

非定常対向流予混合火炎の火炎構造に与える 流入速度変動の影響に関する数値解析*

野々村一樹^{*1}, 山下博史^{*2}
林直樹^{*3}, 山本和弘^{*3}

Numerical Study of Effect of Inflow Velocity Fluctuation on Flame Structure in Unsteady Counterflow Premixed Flame

Kazuki NONOMURA, Hiroshi YAMASHITA,
Naoki HAYASHI^{*4} and Kazuhiro YAMAMOTO

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

The flame structure of unsteady two-dimensional counterflow premixed flame is investigated by numerical simulation with elementary reaction mechanism. In order to investigate unsteady behavior, sinusoidal fluctuations are added to the inlet velocity as follows: $u_0 = u_m \{1 + A \cdot \cos(2\pi ky) \cdot \sin(2\pi ft)\}$. We consider two types of counterflow; one is methane-air premixed mixture/air counterflow, and the other is methane-air premixed mixture/burnt gas counterflow. The flame structure and the unsteady behavior in each type of counterflow are investigated under the condition of very high intensity of fluctuation (the average velocity: $u_m = 1.0$ m/s, the amplitude: $A = 5$). It is shown that the local quenching, the unburned island and the burnt island are generated. These phenomena are examined by the distributions of chemical species and heat release rate near flame surface. Moreover, it is shown that the turbulent burning velocity, which is evaluated based on O_2 mass consumption rate, is directly proportionate to the flame surface area, and the time variation of the spatial averaging burning velocity per unit flame surface area is small compared with that of the flame surface area.

Key Words : Premixed Combustion, Numerical Analysis, Burning Velocity, Unsteady Behavior, Counterflow, Velocity Fluctuation, Flame Structure, Flame Area

1. 結 論

現在、環境・エネルギー問題が深刻化する中で、高効率の燃焼器の開発が急務である。特に、ガソリンエンジンなどの多くの燃焼器の燃焼形態である乱流予混合燃焼は、流れ、拡散、化学反応、熱発生など多くの過程に加え、乱れと反応の相互作用も存在することから、極めて複雑なものとなっている。また、乱れが強い場合には高速に火炎が広がることが知られている⁽¹⁾。しかしながら、この高い燃焼負荷を実現できる乱流予混合燃焼の正確な解明は、その複雑さのために未だ不十分であるといえる。

そのため近年では、直接数値計算 (DNS)⁽²⁻⁵⁾やレー

ザ計測⁽⁶⁻¹⁰⁾によって、乱流予混合火炎の局所火炎構造や乱流燃焼速度について詳細な検討が行われている。例えば、Tanahashiら^{(3),(4)}は水素-空気やメタン-空気乱流予混合火炎の三次元直接数値計算を行い、局所火炎構造を明らかにしている。また、Tsuboiら⁽⁵⁾は総括反応を用いて三次元直接数値計算により乱流燃焼速度について検討している。一方、OHとHCHOの濃度の積と熱発生速度との間に良い相関があることから⁽¹¹⁾、山本ら⁽⁶⁾はOH-HCHO同時PLIF法を用いて、乱流予混合火炎におけるラジカルの濃度分布の測定から火炎構造を可視化し、熱発生速度の検討を行っている。また、馬目・中村ら⁽⁸⁻¹⁰⁾はOH-アセトン同時PLIF法を用いて、乱流予混合火炎における火炎帯の可視化を行っている。さらに、加藤ら^{(12),(13)}は速度場に変動を与えた場合や、火炎面曲率を制御した場合の予混合火炎において、酸素や温度で定義した反応進行度とその勾配の火炎面における値で火炎構造の整理を試みている。

*原稿受付 年 月 日

^{*1} 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)

^{*2} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科

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

一般的に、乱流燃焼において非常に重要な物理量である乱流燃焼速度⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は、火炎面積に大きく依存しているといわれている。しかし、局所的には火炎面の形状やルイス数効果など様々な要因で局所乱流燃焼速度の値は大きく変わる。

そこで本研究では、速度変動の強さとスケールを大幅に変化させることが可能な対向流を用い、メタン-空気系の乱流予混合火炎の燃焼速度に与える乱れの影響を解明することを目的とした。乱れには、計算領域の左右両側の対向流流入境界において、流入速度に時間的および空間的変動を加え、その影響を層流の非定常変動場として数値計算を行い、火炎が非定常挙動を示す場合における乱流燃焼速度や平均燃焼速度と火炎面積の関係について詳細に検討を行った。さらに、予混合火炎に与える周囲流体の影響を明らかにするために、予混合気流に対向させる流体として常温の空気あるいは既燃ガスを用いて比較した。また、可燃限界に近い当量比0.55の場合における火炎の挙動についても検討を併せて行った。

