

二次元非定常予混合火炎に関する素反応機構による数値解析*

(予混合火炎構造を支配する物質質量としての 反応進行度とその勾配の妥当性)

加藤敏宏^{*1}, 林直樹^{*2}, 山下博史^{*2}
中村祐二^{*3}, 山本和弘^{*2}

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)

Toshihiro KATOH, Naoki HAYASHI^{*4}, Hiroshi YAMASHITA,
Yuji NAKAMURA 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 premixed flame is numerically simulated with elementary reaction mechanism. In order to investigate unsteady behavior, a sinusoidal fluctuation is added to the inlet velocity of methane-air premixed mixture as follows: $u_0 = u_m \{1 + A \cdot \sin(2\pi ky) \cdot \sin(2\pi ft)\}$. The average velocity u_m is 1.25-2.00 m/s, the amplitude A is fixed to 1.0, the frequency f is 100, 250, 500 Hz, and the wavenumber k is 0.1-0.4 mm⁻¹. The Smooke's skeletal mechanism is adopted as the elementary reaction mechanism. The equivalence ratio is fixed to 0.75. The unsteady behavior and flame structure of premixed flame are examined by using the progress variable defined with mass fraction of oxidizer C_q and its gradient $(dC/dn)_q$ at flame front. The obtained results are as follows: The total heat release rate, the temperature gradient, the maximum concentration of species are determined by C_q and $(dC/dn)_q$. Consequently, they are the most important descriptors of premixed flame which dominate the flame structure of premixed flame. The unsteady behavior is classified by the flame curvature and the flame propagation direction, and the classified regions are related to C_q and $(dC/dn)_q$.

Key Words: Premixed Flame, Unsteady Behavior, Progress Variable, Flame Curvature, Flame Propagation Direction, Numerical Analysis

1. 結 論

現在、地球環境問題やエネルギー問題が深刻となっており、高効率の燃焼器の開発および有害大気汚染物質の低減が急務である。しかし、ガソリンエンジンをはじめとする多くの燃焼器の燃焼形態である乱流燃焼は、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、

きわめて複雑なものとなっている。このため、未だ多くの研究者の関心を集めており、三次元直接数値計算やレーザ誘起蛍光(LIF)法をはじめとしたレーザ計測を用いた研究がさかんに行われ、これまで未解明であった乱流火炎の火炎構造が明らかにされつつある^①。山本らはOH-PLIF法を用いてメタン・空気予混合火炎の火炎面を可視化し、多孔板による乱れや予混合気の当量比が火炎面曲率に与える影響を検討するとともに、火炎面曲率とOH分布の関係について検討している^②。また、Tanahashiらは水素・空気乱流予混合火炎の三次元直接数値計算を行い、水素・空気乱流予混合火炎の局所火炎構造を明らかにしている^{③,④}。著者らは既に素反応機構を考慮した壁面衝突流予混合

* 原稿受付 2005年2月23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, 名古屋大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員, 北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8)。

E-mail: nhayashi@eess.mech.nagoya-u.ac.jp

火炎の数値計算を行い、非定常挙動が火炎構造に及ぼす影響に関する知見を得ている。

乱流燃焼のように非定常性が存在する燃焼場において、火炎構造を支配する物理量を見出すことは、モデリングを行う上で大変重要なことである。著者らは、平面二次元対向流乱流予混合火炎について詳細素反応機構を用いた数値計算を行い、火炎構造を支配する物理量として、火炎の挙動と密接に関係する酸素の質量分率で定義した反応進行度およびその勾配の火炎面位置における値を用いることで、熱発生速度および OH, CO₂ 等の主要な化学種の質量生成速度、モル濃度の最大値が決定できることを明らかにしている^{(9),(10)}。

そこで、本研究では、素反応機構を用いて二次元非定常予混合火炎の数値計算を行い、非定常性が存在する燃焼場において、火炎構造を支配する物理量として、上述の反応進行度およびその火炎面に垂直方向の勾配の火炎面位置における値を用い、その妥当性について検討を行った。また、流入速度に時間および空間変動を加えた際に生じる火炎の非定常挙動が火炎構造に及ぼす影響について、変動の振動数と波数を変化させて系統的に検討を行った。

