

## ■原著論文／ORIGINAL PAPER■

## 急速混合型管状火炎の燃焼ガス排出特性に及ぼす吹出し流速比の影響

## Effects of the Air-Fuel Injection Velocity Ratio on the Emission Characteristics of the Rapidly Mixed Tubular Flame

王 艶雷・吉村 友吾・下栗 大右\*・石塚 悟

WANG, Yanlei, YOSHIMURA, Yuugo, SHIMOKURI, Daisuke\*, and ISHIZUKA, Satoru

広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1  
Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

2014 年 5 月 8 日受付 ; 2014 年 10 月 29 日受理 / Received 8 May, 2014; Accepted 29 October, 2014

**Abstract** : The effects of the air-fuel injection velocity ratio on the emission characteristics of the rapidly mixed tubular flame have been experimentally investigated. The NO<sub>x</sub> and CO emissions were examined for three tubular flame burners of which injection velocity ratios were  $\alpha_{st} = 1.0, 0.5$  and  $0.25$ . Results showed that the NO<sub>x</sub> and CO emissions of the rapidly mixed tubular flame could be drastically reduced for fuel lean conditions of the  $\alpha_{st} = 0.25$  burner due to the rich-lean combustion. As the injection velocity ratio was enough less than unity, a super-rich mixture could be formed around the injection part even under the fuel lean condition, and thus, the NO<sub>x</sub> formation was suppressed in the upstream region. A large amount of CO could be formed in the region, however, the CO was reduced by reacting with the excess O<sub>2</sub> which was not consumed in the upstream region.

**Key Words** : Rapidly mixed tubular flame, Injection velocity ratio, Gas analysis, Rich-lean combustion

## 1. 緒言

円管の接線方向に可燃性混合気を吹出し着火すると、回転伸長流中に管状の火炎帯が形成される。この管状火炎は、温度分布の対称性から断熱的である上、流れの回転に対し空気力学的にも安定であるといった特性を持ち、幅広い流量範囲において、可燃限界近傍まで安定燃焼可能であることが明らかにされている[1-5]。

近年、これらの特性を実用に供するべく実用管状火炎バーナが開発されている[5-8]。その応用技術の一つとして提案されているのが燃料と酸化剤を別々の接線方向スリットから吹出して火炎を形成させる「急速混合型管状火炎燃焼」[9]である。この燃焼法では、逆火の危険が無いのみならず、予混合燃焼と比べて同程度の燃焼ガス温度が達せられる上、NO<sub>x</sub> 排出濃度を 15 % 近く低減できることが明らかにされている[10]。

しかし、実用利用には燃焼器に課せられる厳格な排ガス規制を満たすことが前提である。例えば平成 21 年 3 月に施行された東京都環境局の低 NO<sub>x</sub>・低 CO<sub>2</sub> 小規模燃焼機

器認定要綱では、小型ボイラ類の場合、窒素酸化物の排出濃度が気体燃料では 60 ppm (0 % 換算) とされている。このような排ガス規制値を満たすためには、急速混合型管状火炎のさらなる低 NO<sub>x</sub> 化を図る必要がある。

そのような背景から、我々は急速混合型管状火炎の混合気形成過程を明らかにするべく実験を行った[11]。その結果、空気と燃料の「吹出し流速比」を変化させれば、接線方向吹出し付近に総括の当量比より希薄側、あるいは過濃側にシフトした混合気を形成可能であることを明らかにした。この特性を利用し、バーナ軸方向上流側から下流側にかけて濃淡燃焼[12-17]を実現できれば、排出 NO<sub>x</sub>, CO 濃度をさらに低減できる可能性がある。

そこで本研究では、急速混合型管状火炎の排出特性に及ぼす吹出し流速比の影響を明らかにするべく、吹出し流速比が異なる 3 種類の管状火炎バーナを用意し、燃焼ガス組成やガス温度の詳細な測定を行った。

## 2. 実験装置および実験方法

図 1 に、今回用いたバーナの概略を示す。バーナは内径 30 mm、長さ 110 mm の石英管に吹出しスリットを 4 つ、

\* Corresponding author. E-mail: cri@hiroshima-u.ac.jp

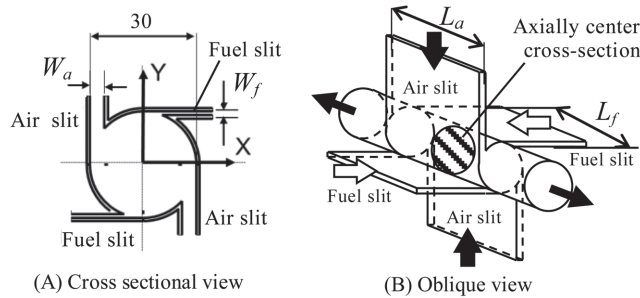


Fig.1 Tubular flame burner.

接線方向に取り付けたものである。空気および燃料であるメタンは、それぞれ2つの空気スリット(図1, Air slit: 幅  $W_a$ , 長さ  $L_a$ ), および燃料スリット(図1, Fuel slit: 幅  $W_f$ , 長さ  $L_f$ ) から別々に吹出される。本研究では、表1のようにスリットの長さ  $L$  と幅  $W$  が異なる3つのバーナ A, B, C を使い、空気と燃料の吹出し流速比を変化させて実験を行う。ここで吹出し流速比の目安として、以下で定義される量論比における吹出し流速比  $\alpha_{st}$  を導入する[11].

$$\alpha_{st} = \left( \frac{V_a}{V_f} \right)_{st} = \frac{A_f/A_a}{[Q_f/Q_a]_{st}} \quad (1)$$

式中,  $V$ : 平均吹出し流速 (m/s),  $A$ : スリット断面積 ( $m^2$ ),  $Q$ : 吹出し流量 ( $m^3/s$ ), 添え字  $a$ : 空気,  $f$ : 燃料,  $st$ : 量論状態である。本研究ではメタン空気混合気を対象とするため  $[Q_f/Q_a]_{st} = 0.105$  であり, したがって  $\alpha_{st}$  はスリット断面積比のみに依存するバーナ固有の値となる。例えば表1中, バーナ A では, ( $W_a, L_a$ ) および ( $W_f, L_f$ ) の値から  $A_f/A_a$  は 0.1 となり,  $\alpha_{st}$  は約 1.0 (0.95) となる。このバーナ A では, 総括当量比 1.0 のメタンと空気をそれぞれのスリットに供給すれば, スリット断面積比が理論燃空比とほぼ等しいため, それらは等速で吹出されることになる。これに対して  $\alpha_{st} < 1.0$  のバーナでは, 総括当量比 1.0 の燃料・空気を供給すれば燃料が高速に吹出され, 一方,  $\alpha_{st} > 1.0$  のバーナでは, 空気が高速に吹出されることになる。

