

酸素富化空気を用いた対向流火炎の火炎構造および NO<sub>x</sub> 生成\*岸本 衛\*<sup>1</sup>, 趙 黛 青\*<sup>2</sup>, 山下 博 史\*<sup>2</sup>Flame Structure and NO<sub>x</sub> Formation of Counterflow Flame Using Oxygen-Enriched AirMamoru KISHIMOTO, Daiqing ZHAO and Hiroshi YAMASHITA\*<sup>3</sup><sup>\*3</sup> Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, numerical simulations of the counterflow diffusion flame and the counterflow double flame with oxygen-enriched air were made by using the GRI chemical reaction mechanism (NO<sub>x</sub> included) in order to elucidate the effects of oxygen concentration and equivalence ratio of mixture on the flame structure and NO<sub>x</sub> formation. The following conclusions were reached: (1) In the case of counterflow diffusion flame, as the oxygen concentration increases, the width of high-temperature zone becomes larger, so that NO formation by the thermal NO mechanism increases, but that by the prompt NO mechanism decreases and becomes negative. (2) In the case of counterflow double flame, as the equivalence ratio becomes large, the NO formation by the prompt NO mechanism at the position of the fuel-rich premixed flame decreases, and that by the thermal NO mechanism at the position of the diffusion flame keeps approximately constant. (3) In the both flames, NO formation has a maximum at about  $Y_{O_2}=0.8$ , and it decreases steeply above  $Y_{O_2}=0.8$ , because the nitrogen concentration decreases.

**Key Words:** Counterflow Flame, Numerical Analysis, Oxygen-Enriched Air, NO<sub>x</sub> Formation, High-Temperature Combustion

## 1. 結 言

酸素富化空気燃焼は従来より製鉄やガラス溶融のような非常に高い温度場が必要となる分野で応用されているが<sup>(1)</sup>, 近年, 地球環境保全の関心が高まるなかで, その優れた省エネルギー性や, CO<sub>2</sub>の削減および回収の容易さに注目が集められている. しかし, 火炎の高温化に伴うNO<sub>x</sub>生成の増加に対する抑制技術の開発が不可欠である.

これまでの研究では, 酸素濃度30~40%の酸素富化空気燃焼について平衡計算による火炎温度やエネルギー効率の計算によりエネルギー効率が高いこと, 詳細素反応機構を考慮した予混合火炎の数値計算により, 予混合火炎の当量比を0.5以下もしくは1.5以上で燃焼させる場合, NO<sub>x</sub>濃度を100ppm以下に抑制することができることが明らかにされた. しかしながら, 実際の燃焼炉では, 空気と燃料の総括的な当量比が1.0程度になる必要があるために, 上記のような燃料希薄あるいは過濃燃焼後の再燃焼過程におけるNO<sub>x</sub>の抑制も非常に重要であることが指摘されている<sup>(2)(3)</sup>. また, 高酸素濃度での燃焼や, 実際の燃焼器で重要な燃焼場の濃度および温度の分布を考慮

した研究はほとんどなされていない.

そこで, 本研究では, 詳細素反応機構を考慮し, 酸素富化空気を用いた対向流拡散火炎および二重火炎の数値解析を行い, 酸素濃度と当量比が火炎構造およびNO<sub>x</sub>生成に与える影響について検討した. これらの研究は高効率ならびに低汚染の酸素富化燃焼技術の開発に有用な知見を与えると考える.

## 2. 解析モデルおよび数値計算方法

本研究で用いた平面二次元対向流層流拡散火炎および二重火炎の解析モデルを図1および2に示す<sup>(4)(5)</sup>. 二つのノズルが距離 $L=15\text{mm}$ だけ離れ対向していると仮定する.

対向流拡散火炎の場合, 左側ノズルからメタンが速度 $u_{\text{fuel}}$ , 温度 $T_{\text{fuel}}$ , 濃度 $Y_{i,\text{fuel}}$ で, 右側ノズルから酸素富化空気が速度 $u_{\text{air}}$ , 温度 $T_{\text{air}}$ , 濃度 $Y_{i,\text{air}}$ で噴射される. この場合には, 燃料側のノズル寄りによどみ面が存在し, よどみ面の酸化剤側に拡散火炎が形成される. 計算条件は以下のようにした.  $u_{\text{fuel}}=u_{\text{air}}=1.0\text{m/s}$ ,  $T_{\text{fuel}}=T_{\text{air}}=300\text{K}$ とする. 燃料は純粋なメタンとし, 酸化剤の酸素の質量分率 $Y_{O_2,\text{air}}$ を0.21~0.99と変化させ, 残りの成分はすべて窒素とした.

対向流二重火炎の場合, 左側ノズルからメタンの過濃予混合気が速度 $u_{\text{mix}}$ , 温度 $T_{\text{mix}}$ , 濃度 $Y_{i,\text{mix}}$  (当量比 $\phi =$

\* 原稿受付 2001年8月7日.

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院.<sup>\*2</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町).