2. 解析モデルおよび計算方法

本研究で用いた二次元非定常予混合火炎の解析モデルおよび境界条件を図 1 に示す。加熱源 0 の位置を原点とした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。メタンと空気からなる一様な予混合気を左端全域から流入させ、加熱源 0 で強制的に温度を上昇させ着火させる。この予混合気は当量比 0.75 で、温度は 300 K とし、流入速度 u_0 に以下のような時間的変動および空間的変動を加えた。

$$u_0 = u_m \{ 1 + A \cdot \sin(2\pi k y) \cdot \sin(2\pi f t) \} \quad (1)$$

ここで、 u_m は平均流入速度、 A は変動の強さ、 k は波数、 f は振動数を表す。今回の計算においては、変動の強さ A を 1.00 に固定し、平均流入速度 u_m を 1.25 ~ 2.00 m/s、波数 k を 0.1 ~ 0.4 mm⁻¹、振動数 f を 100, 250, 500 Hz と変化させた。また、 x 軸を対称境界、右端および上端を自由流境界とした。計算領域の大きさは、 $x = -2 \sim 18$ mm、 $y = 0 \sim 20$ mm であり、差分格子数は x 方向 201、 y 方向 201 とした。また、格子間隔は x, y 方向ともに 0.1 mm の等間隔格子とした。

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り、その離散化には有限体積法を用い、速度と圧力の連成には Patankar の SIMPLE 法を適用した⁽¹¹⁾。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適用し、時間刻み 5 μs とした。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、計算における緩和係数は 0.07、収束判定値は 10⁻⁴ とした。

化学反応機構には、Smooke のメタン・空気系 Skeletal 素反応機構を用いた⁽¹²⁾。この反応機構では 16 の化学種について 25 個の素反応が考慮され、詳細素反応機構の骨組みで構成された反応機構である。熱力学定数については CHEMKIN データベース^{(13),(14)} から求めた。輸送係数については Smooke の Simplified Transport Model⁽¹⁵⁾ を用いた。

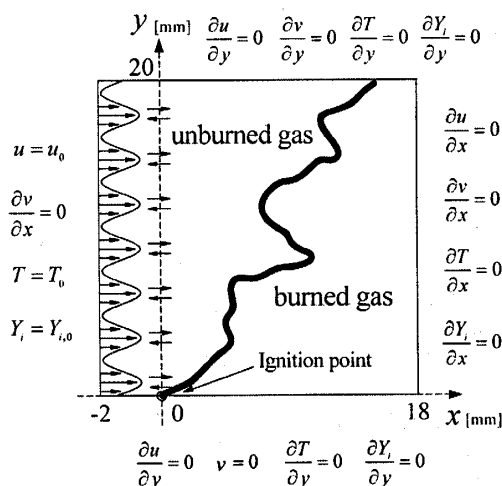


Fig.1 Analytical model and boundary conditions

3. 計算結果および検討

3.1 火炎の時間変化 本研究では、流入速度に時間的および空間的変動を加えているため、時間経過とともに火炎形状が変化する。そこで、 $u_m = 1.75$ m/s、 $k = 0.4$ mm⁻¹、 $f = 250$ Hz および $u_m = 2.00$ m/s、 $k = 0.3$ mm⁻¹、 $f = 500$ Hz とした場合の OH モル濃度の時間変化を図 2 および図 3 に示す。なお、これらの図の時間間隔は 35 μs である。

OH 濃度は未燃側ではほぼゼロであり、火炎帯で急激に増加し極大となった後、徐々に減少する。この極大値の 50 % 程度となる位置が火炎面に相当するが、図では白黒の境目が火炎面と見ればよい。これらの図から分かるように、火炎面形状は時間とと

もに変化している。今回示していない他の条件でも同様の変化が見られた。

図3に示す火炎は、図2の火炎に比べ波数が大きい。また、振動数が大きいことにより、流入速度の変動に対する火炎の追従性が悪くなることから、火炎面の凹凸のスケールも小さくなっている。このような火炎面形状の変化の原因として、流入速度に加えている時間的および空間的変動に加え、火炎面自体が持つ流体力学的不安定性⁽¹⁵⁾が挙げられる。火炎面には流入速度に加えている時間的・空間的変動に対応して凹凸が繰り返し現れ、変形しながら下流側に移動している。また、流体力学的不安定性により、その変形はやや不規則なものとなっている。このような結果は、同様な解析モデルで総括一段不可逆反応を用いた量論混合気に対する研究⁽¹⁶⁾においても得られている。

OH モル濃度のような火炎構造を表す特性量は火炎面形状を表す火炎面曲率の大きさとその正負によって決まるといわれている⁽⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾。しかし、これらの図から、火炎面形状がほぼ同じであっても、OH モル濃度の大きさに違いが見られる。これについては、3.4節で詳しく考察する。

