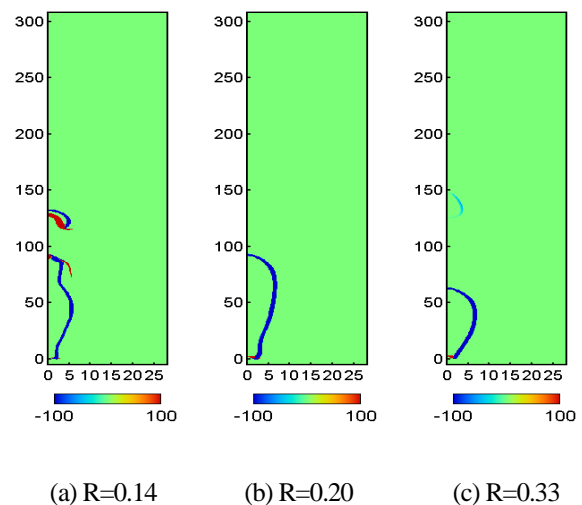


Fig.15 Distribution of flame index (t=34ms)

また、異なる  $R$  における火炎構造の違いについて検討するため、図 13 と同条件の Flame index 分布を調べ



た。その結果を図 15 に示す。これによると、 $R=0.14$  では予混合火炎の領域が下流域に存在しているのに対し、 $R=0.20$ ,  $0.33$  の場合は拡散火炎のみが存在していた。ちなみに、 $R=1$  の場合の Flame index も調べたが、予混合領域が形成されていないことを確認している。したがって  $R=0.14$  の場合は燃料が噴射されてから下流の既燃ガスの領域に到達するまでの時間に燃料と空気の混合が進み、予混合火炎が形成されたものと思われる。

そこで、この予混合化により火炎温度に対してどのような違いが出るのかについて調べることにした。各噴射比における最高温度の時間変化の結果を図 16 に示す。連続燃焼である  $R=1.0$  の場合は、火炎温度が約 2500 K となった。しかし、燃料を間欠噴射した場合は火炎温度が変動しており、連続燃焼に比べて燃焼場の最高温度が下がる時間帯があることがわかった。特に、 $R=0.14$  のときは、連続燃焼より常に 40~350 K 低くなった。図 6 の実験結果によれば、噴射比が 0.2 以下では  $\text{NO}_x$  の排出量が急激に低下する。

この現象の理由について考察する。間欠噴射した燃料は、まず噴射直後にノズル出口で着火する。噴射比が小さく燃料噴射停止期間が長い場合には、未燃の燃料が前サイクルで発生した下流の高温既燃ガス領域に到達して再着火して浮き上がり火炎を形成する。したがって、この部分予混合化により連続燃焼の場合に比べて火炎温度が低下し、低  $\text{NO}_x$  燃焼が実現できたことが示唆された。

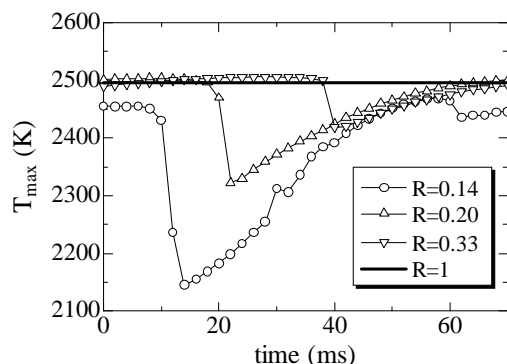


Fig.16 Time-variation of maximum temperature

## 5. 結 言

本研究では、燃料として用いたプロパンガスを間欠噴射した場合に形成される火炎の挙動と  $\text{NO}_x$  排出量を調べた。また、燃料噴射比 (噴射期間/噴射周期) を変

えた数値解析を行い、燃焼特性に及ぼす影響について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ビデオ撮影と OH 発光の検出により火炎を観測したところ、燃料を間欠噴射すると火炎が変動し、付着火炎から浮き上がり火炎への遷移が周期的に起こる現象を確認した。
- (2) 燃料の噴射量を一定にして噴射期間を変化させたところ、噴射比が 0.2 以下になると測定された  $\text{EINO}_x$  が急激に減少した。
- (3) シミュレーションにより燃焼場を調べた結果、 $R=1.0$  の連続燃焼と比較すると、燃料を間欠に噴射した場合は大きな速度変化が生じるため火炎の高さが大きく変動した。 $R=0.20$  と  $0.33$  の場合には、噴射した燃料がノズル出口近傍から燃焼して、一枚の連続的な火炎が形成された。ただし、噴射した燃料がすべて燃焼すると火炎高さが急激に減少した。
- (4) 一方  $R=0.14$  の場合、燃料はまず噴射直後にノズル出口で着火し、その後、未燃の燃料が前のサイクルで発生した下流の既燃ガス領域に到達すると再着火して浮き上がり火炎を形成する現象が観察された。
- (5) Flame index により局所の火炎構造を調べた結果、 $R=0.20$ ,  $0.33$  の場合は燃料を間欠噴射させても連続燃焼させた場合と同様に予混合火炎は形成されなかったが、 $R=0.14$  の場合は下流域に予混合火炎が存在した。
- (6) 燃料を間欠噴射すると火炎温度が連続燃焼させた場合より下がる時間帯があることがわかった。特に、 $R=0.14$  のときは、連続燃焼より常に 40~350 K 低くなった。

以上の実験および解析結果より、間欠噴射による燃焼場の低  $\text{NO}_x$  燃焼は、燃料の噴射停止中に火炎の一部が消失し、浮き上がり火炎が形成される条件では燃料と空気の予混合化が進み、火炎温度が低下したことにより説明できることが示唆された。

## 文 献

- (1) Ito, Y., Toshikawa, K. and Shimo, N., Effect of Different Kinds of Dilution Gases on the Combustion with Highly Preheated, Oxygen-Deficient Air, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.677, 107-114 (2003).
- (2) 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).
- (3) 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).
  - (4) Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., Effect of Liftoff on NO<sub>x</sub> Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Coflowing Air, *Proc. Comb. Inst.* Vol.27, 1149-1155 (1998).
  - (5) Uejima, M., Iwaki, R., Wakimura, M., Noda, S. and Onuma, Y., Premixing Combustion of Lifted Non-Premixed Flame in Hot Airstreams and NO<sub>x</sub> Reduction, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.71, No.701, 310-315 (2005).
  - (6) Kegasa, A., Miyafuji, A. and Tsujishita, M., Application of Forced Oscillating Combustion to Burners for an Industrial Furnace (Evaluation of NO<sub>x</sub> Reduction Effect), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.68, No.675, 3219-3224 (2002).
  - (7) Onuma, Y., Yamauchi, T., Mawatari, K., Morikawa, M. and Noda, S., Low NO<sub>x</sub> Combustion by a Cyclone-Jet Combustor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.66, No.642, 579-584 (2000).
  - (8) Kanagawa, Y., Yamamoto, K., Oshima, H., Yamashita, H. and Uejima, M., Soot and Measurement in a Cyclone-jet Combustor and Numerical Simulation on Flame Structure, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol.74, No.738, 505-512 (2008).
  - (9) 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).
  - (10) 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).
  - (11) Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, (1980).
  - (12) JANAF thermochemical tables, Third Edition, (1985).
  - (13) Smooke, M. D., Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames, *Springer-Verlag*, 1-28. (1991).
  - (14) 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).