

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

当量比変動に対するよどみ流予混合火炎の応答

Response of a Premixed Flame to Equivalence Ratio Fluctuation in Stagnation Flow

末永 陽介¹・北野 三千雄^{2*}・柳岡 英樹³・藤田 尚毅²SUENAGA, Yosuke¹, KITANO, Michio^{2*}, YANAOKA, Hideki³, and FUJITA, Naotake²¹ 岩手大学大学院工学研究科 〒020-8551 盛岡市上田4-3-5
Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020-8551, Japan² 岩手大学工学部 〒020-8551 盛岡市上田4-3-5
Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020-8551, Japan³ 弘前大学理工学部 〒036-8561 弘前市文京町3番地
Hirosaki University, Bunkyo-cho 3, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

2003年6月19日受付; 2003年9月1日受理 / Received 19 June, 2003; Accepted 1 September, 2003

Abstract : Experimental study was made to investigate the flame which propagates through a methane/air mixture flow with periodic concentration fluctuation by using an original stagnation flow type burner. The burner was devised so as to fluctuate the mixture concentration (equivalence ratio) only in the direction of flow without varying the velocity field. Two kinds of fluctuation, $(\phi_m, a)=(0.85, 0.06)$ and $(1.07, 0.17)$, where ϕ_m is the mean equivalence ratio and a is the fluctuation amplitude, were examined for the frequency f ranging from 3 Hz to 50 Hz, and following results were obtained: (1) In a certain range of f , the fluctuation widths of the burning velocity, the temperature and the CO concentration of the burnt gas were larger than those expected from the equivalence ratio fluctuation of the mixture at the burner exit. (2) For the lean side fluctuation with $\phi_m=0.85$ and $a=0.06$, the time average NOx concentration of the burnt gas for the dynamic flame is higher than that for the static flame in the low frequency range, but this relation is reversed in the high frequency range. (3) For the fluctuation with $\phi_m=1.07$ and $a=0.17$, which includes the stoichiometric condition, the NOx concentration of the dynamic flame is always lower than that of the static flame, and it lowers with an increase in f and has the minimum at a certain value of f . These characteristics of the dynamic flame can be related with the periodic change of the direction of flame movement: when the flame moves against (along) the mixture flow, the inflow mass flux of the deficient reactant at the flame front increases (decreases) as compared with the steady or stationary flame.

Key Words : Premixed combustion, Concentration fluctuation, Flame response, Burning velocity, Burnt gas temperature, Nitrogen oxide

1. 緒言

現在、予混合燃焼器の高性能化(排気浄化, 低燃費化)のために、時間的あるいは空間的に濃度分布を形成させて燃焼させる方式が積極的に用いられている。例えば、ガソリンエンジンにおいては、燃料をシリンダー内へ直接噴射する成層希薄燃焼方式が実用化され、一方、連続燃焼器においても、混合気の組成を強制的に変動させて窒素酸化物(NOx)濃度の低減を図る試みがなされている[1-3]。いずれの場合も、火炎は濃度が一様でない混合気中を伝播するこ

とになり、その性質は時間とともに変化する。この動的効果が、均質混合気のと時の火炎にはない特性を生じさせる。

このような火炎の動的応答に関する数値的研究として以下のものがある。Cruz et al.[4]は、管内における成層混合気中と均質混合気中を伝播する層流火炎について調査し、火炎が量論から希薄、あるいは過濃から量論な混合気中を伝播するとき、その伝播速度は、対応する当量比の均質混合気中を伝播する火炎よりも速くなり、量論から過濃な混合気中を伝播するとき、これとは逆に遅くなることを示した。Marzouk et al.[5]は、よどみ流中における伸長火炎に対して、量論から希薄に単発的に当量比変化を与えた時の火炎構造と燃焼速度に及ぼす影響を調査している。その結果、当量比勾配を伴う混合気中の火炎の伝播は、均質混合気

* Corresponding author. E-mail: kitano@iwate-u.ac.jp

場合とは異なり、火炎背後の熱やラジカルによる火炎支持作用 (back support) のために、希薄可燃限界以下の当量比においても燃焼を維持すること、また、当量比が増加するにつれて、慣性的に燃焼が継続する効果 (flame inertia) が強まることを示している。Lauvergne and Egolfopoulos[6]は、対向流中に形成される希薄可燃限界付近の火炎について、供給する混合気の燃料濃度を正弦波的に変化させた場合に、可燃限界が広がることを示した。和久ら[7-9]は、一様な未燃混合気中を伝播する平面一次元火炎が、異なった組成を持つ、列状の濃度はん点と単一の濃度はん点に出合ったときの火炎の挙動について研究を行い、前者の場合においては、火炎はしわ状に変形するが、その変形は時間とともに減衰するのに対し、後者の場合においては、火炎形状の変形は増大し続けることを明らかにした。

一方、成層混合気中を伝播する火炎に関する実験的研究としては以下のものがある。Karim and Lam[10]は、静止空気が充填された垂直円管内にメタンを解放し、自然対流と分子拡散により成層濃度場を形成させ、この雰囲気における火炎の伝播速度が、対応する燃料濃度の均質混合気中を伝播する火炎よりも速くなることを示した。吉田ら[11]は当量比の異なる混合気を層状に配置できる定容燃焼器を用い、当量比の組み合わせを種々変化させた場合の火炎伝播状況を調査している。その結果、直接点火できない希薄予混合気でも、可燃範囲内の混合気の中に層状に配置することによって燃焼させることができることを明らかにした。北川ら[12,13]は、定容燃焼器内の静止した空気中またはプロパン/空気混合気中に同じ種類の燃料を噴射することによって形成される成層濃度場において、着火位置や着火時期を変化させた時の燃焼過程を調査した。その結果、空気中に燃料を噴射した場合、点火時期が遅くなるにつれて未燃燃料量が増加すること、予混合気中に燃料を噴射した場合、噴流内の燃料濃度の高い領域で形成された火炎は、希薄予混合気の領域に達した後も、ある程度の期間伝播し続けること、そして予混合気の当量比が0.4以上になると、火炎伝播が顕著になることが明らかとなった。

以上のように、これまでの成層燃焼に関連した研究の多くは単発の濃度変化を対象としたものであり、また、実験研究で扱っている流れ場や濃度場は単純でない。そこで本研究では、混合気の濃度が周期的に変動する場合の火炎について実験的に調査する。流れ場や濃度場の単純化のため、流れ方向にのみ濃度変動する混合気流をつくり、これを壁面に衝突させるよみ流タイプの予混合バーナを作製した。メタン/空気火炎について、濃度変動を与えたときの燃焼速度、燃焼ガス温度、燃焼ガスのCO濃度の動的応答について調査し、さらに周期的濃度変動のNOx排出特性への影響についても調査した。そして、これらの結果を濃度変動を与えない場合の火炎(定常火炎)の結果と比較した。

