

反応進行度とその勾配による非定常対向流予混合火炎の 火炎構造の整理*

林 直樹^{*1}, 山下博史^{*1}
中村祐二^{*2}, 山本和弘^{*1}

Arrangement of Flame Structure by Reaction Progress Variable and Its Gradient in Unsteady Counterflow Premixed Flame

Naoki HAYASHI^{*3}, Hiroshi YAMASHITA,
Yuji NAKAMURA and Kazuhiro YAMAMOTO

^{*3} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Dominant parameters in unsteady flame structure of methane/air counterflow premixed flame are investigated by numerical simulation with detailed chemical kinetics model. Two boundary conditions are used for comparison of the difference in the countered gas. One is the twin counterflow premixed flames, which is spouted premixed gas from both nozzles, and the other is the single counterflow premixed flame countered premixed gas and air. In order to investigate unsteady flame behavior, a sinusoidal fluctuation is added to the spout velocity. The influences of average velocity and the fluctuation frequency of the spout velocity on flame structure are examined. It is shown that the flame structure in the single-flame is governed by a reaction progress variable defined with mass fraction of oxygen, C_{O_2} , and its gradient, ∇C_{O_2} evaluated at flame front. In the twin-flame, ∇C_{O_2} and the gradient of a progress variable defined with temperature evaluated at flame front, ∇T , dominate the flame structure.

Key Words: Premixed Flame, Unsteady Behavior, Counterflow, Reaction Progress Variable, Numerical Analysis

1. 緒 論

乱流火炎の火炎構造を明らかにすることは、燃焼研究において主要な課題の一つとされている。近年、PLIF (Planer Laser-Induced Fluorescence) 法や PIV (Particle Image Velocimetry) をはじめとしたレーザ計測による濃度場、速度場の計測⁽¹⁾⁽²⁾や、3D-DNS (Direct Numerical Simulation)⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた数値解析による検討が盛んに行われ、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。

しかし、非定常かつ多次元の複雑な乱流現象の検討を行う場合、火炎構造に影響を与える火炎伸長、火炎面曲率、非定常性等に対して各々の要素を個別に取り出して系統的に検討するのは非常に困難である。そ

のため、Laminar flamelet model⁽⁵⁾の考え方にに基づき、より基本的な流れ場である、定常あるいは非定常の対向流火炎を用いた実験や数値解析による検討が行われてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。Sung ら⁽⁸⁾は、予混合および拡散対向流火炎を用い、非定常性が火炎構造や燃焼速度等に及ぼす影響について検討を行っている。また、Muller ら⁽⁹⁾は OH-PLIF と対向流予混合火炎の数値計算により、定常火炎と非定常火炎とで異なる傾向があることを指摘している。

これらの従来の研究を踏まえ、本研究ではノズル出口速度に対して時間変動を加えた燃料希薄のメタン・空気非定常対向流予混合火炎に対して検討を行った。このとき、予混合気と対向させる側の流体として、空気と予混合気の2種類を用いた。

Laminar flamelet modelによると、詳細な化学反応を変動する流れ場の計算から分離して行い、その後両方の計算で共通に定義できるパラメータを媒介として再結合するという組み合わせ手法を用いることにより、乱流燃焼場の計算を可能にすることができる。この再

* 原稿受付 2005年5月16日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市中種区不老町)。

^{*2} 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: hayashi@mech.nagoya-u.ac.jp

結合パラメータとして、火炎構造を支配する物理量を見出すことを試みた。その候補として酸素濃度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を取り上げ、火炎面近傍における諸量の整理を行った。

2. 解析モデルおよび計算方法

図 1(a), (b)に對向流予混合火炎の解析モデルを示す。本研究では予混合気に対向する側の流体として、常温の空気を用いる Single-flame, および同じ予混合気を用いる Twin-flame の 2 種類の境界条件について検討する。この 2 条件は火炎後流側への熱損失の有無という点で異なり、本研究で対象としている燃料希薄予混合火炎において、この違いは火炎に対して大きな影響を与える⁽¹²⁾。Single-flame は空気雰囲気中に予混合気を噴出させる実際のバーナ燃焼に近い境界条件である。また、Twin-flame は下流への熱損失がないため、對向流を用いた実験や数値解析で一般によく用いられるモデルである。これら 2 つの境界条件を用いて、幅広い条件について検討を行う。

流れ場は二次元のポテンシャル流とし、温度場および濃度場においては相似解が適用できるものとする。予混合気の温度および濃度の境界条件を設定するために、仮想的に 15 mm 離れた 2 つのノズルが對向しているものとし、一方のノズルの中心を原点として、ノズル軸方向および軸に垂直方向の座標を (x, y) とし、それぞれの速度成分を (u, v) とする。Single-flame については一方のノズルから、また Twin-flame については両方のノズルから当量比 0.75 の予混合気を噴出させた。また Single-flame のもう一方のノズルからは、空気を噴出させる。圧力は大気圧で、2 つのノズル位置での温度は 300 K である。