なお, これまでに, バーナ軸方向中央断面(図1(B), Axially center cross-section)には当量比分布が半径方向, 周方向に均一な領域が幅広く形成されることが明らかにされている。さらに, その領域内の当量比は,  $\alpha_{st} > 1$  のバーナ ( $V_a > V_f$ ) では総括当量比に比べて空気過剰側に,  $\alpha_{st} < 1$  の

Table 1 Geometries and parameters of burners.

Burner	Air slit		Fuel slit		Injection velocity ratio at $\phi = 1.0$ $\alpha_{st}$	Swirl number $S$
	$W_a$ (mm)	$L_a$ (mm)	$W_f$ (mm)	$L_f$ (mm)		
A	2	70	0.2	70	1.0	5.0
B	4	70	0.2	70	0.5	2.5
C	4	70	0.2	35	0.25	2.5

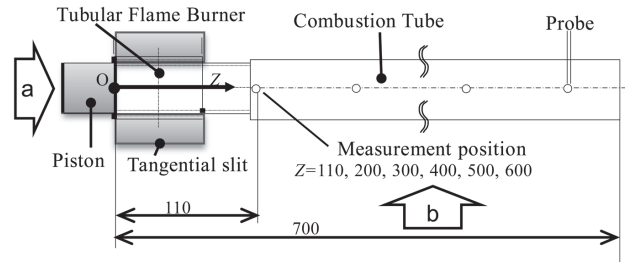


Fig.2 Schematic of the combustor.

バーナ ( $V_f > V_a$ ) では燃料過剰側にシフトすることが明らかとなっている[11]. 本研究ではこの特性を利用し, バーナ軸方向に濃淡燃焼を行わせて急速混合型管状火炎の低  $NO_x$ , 低  $CO$  化を図る。そこで, バーナ吹出し部に過濃混合気を形成させるべく, 表1のように,  $\alpha_{st} = 0.25, 0.5, 1.0$  と設定した。表中, 旋回強度の目安であるスワール数  $S$  [18] も示しているが,  $S$  は 1 のオーダー以上であれば燃焼状態に大きく影響しないことがこれまでの研究で確認されている[11]. また, 比較の予混合燃焼実験ではバーナ A を使い, 旋回強さを同等にするべく空気スリットのみから予混合気を吹出すこととした。

実用型管状火炎バーナでは, ほとんどの場合にバーナ軸方向の一端を封じ, 片端のみから吹出させて高温の燃焼ガスを利用し易くしている[5-10]. そこで本研究では, 図2のように管状火炎バーナの軸方向の一端を石英製のピストン(図2, 左側 Piston)で封じ, 他端には燃焼管として内径 36 mm, 長さ 600 mm の石英管(図2, Combustion tube)を取り付けて実験を行った。図2のように閉端を原点として軸方向距離  $Z$  をとると,  $Z = 0 \sim 70$  mm が接線方向スリット取り付け位置,  $Z = 700$  mm が燃焼管出口である。以降, スリット取り付け位置の  $Z = 0 \sim 70$  mm の範囲を「吹出し部」と呼ぶ。

燃焼管には  $Z = 110, 200, 300, 400, 500, 600$  mm の 6 カ所に測定用の小孔が設けられており, これらに燃焼管出口位置 ( $Z = 700$  mm) を加えた計 7 点において, ガスの濃度, 温度の測定を行った。濃度測定では, 石英製プローブでガスを採取し,  $NO_x$  計(島津製 NOA7600),  $CO \cdot CO_2$  計(島津製 CGT7000), およびガスクロマトグラフ(島津製 GC-8AIT)により,  $NO_x, CO$  のほか,  $O_2, H_2$  の濃度測定を行った。ガス温度の測定には,  $SiO_2$  被覆された R 型熱電対 (Pt/Pt - 13% Rh, 素線径 200  $\mu m$ ) を用いた。輻射補正は行っていない。温度, 濃度測定時には熱損失を抑制するべく燃焼管に断熱材を巻いて実験を行った。

燃料であるメタンおよび空気は, それぞれオリフィス流量計により流量を測定後, バーナへ供給する。本研究では, 安定な火炎が形成可能である空気吹出し流量  $Q_a = 200$  L/min に固定して実験を行う[11]. 火炎の観察にはデジタルビデオカメラ (SONY, HDR-CX700V) を使い, 図2の矢印 a, b で示す2方向から撮影した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 火炎外観

はじめにバーナ A~C を用い、吹出し空気流量  $Q_a = 200$  L/min, 当量比  $\Phi = 0.8$  の条件で火炎の観察を行った。得られた火炎画像を図 3 に示す。図中左側が火炎断面 (図 2 中矢印 a 方向から撮影), 右側が火炎側面 (図 2 中矢印 b 方向から撮影) の画像である。バーナに予混合気を供給して着火した場合, 図 3 (PM: Premixed, 左側) のような円形断面を持つ青色の管状の火炎帯が形成される。火炎側面の画像 (右側) によると, 予混合管状火炎は閉端 (図中 Piston) から燃焼管中程まで形成されており, それより下流側は高温燃焼ガスの充満する領域である。以降, 管状火炎形成領域の軸方向への長さを「火炎長さ」とする。予混合燃焼の場合, 管状火炎形成領域では, 軸方向に火炎色, ならびに発光強度が一様であることがわかる。