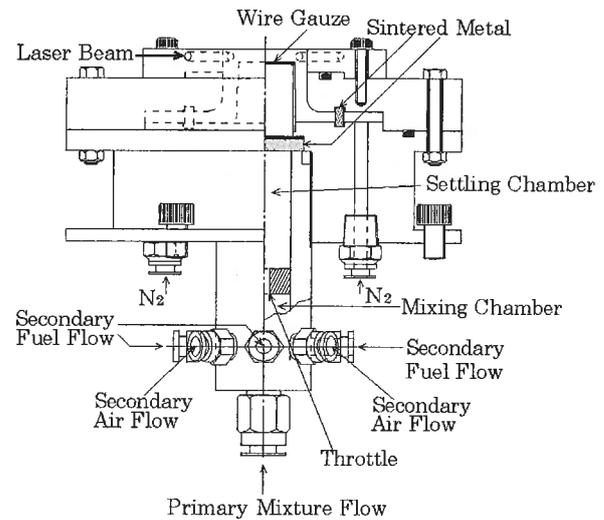


Fig.1 Schematic of the burner.

2. 実験装置および実験方法

2.1. 実験装置

本実験で使用したバーナを図1に示す。火炎形状の一次元性を確保し現象の単純化を図る目的で、主流方向にのみ濃度変動を与え、半径方向には濃度分布をもたないよう、バーナに工夫を施した。バーナは混合室と整流室からなる。まず混合室に上流で十分に混合(1次燃料+1次空気)した濃度、流量ともに一定の混合気(主流混合気)を供給し、これに混合気濃度を変動させるための2次燃料、2次空気を交互に供給する。この時、主流混合気と2次燃料あるいは2次空気を迅速に混合させるため、混合室壁に設けた8個の小孔(内径2.5mm)の4個から燃料、他の4個から空気を主流方向に垂直に噴出させた。さらに混合を促進するため、長さ10mm、内径4mmの絞りを通過させた後、整流室へ導く。整流室では、流入した混合気を厚さ5mmの焼結金属板、およびバーナ出口において1枚ごとに45°ずつ回転させて重ね合わせた4枚の金網(#100)で整流し燃焼場に供給する。バーナ出口径は20mmである。また、周囲の空気の影響を無くすために、混合気供給口の周囲から窒素を供給し、火炎を周囲空気からシールドしている。

2.2. 混合気供給方法

流路系の概略を図2に示す。まずバーナから流量、当量比ともに一定の混合気(主流混合気)を噴出させ $L=20$ mm離れた衝突壁に平行な火炎を形成する。次に主流混合気に対して濃度変動を与える成分である2次燃料、2次空気を電磁弁を用いて交互に供給する。その際、両者の流量の和が一定となるように調整し、バーナからの流出速度を一定に保ったまま、濃度変動だけを与える。電磁弁の開閉時期を制御することにより、濃度変動周波数 f を変化させた。

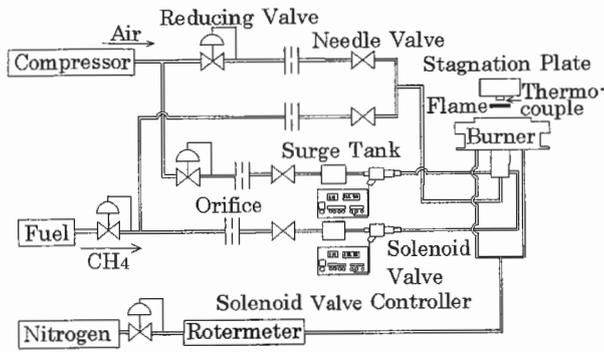


Fig.2 Schematic of the gas supplying system.

実験は混合気流出速度 U を 100 cm/sec とし, f は $5 \sim 50 \text{ Hz}$ で変化させた. 平均当量比を ϕ_m , 当量比振幅を a とすると, バーナ出口における当量比変動範囲は, $\phi = \phi_m \pm a$ で与えられるが, 実験は次の 2 つの変動条件について行われた. 一つは $\phi_m = 0.85$, $a = 0.06$ の希薄域のみでの変動 (以下, 変動 $F_{0.85}$ と表示), もう一つは $\phi_m = 1.07$, $a = 0.17$ の燃焼速度が最大となる当量比を挟んでの変動 (以下, 変動 $F_{1.07}$ と表示) である.

2.3. 混合気濃度と火炎位置の測定

混合気濃度の測定には $3.39 \mu\text{m}$ 赤外吸収法[14]を用いた. レーザー光はチョッパーにより約 1000 Hz の断続光に変え, 集光レンズにより約 0.2 mm に絞り, バーナ出口中心部を通過させた. 透過光強度は $3.39 \mu\text{m}$ の波長のみを通過させるバンドパスフィルタを介して, PbSe 光導電素子により検出した. 火炎位置は衝突壁から火炎帯中心までの距離とし, 高速度ビデオカメラ (Kodak 社製: SR-1000, 撮影速度: 1000 FPS) を用いて撮影し, 得られた画像から求めた. 火炎帯中心は目視により判断した. なお, バーナ出口において半径方向の濃度分布はリム付近を除きほぼ一様であることは予め確認している.

2.4. 燃焼ガス温度の測定

火炎背後の燃焼ガス温度は, 素線径 $50 \mu\text{m}$ の Pt-Rh20%/Pt-Rh40% 熱電対を用いて測定した. 温度測定はセラミック製の衝突壁から上流に 4 mm 離れたバーナ中心軸上の位置 (P_4 点) である. 得られた温度データは時定数 τ を用いて次式により補償した.

$$T_b = (1 + \tau \frac{d}{dt}) T_c$$

ここで T_b は燃焼ガス温度, T_c は熱電対指示温度である [15]. τ は次のようにして求めた. 本実験での最低周波数 ($f=3\text{Hz}$) においては火炎は変動に完全追従するとし, 上式で補償したときの T_b の変動幅と, 当量比変動に対応する定在火炎の燃焼ガス温度の変化幅とが一致するように τ を

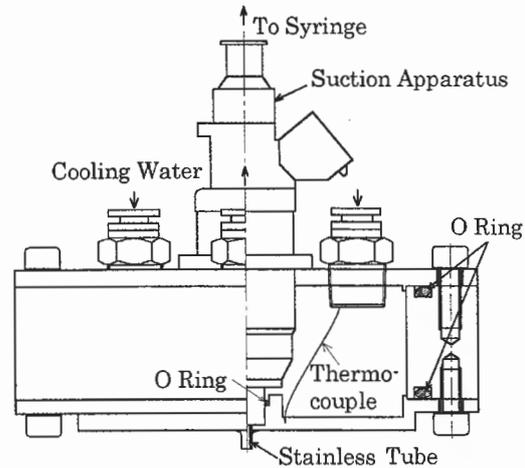


Fig.3 Schematic drawing of burnt gas sampling.