まず、火炎の基本的な特性を調べるために定常火炎について計算する。さらに火炎の非定常性について検討を行うために、ノズル出口流速 u_0 に対し、次式のように正弦関数で表される時間変動を加えた。

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

ここで、 u_m を平均流速、 A を変動の強さ、 f を振動数

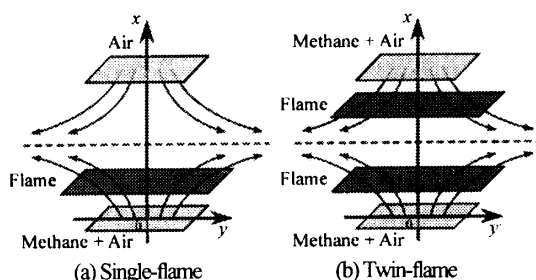


Fig. 1 Schematics of the counterflow flames

とする。ノズル出口流速を平均流速 u_m で一定とした場合の定常火炎を初期条件とし、式(1)のように時間変動を加え十分時間が経過した後の準定常状態について検討を行う。計算条件としては、定常火炎では層流燃焼速度 $S_u = 0.23$ m/s に近い $u_0 = 0.3$ m/s から消炎限界までとした。非定常変動の条件は、 $A = 0.75$ で一定とする。 f の範囲はなるべく広く設定し、下限は計算時間との関係や境界条件の有効性が損なわれないように 50 Hz とし、一方、上限は変動に対する燃焼場の応答にある程度非定常性が見られる 500 Hz とした。 u_m は Single-flame で 0.5 ~ 0.9 m/s, Twin-flame で 0.5 ~ 4.5 m/s の間で変化させた。なお、非定常条件において、定常解が存在しない Single-flame の $u_m = 0.9$ m/s の条件でも、 $f = 250, 500$ Hz では火炎は存在する。この条件では、初期値は消炎直前である $u_m = 0.8$ m/s の定常解を用いた。

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る。速度場については、二次元のポテンシャル流で、式(1)で表される瞬時の境界条件に応じた準定常状態を仮定することにより、ノズル軸方向の運動量勾配が一定となる解析解が求まる。各化学種の連続方程式およびエネルギー方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x}) = w_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) = -\frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i \quad (3)$$

ここで、混合気体の密度 ρ 、温度 T 、定圧比熱 c_p 、熱伝導率 λ 、化学種 i の質量分率 Y_i 、有効拡散係数 D_i 、質量生成速度 w_i 、エンタルピー h_i である。これらの式の離散化には有限体積法を用いた。対流項の差分化には一次風上差分、時間方向については Euler の完全陰解法を適用し、時間刻みは 1 μ s 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った。格子間隔は Single-flame において 501 点とした。火炎が存在する予混合気ノズル側については $x = 0$ mm からよどみ面付近 ($x = 7.5$ mm) までを 400 点の等間隔格子とし格子間隔を 0.01875 mm とした。また残りの 101 点を不等間隔格子とした。Twin-flame ではよどみ面について対称となるため、 $x = 0 \sim 7.5$ mm について計算を行った。格子は 401 点の等間隔格子とし、Single-flame の予混合気ノズル側と同じ格子間隔を用いた。

反応機構には GRI-Mech 3.0 を用いた⁽¹³⁾。この反応機構の妥当性は、文献(13)において、燃焼速度、着火遅れ、火炎構造等の計算結果と実験との比較が示され検証されている。熱力学定数については CHEMKIN

データベース⁽¹⁴⁾から求めた。また、輸送係数については、SmookeのSimplified Transport Model⁽¹⁵⁾を用いた。

3. 計算結果および考察

3.1 定常火炎に対する検討 図2に定常火炎における u_0 および火炎伸長率 κ と火炎の燃焼強度を表す熱発生速度最大値 Q_{max} の関係について示す。火炎伸長率 κ は、対向流の場合には、上下ノズル間の距離を L として以下のように定義される。

$$\kappa = \frac{2u_0}{L} \quad (4)$$

ここで、ポテンシャル流を仮定しているので、 κ は火炎面よりも上流の領域における速度勾配の最小値で定義した局所火炎伸長率(local stretch rate)⁽⁶⁾と一致する。なお、密度変化を考慮した運動量の勾配はいたるところ一定になることを付記しておく。

u_0 が極めて小さい領域では、 Q_{max} は両火炎でほぼ同じ値である。しかし、Single-flameでは u_0 の増加とともに消炎まで単調減少するのに対し、Twin-flameでは、