これに対し, バーナ A ( $\alpha_{st} = 1.0$ ) を用いて, 総括当量比  $\Phi_{Total} = 0.8$  の空気 (200 L/min) と燃料 (16.8 L/min) を別々のスリットから吹出し, 着火すると, 図 3(A) のように予混合の場合と類似した, 円形断面を持つ管状火炎が形成される (図 3(A) 左)。しかし, 予混合燃焼と比べ, 火炎直径はほぼ同程度であるものの, 火炎長 (火炎の軸方向への長さ) が増加している。また, 図 3(A) 右図では, 吹出しスリット付近には予混合燃焼よりも輝度の高い青炎が形成されていることや, 下流側では火炎の発光輝度が弱まっていることがみとめられ, 軸方向に火炎外観が大きく変化していることがわかる。

これに対し, バーナ B ( $\alpha_{st} = 0.5$ , 図 3(B)) の場合, バーナ A に比べ火炎直径がわずかに減少しており, さらに, 目視では吹出し部付近の火炎が緑色になっていることが確認されている。しかし, 吹き出し部での発光輝度は, 依然として予混合燃焼よりも高い。

一方, 吹出し流速比の最も低いバーナ C では (図 3(C),  $\alpha_{st} = 0.25$ ), 総括当量比がバーナ A, B と同じであるにもかかわらず火炎外観が一変する。側面の画像より, 吹出し部での火炎発光強度が著しく低下し, 燃焼管中程に比較的輝度の高い青炎が形成されていることがわかる。目視によると吹出し部には極めて発光の弱い, 濃緑色の火炎が形成されていること, さらにその下流側では, 火炎表面が濃緑色から青色へと徐々に変化する様子が確認されている。このように,  $\alpha_{st} = 0.25$  のバーナ C では, バーナ A, B とは全く外観の異なる火炎が形成されることが明らかとなった。

#### 3.2. 濃度分布および温度分布測定

##### 3.2.1 未燃ガス濃度分布

ここまでに, 吹出し流速比の変化により, 特に  $\alpha_{st} = 0.25$  の場合に火炎外観が大きく変化する様子が確認された。

次に,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  濃度を測定する前段階として, 各バーナにおいて吹出し部付近に形成される未燃混合気の燃料と酸素濃度分布を調べた。なお, 図 2 に示すような, バーナの

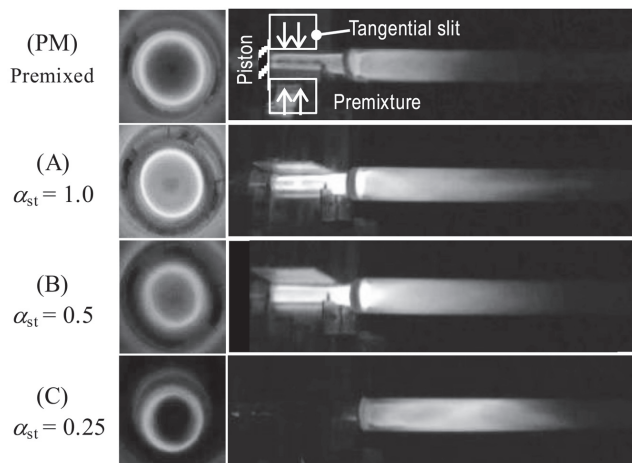


Fig.3 Appearance of flames ( $\Phi = 0.8$ ,  $Q_a = 200$  L/min).

一端を閉じ, 他端に燃焼管を取り付けた状態では, 吹き出し部におけるプローブでの濃度測定が極めて困難である。そこで, ここでは燃焼管を取り外し, 両端開放 (図 1(B) の状態) でバーナ本体中央における未燃ガス中の成分分析を行った。

まずバーナ A に対し, 総括当量比 0.8 の条件で, 軸方向中央断面 (図 1(B) の Axially center cross-section) における半径方向の燃料, 酸素濃度分布測定を行った。なお, 周方向への濃度分布についても確認するべく, 測定は, 図 1(A) の X 方向 (管軸から空気スリット方向), ならびに Y 方向 (燃料スリット方向) に行った。得られた各半径方向位置における燃料, 酸素濃度をもとに, 次式で局所当量比  $\Phi_{Local}$  を求め, その半径方向分布を図 4 に示している。

$$\Phi_{Local} = \frac{X_{CH_4} / X_{O_2}}{[F/O_2]_{st}} \quad (2)$$

ここで  $X_{CH_4}$ : メタンモル濃度,  $X_{O_2}$ : 酸素モル濃度,  $[F/O_2]_{st}$ : 燃料と酸素の量論比 (= 0.5) である。図 4 縦軸は局所当量比, 横軸は管軸を原点 ( $r = 0$  mm) とした半径方向距離で,  $r = 15$  mm が管壁にあたる。

確認のため, 予混合気を供給して半径方向へ局所当量比  $\Phi_{Local}$  を求めたところ (図 4 中, 鎖線),  $\Phi_{Local}$  は, いずれの半径方向位置においても総括当量比と等しい 0.8 となった。これに対して, 急速混合の場合, X 方向への測定では (図中○), 管壁付近の  $r = 14.5$  mm では空気スリット吹出し直後であるため局所当量比はゼロである。しかし,  $r = 14$  mm では局所当量比が急激に増加して  $\Phi_{Local} = 0.85$  となり, さらにそれより管軸側では一定の  $\Phi_{Local} = 0.9$  で推移していることがわかる。一方, Y 方向の測定結果では (図中●), 管壁付近の  $r = 14.5$  mm では燃料スリット吹出し近傍であるため, 局所当量比は 2.0 と高い値を取っている。しかし,  $r = 14$  mm で  $\Phi_{Local} = 0.75$  に一旦低下した後は, X 方向の測定結果と重なるように  $\Phi_{Local} = 0.9$  の一定値で推移している。

以上より, 急速混合型では, 未燃ガス領域中の管壁にご



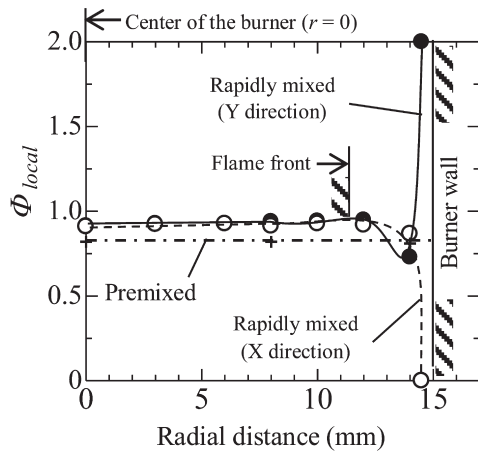


Fig.4 Radial distributions of the local equivalence ratio at the axially center position of the burner A ( $\alpha_{st} = 1.0$ ) for  $\Phi_{Total} = 0.8$  and  $Q_a = 200$  L/min.