決めた. その結果, 変動 $F_{0.85}$ と変動 $F_{1.07}$ について, それぞれ $\tau = 28.3 \text{ msec}$, $\tau = 21.7 \text{ msec}$ となった. なお, この測定位置において, 壁面による熱損失の影響が小さいことは予め確認している.

以下, 当量比を変動させたときの火炎を動的火炎, 当量比が一定で定在するときの火炎を静的火炎と呼ぶこととする.

2.5. 燃焼ガスの成分分析 (CO 濃度)

CO の分析を行うにあたり, 燃焼ガスは, 次のように吸引した. 吸引に用いた管は外径 2 mm , 内径 1 mm のステンレス製であり, 吸引は壁面温度が約 40°C の水冷壁から上流 4 mm の位置 (P_4 点) で行った. 吸引管の存在による流れ場への影響を極力抑えるために, 管先端の外側にはテーパ加工を施した. 非燃焼時において, サンプリング位置における流速を熱線風速計で測定した結果, 35 cm/sec であった. 燃焼時には, 火炎による熱膨張のために, これ以上の流速になることが予想されるが, この速度で燃焼ガスの吸引を行った. 吸引は静的火炎の場合は連続的に, 動的火炎の場合は間欠的に行った. 図 3 は間欠吸引に用いた水冷壁の概略である. 燃焼ガスの間欠吸引は電磁弁を用いて行うが, 吸引時間は全ての f に対して約 3 msec である. 燃焼ガス中の成分濃度はガスクロマトグラフ (島津製作所製: GC-14A) を用いて測定し, N_2 を標準物質として CO について濃度比を算出した. 測定は同位相において 3 回行い, その平均値を図に示した.

2.6. 燃焼ガスの成分分析 (NOx 濃度)

窒素酸化物濃度 ($\text{NO} + \text{NO}_2$, 以下, NO_x) の分析に使用した燃焼ガスの吸引系と NO_x 分析系の概略を図 4 に示す. 燃焼ガスの吸引は, 水冷壁から 4 mm 上流の位置 (P_4 点) に加えて 2 mm 上流の位置 (P_2 点) においても行った. 吸引に

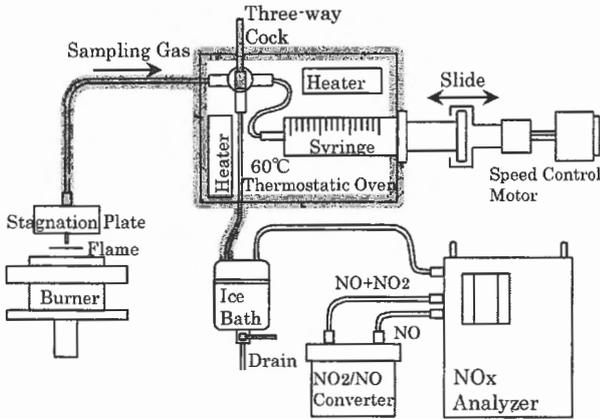


Fig.4 Schematic drawing of burnt gas sampling and NOx analysis system.

は内径 1.7 mm, 外径 2.7 mm の石英管を用いた。吸引速度は、各吸引位置における非燃焼時のガス流速 (P_4 点では 35 cm/sec, P_2 点では 17 cm/sec) とした。NOx 濃度の分析には常圧形化学発光方式 (島津製作所製: NOA-305A) を用いた。NOx の凝縮水への溶解や配管による触媒作用を防ぐ目的で、配管からアイスバスまでを約 60°C に保ち、配管にはテフロンチューブを用いた。

3. 実験結果および考察

以下では、バーナ出口における混合気の当量比 ϕ を $\phi_m \pm a$ の範囲で変化させたときの動的火炎と静的火炎の比較を行っているが、後者の静的火炎については、添字 "0" をつけて表示している。

3.1. 静的火炎

3.1.1. 火炎位置と燃焼ガス温度

図 5, 図 6 にそれぞれ当量比一定の火炎 (静的火炎) の位置 δ_0 と燃焼ガス温度 T_{b0} を示す。Yamaoka and Tsuji[16]は、メタン/空気火炎の燃焼速度が最大となる当量比として $\phi = 1.05$ を得ているが、図 5 でも、火炎は、この当量比近傍において最も上流に位置し、それより希薄あるいは過濃になるにつれて、燃焼速度の低下のために、下流位置で安定する。 T_{b0} の最大値も $\phi = 1.05$ 近傍に存在し、また、 ϕ に対する δ_0 と T_{b0} の変化の傾向が類似しており、燃焼速度と T_{b0} とが密接に関係していることを反映している。図 5 には、 δ_0 に替え、流れ場をポテンシャル流れで近似して求めた静的火炎の燃焼速度 S_{u0} ($= \epsilon \cdot \delta_0$, ここで $\epsilon = U/L = 50$ [1/sec]:伸長率) を縦軸とする表示もなされている。この結果は後述する動的火炎の燃焼速度との比較に用いる。

3.1.2. NOx 濃度

P_2 点と P_4 点における、 ϕ と燃焼ガス中の NOx 濃度の関係を図 7 に示す。測定は $\phi = 0.79 \sim 1.3$ の範囲で行った。

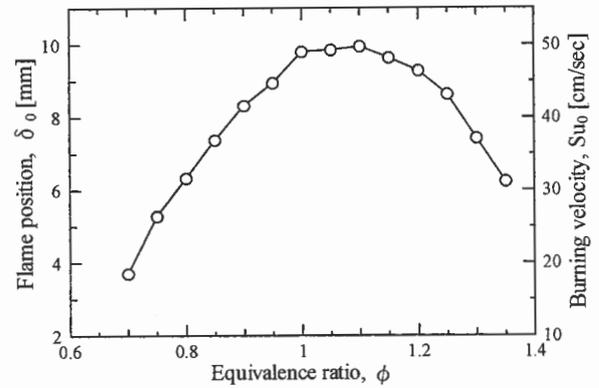


Fig.5 Relationship between equivalence ratio and flame position (static flame).