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

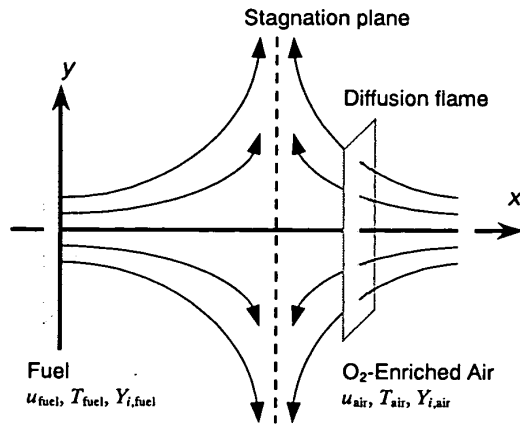


Fig.1 Theoretical model of counterflow diffusion flame

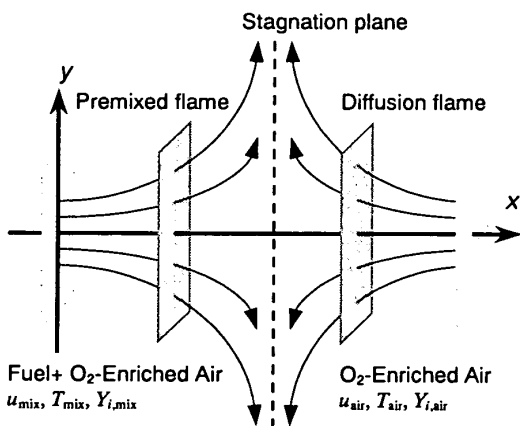


Fig.2 Theoretical model of counterflow double flame

$(Y_{\text{CH}_4,\text{mix}} / Y_{\text{O}_2,\text{mix}}) / (Y_{\text{CH}_4,\text{mix}} / Y_{\text{O}_2,\text{mix}})_{\text{st}}$  で、右側ノズルから酸素富化空気が噴射される。この場合、過濃予混合火炎と拡散火炎から構成された二重火炎が形成される。計算条件は以下のようにした。  $u_{\text{mix}}=u_{\text{air}}$ ,  $T_{\text{mix}}=T_{\text{air}}=300\text{K}$  とする。酸素富化空気の酸素の質量分率  $Y_{\text{O}_2,\text{air}}$  は 0.30, 0.80, 0.95 とする。メタン過濃予混合気の酸化剤としてはこの酸素富化空気を用い、当量比  $\phi=1.5, 1.7, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0$  に設定する。燃焼速度が酸素濃度により変わるので、火炎が両ノズルの間に形成されるように噴出速度  $u$  を 0.5, 2.5, 3.0 m/s と調整した。なお、同一の酸素濃度で過濃予混合気の当量比を変える場合には噴射速度を一定とした。

本計算では流れ場を平面二次元ポテンシャル流とし、温度場および濃度場において相似解が適用できるものと仮定する。成分連続式において Soret 効果（熱拡散）、圧力拡散は無視する。エネルギー保存式において、Dufour 効果、輻射、粘性散逸および圧力仕事  $Dp/Dt$  を無視する。支配方程式は次式となる。

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho \frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_i V_{i,x}) - w_i = 0 \quad i=1, \dots, N$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \sum_{i=1}^N \rho Y_i c_{p,i} V_{i,x} \frac{dT}{dx} + \sum_{i=1}^N h_i w_i = 0$$

$$p = \rho R T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{m_i}$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $T$  は温度、 $c_p$  は定圧比熱、 $\lambda$  は熱伝導率、 $Y_i$ ,  $V_{i,x}$ ,  $h_i$ ,  $w_i$  はそれぞれ成分  $i$  の質量分率、 $x$  方向拡散速度、比エンタルピ、質量生成速度を表す。

これらの支配方程式を計算領域において有限体積法を用いて離散化し、移流項については一次風上法を、時間方向については Euler の完全陰解法を採用した<sup>(4)(5)</sup>。各時間ステップにおいて SOR 法による繰り返し計算を行い、緩和係数は 0.1 程度、収束判定値は  $1.0 \times 10^{-6}$  とした。差分格子は等間隔で 201 点、計算の時間刻みは  $5 \mu\text{s}$  とした。

化学反応機構は NO<sub>x</sub> の生成反応を含む GRI-mech 2.11<sup>(6)</sup> を用い、49 種の成分と正・逆 279 組の素反応を考慮した。熱力学定数については CHEMKIN データベース<sup>(7)</sup> を用い、輸送係数の計算には Smooke らの Simplified Transport Model<sup>(8)</sup> を用いた。

熱発生速度  $q$ 、質量生成速度  $w_i$  を定量的に検討するために  $x$  方向積分値、すなわち単位火炎面積当たりの熱発生速度  $q_{\text{sum}}$ 、質量生成速度  $w_{i,\text{sum}}$  を以下のように定義する。

$$q_{\text{sum}} = \int_0^L q dx, \quad w_{i,\text{sum}} = \int_0^L w_i dx$$

また、単位火炎面積当たりのメタン消費量に対する NO 生成量を表す NO の Emission Index  $EI_{\text{NO}}$  を以下のように定義する<sup>(9)</sup>。

$$EI_{\text{NO}} = \frac{w_{\text{NO},\text{sum}}}{-w_{\text{CH}_4,\text{sum}}} = \frac{\int_0^L w_{\text{NO}} dx}{-\int_0^L w_{\text{CH}_4} dx}$$

### 3. 計算結果および検討

#### 3.1 火炎構造

3.1.1 酸素濃度の影響（対向流拡散火炎） 対向流拡散火炎の代表例として、酸素濃度  $Y_{\text{O}_2,\text{air}}=0.3$  および 0.8 の条件での温度  $T$ 、主成分の質量分率  $Y_i$  の分布を図 3(a),(b)、熱発生速度  $q$ 、燃焼中に形成されたラジカル H, O, OH, CH<sub>3</sub> の質量生成速度  $w_i$  の空間分布を図 4(a),(b) に示す。図中の破線はよどみ面の位置を表す。

温度分布は、 $Y_{\text{O}_2,\text{air}}=0.3$  の場合、 $x=6.5\text{mm}$  で鋭いピークをとるが、 $Y_{\text{O}_2,\text{air}}=0.8$  の場合には  $x=5.5 \sim 7\text{mm}$  で高温領域の幅が広くなり比較的均一となる。熱発生速度は、どちらの場合も二つのピークを持ち、左側の  $Y_{\text{CH}_4}=Y_{\text{O}_2}=0$  とな

る方のピーク位置を火炎面と呼ぶことにする。

図3,4に示された化学種分布によって、火炎面のピークが主にメタンの分解・酸化反応により形成され、もう一つのピークが主に火炎面で生成されたH, O, OHラジカルが酸化剤側に拡散し、 $\text{O}_2$ と反応する素反応により形成される。 $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.3$ の場合には、最高火炎温度の位置と火炎面位置とがほぼ同じであるが、 $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ の場合にはピーク間の距離が離れ、この間が平坦な高温領域となっている。この理由としては、 $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ の場合には酸素濃度の増加により燃焼反応が活発になり、O, OHなどのラジカル成分が増加し幅広く分布すること、また、火炎面が比較的好み面に近い所に形成され、移流の効果が少なくなることにより燃焼反応に必要な成分が酸化剤側へ拡散しやすくなることが考えられる。さらに、熱発生速度については、酸素濃度が増大すると、一つ目のピークの燃料側で熱分解反応により負のピークが大きくなり正のピークを弱めるため、二つ目のピークの増大の割合が一つ目のピークよりも大きくなる。