く近い部分では、周方向・半径方向へ濃度が大きく変動していることが判明した。このことは、管壁に近い領域では酸素濃度、あるいは燃料濃度の高い領域が交互に螺旋状に分布していることを示唆している。一方、管軸側の幅広い領域では、当量比が周方向・半径方向へ均一になっていることが明らかとなった。また、図 4 中にはこの条件で燃焼させた場合の火炎帯位置を示しているが(図中, Flame front), 火炎帯は当量比分布が均一な領域に形成されていることがわかる。しかし、その領域の当量比は 0.9 と、総括当量比  $\Phi_{Total} = 0.8$  と一致していないことも見て取れる。ここで、図 3(A) に示された、この条件 ( $\alpha_{st} = 1.0, \Phi_{Total} = 0.8$ ) での火炎外観を見ると、吹出し部には当量比 0.8 の予混合の場合よりも輝度の高い火炎が形成されている。これは、バーナ A では総括当量比が 0.8 でも、吹出し部にはより量論比に近い混合気が形成されることを裏付けている。

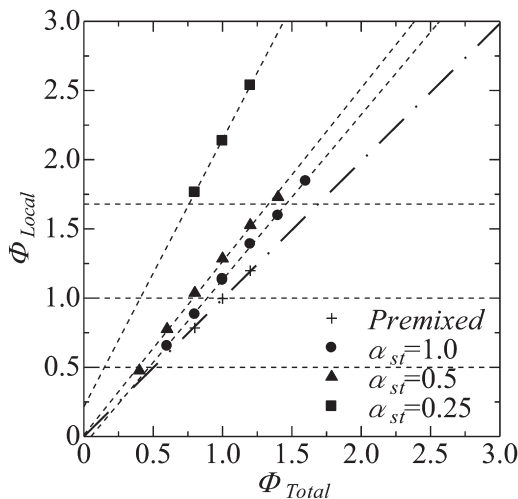


Fig.5 Variations of the local equivalence ratio with the total equivalence ratio ( $Q_a = 200$  L/min).

なお、図 4 において火炎帯形成位置での局所当量比は、管軸 ( $r = 0$  mm) における値とほぼ等しい。このことから、管軸での局所当量比が得られれば、火炎帯付近での局所当量比が見積もられると考えられる。そこで次に、各バーナで総括当量比を様々に変化させ、バーナ中央(半径方向・軸方向中央)における局所当量比の測定を行った。結果を図 5 に示す。ここでも測定は両端開放の状態で行っている。図中、縦軸は測定されたバーナ中央での局所当量比、横軸は総括当量比である。

図 5 より、まず予混合気を供給した場合、局所当量比  $\Phi_{Local}$  は総括当量比  $\Phi_{Total}$  に正比例して変化する。ところが急速混合型の場合、局所当量比は総括当量比に対して直線的に変化するものの、吹出し流速比の低下に伴い、その勾配が大きくなり、より過濃な混合気が形成される傾向を取っている。例えば、総括当量比  $\Phi_{Total} = 0.8$  の条件において、バーナ A ( $\alpha_{st} = 1.0$ ) では  $\Phi_{Local} = 0.9$ 、バーナ B ( $\alpha_{st} = 0.5$ ) では  $\Phi_{Local} = 1.1$ 、バーナ C ( $\alpha_{st} = 0.25$ ) では  $\Phi_{Local} = 1.75$  の混合気が形成されており、吹出し流速比の低下に伴い、バーナ中央の均一領域における当量比が増加していることがわかる。

このことから、同一の総括当量比条件であっても、吹出し流速比の低いバーナでは吹出し部で過濃燃焼となること、またその一方で、そこで消費されなかった余剰酸素が下流側にまわることで、上流と下流で「濃」と「淡」の差の大きい燃焼状態になることが予測される。以上の結果は、両端開放の状態でも得られた結果であり、一端を閉じ、燃焼管を取り付けた時の混合気の状態を完全に再現するものではないが、吹出し流速比変化による燃焼特性の変化に対し、大きな目安となるものである。次節以降では、このような吹出し流速比変化によって生じる当量比の軸方向分布が NOx や CO の生成に与える影響について詳細に調べる。

### 3.2.2. 排出ガス温度および排出 NOx, CO 濃度測定

次に、いよいよ、バーナ A~C を用い、図 2 のような片端吹出しとして NOx, CO 濃度の測定を行った。はじめに、図 6 に、総括当量比を様々に変化させた場合の燃焼ガス温度(A), 排出 NOx 濃度(B), および排出 CO 濃度(C)を示す。実験では、周囲空気の影響を除くため、測定位置を燃焼管出口より 100 mm 上流側 ( $Z = 600$  mm) とし、管軸上での温度, NOx, CO 濃度を測定した。

まず、排出ガス温度(図 6(A))は、予混合燃焼(+)の場合は希薄側  $\Phi_{Total} = 0.6$  で 1037 °C をとり、当量比の増加とともに緩やかに上昇、量論比付近において極大値 1216 °C をとり、それより過濃側では低下している。一方、急速混合燃焼では、全ての条件において  $\Phi_{Total} = 1.1$  で最大値をとっている。なお、図 6(A) の排出ガスの温度は火炎長さにも依存している。例えば図 3(PM) の管状火炎形成領域では、火炎帯が未燃ガスに覆われるために燃焼ガスが壁面に直接触れず、燃焼ガスから壁面への熱損失が極めて少ない状態となる。一方、その下流側の燃焼ガス領域では、高温燃焼