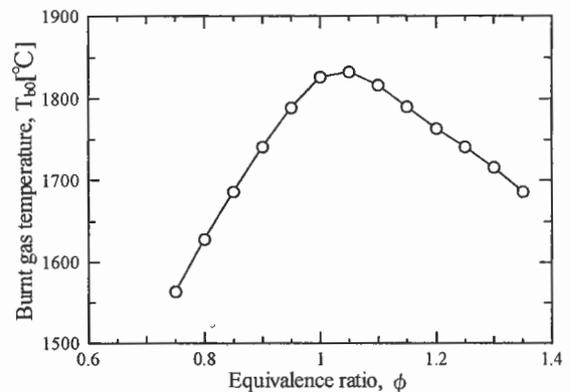


Fig.6 Relationship between equivalence ratio and burnt gas temperature (static flame).

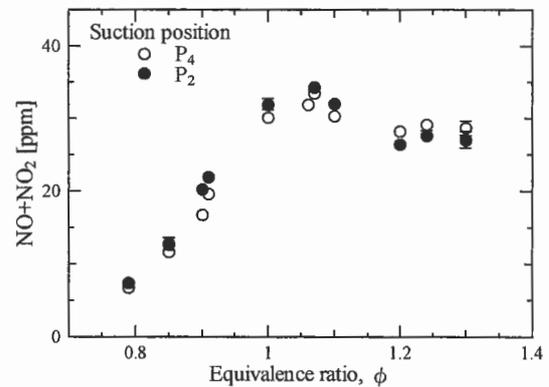


Fig.7 Relationship between equivalence ratio and NOx concentration (static flame).

希薄域においては、 ϕ の増加に伴って NOx 濃度、 T_{b0} ともに増加しており、両者の関係に良い対応が見られるが、過濃側では NOx 濃度と T_{b0} の対応は明確ではない。一般に、炭化水素/空気混合気の燃焼において、NOx 濃度の大部分を占める NO の生成については、温度依存性の強い、いわゆる Zeldovich NO と、過濃側で特徴的に見られる温度依存性の弱い Prompt NO ($\phi = 1.4 \sim 1.5$ で最大値をとる[17]) との 2 つの異なる生成機構が知られている。図 7 の過濃域に

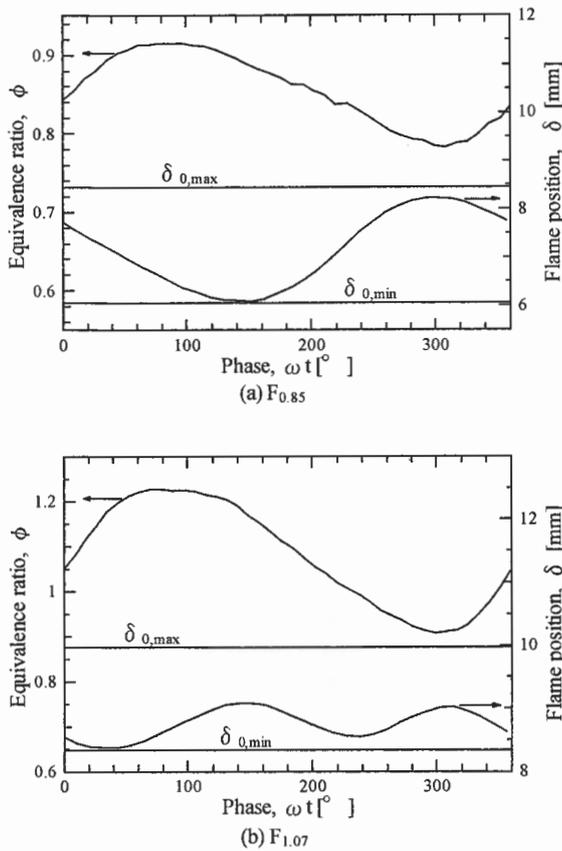


Fig.8 Time variations of equivalence ratio and flame position at $f=30$ Hz.

おける NO_x 濃度の変化は、これら 2 つの生成機構が合わされた形で現れているように見える。メタン/空気一次元予混合火炎の NO の排出特性について数値的に検討を行った Nishioka et al. の研究[18]でも類似の関係を得ている。希薄域において、 P_4 点に比べて P_2 点の方が高目の NO_x 濃度を示しているが、これは、火炎に対してより下流に位置する P_2 点の方が燃焼ガスの滞留時間が長いために、Zeldovich NO が継続して生成されるためである。

3.2. 動的火炎

3.2.1. 当量比変動と火炎位置

図 8(a), (b) はそれぞれ変動 $F_{0.85}$ と変動 $F_{1.07}$ の $f=30$ Hz における動的火炎のバーナ出口当量比 ϕ と火炎位置 δ の時間変化を示している。図の横軸は振動位相 ωt (ここで $\omega = 360 \cdot f$, t は時間) である。この図から、 ϕ の変化に伴って火炎は上流あるいは下流へ移動しているが、最大燃焼速度の当量比を挟む変動 $F_{1.07}$ の場合には、火炎は 1 周期に 2 回、上下に移動していることがわかる。また、動的火炎の移動範囲は、それぞれの ϕ の変化域に対応する静的火炎の位置 δ_0 についての、最も上流の位置 $\delta_{0,max}$ と最も下流の位置 $\delta_{0,min}$ で挟まれた範囲内にあることがわかる。

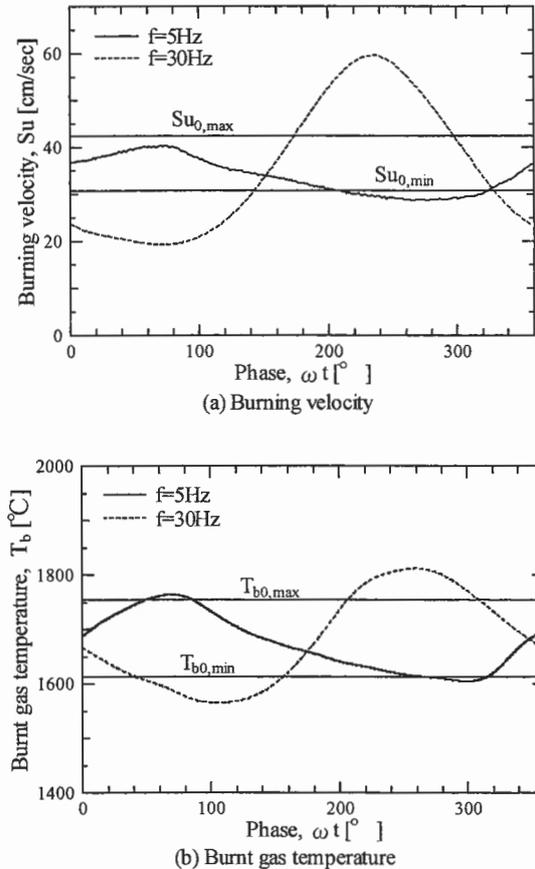


Fig.9 Time variations of burning velocity, temperature and CO concentration in burnt gas ($F_{0.85}$).