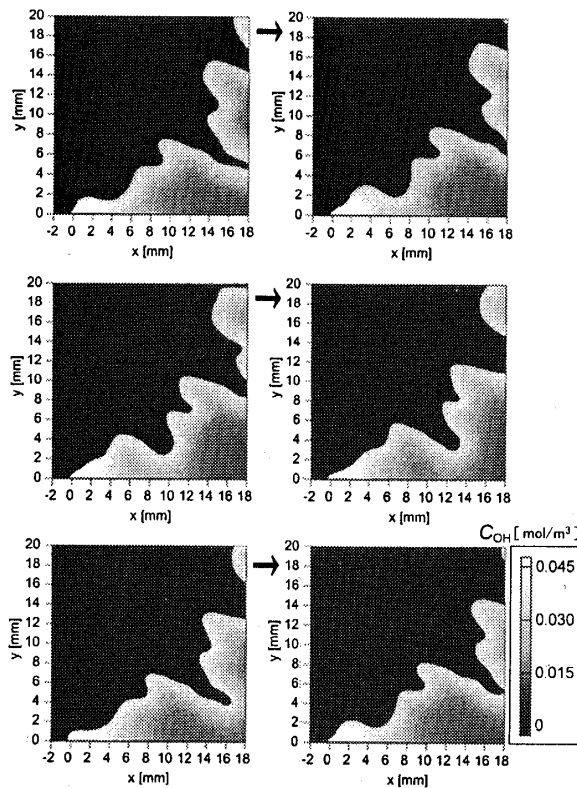


Fig. 2 Time evolution of 2-D OH mole concentration contour ($u_m=1.75$ m/s, $A=1.00$, $k=0.4$ mm⁻¹, $f=250$ Hz, $\Delta t=35$ μ s)

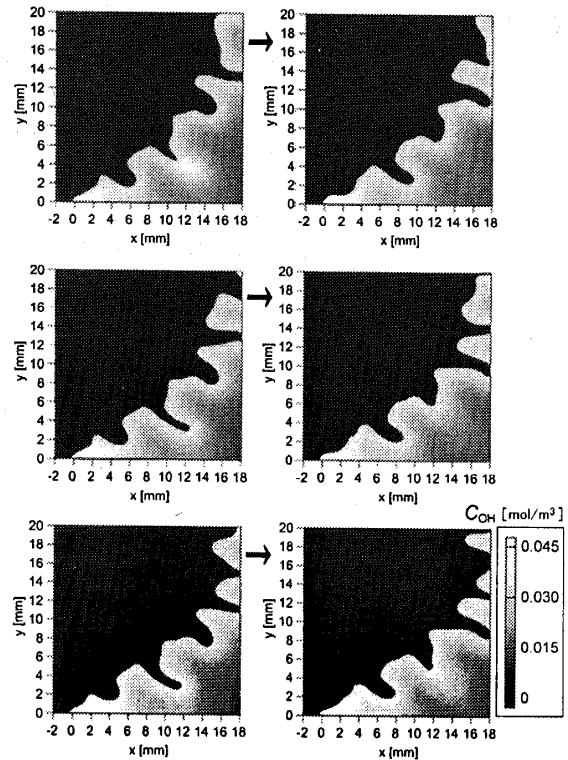


Fig. 3 Time evolution of 2-D OH mole concentration contour ($u_m=2.00$ m/s, $A=1.00$, $k=0.3$ mm⁻¹, $f=500$ Hz, $\Delta t=35$ μ s)

3.2 火炎面垂直方向の諸量の分布 火炎構造の考察を行うにあたり、火炎面に垂直方向の諸量の分布を求めた。例として、 $u_m=1.75$ m/s, $k=0.2$ mm⁻¹, $f=250$ Hzとした場合における OH モル濃度分布を図4(a)に示す。図中に示した A-A'断面の温度 T 、熱発生速度 Q 、OH モル濃度 C_{OH} 、CO₂ モル濃度 C_{CO_2} の分布は図4(b)のようになる。ここで図中の n 軸は火炎面を原点とし、既燃側方向を正としたものである。

流入速度に変動を加えない場合、定常な斜め予混合火炎が形成され、着火点から離れた領域では、火炎面垂直方向の諸量の分布はどの位置でも同じとなる。

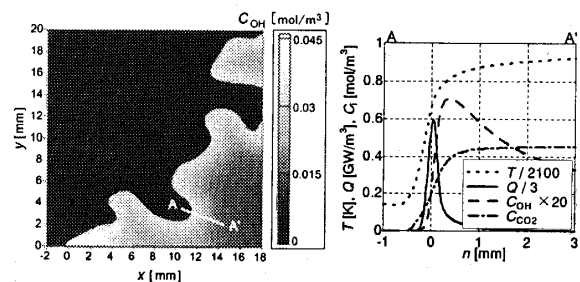


Fig. 4 (a) Cross section A-A' perpendicular to flame front, (b) Flame structure along A-A'

これに対し、速度変動を加えた場合、前節で述べたように、火炎面形状の変化等の影響により、局所的な火炎構造は変化し、定常火炎とは異なるものとなる。この違いについては3.4節で示す。