2. 解析方法

2・1 解析モデル 本研究で用いた二次元非定常対向流予混合火炎の解析モデルおよび境界条件を図1に示す。支配方程式は、連続方程式、運動方程式、エネルギー方程式および各化学種の連続方程式である。二次元の直角座標系を考え、流れ方向およびそれに垂直方向の座標を (x, y) とし、それに対応する速度成分を (u, v) とする。計算領域の幅 $L_m = 10$ mm、流れ方向の長さを15 mmとし、座標系は $x = -7.5 \sim 7.5$ mm、 $y = 0 \sim 10$ mmとした。作動流体として、左端からはメタン・空気予混合気を、右端からはそれに対向して空気または既燃ガスを流入させた。ここで、作動流体に空気を用いた場合をCase A、既燃ガスを用いた場合をCase Bとする。メタン・空気予混合気の温度は300 Kとし、当量比は0.75および0.55とした。対向させる空気の温度

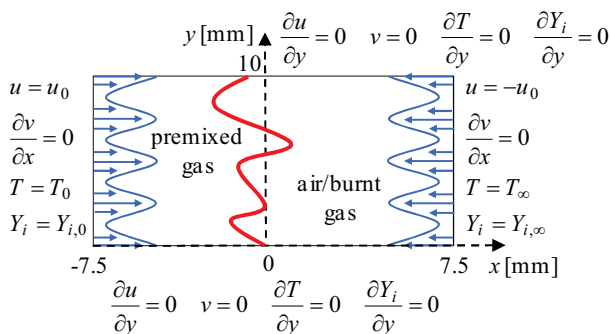


Fig.1 Analytical model and boundary conditions

は300 Kとし、既燃ガスの温度および組成は、左端から流入させる予混合気を用いた一次元層流火炎を別途数値計算し、その十分下流での値を用いた。また、左右両端の流入速度 u_0 には、次式で時間的および空間的変動を加えた。

$$u_0 = u_m \{1 + A \cos(2\pi ky) \sin(2\pi ft)\} \quad (1)$$

ここで、 u_m は平均流入速度、 A は変動の振幅、 k は波数、 f は振動数を表す。また、上端、下端は自由流出境界とした。本モデルでは、幅広い範囲で速度変動を設定することが可能であるが、本報では、 $\phi = 0.75$ の場合には、 $u_m = 1.0$ m/s、 $A = 5$ 、 $k = 1$ mm⁻¹、 $f = 50$ Hzとし、比較的強い変動を与えた。

数値計算法としては、離散化には有限体積法（コントロール・ボリューム法）を用いた。差分格子数は x 方向301、 y 方向101とした。また、格子間隔は x 方向が0.05mm、 y 方向が0.1 mmの等間隔格子とした。速度と圧力の連成にはPatankarのSIMPLE法⁽¹⁶⁾を使用した。対流項にはQUICK法を、時間展開には二次精度の完全陰解法を用い、時間刻みは5 μ sとした。各時間ステップにおいては、SOR法による繰り返し計算を行い、計算における緩和係数は0.07、収束判定値は 10^{-4} とした。

化学反応機構はSmookeら⁽¹⁷⁾のメタン-空気系Skeletal素反応機構を用いた。この反応機構では、16個の化学種について25組の素反応を考慮している。熱力学定数についてはCHEMKINデータベース⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾とJANAF table⁽²⁰⁾を参考にして求めた。また、輸送係数については、SmookeらのSimplified Transport Model⁽¹⁷⁾を用いた。

2・2 燃焼特性の把握 流入速度に与えた速度変動により、非定常過程の各瞬間において、火炎形状と反応速度が空間分布を持ち、時間経過とともに変化する。そこで、各瞬間における燃焼特性を把握するために、各瞬間の火炎長さや燃焼速度の空間平均量を以下のように算出した。

2・2・1 火炎長さ 火炎長さ L_f （二次元場なので火炎面積に対応）を算出するために、まず各時間における火炎面の位置を熱発生速度 Q が局所的に極大となる位置と定義し、それらの点を結ぶことで火炎面形状を求めた。ここで、 Q の局所的な極大位置は、注目している格子点位置での Q の値が、 x 軸と y 軸に沿う方向の最も近傍の上下左右の4つの格子点での値よりも大きい場合、あるいは x 軸と y 軸を45度回転した方向の最も近傍の対角2方向の4つの格子点での値よりも大きくなる点を探した。そして、この条件を満たす極大

位置について、その上下左右あるいは対角2方向のいずれかを含む3点において2次関数補間をすることで修正を加えた。さらに、定常状態における熱発生速度の最大値のほぼ50%である $Q_1 = 0.8 \text{ GW/m}^3$ を閾値として、各時間における Q の極大値が、 Q_1 以上の値を示した場合にのみ火炎面として判定し、これ以下の場合には局所的な消炎が発生しているとした。このようにして求めた極大点位置の最近接点同士を結ぶことにより連続した火炎面を構成するが、この際、極大点の間隔が幅方向の格子点間隔の5倍以下となっている場合だけを結ぶこととした。これは、火炎面に「端」が存在する場合に、その点とある程度離れた位置にある火炎面を連結してしまうことを防ぐためである。このようにして探索した火炎面における隣接した極大点間距離をピタゴラスの定理により求め、火炎長さ L_f を算出した。