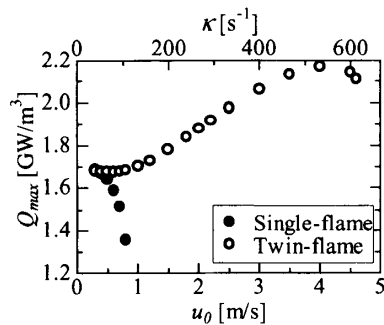


Fig. 2 Relationship and Q_{max} to κ and u_0 (Steady flow)

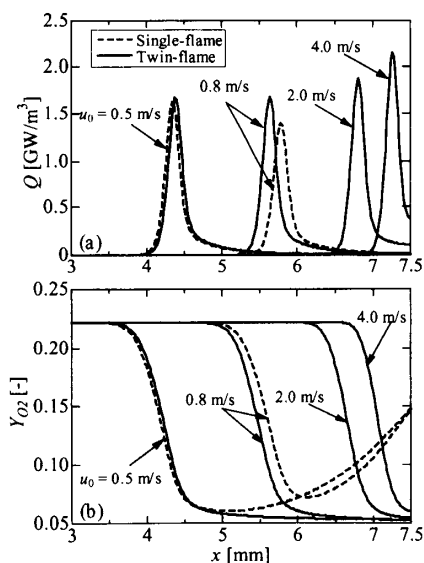


Fig. 3 Distributions of Q and Y_{O_2} (steady flow)

消炎の直前まで増加を続け、消炎の極近傍でのみ減少する。これは、熱損失の有無が大きな影響を与えているためであると考えられる。

図3(a)に熱発生速度 Q の x 軸方向分布を示す。 u_0 が小さい0.7 m/s以下の条件では、火炎は比較的よどみ面から離れた領域に形成されるため、対向してくる流体にほとんど影響されない。そのため、熱発生速度の分布をはじめとした火炎構造は両火炎でほぼ同じとなる。しかし、 u_0 が大きくなると、Single-flameでは温度の低い空気が対向しているため、下流側への熱損失により、Twin-flameの場合よりも小さい $u_0 = 0.8$ m/s付近で火炎が消炎する。このSingle-flameの消炎では、 Q_{max} をはじめ、反応により生成されるCOやCO₂などの化学種の質量生成速度等が単調に減少する傾向を示す。これに対し、対向する流体が高温の既燃ガスであるTwin-flameでは下流への熱の損失が存在しないので、火炎の消炎限界は $u_0 = 4.6$ m/sとなり、Single-flameより大きい。

Twin-flameでは、 Q_{max} は u_0 の小さい場合には、わずかな減少が見られるが、 $u_0 = 0.8$ m/s以上では、消炎直前の4.0 m/s程度まで増加する⁽¹⁶⁾。これは、燃料希薄メタン・空気予混合気のレイス数が1よりも小さいことによる熱と拡散の不均衡の効果であると考えられる⁽⁷⁾。また、 u_0 が大きくなると火炎がよどみ面へと近づき、よどみ面においても熱発生速度はある程度の値を持ち、燃焼反応が完結することができず、不完全燃焼の状態となり、最終的に消炎に至る。

次に、図3(b)に酸素の質量分率 Y_{O_2} の x 軸方向分布を示す。Single-flameにおいて u_0 の増加に伴い、火炎面付近の勾配は緩やかになることがわかる。また、Twin-flameでは、逆に u_0 の増加に伴い勾配が急になる。これは Q_{max} の傾向と同じであり、 Y_{O_2} の火炎面における勾配と Q_{max} の間に強い相関があると考えられる。ここで、火炎面は熱発生速度が最大となる位置とした。

3.2 火炎の非定常性 図4にSingle-flame、 $u_m = 0.6$ m/sの非定常条件における火炎伸長率 κ 、熱発生速度最大値 Q_{max} の時間変化を各条件1周期分について示す。Egolfopoulosら⁽¹⁸⁾が火炎温度で示したのと同様に、振動数が大きくなるに従い、 Q_{max} の振幅は小さくなり、 κ に対する Q_{max} の位相遅れは大きくなる。これは f が大きい場合、速度の変動に対して、諸量の追従性が悪くなることを示している。同様の傾向が主要な化学種(OH, CH, CO₂等)の質量生成速度や温度の最大値についても見られた。この位相遅れの傾向は、振動数の他に平均流速の違いによっても異なる。

定常火炎では、消炎した Single-flame の $u_m = 0.9$ m/s の条件でも、 $f = 250$ Hz, 500 Hz では、火炎は消炎しなかった。これは、図 4 のような非定常条件の 1 周期に関して Q_{max} の時間平均を算出した結果、Single-flame では定常条件よりも大きくなったことによるものと考えられる。