3.3 火炎構造を支配する物理量の検討 火炎構造を支配する物理量として反応進行度がよく用いられている。一般に反応進行度を定義する場合、燃料の質量分率を正規化して用いることが多いが、本研究においては、酸素の質量分率によって定義した反応進行度を用いた。これは、素反応機構を適用する場合、燃料のメタンはすぐに CH_3 等に分解されてしまい、火炎面近傍の特性を評価するのに適していないためである。これまでの研究により、対向流予混合火炎において、火炎構造を支配する物理量として酸素の質量分率で定義した反応進行度およびその勾配の火炎面位置における値を用いることで、主要な化学種の質量生成速度やモル濃度の最大値などの火炎構造を決定できることが分かっている^{(9),(10)}。

酸素の質量分率で定義した反応進行度を以下に示す。

$$C = \frac{Y_{O_2,u} - Y_{O_2}}{Y_{O_2,u} - Y_{O_2,b}} \quad (2)$$

ここで、 Y_{O_2} は酸素の質量分率であり、 $Y_{O_2,u}$ は未燃予混合気における値である。一方、 $Y_{O_2,b}$ は既燃予混合気の平衡状態における値であり、用いた予混合気の当量比に対する平衡計算によって求めた。反応進行度は反応がどれだけ進んでいるかを表すパラメータであり、未燃ガスでは0、既燃ガスではほぼ1となる。

3.3.1 反応進行度とその勾配 本研究では、熱発生速度が最大となる位置を火炎面として定義し、酸素の質量分率で定義した反応進行度の火炎面位置における値 C_q を用いて、火炎構造を表す特性量である熱発生速度の最大値 Q_{max} 、OHモル濃度の最大値 $C_{OH,max}$ との関係を調べる。 C_q と各特性量の間に関連関係があるとすれば、反応進行度の火炎面位置における値を用いることで火炎構造を表すことが可能であるといえる。そこで、反応進行度の火炎面位置における値 C_q を横軸にとり、図5(a)に熱発生速度の最大値 Q_{max} との関係を、また、図5(b)にOHモル濃度の最大値 $C_{OH,max}$ との関係を示す。

図5(a)より、 C_q と Q_{max} の間には相関があることが分かる。多少の差異があるものの、 C_q が決まれば一意に Q_{max} が決まる。しかし、図5(b)では図5(a)と比較し

て、差異が大きい。つまり、 C_q のみを用いて火炎構造を表すことが難しいということを示している。 Q_{max} のように反応進行度の火炎面位置における値だけで決定できるものもあるが、それは火炎構造を表す特性量の一部に過ぎない。より多くの特性量を決定するためには、新たな物理量を追加する必要があると考えられる。

そこで、火炎構造を支配するもう一つの物理量として、反応進行度の火炎面に垂直方向の勾配の火炎面位置における値 $(dC/dn)_q$ を提案する。この物理量は、火炎面位置における酸素の質量分率の勾配に比例し、火炎面で消費される反応物の量と関係が深く、燃焼特性をよく表すと考えられる。これら2つの物理量と火炎構造を表す特性量がどのような関係になっているかについて次項で示し、これら2つの物理量の火炎構造を支配する物理量としての妥当性を検討する。

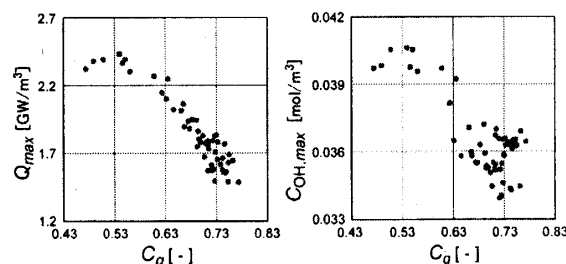


Fig. 5 (a) Relationship of Q_{max} to C_q , (b) Relationship of $C_{OH,max}$ to C_q

3.3.2 反応進行度の火炎構造を支配する物理量としての妥当性 図6(a),(b)にそれぞれ、 C_q および $(dC/dn)_q$ を用いて、全熱発生速度 Q_{sm} と火炎面位置における温度勾配 $(dT/dn)_q$ を整理した結果を示す。ここで Q_{sm} は、火炎面垂直方向に熱発生速度を積算した値である。図6(a),(b)から分かるように、 Q_{sm} または $(dT/dn)_q$ の値は、 C_q および $(dC/dn)_q$ で表した平面上のごく近くに配置された場合、ほぼ同じ値となる。したがって、これらの値は、 C_q と $(dC/dn)_q$ が決まれば一意に定まることになる。つまり、 Q_{sm} や $(dT/dn)_q$ のような火炎構造を表す特性量を支配する物理量として、 C_q と $(dC/dn)_q$ が妥当であると考えられる。 Q_{sm} は C_q が大きいかつ $(dC/dn)_q$ が大きい場合、小さな値となっている。これは、火炎面位置で酸素の質量分率が小さく、酸素の質量分率の勾配が大きい場合には、反応が活発ではないことを示している。また逆に、 $(dT/dn)_q$ は C_q が小さくかつ $(dC/dn)_q$ が小さい場合、小さな値となっている。