### 3.1.2 当量比の影響 (対向流二重火炎, $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ )

対向流二重火炎の代表例として、酸素濃度 $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ 、流入速度 $u=2.5\text{m/s}$ 、過濃予混合気の当量比 $\phi=1.5$ および $2.0$ の条件での温度 $T$ 、主成分の質量分率 $Y_i$ の分布を図5、熱発生速度 $q$ 、H, O, OHの質量生成速度 $w_i$ の分布を図6に

示す。上図(a)は当量比 $\phi=1.5$ の条件、下図(b)は当量比 $\phi=2.0$ の条件での結果である。図中の破線はよどみ面の位置を表す。

図5より、温度分布は、 $\phi=1.5$ の場合、 $x=2.5\text{mm}$ の過濃予混合火炎の位置で急激に上昇し、 $x=6.5\text{mm}$ の拡散火炎の位置で若干上昇する。過濃予混合火炎で過剰のメタンは主にCOおよび $\text{H}_2$ に酸化・分解され、拡散火炎により完全燃焼する。拡散火炎の位置は当量比によらずほぼ同じである。これに対して、過濃予混合火炎の火炎温度は $\phi=2.0$ の場合、 $\phi=1.5$ の場合より低くなり、燃焼速度の減少により過濃予混合火炎の位置は拡散火炎に近づき、高温領域の幅が狭くなる。

図6より、熱発生速度は $\phi=1.5, 2.0$ のどちらの場合も過濃予混合火炎と拡散火炎による二つのピークが存在し、過濃予混合火炎の熱発生速度は拡散火炎に比べて著しく大きく、当量比の増加に伴いその熱発生速度は小さくなる。さらに当量比を2.0からさらに増加させた場合、過濃予混合火炎と拡散火炎の位置が近づき、その火炎構造は $3 \cdot 1 \cdot 1$ 項で述べた対向流拡散火炎( $\phi=\infty$ に相当)と同様なものとなる。すなわち、図4(b)における拡散火炎の熱発生速度の一つ目のピークが二重火炎の過濃予混合火炎に、二つ目のピークが二重火炎の拡散火炎に対応していることがわかる。

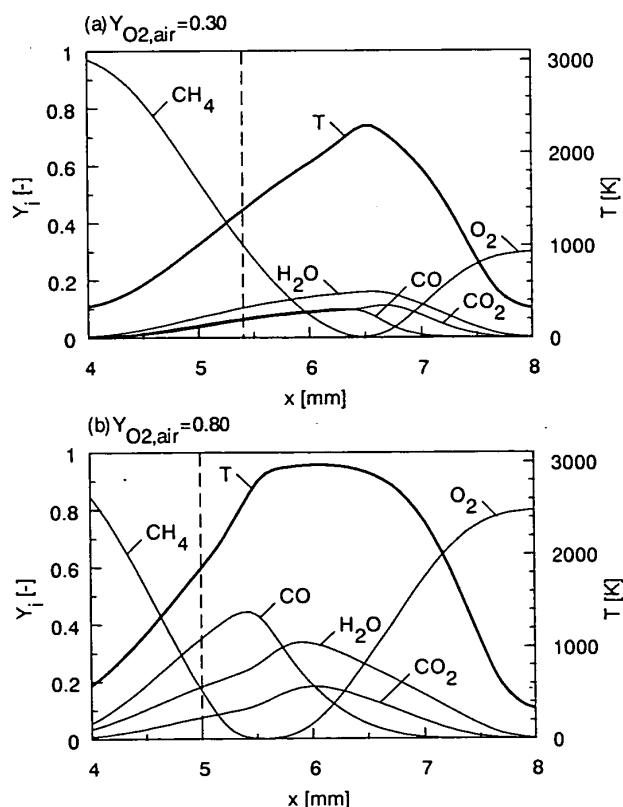


Fig.3 Distributions of major species mass fractions and temperature with stagnation plane (Diffusion flame)

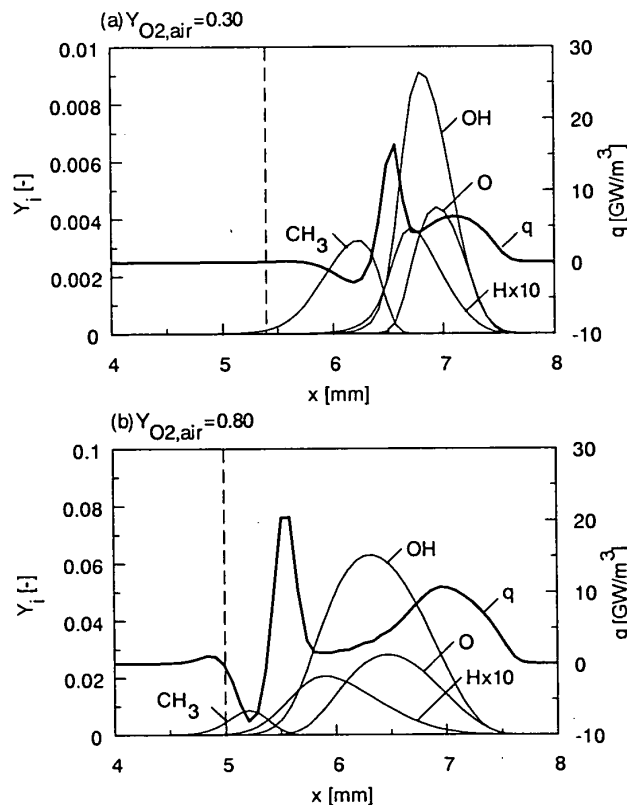


Fig.4 Distributions of major species mass fractions and heat release rate (Diffusion flame)