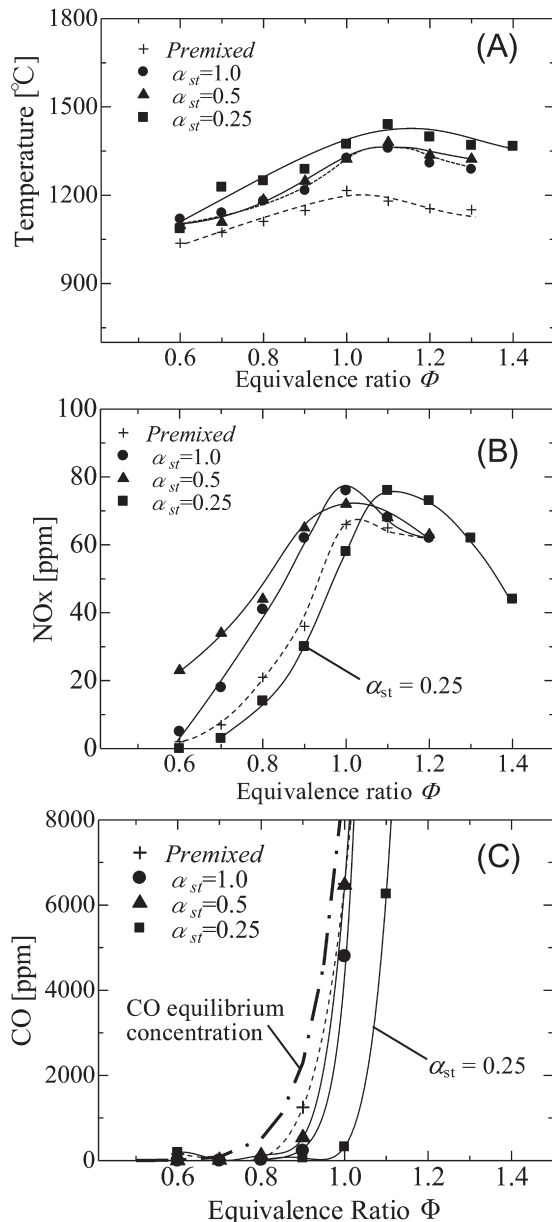


Fig.6 Variations of the burned gas temperature (A), NOx emission (B) and CO emission (C) with the total equivalence ratio  $\Phi_{Total}$  ( $Q_a = 200$  L/min).

ガスが壁面に接するため壁面へ大きな熱損失が生じる。つまり、火炎が短く燃焼ガス領域が増えるほど、燃焼ガスから壁面への熱損失が大きくなり、結果、排出段階での燃焼ガス温度が低下する傾向を取る。以上のような理由により、火炎が十分に短く、燃焼ガスが燃焼管壁に接する時間が長い予混合燃焼 (図 3, (PM)) では、急速混合型に比べて排出ガス温度が最大で約 220 °C 低下したと考えられる。また、急速混合型の場合には  $\alpha_{st} = 0.25$  (■) で最も高い温度を取っているが、これは逆に、図 3(C) のようにこの条件で火炎が最も長く、温度測定位置までの熱損失が低減されたことに起因すると考えられる。

これに対して NOx 濃度は (図 6(B)), 予混合燃焼の場合

(+),  $\Phi_{Total} = 0.6$  ではほぼゼロであるものの、燃料濃度を増加させると  $\Phi_{Total} = 0.7$  から急激に増加しはじめ、燃焼ガス温度が最大となる  $\Phi_{Total} = 1.0$  において最大値 66 ppm に達する。それよりさらに燃料濃度を増加させると、 $\Phi_{Total} = 1.1$  以上では NOx 濃度はわずかに減少するのみで高い値を維持している。この  $\Phi_{Total} = 0.8 \sim 1.0$  での NOx の急増は、燃焼ガス温度の上昇により、いわゆる Thermal NO が増加したためであり、過濃側の  $\Phi_{Total} = 1.1$  以上で NOx が高い値を維持しているのは Prompt NO の寄与が大きくなっているためと考えられる。当量比変化に対する以上のような NOx 排出濃度の挙動は、予混合燃焼において典型的なものであると言える。

一方、急速混合燃焼の場合、 $\alpha_{st} = 1.0$  (図 6(B), ●) では、当量比 0.7 から 18 ppm の NOx が排出され、 $\Phi_{Total} = 0.9$  では 62 ppm,  $\Phi_{Total} = 1.0$  では 76 ppm にも達する。それより過濃側では減少する傾向を取るものの、予混合に比べ、全ての当量比条件で高い値を取ることがわかる。

$\alpha_{st} = 0.5$  (図 6(B), ▲) でも同様に、NOx 濃度は全ての条件において予混合型より高い値を取っている。特に希薄側の  $\Phi_{Total} = 0.6 \sim 0.9$  では、NOx 濃度が  $\alpha_{st} = 1.0$  の場合や予混合燃焼に比べて大幅に高い値を取っていることがわかる。図 5 によると、バーナ B ( $\alpha_{st} = 0.5$ ) では、 $\Phi_{Total} = 0.6 \sim 0.9$  の範囲における吹出し部での局所当量比が  $\Phi_{Local} = 0.8 \sim 1.2$  の範囲にあり、Thermal-NO, Prompt-NO の両者が吹出し付近において多量に生成されたと考えられる。

ところが、急速混合燃焼の  $\alpha_{st} = 0.25$  (■) の場合、総括当量比 0.6 では NOx が検出されず、燃料濃度を増加させても、 $\Phi_{Total} = 0.7$  で 3 ppm, 0.8 で 12 ppm と、予混合燃焼よりも低い値で推移し、 $\Phi_{Total} = 1.0$  までは予混合燃焼より約 10 ppm 低い値で推移している。過濃側の  $\Phi_{Total} = 1.1$  以上では、他の条件に比べて高い値で推移するものの、実用で想定される希薄条件では NOx 濃度が大幅に抑制されている。特に  $\Phi_{Total} = 0.8$  では NOx 濃度が 12 ppm と、予混合燃焼 (+) の 20 ppm より約 40% 程度も低く、 $\alpha_{st} = 0.5$  (44 ppm), 1.0 (41 ppm) と比較すると 50% 以上も低減されていることがわかる。

以上のように、急速混合型管状火炎では、吹出し流速比によって排出 NOx 濃度が大きく影響を受けることが明らかとなり、特に  $\alpha_{st} = 0.25$  では、希薄側での NOx 排出が予混合に比べ最大 40% 近く低減されることが判明した。