同様に、化学種の特性量を $C_q-(dC/dn)_q$ 平面上で整理した結果の例として、図6(c)~(f)にOHモル濃度の

最大値 $C_{OH,max}$, HCO モル濃度の最大値 $C_{HCO,max}$, 最大 CO_2 質量生成速度 $w_{CO_2,max}$ および CO_2 全質量生成速度 $w_{CO_2,sum}$ を示す。ここで, HCO は PLIF 法や自発光計測で計測することができる重要な中間生成物の CH と同様の分布となる化学種である。これらの特性量もまた

$C_q - (dC/dn)_q$ 平面上で一義的に決定することができる。とともに, C_q が大きくかつ $(dC/dn)_q$ が大きい場合, 小さな値となるものが多い。ただし, $C_{HCO,max}$ は他の量と比べ, C_q との依存性が強く, C_q が大きい場合に小さくなる。

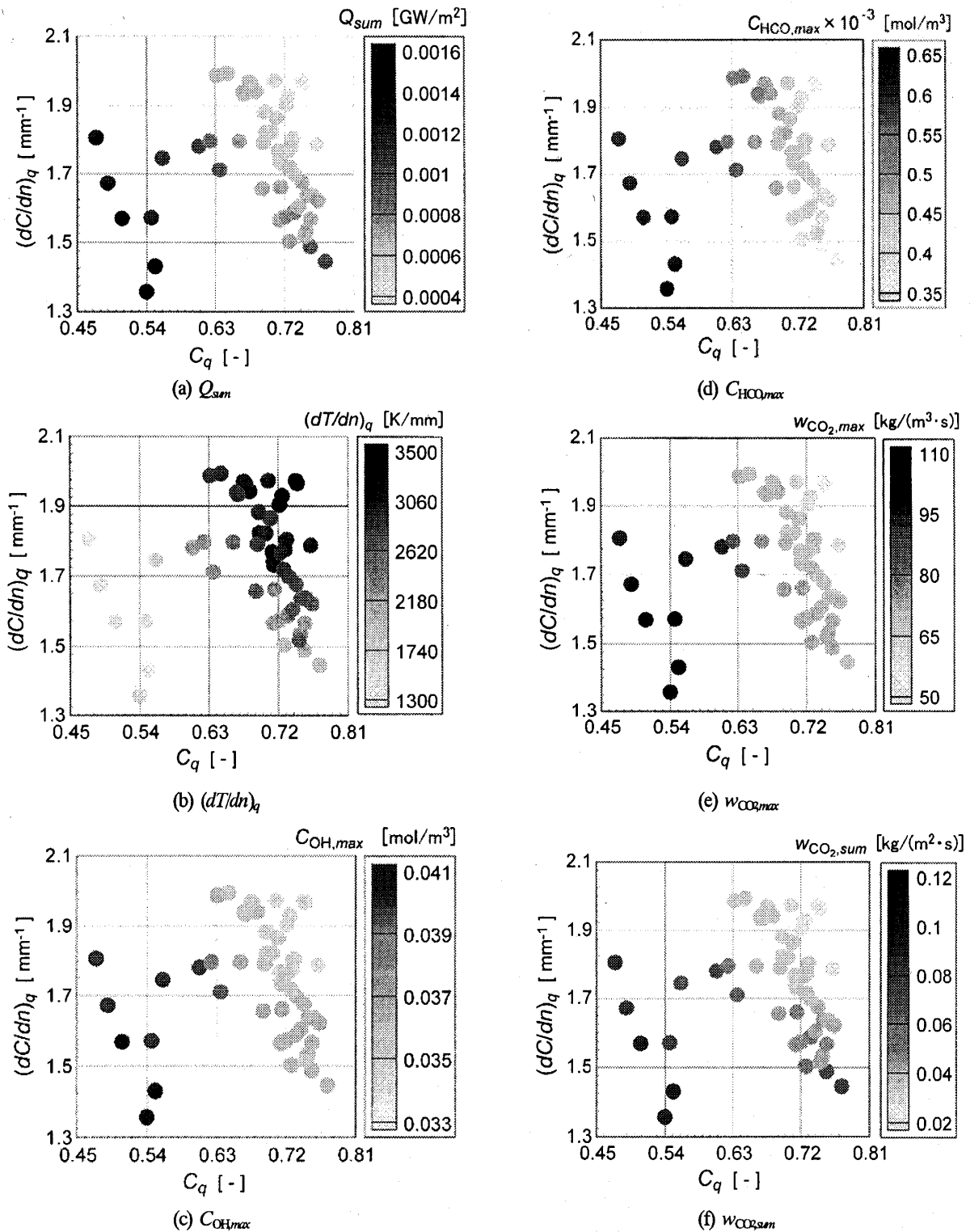


Fig. 6 Relationship of various quantities to C_q and $(dC/dn)_q$

Table 1 Classification of flame behavior

Case	Symbol	Sign of flame curvature	Magnitude of flame curvature large: $\geq 1\text{mm}^{-1}$ small: $< 1\text{mm}^{-1}$	Flame Propagation direction
		+ : concave toward burned gas - : convex toward burned gas		burned \leftarrow unburned
Case 1	●	-	large	\rightarrow
Case 2	■	-	large	\leftarrow
Case 3	○	-	small	\rightarrow
Case 4	□	-	small	\leftarrow
Case 5	▲	+	large	\rightarrow
Case 6	▼	+	large	\leftarrow
Case 7	△	+	small	\rightarrow
Case 8	▽	+	small	\leftarrow

以上より、火炎構造を表す様々な特性量は、反応進行度の火炎面位置における値 C_q と反応進行度の火炎面に垂直方向の勾配の火炎面位置における値 $(dC/dn)_q$ の平面上で一義的に決定できることが分かった。

3.4 非定常挙動が火炎構造に及ぼす影響