以上より、火炎伸長率の時間変化は火炎構造に対して影響を与える根本的な原因ではあるが、その瞬間の火炎伸長率で非定常火炎における火炎構造を決めることはできないことがわかった。

3.3 反応進行度による諸量の整理

3.3.1 反応進行度の定義 前節に示したように、火炎伸長率で火炎構造を決めることはできない。そこで、本研究では火炎構造を表すパラメータとして流れ場によって決まる火炎伸長率ではなく、酸素濃度や温度で定義された反応進行度を用いることを提案する。

まず、酸素の質量分率を用いた反応進行度 C_O を以下のように定義する。

$$C_O = \frac{Y_{O_2} - Y_{O_{2,u}}}{Y_{O_{2,b}} - Y_{O_{2,u}}} \quad (5)$$

ここで、 $Y_{O_{2,u}}$ には未燃予混合気における値 $Y_{O_{2,u}} = 0.222$; $Y_{O_{2,b}}$ には量論混合気の平衡状態における酸素の質量分率の値 $Y_{O_{2,b}} = 5.27 \times 10^{-3}$ を用いた。なお、量論混合気における値を用いるのは他の当量比の場合に拡張することを考慮したためである。

次に、温度で定義した反応進行度を示す。温度はレーリ-散乱法などにより実験で計測可能であるためよく用いられる定義である²⁾。温度で定義した反応進行度 C_T は次式で表される。

$$C_T = \frac{T - T_u}{T_b - T_u} \quad (6)$$

ここで T_u は未燃予混合気における値、 T_b は量論混合気の場合における断熱火炎温度 $T_b = 2220$ K である。拡散火炎について清水ら⁹⁾は、混合分率の火炎面位置における勾配と関連する Scalar Dissipation Rate を用いることで、拡散火炎の火炎構造を整理することができることを示している。予混合火炎においても、Scalar Dissipation Rate と同様に、スカラー量である反応進行度の勾配を用いて火炎構造を整理することが可能であると考えられる。そこで、以下では、反応進行度の火炎面における値を $C_{O,q}$ および $C_{T,q}$ とし、またその位置での x 軸方向勾配を $\nabla C_{O,q}$ および $\nabla C_{T,q}$ とし、これらの量を用いて火炎構造を整理することを試みる。図 3 の Y_{O_2} の分布からわかるように、 C_O は未燃側で 0、既然側で 1 に近づく。

ここで、Single-flame では、反応進行度は一度ピークをとった後、空気側の酸素が拡散してくるため、その値は小さくなる。したがって、Single-flame では C_O や C_T が同じ値を 2 箇所とることになるが、本研究では火炎面付近での値を用いて議論を行うために影響はない。

図 5(a), (b) に定常火炎における u_m および κ と反応進行度 $C_{O,q}$, $C_{T,q}$, $\nabla C_{O,q}$ および $\nabla C_{T,q}$ の関係を示す。まず、図 5(a) に示すように、 $C_{O,q}$ および $C_{T,q}$ は、 u_m に対する変化量は大きくない。しかし、Single-flame の場合では、Twin-flame よりも u_m に対する変化率は大きい。それに対し、図 5(b) に示す $\nabla C_{O,q}$ および $\nabla C_{T,q}$ は u_m に対して大きく変化する。Single-flame で、 u_m が大き

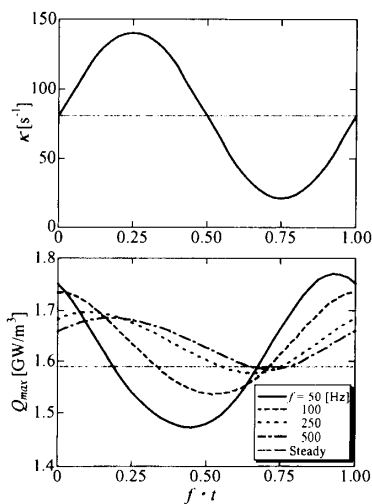


Fig. 4 Periodic variations of κ and Q_{max} in single-flame (Single-flame, $u_m = 0.6$ m/s)