次に、図 6(C) には各バーナでの排出 CO 濃度を示す。CO については平衡組成が排出濃度の目安となるため、図中、CO 平衡濃度 [19] を一点鎖線で示している。図のように、予混合燃焼の場合 (+),  $\Phi_{Total} = 0.8$  までは CO 濃度はゼロであったが、 $\Phi_{Total} = 0.9$  において 1250 ppm に急増し、 $\Phi_{Total} = 1.0$  では 5000 ppm 以上となる。また CO 排出濃度は各当量比での平衡濃度に近いことがわかる。

一方、急速混合型の排出 CO 濃度は、 $\alpha_{st} = 1.0$  (●), および 0.5 (▲) の場合、希薄側では予混合に比べて低い値で推移しているが、 $\Phi_{Total} = 1.0$  より過濃側では同程度の値をとる。ところが、 $\alpha_{st} = 0.25$  (■) では、希薄側で CO 濃度がほ

ぼゼロで推移するのみならず,  $\Phi_{\text{Total}} = 1.0$  でも約 320 ppm と, 他の条件に比べると大幅に抑制されていることがわかる.  $\Phi_{\text{Total}} = 1.1$  では 5000 ppm を超える濃度となるものの, 実用で想定される希薄条件では CO 排出濃度がほぼゼロであることが確認された.

以上の結果より, 急速混合型の  $\alpha_{\text{st}} = 0.25$  の場合には, 実用で想定される希薄条件において, 例えば  $\Phi_{\text{Total}} = 0.8$  では排出 NOx 濃度 12 ppm, CO 濃度 0 ppm と, NOx, CO を大幅に低減可能であることが明らかとなった.

### 3.2.3. 軸方向, 半径方向の温度, 濃度分布測定

次に, 急速混合型管状火炎で吹出し流速比の変化により NOx, CO の排出濃度が大きく変化したメカニズムについて詳細に検討するべく, 排出 NOx 濃度の高い  $\alpha_{\text{st}} = 0.5$ , および NOx 濃度の低い  $\alpha_{\text{st}} = 0.25$  の 2 つのバーナを用い, 実用で想定される燃料希薄の  $\Phi_{\text{Total}} = 0.8$  の条件で, NOx, CO 濃度のほか, ガス温度, および O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 濃度の 2 次元分布を調べた. 測定は  $Z = 110 \sim 700$  mm において半径方向に 4 点  $r = 0, 5, 10, 15$  mm で行った.  $\alpha_{\text{st}} = 0.5$  の結果を図 7 に,  $\alpha_{\text{st}} = 0.25$  の結果を図 8 に示す. 図中, 縦軸は半径方向距離

$r$  で,  $r = 0$  が管軸, 18 mm が燃焼管壁である. 横軸は軸方向距離  $Z$  で  $Z = 700$  mm が燃焼管出口である.

まず,  $\alpha_{\text{st}} = 0.5$  の場合 (図 7),  $\Phi_{\text{Total}} = 0.8$  でのガス温度分布は (図 7(A)),  $Z = 110$  mm の管軸 ( $r = 0$  mm) において既に約 1700 °C に達している. メタン空気混合気の  $\Phi = 0.8$  における断熱火炎温度は 1724 °C であるが[19], 熱電対の輻射損失 (約 200 K) を考慮すれば, このガス温度は  $\Phi = 1.0$  の断熱火炎温度 (1952 °C) に近いと言える. つまり,  $\alpha_{\text{st}} = 0.5$  では, 総括当量比 0.8 に対し, 吹出し部付近で量論比に近い燃焼が行われていると考えられる.

これに対応して NOx 濃度は (図 7(B)),  $Z = 110$  mm の管軸付近で 71 ppm にも達する.  $Z = 300$  mm より下流側では NOx 濃度が緩やかに低下する傾向を取るが,  $Z = 600$  mm では 44 ppm となる. ここで  $Z = 300$  mm から NOx が低下する原因について考察するべく図 7(D) の酸素濃度に注目すると,  $Z = 110$  mm の管軸側 ( $r = 0 \sim 5$  mm) ではほぼゼロで, やはり上流側では量論比付近での燃焼が行われていると考えられる. これに対して NOx が低下する  $Z = 300$  mm の燃焼ガス領域中 ( $r = 0 \sim 5$  mm) では酸素濃度が僅かに上昇しており, このことから, この  $Z = 300$  mm より下流側での

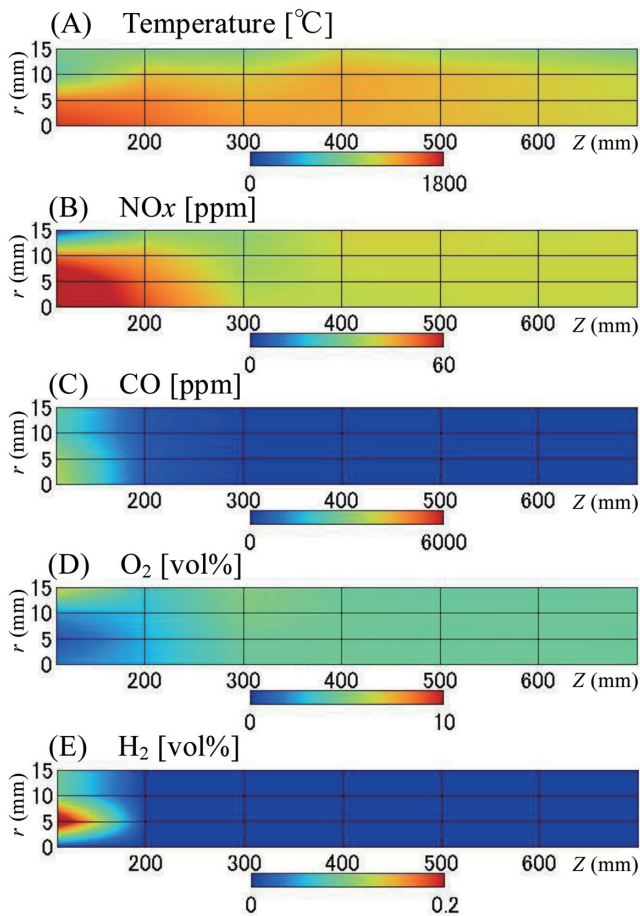


Fig.7 Two dimensional distributions of the gas temperature (A), NOx (B), CO (C), O<sub>2</sub> (D), and H<sub>2</sub> (E) concentrations for  $\alpha_{\text{st}} = 0.5$  ( $\Phi_{\text{Total}} = 0.8, Q_a = 200$  L/min).