非定常性が存在する場において、図2および3のように火炎面形状は時間とともに変化する。この非定常性によって、火炎面形状だけでなく火炎構造も変化する。以下では、非定常性によって火炎構造にどのような変化が生じているかを調べ、非定常性が火炎構造に及ぼす影響について検討する。

3.4.1 火炎の非定常挙動

従来の研究において、火炎面曲率の大きさや正負などの火炎面形状が火炎構造に影響を及ぼすとされている^(8, 10-12)。しかし、図2および図3に示したOHモル濃度の時間変化によると、火炎面曲率の大きさや正負が同じ場合でも、OHモル濃度の大きさが異なっていることが確認できる。これは、その瞬間の火炎面形状だけではOHモル濃度の大きさが決まらないことを示している。火炎面の瞬間の曲率だけでなく、火炎面の時間的な履歴を考慮する必要がある。したがって、本研究では火炎面曲率の大きさ・正負といった火炎面形状に加え、火炎の伝播する方向についても考慮し、これらが火炎構造に与える影響について検討を行った。

3.4.2 火炎挙動の分類

本研究では、火炎構造に影響を与える要因として次のような火炎挙動について分類を行った。まず、ある瞬間の火炎面形状を表すものとして、火炎面曲率の正負（火炎面が既燃側あるいは未燃側に凸か）と火炎面曲率の大きさ（火炎面曲率が大きいか小さいか）、また火炎面の時間的な変化として、火炎面の伝播方向（火炎面が既燃側から未燃側あるいは未燃側から既燃側に進むか）の三点である。これらに注目し、本研究で得られた様々な火炎

挙動を8つに分類した。表1に火炎挙動の分類を示す。火炎面曲率の大きさは 100mm^{-1} を閾値とし、曲率の小さいものは $0.05 \sim 0.74\text{mm}^{-1}$ （平均： 0.32mm^{-1} ）、曲率の大きいものは $1.61 \sim 4.19\text{mm}^{-1}$ （平均： 2.56mm^{-1} ）である。

3.4.3 火炎挙動と反応進行度およびその勾配の関係

表1に示した8つの分類に該当する火炎挙動について、数値計算結果のいくつかの瞬間といくつかの火炎面位置から数個のデータを選び出し、そのデータにおける C_q と $(dC/dn)_q$ を用いて、 $C_q - (dC/dn)_q$ 平面上にプロットしたものを図7に示す。図中の記号は表1に示す火炎挙動を表している。

図より、それぞれの火炎挙動が不規則に C_q と $(dC/dn)_q$ の平面上に配置されているように見えるが、これらには規則性が存在しており、火炎挙動によって C_q と $(dC/dn)_q$ の平面上に配置される領域が異なっていることが分かる。●は C_q が小さい領域に、■は C_q が比較的大きく、 $(dC/dn)_q$ が大きい領域に、○は C_q と $(dC/dn)_q$ がともに大きい領域に、□は C_q が大