ここで、適当な条件における火炎について、上記の方法で決定された火炎面の位置(a)と実際の熱発生速度分布(b)、また両者を比較したもの(c)を図2で示す。この図より、決定された火炎面の位置が、熱発生速度の分布形状と非常によく一致していることが分かる。また、火炎面と定義する熱発生速度の極大値に閾値を設けたことで、局所的な消炎が起こっている火炎面の先端においても、火炎面が精度よく検出できている。

2・2・2 燃焼速度 乱流燃焼速度 S_T および単位火炎長さ当たりの平均燃焼速度 S_a は、計算領域幅 L_{in} および火炎長さ L_f を用いて次式で定義した。

$$S_T = -\frac{1}{j} \frac{\iint w_{O_2} dx dy}{\rho_0 L_{in} Y_{fuel}} \quad (2)$$

$$S_a = \frac{L_{in}}{L_f} S_T \quad (3)$$

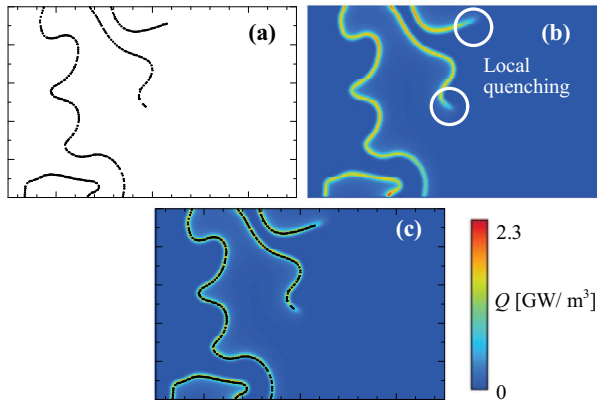


Fig.2 Example of Search of flame front: (a) Search Result of Flame front, (b) Distribution of heat release rate, and (c) Comparison between (a) and (b)

ここで、 j は量論酸素・燃料質量比、 w_{O_2} は酸素の質量生成速度、 ρ_0 は未燃予混合気の密度、 Y_{fuel} は未燃予混合気中の燃料 CH_4 の質量分率である。通常、燃料の質量生成速度を用いて乱流燃焼速度を算出する⁽⁹⁾が、素反応機構を適用する場合、燃料のメタンは後述のように、温度がある程度高ければ、発熱反応を伴わない場合においても、 CH_3 等への分解反応が起こってしまう。このため、局所消炎などを伴う場合に正確な燃焼速度を算出できないと考えられる。そのため、本研究では酸素の質量生成速度を用いて燃焼速度を算出した。式(4)のようにメタンの質量生成速度 w_{CH_4} を用いた場合と比較すると、 w_{CH_4} を用いた場合の方が w_{O_2} を用いた場合よりも伸長がある条件では、若干大きな値を示す。

$$S_T = -\frac{\iint w_{CH_4} dx dy}{\rho_0 L_{in} Y_{fuel}} \quad (4)$$

例えば、流入速度に乱れを与えない $u_0 = 1.0 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.75$ 、定常の予混合気 - 空気の対向流火炎において算出した場合、 w_{O_2} を用いた場合では 0.227 m/s 、 w_{CH_4} を用いた場合では 0.235 m/s となる。このように、この条件では w_{CH_4} を用いた場合の燃焼速度は w_{O_2} を用いたものより4%程度大きな値を示す。なお、これらの値は火炎伸長のない一次元予混合火炎における層流燃焼速度 $S_L = 0.25 \text{ m/s}$ に比べてやや小さい。また、火炎伸長のない一次元予混合火炎で算出した場合、燃料希薄条件では w_{O_2} と w_{CH_4} のいずれを用いても、層流燃焼速度と同じ値となることを確認している。

3. 計算結果および考察

3・1 火炎面形状の時間変化 まず、 $\phi = 0.75$ の場合について、流入速度の変動による火炎面の時間的・空間的な変化について検討する。Case AおよびCase Bの場合の温度と熱発生速度の時間変化の例を図3および図4にそれぞれ示す。ここで、熱発生速度分布において、熱発生速度の値が大きい赤い線が火炎面に相当する。これらの図から、火炎面形状が時間経過とともに変化していることが分かる。ここで、図3(a),(b)および図4(a),(b)より、式(1)で流入速度に与えた正弦関数と余弦関数の時間的また空間的な周期的変化と、火炎面形状の変化がほとんど対応していないことが分かる。これは、変動の振幅 A が5という非常に強い乱れを与えていることや、流れ場に起因する不安定性が現れていることが大きく影響していると考えられる。

次項では、図3(b)に示したCase Aの特徴的な挙動である局所的な消炎と、図4(b)に示したCase Bの特徴的

な挙動である未燃ガスの島の発生・消滅についてそれぞれ調べ、火炎構造の非定常挙動について検討する。

3・1・1 局所的な消炎（予混合気-空気対向流火炎：Case A） 図3(b)の①と②にかけて、計算領域中央部の火炎面が空気側に張り出した形状となり、局所的に消炎していることが分かる。