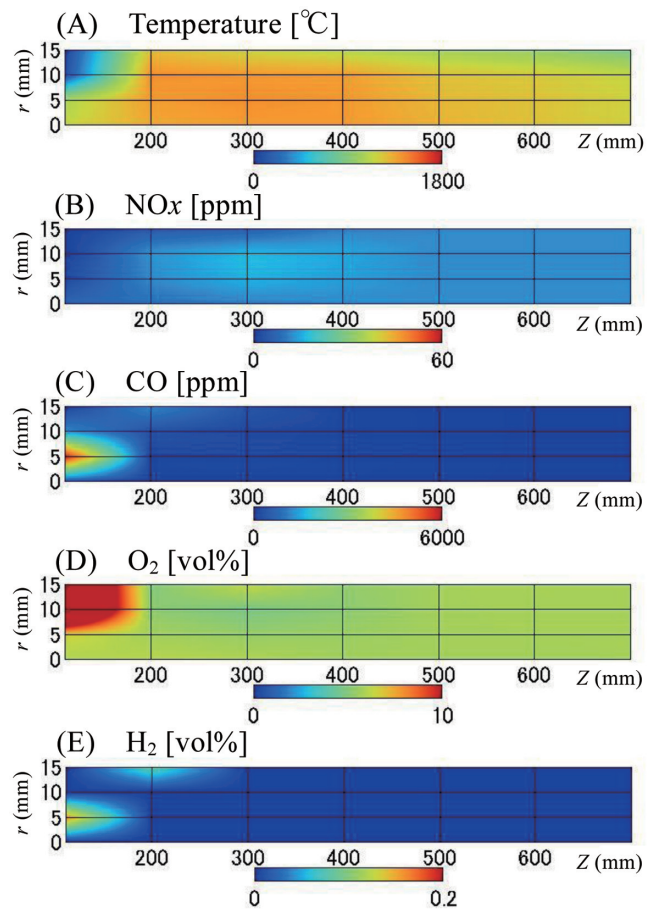


Fig.8 Two dimensional distributions of the gas temperature (A), NOx (B), CO (C), O<sub>2</sub> (D), and H<sub>2</sub> (E) concentrations  $\alpha_{\text{st}} = 0.25$  ( $\Phi_{\text{Total}} = 0.8, Q_a = 200$  L/min).



NO<sub>x</sub> 低下は、その付近から、上流で消費されなかった余剰酸素による二次燃焼が行われ、その燃焼ガスによって NO<sub>x</sub> が希釈されていることに起因すると考えられる。

一方、CO 濃度 (図 7(C)) は  $Z = 110$  mm の管軸側の燃焼ガス領域中 ( $r = 0 \sim 5$  mm) において最大 3600 ppm に達している。また、同じ位置では水素が検出されており (図 8(E))、このことから、 $\alpha_{st} = 0.5$  では、 $\Phi_{Total} = 0.8$  の条件でも、吹出し部において若干過濃な燃焼が行われていると考えられる。ところが CO 濃度は、 $Z = 200$  mm では 400 ppm 以下にまで大幅に減少し、さらに  $Z = 400$  mm では 60 ppm、 $Z = 600$  mm では 30 ppm まで低下している。この CO 濃度が低下する  $Z = 200 \sim 300$  mm は、前述のように、上流で消費されなかった余剰酸素が燃焼領域に供給され始める位置であり、やはりこの部分から CO と余剰 O<sub>2</sub> の二次燃焼が始まっていると考えられる。なお、管壁付近の未燃領域 ( $r = 15$  mm) では、 $Z = 200$  mm で酸素濃度が一旦低下し、 $Z = 300$  mm で増加していることが認められる。これは図 4 で示されたように、未燃ガス中の管壁に近い領域では、酸素濃度、および燃料濃度の高い部分が、交互に螺旋状に分布していることに起因するものと推察される。

以上の結果より、 $\alpha_{st} = 0.5$  では、 $\Phi_{Total} = 0.8$  において、上流側 (吹出し付近) で量論比～若干過濃側での燃焼が行われ、その位置において多量の NO<sub>x</sub> 濃度が生成され、結果、排出 NO<sub>x</sub> 濃度が 44 ppm と高い値を取ったと考えられる。ただし CO に関しては、上流側で消費されなかった余剰酸素により酸化され、排出段階では 30 ppm 以下まで低下することが確認された。

次に  $\alpha_{st} = 0.25$  の場合 (図 8)、温度分布を見ると (図 8(A))、上流側  $Z = 110$  mm の管壁付近  $r = 10 \sim 15$  mm ではガス温度が常温に近い。この条件では火炎が長いことが確認されており (図 3 (C))、この結果はやはり、未燃領域が幅広く存在していることを示唆している。これに対して、上流側  $Z = 110 \sim 300$  mm の燃焼ガス領域 ( $r = 0 \sim 5$  mm) の温度は最大でも 1433 °C である。これは  $\alpha_{st} = 0.5$  の最高温度 (1709 °C) に比べて低く、 $\Phi = 0.8$  の断熱火炎温度 1724 °C に比べても十分に低い。下流側でも  $Z = 700$  mm に至るまで全域で 1400 °C 以下で、燃焼ガス温度が大幅に抑制されていることがわかる。排出段階 ( $Z = 600$  mm) では他の条件より高い値を取っているが (図 6(A))、これは先述のように、火炎が長いために燃焼ガスから管壁への熱損失が抑制されたためである。

これに対して NO<sub>x</sub> (図 8(B)) は、 $\alpha_{st} = 0.5$  の場合と対照的に、上流側の  $Z = 110$  mm で約 7 ppm と非常に低い値を取る。下流側に向け緩やかに増加し  $Z = 300$  mm の  $r = 10$  mm で最大値に達するが、その値は 17 ppm である。さらにそこから下流側でも 12～15 ppm の低い値のまま推移し、排出段階でも 12 ppm と、非常に低い値を取っている。