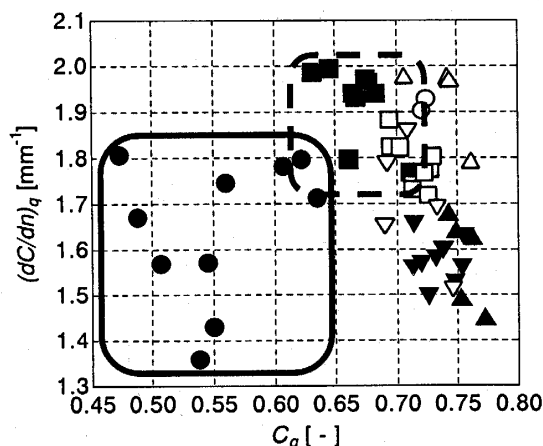


Fig. 7 Relationship of flame behavior to C_q and $(dC/dn)_q$
(Classification based on flame propagation direction)

大きく、 $(dC/dn)_q$ が比較的大きい領域に、 \blacktriangle と \blacktriangledown は C_q が大きく、 $(dC/dn)_q$ が小さい領域に、 \triangle と \triangledown は C_q が大きい領域に配置されている。このように、火炎の挙動が同じ分類であるものは、 $C_q-(dC/dn)_q$ 平面上ではほぼ同じ領域に配置される。したがって、火炎挙動が火炎構造に及ぼす影響は、この C_q と $(dC/dn)_q$ の平面を用いて検討できると考えられる。逆に、 \blacktriangle 、 \blacktriangledown および \triangle がこの平面の同じ領域に混在するが、これは火炎の曲率や非定常挙動が異なっている、 C_q と $(dC/dn)_q$ が同じとなることがあることを意味している。

3.4.4 火炎面の伝播方向が火炎構造に及ぼす影響

図8(a)～(e)に定常火炎および火炎面曲率が大きい4条件における各火炎面に垂直方向の諸量の分布の一例を示し、図7に示した $C_q-(dC/dn)_q$ 平面と併せて、火炎面の伝播方向が火炎構造に及ぼす影響を検討する。なお、図8では、火炎面曲率が負となる場合を(a)(b)に、定常でゼロとなる場合を(c)に、正

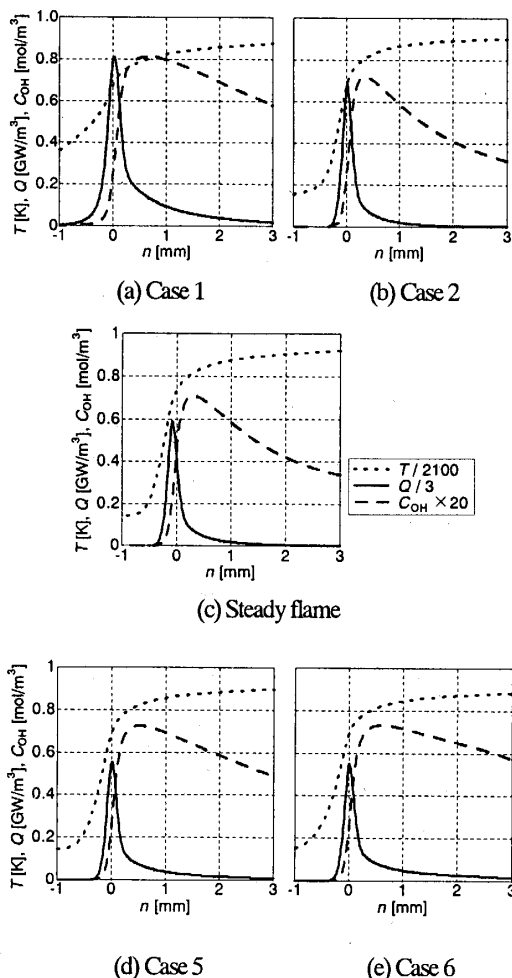


Fig. 8 The distribution of temperature, heat release rate and mole concentration of OH normal to the flame front

となる場合を(d)(e)に示した。

火炎面形状が同一で火炎面の伝播方向が異なる例として、図7において、実線の四角で囲った領域 (\bullet で表される火炎挙動：火炎面は既燃側から未燃側に進む)と破線の四角で囲った領域 (\blacksquare で表される火炎挙動：火炎面は未燃側から既燃側に進む)に注目する。これら二つの火炎挙動はいずれも既燃側に凸で曲率が大きく、火炎面形状が同じであることから、従来の考えでは火炎構造も同じはずであり、図7では同じ領域にならなければならない。しかしながら、図7から明らかのように、この2つの領域は異なった場所に配置されている。火炎面曲率が負で大きく、火炎面の伝播方向が異なる図8(a)、(b)を比較しても明らかのように、温度分布が図8(a)では、未燃側でも図8(b)に比べて高くなり、また、熱発生速度やOH濃度の最大値にも大きな違いがみられる。この2つの領域を図6(a)～(f)に照らし合わせてみると、火炎面の伝播方向の違いによって、全熱発生速度 Q_{sm} や火炎面位置における温度勾配 $(dT/dn)_r$ 、最大 CO_2 質量生成速度 w_{CO_2max} では15～20倍の差が、 CO_2 全質量生成速度 w_{CO_2sm} に至っては3倍近い差がある。これは、火炎面形状だけではなく、火炎面の伝播方向による影響があることを示しており、3.4.1項における火炎の時間的変化を考慮する必要があることを裏付けるものである。つまり、火炎面曲率が負で大きな値を持つ場合には、火炎面形状だけでは火炎構造は決まらないことを示唆している。なお、火炎面曲率が負の場合には、火炎面曲率がゼロである図8(c)の定常火炎の場合よりも熱発生速度は大きい。