この現象を詳しく検証するために、図3(b)の①と②における Q および CH_3 の質量分率 Y_{CH_3} の分布を、 $y = 5$ mmの断面(-2 mm $< x < 2$ mm)において図5(a),(b)にそれぞれ示す。図5(a)に示されるように、①、②での $y = 5$ mmの断面上において、 Q の極大値が $Q_1 = 0.8$ GW/m³未満の値であるので、本研究の定義では火炎面は存在しないことになる。また図5(b)より、予熱帯で発生する CH_3 は時間とともに減少しているが、 Q がほとんど零となっている②の時刻においても CH_3 はある程度存在している。これはメタンの熱分解は生じているが発熱反応には至っていないことを示しており、 $y = 5$ mmの断面上で局所的な消炎が起こっていることを示唆している。この原因として、対向流の最大流速が6.0 m/sにも達することで、定常場では火炎が存在できないような強い火炎伸長の効果、および火炎面が常温の空気流側に凸となることによる火炎の冷却の効果が考えられ

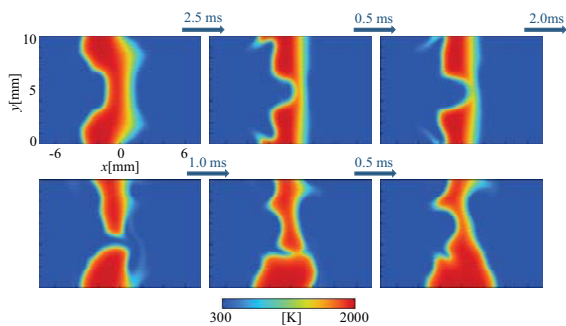


Fig. 3(a) Time evolution of distribution of temperature [Case A]

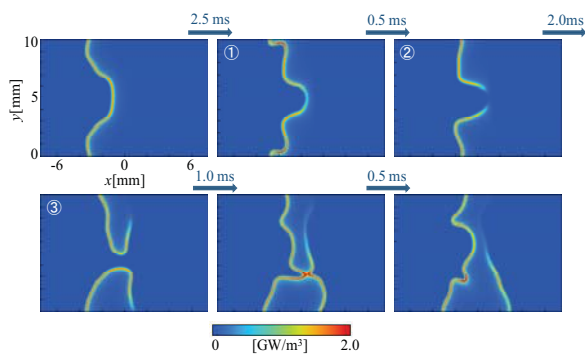


Fig. 3(b) Time evolution of distribution of heat release rate [Case A]

る。しかし、高温の既燃ガスを対向させたCase Bの場合、このような局所消炎は確認されなかった。これより、後者の効果が局所消炎に大きく影響していると考えられる。

3・1・2 未燃ガスの島の発生・消滅（予混合気-既燃ガス対向流火炎：Case B） 図4(b)の①～④にかけて、火炎が予混合気の未燃ガスを包み込むことで未燃ガスの島が既燃ガス中に発生することが模擬されている。そこで、火炎面近傍の温度が高い既燃ガス中に発生するOHラジカルについて、図4(b)の①～④およびその直後におけるOH質量分率の分布を図6に示す。

図6より、白丸に囲まれた部分の両側の火炎面が、その間に存在する未燃ガスに伝播して融合することで、既燃ガス中に未燃ガスの島が発生していることが分かる。さらに、未燃ガスの島の周囲が既燃ガスに囲まれ

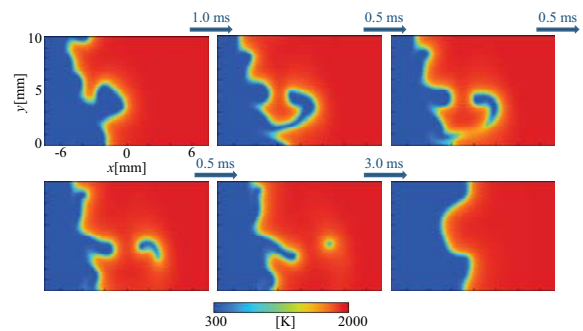


Fig. 4(a) Time evolution of distribution of temperature [Case B]

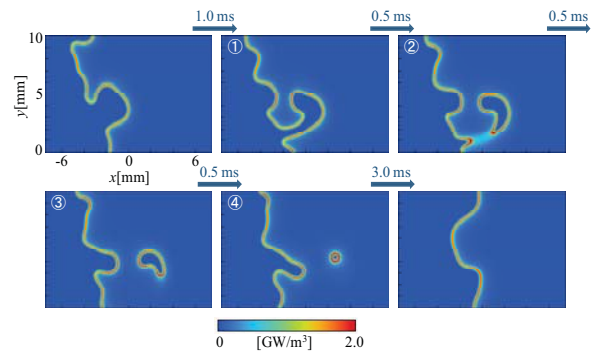


Fig. 4(b) Time evolution of distribution of heat release rate [Case B]