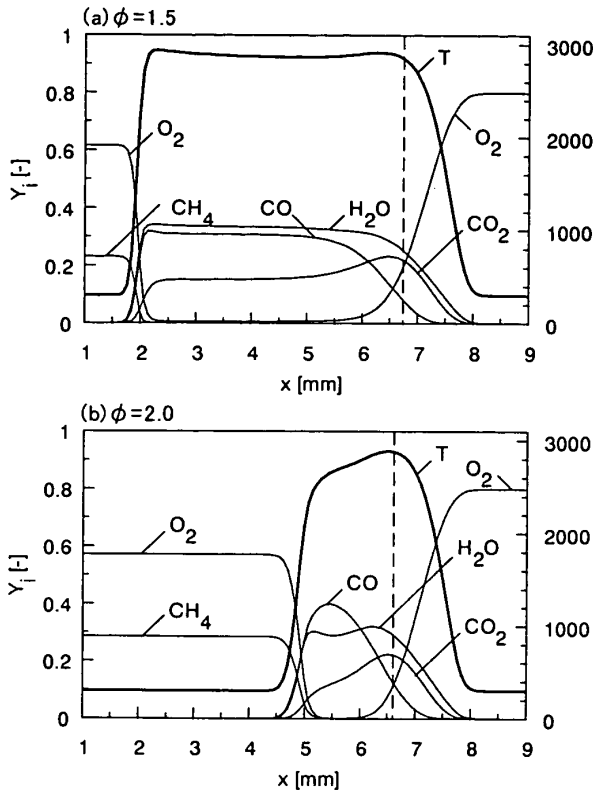


Fig.5 Distributions of major species mass fractions and temperature with stagnation plane (Double flame,  $Y_{O_2,air}=0.8$ )

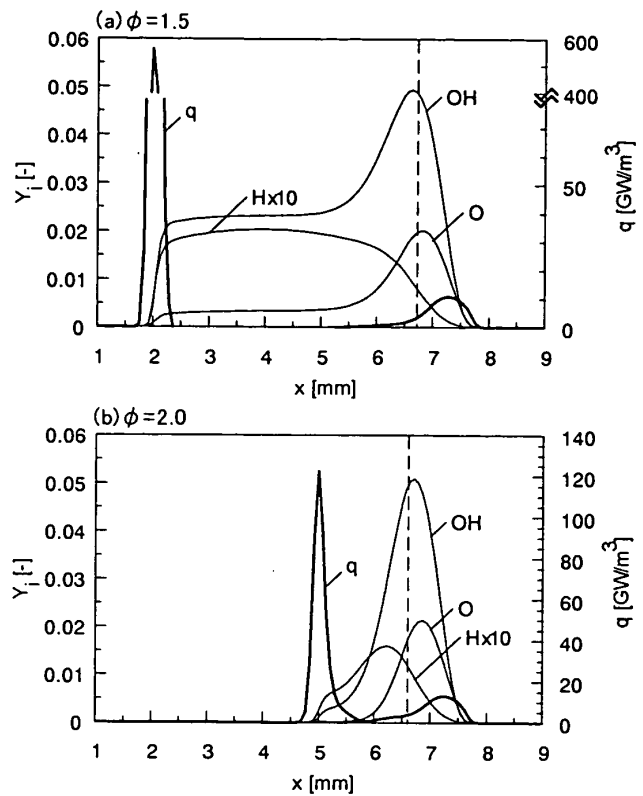


Fig.6 Distributions of major species mass fractions and heat release rate (Double flame,  $Y_{O_2,air}=0.8$ )

### 3 2 最高火炎温度および熱発生速度

3 2 1 対向流拡散火炎 酸素富化空気の酸素濃度が火炎温度および熱発生量に与える影響を調べるために、対向流拡散火炎の最高火炎温度 $T_{max}$ 、単位火炎面積当たりの熱発生速度 $q_{sum}$ と酸素濃度 $Y_{O_2,air}$ の関係を図7にまとめる。最高火炎温度は、 $Y_{O_2,air}=0.4$ 付近までは急激に増加するが、 $Y_{O_2,air}=0.6$ 付近からは緩やかになり、 $Y_{O_2,air}=0.9$ で3000Kを越える。熱発生速度は最高火炎温度とは異なり高酸素濃度でもほぼ直線的に増加する。この計算条件での消炎限界は $Y_{O_2,air}=0.21$ である。

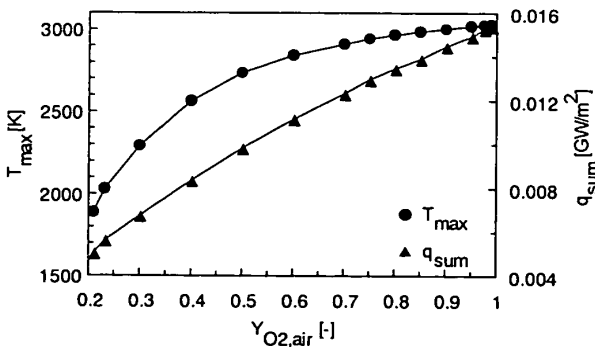


Fig.7 Effect of oxygen concentration on flame temperature and summation of heat release rates (Diffusion flame)

3 2 2 対向流二重火炎 各酸素濃度における対向流二重火炎の最高火炎温度 $T_{max}$ 、単位火炎面積当たりの熱発生速度 $q_{sum}$ と当量比 $\phi$ の関係を図8にまとめる。横軸の上段は当量比、下段は当量比の逆数 $1/\phi$ である。また、比較のために当量比 $\phi=\infty$ の場合である対向流拡散火炎の結果を $1/\phi=0$ の場合として表示した。

二重火炎における拡散火炎の火炎構造は当量比によってあまり変化しないため、同酸素濃度の条件では当量比の最高火炎温度に与える影響は大きくない。一方、拡散火炎に比べて、過濃予混合火炎の熱発生速度が著しく大きく、当量比の増加に伴いその熱発生速度が小さくなるため、すべての酸素濃度において当量比が大きいほど熱発生速度 $q_{sum}$ が小さくなる。

### 3 3 NO生成特性

3 3 1 酸素濃度の影響 (対向流拡散火炎) 酸素濃度の増加に伴いNO濃度は大きく増大するが、このNO生成機構について、NOの生成・消滅の素反応の振る舞いから検討する。Thermal NOに関する素反応およびPrompt NOの開始反応を以下に示す。ここで括弧内の数値はGRI-mech 2.11の素反応機構の番号である。