また、火炎面曲率が正で大きく、火炎面の伝播方向が異なる図8(d)、(e)を比較すると、火炎面曲率が負の場合と比較して、火炎面の移動方向による大きな変化はみられない。これは、Case 5とCase 6の場合、図7の $C_q-(dC/dn)_q$ 平面では配置される領域がかなり近いことに対応し、各種物理量は、図6に示されるように、ほぼ同じ値を示す。

4. 結 論

二次元非定常予混合火炎に対して素反応機構による数値計算を行い、その火炎挙動と火炎構造を支配する物理量として、酸素の質量分率で定義された反応進行度の火炎面位置における値 C_q と、その火炎面に垂直方向の勾配 $(dC/dn)_q$ を提案し、詳細な検討を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 全熱発生速度、火炎面での温度勾配、各種の化学種濃度の最大値などの火炎構造を表す特

性量は、 $C_q - (dC/dn)_q$ 平面で一義的に表すことができる。したがって、 C_q と $(dC/dn)_q$ は、火炎構造を支配する物理量として妥当である。

- (2) 火炎の非定常挙動を火炎面曲率の正負とその大きさ、および火炎面の伝播方向に注目して分類し、火炎の挙動が同じ分類であるものは、 $C_q - (dC/dn)_q$ 平面上でほぼ同じ領域に配置されることを示した。したがって、火炎の挙動が火炎構造に及ぼす影響は、この $C_q - (dC/dn)_q$ 平面を用いて検討できる。逆に、火炎の曲率や非定常挙動が異なっている場合でも、 C_q と $(dC/dn)_q$ が同じ値となることがある。
- (3) 火炎面の曲率の正負や大きさが同じ場合でも、 $C_q - (dC/dn)_q$ 平面上で同じ領域に配置されるとは限らず、火炎の伝播方向にも関係し、火炎の形状だけでは火炎構造が決まらない。

文 献

- (1) Bell, J. B., Day, M. S. and Gicar, J. F., *Proc. Combust. Inst.* **29** (2002), 1987-1993.
- (2) 山本和弘・西澤泰樹, 機論, **68-665, B**(2002), 238-245.
- (3) Characorborty, N. and Cant, S., *Combust. Flame* **137** (2004), 129-147.
- (4) Dinkelacker, M. F. and Leipertz, A., *Proc. Combust. Inst.* **29** (2002), 1801-1808.
- (5) Cheng, Y.C. and Bilger, R.W., *Combust. Flame* **138** (2004), 155-174.
- (6) 山本典史・中村祐二・趙黛青・山下博史, 流体熱工学研究 **38**(2004), 19-28.
- (7) Tanahashi, M., Fujimura, M. and Miyauchi, T., *Proc. Combust. Inst.* **28** (2000), 529-535.
- (8) Tanahashi, M., Nada, Y., Ito, Y. and Miyauchi, T., *Proc. Combust. Inst.* **29** (2002), 2041-2049.
- (9) 後藤英之・山下博史, 第 40 回燃焼シンポジウム講演論文集(2002), 331-332.
- (10) 林直樹・中村祐二・山下博史, 第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集(2004), 145-146.
- (11) Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (1980), 126-130, McGraw-Hill.
- (12) Smooke, M.D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
- (13) Kee, R. J., Lewis, G. D., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., *Sandia Report*, SAND 86-8246 (1986).
- (14) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., *Sandia Report*, SAND 89-8009 (1989).
- (15) Willams, F.A., *Combustion Theory*, 2nd ed. (1985), 341-349, The Benjamin/Cumming Publishing.
- (16) 大須賀達也・山下博史, 第 36 回燃焼シンポジウム講演論文集(1998), 356-358.
- (17) Lee, T. W., Lee, J. G. and Nye, D. A., *Combust. Flame* **94** (1993), 146-160.
- (18) Echehki, T. and Chen, H. J., *Combust. Flame* **106** (1996), 184-202.
- (19) 店橋讓・名田讓・宮内敏雄, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, 第 11 巻 第 4 号 (2003), 211-223.