3.2.2. 燃焼速度および燃焼ガスの温度と CO 濃度(変動 $F_{0.85}$)

希薄側変動 $F_{0.85}$ における $f=5$ Hz と 30 Hz の動的火炎の燃焼速度 S_u , 燃焼ガス温度 T_b , 一酸化炭素濃度 Y^*_{CO} ($\equiv Y_{CO}/Y_{N_2}$, Y_i は i 成分の濃度) を図 9(a), (b), (c) に示す。図 9(a) の S_u は以下のように求めた。壁面を原点、上流方向を正とする座標軸 x を選ぶとき、火炎の位置 $x = \delta$ における、火炎移動速度を u_f , 未燃ガス速度を $u_g (< 0)$ とすると S_u は $S_u = u_f - u_g$ で表される。ここで $u_f = d\delta/dt$ (t は時間) であるから、火炎が上流へ移動する時は $u_f > 0$, 下流へ移動する

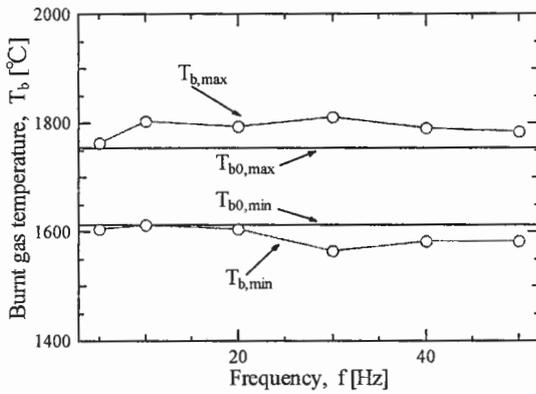


Fig.10 Frequency dependences of the maximum and the minimum burning velocity ($F_{0.85}$).

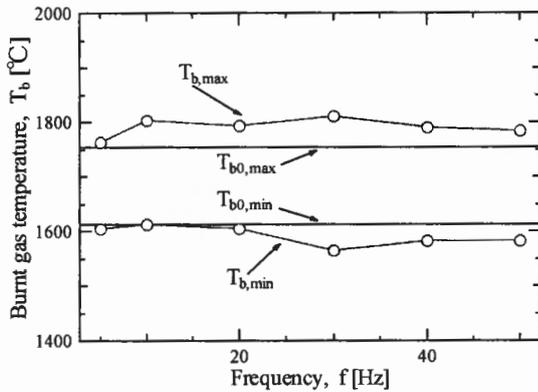
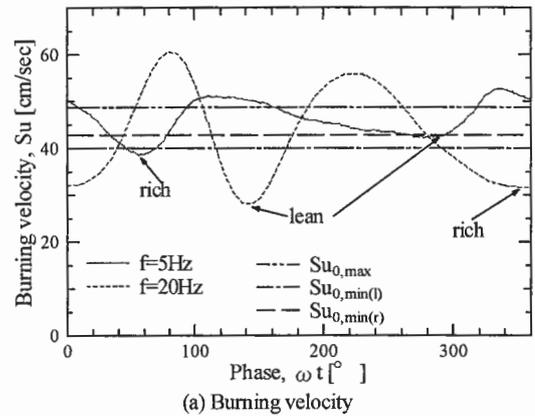


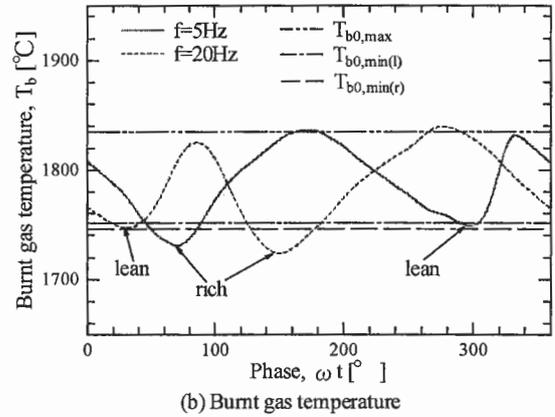
Fig.11 Frequency dependences of the maximum and the minimum burnt gas temperature ($F_{0.85}$).

ときは $u_f < 0$ となる。 u_g を求めるには流れ場計測を必要とするが、火炎の一次元性を維持しての流速測定が困難なため、流れ場をポテンシャル流れで近似して u_g を求めることとした。この場合の u_g は $u_g = -\epsilon \cdot \delta$ ($\epsilon = U/L$: 伸長率) で表され、したがって、 $Su = d\delta/dt + \epsilon \cdot \delta$ となる。図 9(a), (b), (c) には、比較のために静的火炎の燃焼速度、燃焼ガス温度、一酸化炭素濃度の、 ϕ の変化域における最大値 $Su_{0,max}$, $T_{b0,max}$, $Y_{CO,0,max}$ および最小値 $Su_{0,min}$, $T_{b0,min}$, $Y_{CO,0,min}$ も示してある。図より、動的火炎の Su , T_b , Y_{CO} の変動幅は、 $f=5$ Hz においては静的火炎のそれらの変化域とほぼ同じであるが、 $f=30$ Hz においては、動的火炎の方が静的火炎よりも大きくなっていることがわかる。

これらの原因について、以下のように考えることができる。希薄側変動 $F_{0.85}$ の場合、火炎前縁において、変動する不足反応物質濃度(この場合、 CH_4 濃度)が増加段階にあるときは火炎は上流へ移動し、減少段階にあるときは下流へ移動することになるが、火炎が上流へ移動する時、火炎の移動方向と CH_4 の拡散方向が相対するため、火炎前縁での濃度勾配が大きくなり火炎面への CH_4 の質量流束が増加する。一方、逆に火炎が下流へ移動する時、火炎の移動方



(a) Burning velocity



(b) Burnt gas temperature

Fig.12 Time variations of burning velocity and burnt gas temperature ($F_{1.07}$).