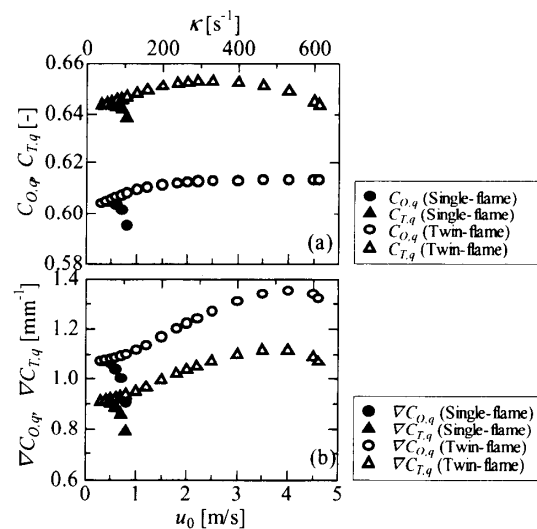


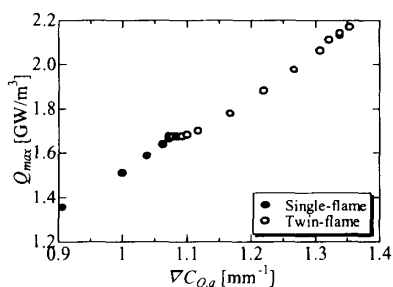
Fig. 5 Relationship of $C_{O,q}$, $C_{T,q}$, $\nabla C_{O,q}$ and $\nabla C_{T,q}$ to κ and u_0 (Steady flow)

くなると ∇C_{O_2} は小さくなるのに対し, Twin-flame では逆に小さくなる. このように, 両火炎で ∇C_{O_2} と Q_{max} との関係は逆になる. 図 6 に, ∇C_{O_2} と Q_{max} との関係を示す. 図からわかるように, 定常火炎では Q_{max} は ∇C_{O_2} が大きい場合に大きな値をとる. このことは, ∇C_{O_2} が火炎構造と強い相関があることを示唆している. したがって, ∇C_{O_2} は火炎構造を支配している拡散現象の寄与の大きさを示すスカラー量の勾配の代表値と考えることができる.

3.3.2 Single-flame における諸量の整理 図 7 に非定常火炎, Single-flame における ∇C_{O_2} と Q_{max} との関係を示す. 図中のプロットは各非定常解の 1 周期から 40 点ずつサンプリングした結果を Single-flame の全条件について示してある. 図より ∇C_{O_2} が大きい場合に Q_{max} は大きな値をとるという傾向は定常火炎の場合と同じである. ∇C_{O_2} が大きい場合には Q_{max} の値の差異が大きくなり ∇C_{O_2} のみで表すことができない. この差異をより正確に表すために, ∇C_{O_2} に加えて補助的なパラメータとして, C_{O_2} を用いることを考える.

図 8(a) に Q_{max} を $C_{O_2} - \nabla C_{O_2}$ 平面上で整理した結果を示す. 図 7 で示したように, ∇C_{O_2} との相関が強いため, Q_{max} の値は ∇C_{O_2} が大きい場合に大きな値をとる. しかし, 同じ ∇C_{O_2} で比較すると, 特に ∇C_{O_2} が比較的大きい条件では, C_{O_2} が小さい場合に Q_{max} はより大きな値をとることがわかる. 一方, ∇C_{O_2} が小さい条件, つまり, 消炎に近い条件では, Q_{max} と C_{O_2} の相関はなくなる. 以上より C_{O_2} を用いることで, Q_{max} をより正確に表すことができる.

この $C_{O_2} - \nabla C_{O_2}$ 平面を用いて, 各化学種の質量生成速度, およびモル濃度を表すことを試みる. まず, 図 8(b-1) ~ (b-3) に OH, CO および CO_2 の質量生成速度最大値 $w_{OH,max}$, $w_{CO,max}$ および $w_{CO_2,max}$ を整理した結果を示す. 図に示されるように $w_{OH,max}$ および $w_{CO_2,max}$ は Q_{max} の場合と同様に, ∇C_{O_2} との相関が主であるとともに, C_{O_2} に対する相関も見られる. また, $w_{CO,max}$ は C_{O_2} に対する相関は他の化学種よりも小さく, ∇C_{O_2}

Fig. 6 Relation between ∇C_{O_2} and Q_{max} in steady flame

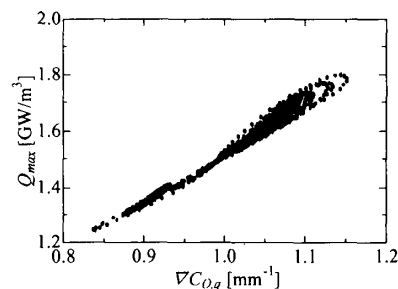
のみでその値を決めることができる.

次に, 図 8(c-1) ~ (c-4) に OH, CH, CO および CO_2 の火炎面におけるモル濃度 $c_{OH,q}$, $c_{CH,q}$, $c_{CO,q}$ および $c_{CO_2,q}$ との関係を示す. $c_{OH,q}$, $c_{CH,q}$ および $c_{CO,q}$ は, 上記の量と同様の傾向を示す. ただし, $c_{CH,q}$ は, 同じ ∇C_{O_2} ならば, C_{O_2} が大きい場合により大きな値をとる傾向がある. これらの量に対して, $c_{CO_2,q}$ のみ異なる傾向を示す. 他の諸量が ∇C_{O_2} に対する相関が強かったのに対し, $c_{CO_2,q}$ は C_{O_2} が大きい場合に大きな値をとるという傾向がある. ただし, 最終生成物である $c_{CO_2,q}$ は, 対流の影響を他の化学種よりも強く受けるため u_m が大きい条件で $c_{CO_2,q}$ は大きくなる傾向がある.