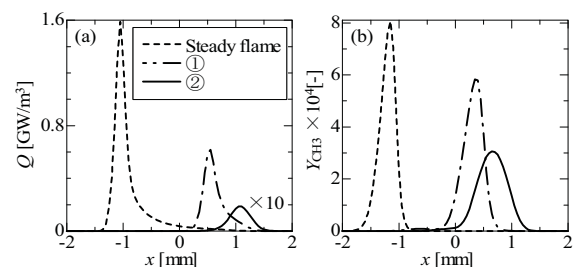


Fig. 5 Distributions of heat release rate and CH_3 mass fraction of $y = 5$ mm [Case A]

ていることから、燃焼反応が進行することで島内部の未燃ガスが消費され、島が小さくなっている。そして、未燃ガスの島が消失した直後には、黒丸に囲まれているOHスポットが確認できる。このような未燃ガスの島に関してはPoinso⁽²¹⁾らによっても検討されている。また、店橋⁽³⁾の計算結果や中村⁽⁹⁾の実験結果でも観測されている。

3・2 非定常火炎におけるOHとCH₂Oの濃度の積と熱発生速度の関係 近年、OHとCH₂Oの濃度の積が熱発生速度と良い相関がある⁽¹¹⁾ということから、OH-CH₂O同時PLIF法により両者の濃度場を計測し、熱発生速度分布の可視化が行われている⁽⁶⁾。しかし、この手法の妥当性は定常場における数値解析を基にしており、非定常場における妥当性の証明は不十分である。そこで、図3(b)の③における $y = 2 \text{ mm}$ ($-4 \text{ mm} < x < 4 \text{ mm}$)の断面について、CH₂OおよびOHのモル濃度 $C_{\text{CH}_2\text{O}}$ 、 C_{OH} の分布を図7(a)に、それらの積 $C_{\text{OH}} \times C_{\text{CH}_2\text{O}}$ と Q の分布を図7(b)に示す。ただし、各々の値を断面内の最大値 Q_{max} 、 $C_{\text{CH}_2\text{O,max}}$ 、 $C_{\text{OH,max}}$ 、 $[C_{\text{OH}} \times C_{\text{CH}_2\text{O}}]_{\text{max}}$ で正規化した。

図7(b)の熱発生速度分布より、この断面上には火炎面が2ヶ所に存在していることが分かる。図3(b)の③のように、火炎面が計算領域中心で上下に分断されているため、その間を通過して回り込んだメタンが燃焼してU字型の火炎が形成される。

図7(b)より、火炎帯付近において $C_{\text{OH}} \times C_{\text{CH}_2\text{O}}$ と熱発生速度 Q の分布は非常に一致を示していることが分かる。これより、非定常場においても、温度が高い既燃ガス中に存在するOHと予熱領域および反応領域に存在するCH₂Oの濃度の積が、火炎面の位置に対応する熱発生速度の分布とよく対応することが本計算によって確認できた。

3・3 非定常場における燃焼速度と火炎面積の関係 非定常性が存在する場において、図3(a)や図4(a)のように火炎面形状は時間とともに変化

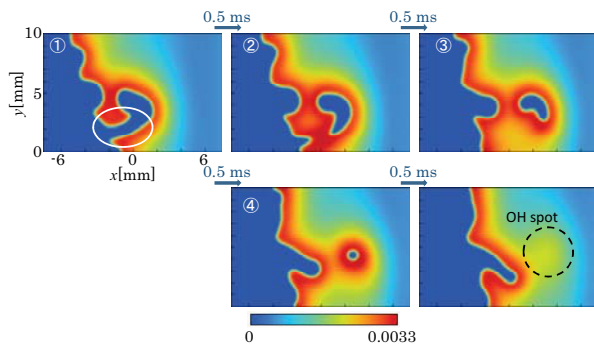


Fig. 6 Time evolution of distribution of OH mass fraction [Case B]

する。この非定常性によって、場全体の燃焼の強さを表す乱流燃焼速度も時間とともに変化し、それは火炎長さつまり火炎面積に大きく影響を受ける。本研究では、乱流燃焼速度と火炎面積の相関について、与えた変動が大きい場合について詳しく検討を行う。また、式(3)で定義される平均燃焼速度についても、火炎面積や乱流燃焼速度と比較し検討を行う。

対向させる気体の種類以外の条件が同じであるCase AとCase Bにおいて、流入速度変動による火炎長さ L_f と単位火炎長さ当たりの平均燃焼速度 S_a の $t = 0 \sim 50 \text{ ms}$ における時間変化について図8と図9にそれぞれ示す。ここで、 $t = 0 \text{ ms}$ の初期時刻には、対向流の流入速度を平均流速 u_m で一定とした場合の定常火炎を用い、それ以降の非定常変化を示した。なお、縦軸の S_a および L_f は、予混合気に対向させる空気または既燃ガスそれぞれの場合における変動を与えない定常火炎での値 $S_{a,A}^0$ 、 $S_{a,B}^0$ 、 $L_{f,A}^0$ 、 $L_{f,B}^0$ で正規化している。ここで、図8と図9のどちらの場合も、 L_f は初期値の2倍以上まで変化しているが、 S_a は初期値の約0.9 ~ 1.3倍程度しか変化していない。このように、流れ場の変動により、火炎面には火炎の伸長効果や変形による凹凸が生じ、火炎長さ(火炎面積)は大きく変化する。これに対し、ある瞬間の局所燃焼速度の平均値である単位火炎長さ当たりの平均燃焼速度 S_a の値はあまり変化しない。しか