向と CH_4 の拡散方向が一致するため、その濃度勾配は小さくなり CH_4 の質量流束は減少する。このように、当量比変動に伴う火炎の移動が CH_4 の火炎への輸送速度の変動幅を増大させるため、バーナ出口での当量比変動から予想される以上に火炎の性状を変化させる。

図 10, 11 は、変動 $F_{0.85}$ に対する動的火炎の Su の最大値 Su_{max} と最小値 Su_{min} , そして T_b の最大値 $T_{b,max}$ と最小値 $T_{b,min}$ を f に対して示したものである。これらの図から、 f の増加につれて両者とも変動幅は増加し、 $f=30$ Hz 付近で最大となり、それ以降は減少していることがわかる。バーナ出口での当量比の変動幅は、混合気が火炎に到達するまでに成分の拡散により減衰するが、その程度は f の増加につれて顕著になることから、 f がある程度以上大きくなると、前述の火炎への輸送速度の変動幅を増大させる効果も減衰するためと考えられる。

3.2.3. 燃焼速度と燃焼ガス温度 (変動 $F_{1.07}$)

図 12(a), (b) は、量論まわりの変動 $F_{1.07}$ における、 $f=5$ Hz と 20 Hz に対する Su と T_b の時間変化を示している。量論まわりで濃度変動させているため、 Su と T_b は 1 周期に

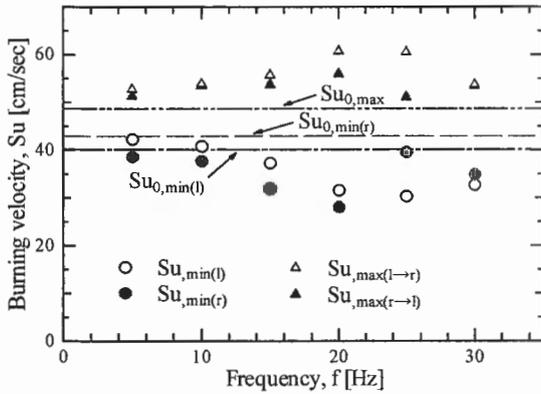


Fig.13 Frequency dependences of the maximum and the minimum burning velocity ($F_{1.07}$).

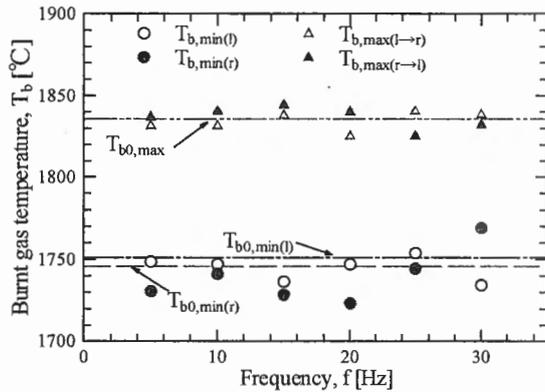


Fig.14 Frequency dependences of the maximum and the minimum burnt gas temperature ($F_{1.07}$).

2つの極大値と極小値をもつ。 $f=5$ Hzにおいては、動的火炎の S_u と T_b の変動幅は静的火炎のそれらの変化域とほぼ同じであるが、 $f=20$ Hzにおいては、動的火炎の方が静的火炎よりも大きいことがわかる。この結果は変動 $F_{0.85}$ の場合と類似した傾向であり、その理由も希薄側変動 $F_{0.85}$ と同様に考えることができる。混合気濃度が量論から希薄、あるいは量論から過濃に変化するにつれて火炎は下流へ移動するが、このときの火炎の移動方向と不足反応物質（希薄側では燃料、過濃側では酸素）の拡散方向とが一致するので、火炎前縁における濃度勾配は小さくなり、火炎に流入する不足反応物質の質量流束はどちらの場合も減少する。このため、変動 $F_{1.07}$ においても、当量比変動に伴う火炎の移動が不足反応物質の火炎への輸送速度の変動幅を増大させ、バーナ出口での当量比変動から予想される以上に火炎の性状を変化させる。

変動 $F_{1.07}$ の動的火炎について、図 13 は S_u の極大値と極小値、図 14 は T_b の極大値と極小値を f に対して示したものである。図中の○と●はそれぞれ、 S_u と T_b の希薄側における極小値 $S_{u,min(l)}$ 、 $T_{b,min(l)}$ 、および過濃側における極

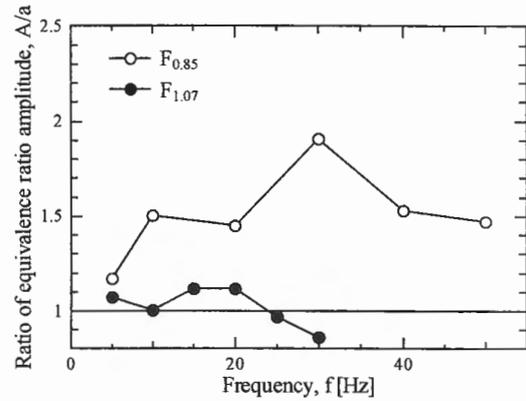


Fig.15 Relationship between frequency and the ratio of equivalence ratio amplitude at the flame front to that at the burner exit.

小値 $S_{u,min(r)}$ 、 $T_{b,min(r)}$ を表す。また、△と▲はそれぞれ、火炎に流入する混合気の組成が希薄から過濃へ変化する場合の S_u と T_b の極大値 $S_{u,max(l \rightarrow r)}$ 、 $T_{b,max(l \rightarrow r)}$ 、および、過濃から希薄に変化する場合の極大値 $S_{u,max(r \rightarrow l)}$ 、 $T_{b,max(r \rightarrow l)}$ を表す。比較のために静的火炎の場合の最大値 $S_{u0,max}$ 、 $T_{b0,max}$ 、希薄側最小値 $S_{u0,min(l)}$ 、 $T_{b0,min(l)}$ および過濃側最小値 $S_{u0,min(r)}$ 、 $T_{b0,min(r)}$ も示してある。なお、この場合の $S_{u0,max}$ および $T_{b0,max}$ は、静的火炎の全当量比範囲における最大燃焼速度 $S_{u0,MAX}$ および最高燃焼ガス温度 $T_{b0,MAX}$ と等しい。図 13、14 によると、多少のばらつきはあるが、 S_u 、 T_b ともに変動幅は f の増加につれて大きくなり、 $f=20$ Hz 付近でその変動幅は最大となるようにみえる。しかし、極大値についてみると両者で変化の傾向は異なる。すなわち、 S_u についての極大値 $S_{u,max(l \rightarrow r)}$ 、 $S_{u,max(r \rightarrow l)}$ は $S_{u0,MAX}$ よりも大きく、また f の増加とともに増加し $f=20$ Hz 付近で最大となるのに対し、 T_b についての極大値 $T_{b,max(l \rightarrow r)}$ 、 $T_{b,max(r \rightarrow l)}$ は f によらず $T_{b0,MAX}$ とほぼ同じである。先に、当量比変動に伴う火炎の移動が火炎へ流入する不足反応物質の質量流束の変動幅を増大させることを述べたが、これにより、変動周期のある時間内において、不足反応物質の流入質量流束（消費速度）が増大し、変動条件によっては、 S_u が $S_{u0,MAX}$ (~ 50 cm/sec) を超えることも起こりえる（図 10 の希薄側変動 $F_{0.85}$ においても $S_{u0,MAX}$ を超える領域が存在する）。しかし、 T_b は、火炎へ流入する燃料や酸素の質量流束の大小ではなく両質量流束の比に支配され、また、この比と T_b の関係は図 6 に対応したものとなるため、流入質量流束の変動幅が増大しても、 T_b は $T_{b0,MAX}$ ($\sim 1835^\circ\text{C}$) を超えることはない。変動 $F_{0.85}$ での $T_{b,max}$ は $T_{b0,MAX}$ より低く（図 11）、一方、変動 $F_{1.07}$ での $T_{b,max}$ は、前述のように f によらず $T_{b0,MAX}$ にほぼ等しい。