このように Single-flame においては, C_{O_2} と ∇C_{O_2} を用いることで, 火炎面付近にその特性をもつ多くの量を一意に整理できる.

ここで, C_{O_2} と $C_{T,q}$ の関係, および ∇C_{O_2} と $\nabla C_{T,q}$ の関係をそれぞれ図 9(a), (b) に示す. 図よりこれらの量の間にはそれぞれ強い正の相関があることが分かる. C_{O_2} が小さい場合にこの相関から外れる条件があるが, これは消炎に近い条件に対応する. しかし, 上述のように消炎に近い条件では, C_{O_2} は影響を及ぼさないため, 諸量の整理には影響しない. したがって, 酸素濃度あるいは温度のどちらかで定義した反応進行度を用いても Single-flame では同じ結果が得られる. したがって, 反応進行度の定義にはその用途に応じて, 温度と酸素濃度で使い分けことが可能である.

3.3.3 Twin-flame における諸量の整理 図 10(a), (b) に Twin-flame において $C_{O_2} - \nabla C_{O_2}$ 平面上で $c_{CO_2,q}$ と Q_{max} を整理した結果を示す. 図 5(b) で示したように, ∇C_{O_2} が小さい領域が u_m が小さい条件に相当する. $c_{CO_2,q}$ は Single-flame の場合よりも, C_{O_2} に対する相関が強くなり, Twin-flame においても $C_{O_2} - \nabla C_{O_2}$ 平面上で整理することが可能である. しかし, Q_{max} の分布は 1 周期のうち C_{O_2} および ∇C_{O_2} の描く軌道が交差するなど複雑な挙動を示し, 同じ $C_{O_2} - \nabla C_{O_2}$ の組み合わせ

Fig. 7 Relation between ∇C_{O_2} and Q_{max} in single-flame

でも異なる値を示す場合がある。このため $C_{O,q}$ と $\nabla C_{O,q}$ のみで整理することは困難となり、さらに他のパラメータを加える必要があると考えられる。そこで、温度で定義した反応進行度の勾配 $\nabla C_{T,q}$ を用いる。 $C_{O,q}$ の影響は小さいと考えられるため、 $\nabla C_{O,q} - \nabla C_{T,q}$ 平面上での整理を試みる。

図 11(a) ~ (c)に $\nabla C_{O,q}$ と $\nabla C_{T,q}$ で Twin-flame における Q_{max} , $c_{OH,q}$ および $c_{CH,q}$ を整理した結果を示す。図

より、 $\nabla C_{O,q}$ と $\nabla C_{T,q}$ は両者の値が小さい領域では、Single-flame と同様に正の相関が見られるが、この値が大きくなる領域つまり u_m が大きい条件では、広がりが大きくなる。特に、周波数が小さい場合、ヒステリシスを示す。

Q_{max} などは、 $\nabla C_{O,q}$ が大きくかつ $\nabla C_{T,q}$ が小さい条件で大きな値をとることが分かる。すなわち、熱と物質の拡散を考えた場合、熱の拡散に関係がある $\nabla C_{T,q}$