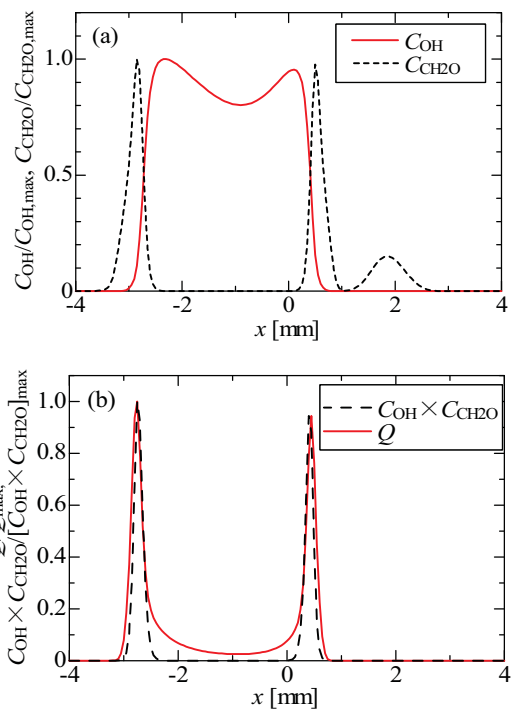


Fig. 7 Distributions of $C_{\text{CH}_2\text{O}}$, C_{OH} , Q and $C_{\text{CH}_2\text{O}} \times C_{\text{OH}}$

しながら、局所的な燃焼速度は火炎伸長や火炎面曲率により大きく変化する可能性はある⁽⁴⁾。つまり、局所的な燃焼速度は局所の火炎面の形状や火炎伸長に応じて大小様々な値に変化しているが、計算領域全体で平均するとそれほど大きな変化にはならないといえる。

さらに、上記と同様にCase AとCase Bにおいて、乱流燃焼速度 S_T と L_f の各瞬間における関係について図10に併せて示す。ただし、 S_a および L_f は図8および9と同様に正規化している。この図より、予混合気と対向させている流体がどちらの場合にも、 S_T と L_f は非常に相関があり、乱流燃焼速度の大きさは火炎長さすなわち火炎面積によってほぼ決まるといえる。さらに、予混合気に対向させる気体が、常温の空気か高温の既燃ガスかによってあまり差はないといえる。

なお、 S_T と L_f の関係が直線上からわずかにばらつく原因としては、 $3 \cdot 1 \cdot 1$ 項で示した局所的な消炎の効果、熱発生速度が 0.8 GW/m^3 以上の場合を火炎面として火炎長さを算出したことによる影響、さらに、局所の燃焼速度の平均値である S_a 自体の変化が挙げられる。

3・4 超希薄燃焼 予混合気の当量比を可燃限界付近の0.55として、予混合気 - 空気および予混合気 - 既燃ガスの対向流場において燃焼特性を検討した。まず、予混合気に対向させる気体が既燃ガスの場合は均

流入速度 $u_m = 1.0 \text{ m/s}$ においても、火炎が消炎せずに存在した。ただし、可燃限界付近であるので、変動のない定常火炎において式(2)で求められる燃焼速度が 0.062 m/s と、当量比0.75における燃焼速度 0.227 m/s よりも非常に小さな値を示す。それでも、平均流速 1.0 m/s の対向流場で消炎せずに存在し続けるのは、高温の既燃ガスによる保炎効果が大きく影響しているからである。実際、対向させる気体を空気にしたところ、対向流の平均流速を 0.15 m/s まで落とさないと火炎が消炎してしまうことを確認している。