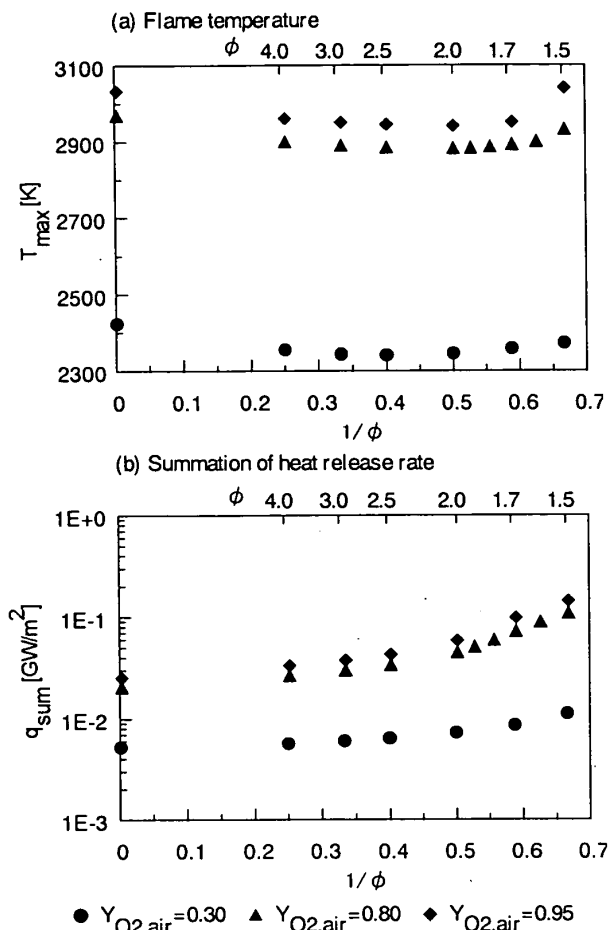


Fig.8 Effect of equivalence ratio and oxygen concentration on flame temperature and summation of heat release rate

Thermal NO 機構



Prompt NOの開始反応



NOの素反応別の質量生成速度 $w_{NO,k}$ の分布を図9に示す。上図(a)は $Y_{O_2,air}=0.3$ の条件、下図(b)は $Y_{O_2,air}=0.8$ の条件での結果である。質量生成速度の分布の横軸上段における'1st', '2nd'はそれぞれ熱発生速度の一つ目(火炎面)、二つ目のピーク位置を表す。計算結果より、以下の素反応がNOの生成・消滅に大きく関与することがわかる。

生成反応

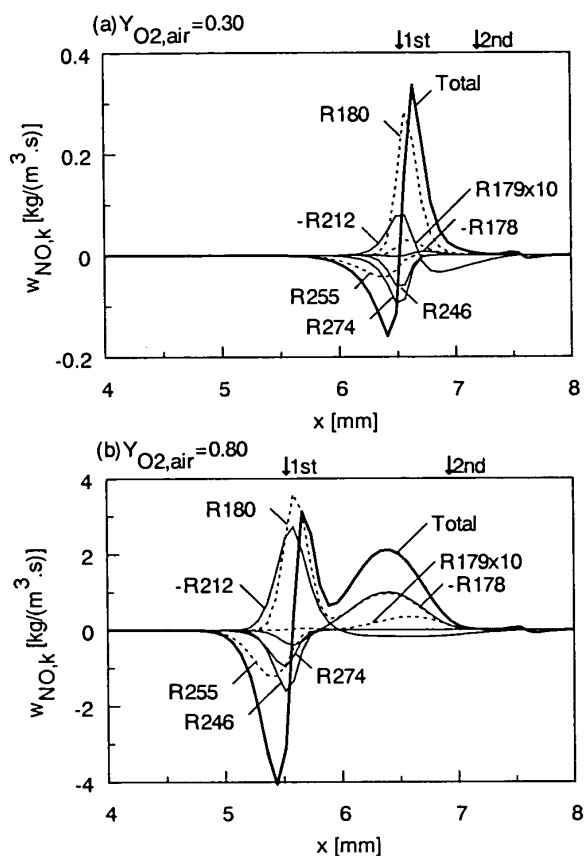
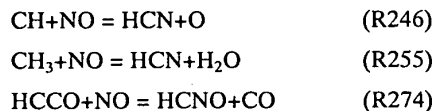


Fig.9 Distributions of NO mass production rates by various elementary reactions (Diffusion flame)

消滅反応



NOは $Y_{O_2,air}=0.3, 0.8$ のどちらの場合も火炎面付近でR180および-R212により生成され、R246,R255,R274などにより消滅しHCN,HCNOなどに変化することがわかる。Thermal NOの生成反応R179による寄与はどちらの場合でも非常に小さい。 $Y_{O_2,air}=0.8$ の場合、高温になった火炎中にはNO生成反応に必要なO,OHラジカルの濃度が大きく増えるため、二つの熱発生速度ピークの間で、-R178およびR180による大きなNO生成ピークが形成される。また、この領域では、-R178とR180の質量生成速度分布はほぼ重なることがわかる。火炎面付近の全NO質量生成速度 $w_{NO}$ の分布より、 $Y_{O_2,air}=0.8$ の場合、NO消滅速度が生成の方より大きくなることがわかる。これは通常のPrompt機構によるNOの生成・消滅のほか、二つ目のピークにおけるThermal機構により生成されたNOが火炎面付近まで拡散し、メタンの分解生成物CH, CH<sub>3</sub>とR246, R255により反応し、消滅されるためと考えられる。