図 15 は、変動 $F_{0.85}$ および変動 $F_{1.07}$ の動的火炎について、その T_b から、静的火炎の T_{b0} と ϕ の関係（図 6）を用いて静的火炎で評価した、火炎に流入する混合気の相当当量比を算定し、その変動幅 ($2A$) をバーナ出口における当量比変動

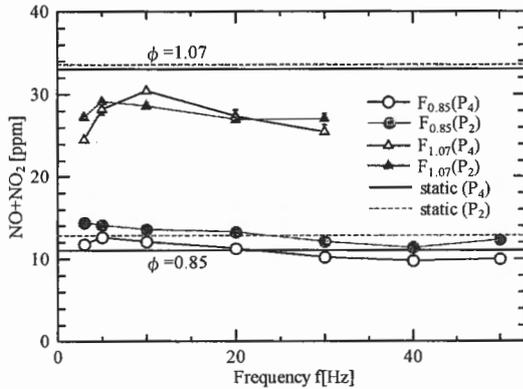


Fig.16 Relationship between frequency and NOx concentration.

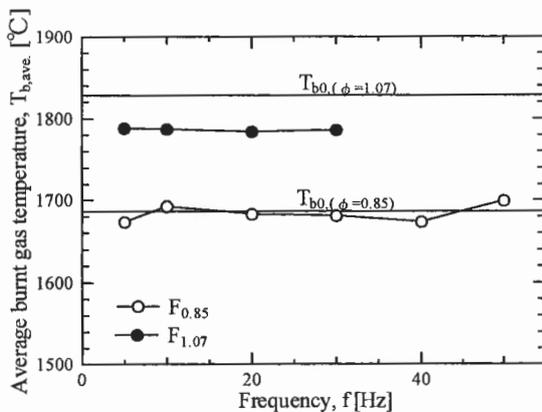


Fig.17 Relationship between frequency and average burnt gas temperature of dynamic flame.

幅 (2a) で除した値を f に対して示したものである。この図から、変動 $F_{0.85}$ においては、 f に関わらず A/a は 1 より大きく (火炎に流入する混合気の相当当量比振幅の方がバーナ出口におけるそれよりも大きく)、また $f = 30$ Hz 付近で最大となる。

変動 $F_{1.07}$ においても、 f に対して A/a は凸形状を示すが、 $f = 15 \sim 20$ Hz にその最大値が存在し、また $f > 25$ Hz では 1 より小さくなる。 A/a が最大となる f は変動 $F_{0.85}$ のほぼ 1/2 であるが、これは、変動 $F_{0.85}$ のような 1 回の当量比変動で火炎が上流と下流へ 1 回移動する場合と異なり、変動 $F_{1.07}$ の場合は 1 周期に火炎は 2 回上流と下流へ移動するため、同じ f でも実質 $2f$ の周波数で変動していることが原因と思われる。

3.2.4. NOx 濃度

図 16 は NOx の時間平均濃度を f に対して示したものである。変動 $F_{0.85}$ についての動的火炎の NOx 濃度は、低い f では静的火炎における $\phi = 0.85$ の濃度より高いが、 f の増加につれて減少し、 $f = 30$ Hz を超えると静的火炎の濃度よりも低く、 $f = 40$ Hz で最小となることがわかる。図 7 にお

いて、静的火炎の希薄域 ($\phi < 0.9$) における NOx 濃度は、 ϕ に対し下に凸の変化を示すことから、動的火炎での時間平均濃度は静的火炎での濃度を上回ることが予想されたが、実験結果はこれとは逆である。

燃料・空気の混合の程度と NOx 濃度の関係を調べた長谷ら [19,20] や Mongia et al. [21] の研究によると、平均当量比が量論付近では不完全な混合の場合の方が完全混合の場合よりも NOx 濃度は小さいが、希薄になるにつれてその差は減少し、ある平均当量比 ϕ_c を境界にその傾向は逆転する。また、 ϕ_c の値は混合の不完全性が高まるにつれて徐々に希薄側へ移動する。この結果を踏まえると、本実験での ϕ_m や a (混合の不完全性に相当するパラメータと考えられる) の設定条件によっては、動的火炎の NOx 濃度が静的火炎に比べ低くなる可能性がある。また、前節において示したように、 a が一定であるにも関わらず、火炎直前での相当当量比振幅は $f = 30$ Hz 付近までは f とともに増加する (混合の不完全性が高まる) ことから、上記の NOx 濃度の大小関係が逆転する時の ϕ_c が減少することも考えられ、これらが結果として、 f が大きい時の NOx 濃度が静的な場合を下回る状況を作り出していると思われる。

変動 $F_{1.07}$ の場合、全ての f で静的火炎における $\phi = 1.07$ の NOx 濃度を大きく下回っている。これは、最も NOx 濃度が高い当量比を平均当量比 ϕ_m とした濃度変動では、 ϕ_m より希薄側でも過濃側でも NOx 濃度が低く、その結果時間平均 NOx 濃度が減少する、いわゆる濃淡燃焼効果による。図 15 に示されたように、火炎直前での相当当量比振幅は $f = 20$ Hz 付近まで増加することから、この f までは濃淡燃焼効果が強まり、NOx 濃度を減少させることが予想される。実際、 P_2 点の NOx 濃度については、 f が 20 Hz 付近で極小となっている。

図 17 は P_4 点における動的火炎の時間平均燃焼ガス温度 $T_{b,ave}$ を f に対して示したものである。比較のために平均当量比に対応する静的火炎の燃焼ガス温度 T_{b0} も示してある。図より、変動 $F_{0.85}$ における $T_{b,ave}$ は f によらずほぼ一定で、また、その値は静的火炎の T_{b0} ($\phi = 0.85$) とほぼ同じであることがわかる。一方、図 16 によると、 $f = 30$ Hz \sim 50 Hz の NOx 濃度は、静的火炎の場合よりも低くなっている。このことは、希薄側においては、濃度変動を与えることにより、時間平均燃焼ガス温度を一定のまま NOx 濃度を削減できる可能性を示唆している。