一方、CO は (図 8(C))、火炎帯の存在する付近の  $Z = 110$  mm、 $r = 5$  mm 付近において 5000 ppm を超えている。また、同じ位置では水素が検出されており (図 8(E))、このことから

やはり、 $\alpha_{st} = 0.25$  では、吹出し部において超過濃な燃焼が行われていると考えられる。ところが、 $\alpha_{st} = 0.5$  の場合と同様、CO は下流側で急低下し、 $Z = 200$  mm では 200 ppm、 $Z = 600$  mm では 10 ppm となる。ここで酸素濃度分布を見ると (図 8(D))、 $Z = 200$  mm より下流側で急低下していることが見て取れ、したがって、 $\alpha_{st} = 0.25$  では、吹出し部では超過濃な燃焼が行われる一方、そこで生成される CO は下流側で余剰酸素により急速に酸化されていると考えられる。

以上の結果より、 $\alpha_{st} = 0.25$  の  $\Phi_{Total} = 0.8$  では、上流側で低酸素、且つ低温な超過濃燃焼が行われており、Prompt-NO、Thermal-NO 両者の生成が抑制されている上、そこで生成される CO は、下流側で余剰酸素によって CO<sub>2</sub> へと酸化されていることが判明した。これは、いわゆる濃淡燃焼による NO<sub>x</sub>, CO 低減である。

濃淡燃焼法の実用利用の一例が、給湯器用のスリットバーナである。スリットバーナにおける濃淡燃焼では、 $\Phi = 1.3$  程度の「濃」火炎内炎で生成される Prompt-NO と、その後流の高温領域で生成される Thermal-NO が NO<sub>x</sub> 生成量の大部分を占めることが明らかにされている [15-17]。これに対して  $\alpha_{st} = 0.25$  の急速混合型管状火炎では、図 5 や図 8 で示されたように、吹出し部に超過濃混合気が形成されているにもかかわらず、管状火炎による安定燃焼が行われ Prompt-NO 生成が大幅に抑制されている。さらに、上流側で超過濃な燃焼が行われることで下流側は超希薄での燃焼となり、火炎全域に渡って低温・低反応速度の緩慢な燃焼状態であると推察される。結果、図 8(A) のように高温領域が形成されず、排出 NO<sub>x</sub> 濃度が 12 ppm まで低減されたと考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、急速混合型管状火炎の空気-燃料の吹出し流速比が異なる 3 種類の管状火炎バーナ ( $\alpha_{st} = 0.25, 0.5, 1.0$ ) に対し、燃焼ガス温度の測定やガス分析を行い、以下の知見を得た。

1. 火炎外観の観測より、急速混合型管状火炎で吹出し流速比を変化させた場合、特に吹出し部付近での火炎外観が大きく変化することが確認された。
2. 吹出し部付近の未燃混合気の局所当量比測定の結果、吹出し流速比が小さいほど、すなわち、燃料の方が空気に比べて高速に吹出されるほど、吹出し部付近により過濃な混合気が形成されることが判明した。
3. 排出 NO<sub>x</sub>, CO 濃度測定の結果、NO<sub>x</sub> は、 $\alpha_{st} = 0.25$  の急速混合型管状火炎で、予混合燃焼に比べて希薄側で最大 40% 近くも低減されることが明らかとなった。
4.  $\alpha_{st} = 0.25$  の場合、NO<sub>x</sub> 濃度はバーナ上流側から低い値で推移し、排出段階では 12 ppm と大きく低減されることが確認された。一方、CO 濃度は上流側で 5000 ppm を超える高い値を取るものの、下流側で急低下し、排出段階ではほぼゼロとなることが判明した。酸素や水素の

濃度分布測定結果も考慮すると、 $\alpha_{st} = 0.25$  ではバーナ内で濃淡燃焼が実現されることで、 $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  が同時に低減されたと考えられる。

## 謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(挑戦的萌芽研究・課題番号 23656150；連続可変型多段燃焼と自己再循環による超低  $\text{NO}_x$  バーナの実現)の助成を受けて行った。ここに謝意を表する。

## References

- Ishizuka, S., *Proc. Combust. Inst.* 20: 287-294 (1984).
- Ishizuka, S., *Combust Flame* 75: 367-379 (1989).
- Ishizuka, S., *J. Loss Prev. Process Ind.* 4: 185-193 (1991).
- Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.* 19: 187-226 (1993).
- Ishizuka, S., and Dunn-rankin, D., *Tubular Combustion (Sustainable Energy)*, Momentum Press (2013).
- Ishizuka, S., Shimokuri, D., Ishii, K., Okada, K., Takashi, K., and Suzukawa, Y., *J. Combust. Society Japan.* (in Japanese) 51: 104-113 (2009).
- Ishizuka, S., Hagiwara, R., Suzuki, M., Nakamura, A., and Hamaguchi, O., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 65: 3845-3852 (1999).
- Hagiwara, R., Okamoto, M., Ishizuka, S., Kobayashi, H., Nakamura, A., and Suzuki, M., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 66: 3326-3232 (1999).
- Ishizuka, S., Motodamari, T., and Shimokuri, D., *Proc. Combust. Inst.* 31: 1085-1092 (2007).
- Shimokuri, D., Kubo, C., and Ishizuka, S., *J. Combust. Soc. Japan.* (in Japanese) 47: 300-307 (2005).
- Shimokuri, D., Eto, Y., Kimura, K., Gokita, N., Wang, E., and Ishizuka, S., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 78: 185-193 (2012).
- Yoshida, K. ed., *Gasu Nenshou no Riron to Jissai*, The Energy Conservation Center, p.136 (2000).
- Mizutani, Y., *Nenshou Kougaku*, Morikita Publishing, p.218 (2001).
- Yamagishi, K., Nozawa, M., Yoshie, T., Tokumoto, T., and Kakegawa, Y., *Proc. Combust. Inst.* 15: 1157-1166 (1975).
- Sogo, S., Homma, R., and Hase, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 64: 290-297 (1998).
- Watanabe, T., and Nakajima, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 66: 264-270 (2000).
- Watanabe, T., and Nakajima, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 66: 247-252 (2001).
- Syred, N., and Beer, J. M., *Combust. Flame* 23: 156 (1974).
- NASA, The NASA Computer Program CEA, (1995).