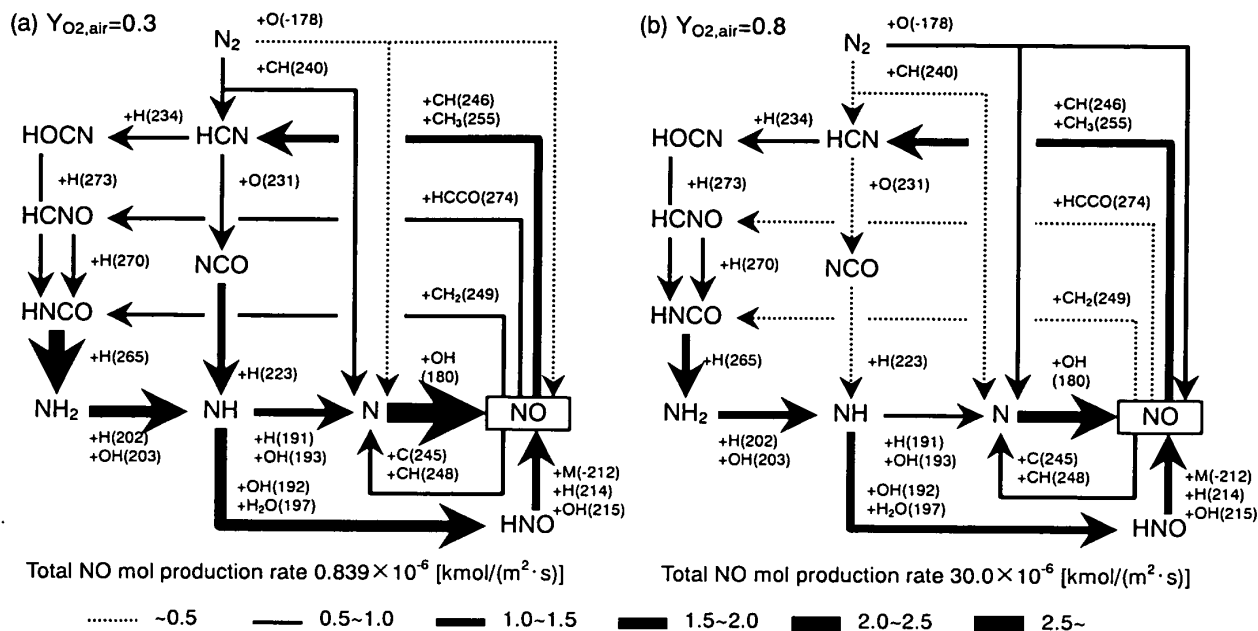


Fig.10 Quantitative reaction path diagram of NO formation (Diffusion flame)

NOまわりの反応経路図を図10(a),(b)に示す. 反応経路図において矢印の向きは各素反応の方向を表し, 太さは各素反応によるモル生成量  $w_{i,k, \text{sum}} / M_i$  と全NOモル生成量  $w_{\text{NO, sum}} / M_{\text{NO}}$  との比で表す<sup>(9)(10)</sup>.  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.3$  の場合には, R240により  $\text{N}_2$  から  $\text{N}$  と  $\text{HCN}$  を生成する素反応に始まり,  $\text{NCO}$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{N}$  を経由し最終的にR180により  $\text{NO}$  を生成するPrompt経路が確認できる. この場合, -R178による  $\text{NO}$  生成は非常に少なく, R180で消費される  $\text{N}$  はほとんどPrompt経路から生成される. それに対して,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$  の場合には, Prompt経路の開始反応のR240の寄与が非常に小さくなり, -R178により  $\text{N}_2$  から  $\text{N}$  と  $\text{NO}$  を生成し, さらに生成された  $\text{N}$  がR180により  $\text{OH}$  と反応して  $\text{NO}$  を生成するThermal経路が主要経路となる. これは, 通常の空気を用いた対向流拡散火炎での  $\text{NO}$  生成がほぼPrompt機構のみに支配されることとは異なっている. また, どちらの場合も  $\text{NO}$  がR246, R255, R274などにより消滅し  $\text{HCN}$ ,  $\text{HCNO}$  などに变化する  $\text{NO}$  消滅経路が存在する. 特に,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$  の場合, Prompt  $\text{NO}$  の生成経路より消滅経路の方が大きいことがわかる.

単位火炎面積当たりの  $\text{NO}$  の質量生成速度  $w_{\text{NO, sum}}$ , 単位火炎面積当たりのPrompt  $\text{NO}$  およびThermal  $\text{NO}$  の質量生成速度  $w_{\text{Prompt NO, sum}}$  および  $w_{\text{Thermal NO, sum}}$  と酸素濃度  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}$  の関係を図11(a),  $\text{NO}$  のEmission Index  $EI_{\text{NO}}$  と酸素濃度  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}$  の関係を図11(b)に示す. ここでは,  $\text{NO}$  の生成機構をPrompt  $\text{NO}$ , Thermal  $\text{NO}$  に大別し, 火炎面で生成される  $\text{NO}$  をPrompt  $\text{NO}$  ( $w_{\text{Prompt NO}}$ ), 二つの熱発生速度のピークの間的高温領域で生成される  $\text{NO}$  をThermal  $\text{NO}$  ( $w_{\text{Thermal NO}}$ ) と定義する. 図9の分布からわかるように, 上述の

Prompt経路に関する素反応はすべて火炎面付近で起きている. また, R180のみが両方の  $\text{NO}$  生成に関与しており, Thermal  $\text{NO}$  の生成に対してR180と-R178は同等の寄

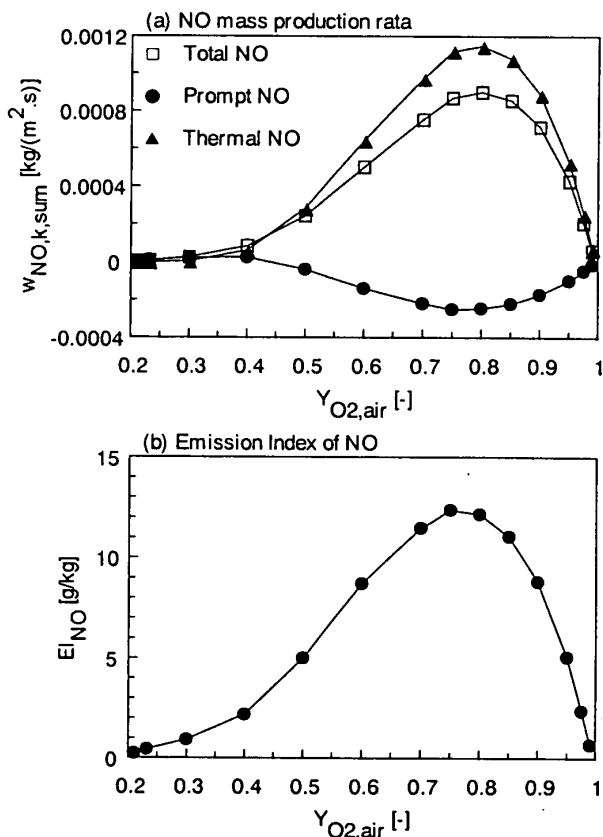


Fig.11 Effect of oxygen concentration on (a) summation of  $\text{NO}$  mass production rates (Prompt  $\text{NO}$  and Thermal  $\text{NO}$ ) and (b) Emission Index of  $\text{NO}$  (Diffusion flame)

与をする. このことから,  $w_{\text{Prompt NO}} = w_{\text{NO, sum}} - 2w_{\text{NO, 178, sum}}$ ,  $w_{\text{Thermal NO}} = 2w_{\text{NO, 178, sum}}$  として算出した.