特に、 $3 \cdot 1 \cdot 2$ 項とは逆に、未燃ガス中に既燃ガスの島が発生する現象が現れた。その結果を熱発生速度と

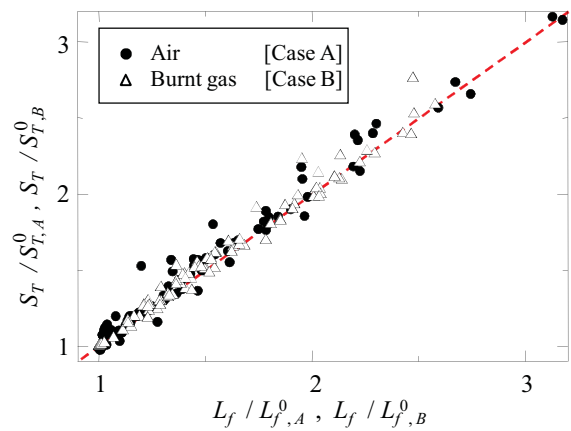


Fig. 10 Relation between S_T and L_f

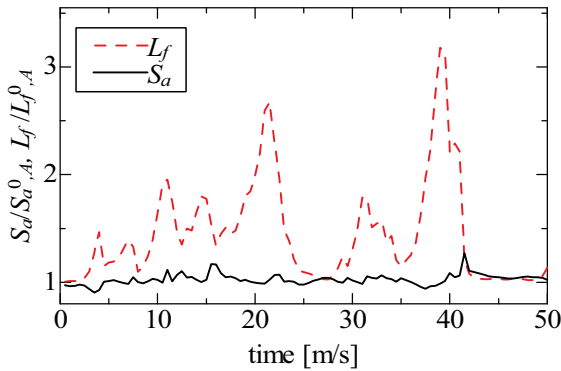


Fig. 8 Time evolution of S_a and L_f [Case A]

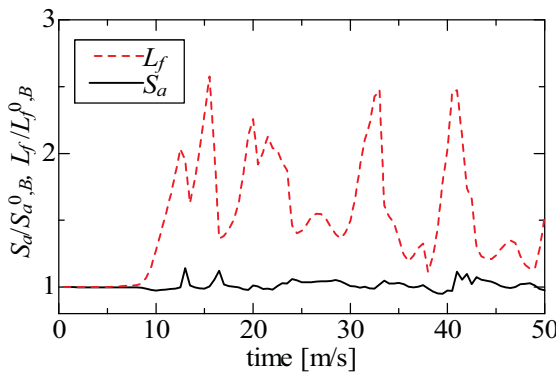


Fig. 9 Time evolution of S_a and L_f [Case B]

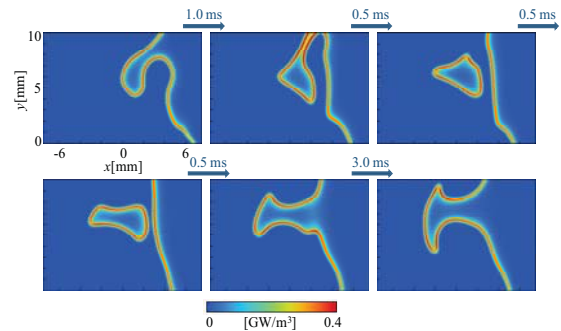


Fig. 11(a) Time evolution of distribution of heat release rate

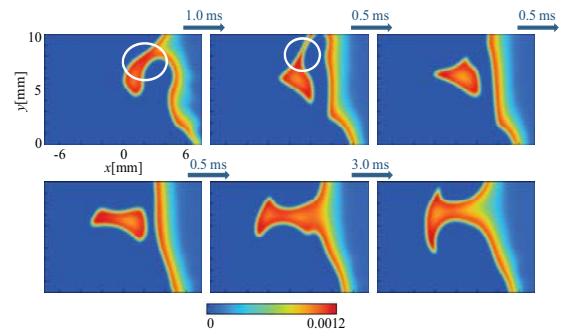


Fig. 11(b) Time evolution of distribution of OH mass fraction

OH質量分率の分布図として図11(a),(b)にそれぞれ示す。ただし、変動の振幅 A は3, 波数 k は 0.5 mm^{-1} で, その他の条件は同じである。この既燃ガスの島は, 図11(b)の白丸で囲まれた部分のように, 2つの火炎面が接近して一つの火炎になり, 火炎伸長の効果や熱拡散の効果で局所的に消炎することで発生している。当量比0.75の予混合気と既燃ガスの対向流では, 高温の既燃ガスによる保炎の効果により局所的な消炎は発生しなかったが, 当量比0.55の超希薄燃焼においては熱発生速度が非常に小さく, 既燃ガスによる保炎の効果があっても局所的な消炎が発生したと考えられる。ここで, 未燃ガスの島との違いを見てみると, 島内部にOHラジカルが多く発生していることが挙げられる。また, 周囲が未燃ガスに囲まれているため, 島が小さくならず存在し続け, 最終的には近くの火炎面と融合していることが分かる。この未燃ガスの島についても, 中村ら⁽¹⁰⁾の実験結果でも観測されている。

4. 結 論

速度場はかなり強い変動を与えた二次元非定常変動場での対向流予混合気火炎に対して, 素反応機構による数値解析を行い, 火炎構造の変化や火炎長さ(火炎面積)と燃焼速度の関係について以下のような知見を得た。

- (1) 非定常変動場において, 火炎面の形状は時間とともに様々な形に変化する。そのなかで, 局所的に消炎を起こすことや, 未燃ガスおよび既燃ガスの島を発生させることがある。これらは実験において観測されている現象を再現している。消炎の原因としては, 火炎面が常温の空気流側に凸となることによる火炎の冷却の効果が考えられる。
- (2) 非定常変動場においても, OHと CH_2O のモル濃度の積と熱発生速度の分布は非常によい一致を示す。
- (3) 乱流燃焼速度 S_T と火炎長さ L_f は, 局所的な消炎が発生するか否かに関わらず強い相関を持ち, ほぼ比例関係にある。なお, 比例関係からずれる場合もあるが, この原因としては局所的な消炎が発生することや, 火炎面の曲率による局所的な燃焼速度の増大などが挙げられる。また, 単位火炎長さ当たりの平均燃焼速度 S_a は火炎長さ L_f と比べ変化が小さい。