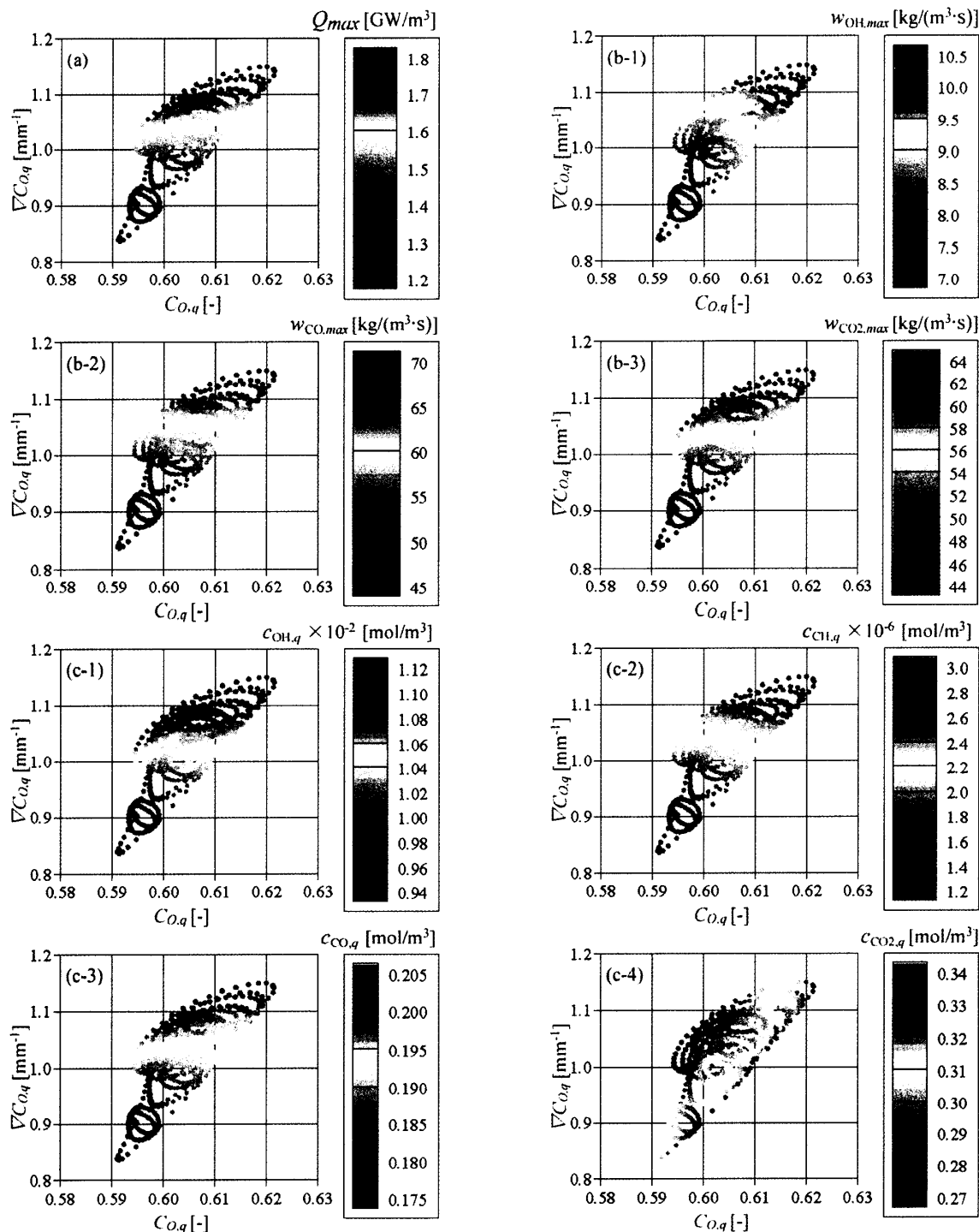


Fig. 8 Relationship of various quantities to $C_{O,q}$ and $\nabla C_{O,q}$ in single-flame

が小さいとき上流への熱の拡散が抑制される。また物質の拡散と大きく関係がある $\nabla C_{O,q}$ が大きいとき物質の反応帯への拡散が促進される。よって、このような条件のときに最も反応は活発となる。このため、 $\nabla C_{O,q}$ が大きくかつ $\nabla C_{T,q}$ が小さい条件で最も熱発生速度最大値のような量は大きな値をとるものと考えられる。