$\text{NO}$ 生成量は  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.3$  までは Prompt  $\text{NO}$  が Thermal  $\text{NO}$  よりも大きく, 通常の拡散火炎の  $\text{NO}$  生成特性を有している. 酸素濃度が増大すると, 火炎の高温化に伴い Thermal  $\text{NO}$  が大きく増加する. それに対して, 火炎面付近に拡散してきた  $\text{NO}$  が R246, R255, R274 などの  $\text{NO}$  消滅経路により消滅するため, Prompt 機構の  $\text{NO}$  生成に対する正味の寄与は負になる. 特に, Thermal  $\text{NO}$  の生成量が大きいほど, Prompt  $\text{NO}$  が大きな負となる. また,  $\text{NO}$  の生成量が  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$  で最大となり,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$  を越えたあたりから酸素富化空気中の窒素濃度の減少により急速

に減少する. また,  $\text{NO}$  生成量は  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.3$  の場合には通常空気の場合 ( $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.232$ ) よりも約3倍,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$  の場合には約100倍になる. 純酸素濃度に近い  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.99$  の場合でも約7倍と高い値になる.

$EI_{\text{NO}}$  の酸素濃度に対する変化の傾向は  $\text{NO}$  生成量とほぼ同様となる. しかしながら  $EI_{\text{NO}}$  の定義における分母であるメタンの消費量は図7に示した熱発生速度にほぼ対応して変化するので,  $EI_{\text{NO}}$  が最大となる酸素濃度は  $\text{NO}$  生成量の場合よりもやや小さく  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.75$  である.

### 3.3.2 当量比の影響 (対向流二重火炎, $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ )

$\text{NO}$  の素反応別の質量生成速度  $w_{i,k}$  の空間分布を図12に示す. 上図(a)は  $\phi=1.5$  の条件, 中図(b)は当量比  $\phi=2.0$  の条件, 下図(c)は当量比  $\phi=3.0$  の条件での結果である.

酸素富化二重火炎中の  $\text{NO}$  は, 過濃予混合火炎では  $\text{HCN}$  などを經由する Prompt 機構 (R180, R212) により生成され, 当量比の増加により燃焼反応が弱まり  $\text{NO}$  生成も減少する. 拡散火炎では主に Thermal 機構 (-R178, R180) により生成されるが, 当量比の増加にかかわらず高温領域が形成されるため,  $\text{NO}$  の生成速度が過濃予混合火炎よりかなり大きい. これは, 前述の高酸素濃度対向流拡散火炎の  $\text{NO}$  生成機構と類似している. このように, 酸素富化二重火炎では, 当量比の増加により過濃予混合火炎での Prompt  $\text{NO}$  は抑制できるが, 拡散火炎での Thermal  $\text{NO}$  の抑制が極めて重要であることが示された.

$\phi=2.0$  の場合,  $\phi=1.5$  の場合と比べて, 過濃予混合火炎の  $\text{NO}$  生成速度 (R180) は小さくなるが, 拡散火炎の  $\text{NO}$  の生成速度にあまり変化がない.  $\phi=3.0$  の場合になると, 予混合火炎がさらに拡散火炎に近づき, ほぼ対向流拡散火炎の火炎構造になり,  $\text{NO}$  の生成・消滅も対向流拡散火炎の  $\text{NO}$  生成特性に近くなる.

各酸素濃度における単位火炎面積当たりの  $\text{NO}$  の質量生成速度  $w_{\text{NO, sum}}$  および  $\text{NO}$  の Emission Index  $EI_{\text{NO}}$  と当量比  $\phi$  の関係を図13(a), (b)にまとめる. 横軸の上段は当量比  $\phi$ , 下段は当量比の逆数  $1/\phi$  である. また, 当量比  $\phi = \infty$  の場合である対向流拡散火炎の結果を  $1/\phi = 0$  の場合として書き入れた.

図13(a)より,  $\phi=2.0$  以下では,  $\text{NO}$  生成量は当量比の増加に伴い小さくなり,  $\phi=2.0$  以上になると,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8, 0.95$  の高酸素濃度の場合,  $\text{NO}$  生成量の当量比に伴う変化が非常に緩やかになる. 図13(b)に示されるように,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8, 0.95$  の場合では,  $\phi=1.7$  で  $EI_{\text{NO}}$  は最小値になり, 拡散火炎の場合よりも小さい.  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.3$  の場合では,  $\text{NO}$  生成量は当量比の減少とともに大きくなるが,  $EI_{\text{NO}}$  はほぼ一定である.