謝 辞

本研究は, 独立行政法人日本学術振興会の科研費(18560196)の助成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) Kagawa, N., Yanagi, T. and Kobayashi, T., Study on burning velocity of premixed turbulent flames with wrinkled laminar flame structure, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.597 (1996), pp.2056-2063.
- (2) Bell, J.B., Day, M.S. and Grcar, J.F., Numerical simulation of premixed turbulent methane combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29 (2002), pp.1987-1993.
- (3) Tanahashi, M., Nada, M. and Miyauchi, T., Direct Numerical Simulations of Turbulent Premixed Flames, *Japan Society of Computational Fluid Dynamics*, Vol.11 (2003), pp.211-223.
- (4) Tanahashi, M., Nada, Y., Ito, Y. and Miyauchi, T., Local Flame Structure in the Well-Stirred Reactor REGIME, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29 (2002), pp.2041-2049.
- (5) Tsuboi, K., Nishiki, S., and Hasegawa, T., Analysis on Local Quantities of Turbulent Premixed Flames Using DNS Databases, *Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2007), pp.348-351.
- (6) Yamamoto, K., Ohnishi, M., Hayashi, N. Ozeki, M. and Yamashita, H., Flame Image and Flame Structure of Turbulent Premixed Flames Using Simultaneous OH-HCHO PLIF Technique, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.733 (2007), pp.1943-1949.
- (7) Chen, Y.C. and Bilger, R.W., Experimental Investigation of Three-Dimensional Flame-Front Structure in Premixed Turbulent Combustion I: Hydrocarbon/Air Bunsen Flames, *Combustion and Flame*, Vol.131 (2002), pp.400-435.
- (8) Manome, S., Nakamura, Y., Hayashi, N. Yamamoto, K. and Yamashita, H., Study of Acetone-OH Simultaneous PLIF for Combustion Diagnostics of Turbulent Flames, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.725 (2007), pp.350-356.
- (9) Nakamura, Y., Manome, S. and Yamashita, H., Imaging of Reactive Zone in Turbulent Premixed Flames by Acetone-OH Simultaneous PLIF, *Journal of Visualization*, Vol.11, No.1 (2008), pp.71-78.
- (10) Nakamura, Y., Manome, S., Yamashita, H. and Hayashi, N., Diagnostics on Local Extinction in Ultra-Lean Combustion via Acetone-OH Simultaneous PLIF Approach, *Work-In Progress Poster Colloquium at 31st International Symposium on Combustion*, (2006), p.480.
- (11) Najam, H.N., Paul, P.H., Muller, C.J., and Wyckoff, P.S., On the Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of Flame Burning Rate, *Combustion and Flame*, Vol.113(1998), pp.312-332.
- (12) Kato, T., Hayashi, N., Yamashita, H., Nakamura, Y. and Yamamoto, K., Numerical Study on Unsteady Two-Dimensional Premixed Flame Using Elementary Reaction Mechanism (The validity of Progress variable and its Gradient as Descriptor of Premixed Flame Structure), *Transactions of the*

- Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.712 (2005), pp.3038-3045.
- (13) Hayashi, N., Yamashita, H., Nakamura, Y. and Yamamoto, K., Arrangement of Flame Structure by Reaction Progress Variable and Its Gradient in Unsteady Counterflow Premixed Flame, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, No.72, No.713 (2006), pp.208-215.
 - (14) Abdel-Gayed, R.G., Bradley, D., and Lawes, M., Turbulent Burning Velocities: a General Correlation in Terms of Straining rates, *Proceeding of Royal Society of London A*, Vol.414 (1987), pp.389-413.
 - (15) Bradley, D., Lau, A.K.C. and Lawes, M., Flame Stretch as a determinant of turbulent burning velocity, *Philosophical Transactions Royal Society of London A*, Vol.338 (1992), pp.359-387.
 - (16) Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (1980), McGraw-Hill.
 - (17) Smooke, M.D., Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames, (1991), pp.1-28, Springer-Verlag.
 - (18) Kee, R.J., Lewis, G.D., Warnatz, J., Coltrin, M.E. and Miller, J.A., *Sandia Report*, (1986), SAND86-8246.
 - (19) Kee, R.J., Rupley, F.M., and Miller, J.A., *Sandia Report*, (1989), SAND89-8009.
 - (20) NIST, JANAF thermochemical tables, Third Edition, (1985).
 - (21) Poinso, D., Veynante, D. and Candel, S., Quenching processes and premixed turbulent combustion diagrams, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.228 (1991), pp.561-606.
-