変動 $F_{1.07}$ においては、 $T_{b,ave}$ は全ての f に対して T_{b0} ($\phi = 1.07$) よりも低い。これは $\phi = 1.07$ をはさむ希薄側、過濃側での T_b がともに T_{b0} ($\phi = 1.07$) より低い (図 6 参照) ためである。また、その T_b の当量比変動域における極小値 $T_{b,min}$ は、図 14 に示されるように f による影響を受け、希薄側、過濃側ともに $f = 20$ Hz 付近で極小となるが、このことが $T_{b,ave}$ にも反映され、 f に対する $T_{b,ave}$ 曲線が (鮮明ではないが) $f = 20$ Hz 付近で最小となる凹形状を示す理由と考えられる。

4. 結言

平均当量比を ϕ_m , 当量比振幅を a として, 混合気の当量比を $\phi_m \pm a$ の範囲で周期的に変化させることのできるよどみ流タイプの予混合バーナを作製した. メタン/空気混合気火炎について, $\phi_m = 0.85$, $a = 0.06$ の希薄側変動 (変動 $F_{0.85}$) および $\phi_m = 1.07$, $a = 0.17$ の量論まわり変動 (変動 $F_{1.07}$) の二つの当量比変動に対する燃焼速度, 燃焼ガス温度, 燃焼ガス中の CO 濃度および NOx 濃度の応答を調査した. 変動周波数 $f = 5 \sim 50$ Hz の範囲で得られた結果を以下に示す.

- (1) 変動 $F_{0.85}$ に対する, 動的火炎の燃焼速度, 燃焼ガス温度, CO 濃度の変動幅は, 対応する静的火炎のそれよりも大きい. これらの変動幅は, f の増加に対して凸形状を示し, $f = 30$ Hz 付近で最大となる.
- (2) 変動 $F_{1.07}$ の燃焼速度と燃焼ガス温度の変動幅も同様の变化を示し, $f = 20$ Hz 付近で最大となる. このときの燃焼速度の最大値は静的火炎における最大燃焼速度よりも大きくなるのに対し, 燃焼ガス温度の最大値は f によらず静的火炎における最高燃焼ガス温度とほぼ同じである.
- (3) 燃焼速度などの変動幅が拡大する現象は, 動的火炎に流入する反応物の質量流束が, 静的火炎よりも増大あるいは減少するためと考えられる. すなわち, 動的火炎への流入質量流束は, 火炎の移動方向と反応物の拡散方向が相対する上流移動のときは増大し, これが一致する下流移動の時は減少する.
- (4) 変動 $F_{0.85}$ の場合の NOx 濃度は, f の増加に伴い減少し, ある f で平均当量比 (=0.85) に対応する静的火炎の NOx 濃度を下回り, $f = 40$ Hz 付近で最小となった後, 増加に転ずる.
- (5) 変動 $F_{1.07}$ での NOx 濃度は, 濃度変動による濃淡燃焼効果のため, f によらず平均当量比 (=1.07) に対応する静的火炎よりも常に低くなる. また, f の増加につれて NOx 濃度は低下し, $f = 20$ Hz 付近で最小となる.

謝辞

混合気濃度の光学的測定法について, 岡山大学・富田栄二教授にご助言をいただいた. 実験装置を本学吉田宏技官に, 電磁弁とその制御系を株式会社日立ユニシアオートモティブに製作していただいた. また, 実験遂行にあたり, 当時の学部4年生・小沼真祐氏, 高橋陽一氏の協力を得た. ここに記して謝意を表す.

References

1. Kegasa, A., *JSME Trans B.* 67: 2574-2581 (2001), (in Japanese).
2. Kegasa, A., Miyafuji, A., and Tsujishita, M., *JSME Trans B.* 68: 943-948 (2002), (in Japanese).
3. Kegasa, A., Miyafuji, A., and Tsujishita, M., *JSME Trans B.* 68: 3219-3224 (2002), (in Japanese).
4. Cruz, A.P.D., Dean, A.M., and Grenda, J.M., *Proc. Combust. Inst.* 28: 1925-1932 (2000).
5. Marzouk, Y.M., Ghoniem, A.F., and Najim, H.N., *Proc. Combust. Inst.* 28: 1859-1866 (2000).
6. Lauvergne, R. and Egolfopoulos, F.N., *Proc. Combust. Inst.* 28: 1841-1850 (2000).
7. Waku, T., Yamashita, H., and Takeno, T., *JSME Trans B.* 62: 3502-3509 (1996), (in Japanese).
8. Waku, T. and Takeno, T., *JSME Trans B.* 63: 1798-1805 (1997), (in Japanese).
9. Waku, T. and Takeno, T., *JSME Trans B.* 64: 931-938 (1998), (in Japanese).
10. Karim, G.A. and Lam, H.T., *Proc. Combust. Inst.* 21: 1909-1915 (1986).
11. Yoshida, H., Arai, M., and Hiroyasu, H., *JSME Trans B.* 54: 2941-2948 (1988), (in Japanese).
12. Kitagawa, T., Kido, H., Deguchi, T., and Yamashita, J., *JSME Trans B.* 67: 1549-1554 (2001), (in Japanese).
13. Kitagawa, T., Kido, H., Kim, K., and Koga, H., *JSME Trans B.* 68: 2657-2663 (2002), (in Japanese).
14. Yoshiyama, S., Hamamoto, Y., Tomita, E., and Minami, K., *JSME Trans B.* 62: 1200-1205 (1996), (in Japanese).
15. Yoshida, A., Kubozuka, S., and Nakamura, S., *Combust. Sci. Tech.* 65: 317-331 (1989).
16. Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. Combust. Inst.* 20: 1883-1892 (1984).
17. *JSME Combustion Handbook*: 90-91 (1995), (in Japanese).
18. Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y., and Takeno, T., *Combust. Flame*, 98: 127-138 (1994).
19. Hase K., Kori Y., and Ohgi K., *Nensho no kagaku to gizyutsu* 1: 175-181 (1993), (in Japanese).
20. Hase, K. and Kori, Y., *Nensho no kagaku to gizyutsu* 2: 185-191 (1994), (in Japanese).
21. Mongia, R.K., Tomita, E., Hus, F.K., Talbot, L., and Dibble, R.W., *Proc. Combust. Inst.* 26: 2749-2755 (1996).