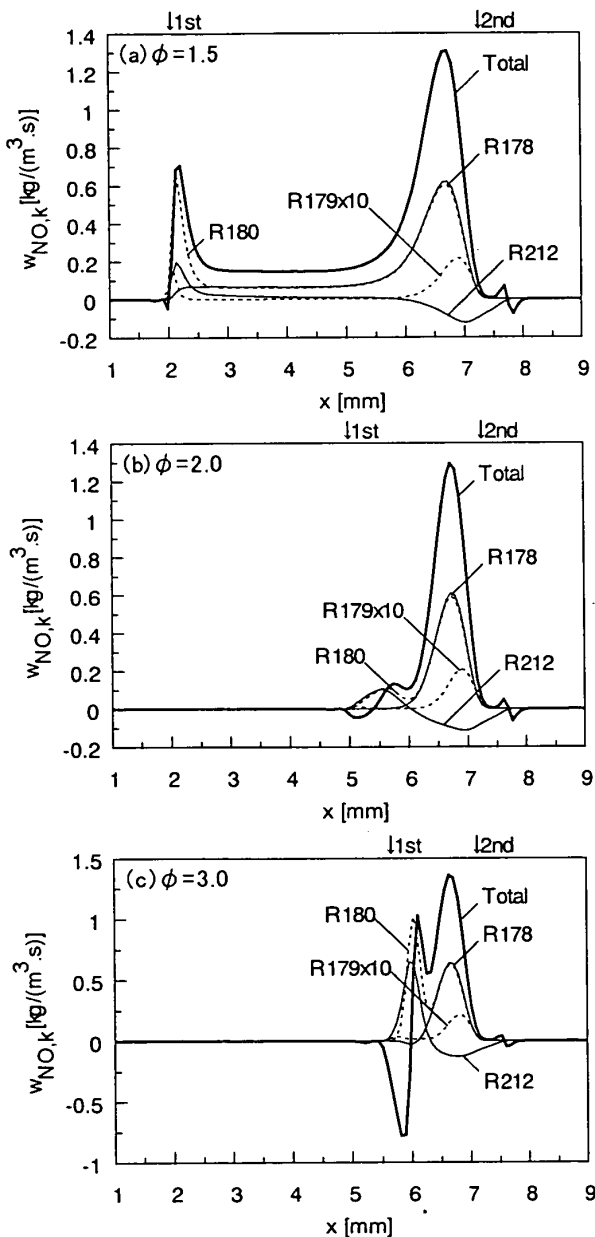


Fig.12 Distributions of  $\text{NO}$  mass production rates by various elementary reactions (Double flame,  $Y_{\text{O}_2, \text{air}}=0.8$ )

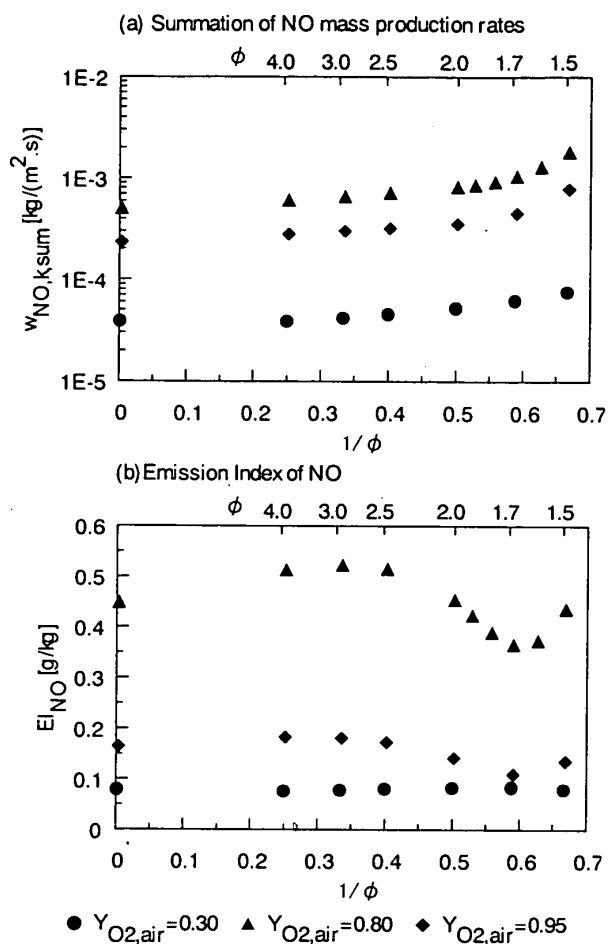


Fig.13 Effect of equivalence ratio on summation of NO mass production rates and Emission Index of NO

#### 4. 結 論

本研究では、詳細素反応機構を考慮し、酸素富化空気を用いた対向流層流火炎の数値解析を行い、酸素濃度や当量比が対向流拡散火炎および二重火炎の火炎構造およびNO生成などの燃焼特性に与える影響について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 対向流拡散火炎の熱発生速度は二つのピークを有するが酸素濃度の増加により、酸化剤側のピークが大きくなり、高温領域の幅が広がる。この二つのピークは、対向流二重火炎における過濃予混合火炎と拡散火炎に対応する。

- (2) 対向流拡散火炎では、酸素濃度が $Y_{O_2,air}=0.3$ 以下の場合、NOの生成は主にPrompt NOに支配される。酸素濃度が増大すると、熱発生速度の二つ目のピークに対応して、Thermal NOの寄与が増加し、Prompt NOの寄与は減少し、NO生成に対する正味の寄与が負になる。酸素濃度が $Y_{O_2,air}=0.8$ 以上の場合、NOの生成は急速に減少する。
- (3) 対向流二重火炎では、過濃予混合火炎位置でのPrompt NO生成は当量比が大きいほど減少し、拡散火炎位置でのThermal NO生成は当量比の変化によらずほぼ一定となる。高酸素濃度になると、 $EI_{NO}$ は当量比1.7の付近で最小となる。
- (4) 以上の対向流火炎の結果から、酸素富化空気燃焼では、Thermal 機構によるNO生成が支配的となることが予想される。

#### 文 献

- (1) 本田尚士監修, 環境圏の新しい燃焼工学, (1999), 216-222, フジ・テクノシステム.
- (2) 西村真, 須鎌護, 鈴木富雄, 高城敏美, 日本エネルギー学会, 79-4(2000), 321-328.
- (3) 西村真, 須鎌護, 鈴木富雄, 高城敏美, 日本エネルギー学会, 79-4(2000), 329-337.
- (4) 山下博史, 機論, 65-630, B(1999), 783-789.
- (5) 趙黛青, 山下博史, 山本剛, 古畑朋彦, 新井紀男, 化学工学論文集, 25-6(1999), 955-960.
- (6) GRI, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/), 1995.
- (7) Kee,R.J., Rupley,F.M. and Miller,J.A., CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics, SAND 89-8009(1989).
- (8) Smooke,M.D., *Reduced Kinetic Mechanism and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
- (9) Takeno,T.and Nishioka,M., *Combustion and Flame*, 92(1993), 465-468.
- (10) 西岡牧人, 栗田敦, 近藤雪水, 竹野忠夫, 燃焼研究, 104(1995), 75-90.
- (11) 竹野忠夫, 西岡牧人, 燃焼研究, 111(1998), 3-15.