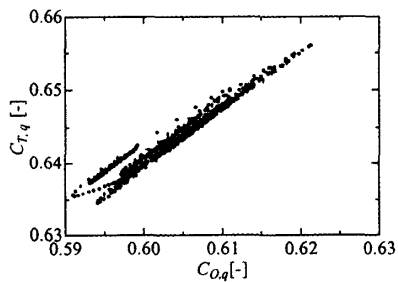


Fig. 9(a) Relation between $C_{O,q}$ and $C_{T,q}$

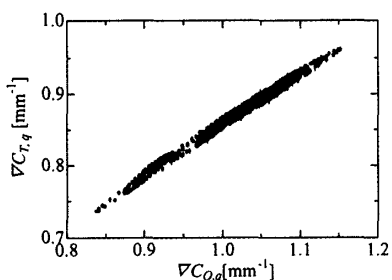


Fig. 9(b) Relation between $\nabla C_{O,q}$ and $\nabla C_{T,q}$

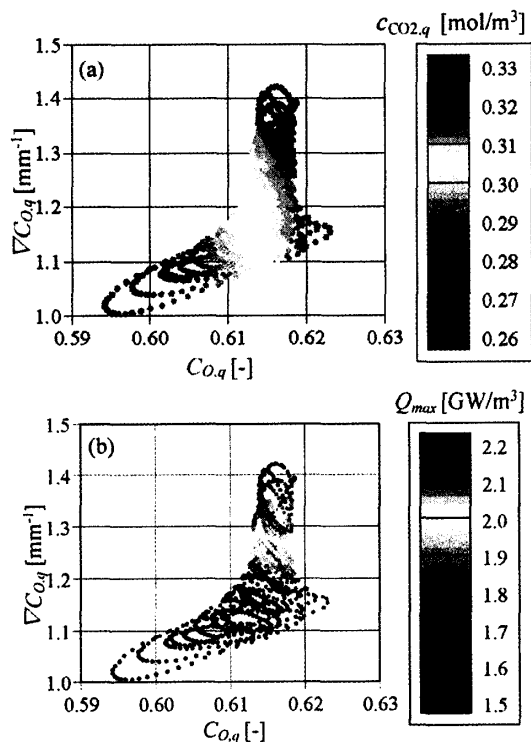


Fig. 10 Relationship of $C_{CO_2,q}$ and Q_{max} to $C_{O,q}$ and $\nabla C_{O,q}$ in twin-flame

以上のように、温度や酸素で定義した反応進行度およびその勾配の火炎面における値を用いることで、火炎面近傍における諸量を整理することができる。

4. 結 論

詳細素反応機構を用いたメタン・空気非定常対向流予混合火炎の数値解析を行い、酸素濃度あるいは温度で定義した反応進行度およびその勾配の火炎面における値を用いて火炎構造を整理し、以下のような結果を得た。

- (1)非定常対向流予混合火炎において、非定常性の存在により、定常火炎と比較して熱の発生速度などの平均は大きくなり、より大きな平均流速まで消炎しない。また、振動数が大きくなると、変動の振幅は小さくなり位相遅れは大きくなる。

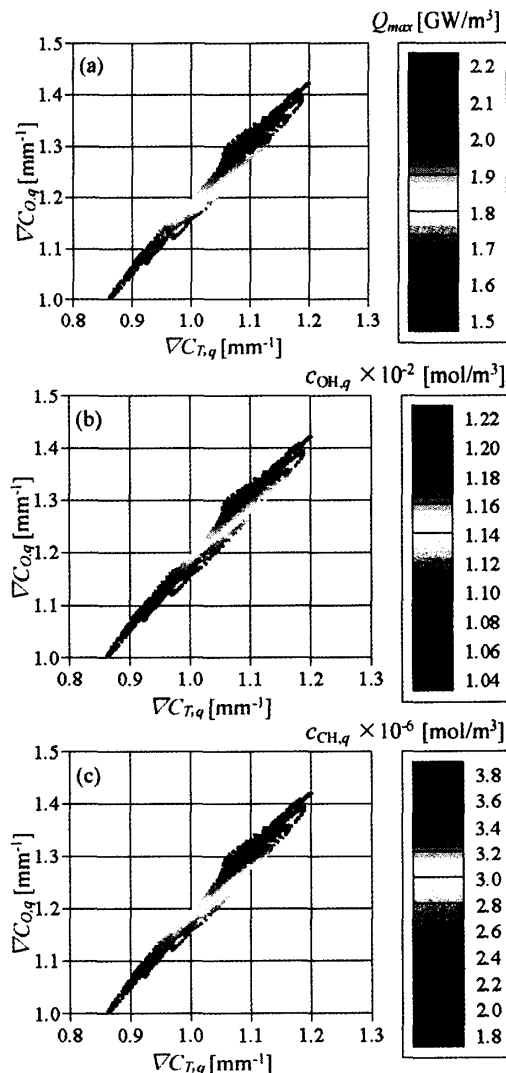


Fig. 11 Relationship of various quantities to $\nabla C_{O,q}$ and $\nabla C_{T,q}$ in twin-flame

- (2)予混合気と空気を対向させた Single-flame では、酸素濃度または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を用いることにより、熱発生速度最大値、CO₂などの質量生成速度最大値、OH、CHなどの火炎面におけるモル濃度を一意に決めることができる。
- (3)予混合気同士を対向させた Twin-flame では、酸素濃度で定義した反応進行度で火炎構造を整理することができる範囲は、平均流速が小さい場合に限定される。平均流速が大きい場合には、酸素濃度で定義した反応進行度に加えて、温度で定義した反応進行度の勾配を用いることで整理することができる。
- (4)熱発生速度最大値や質量生成速度および CH、OHのような中間生成物の火炎面におけるモル濃度は主に ∇C_{O_2} に強い相関を持つ。また、最終生成物である CO₂ のモル濃度は C_{O_2} に強い相関を持つ。

文 献

- (1) Yamamoto, N., et al., Study on OH Structure in Turbulent Premixed Flames by PLIF, *Proceeding of 19th International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, (2003), Mo1-3-3 (CD-ROM).
- (2) Cheng, Y.C. and Bilger, R.W., Experimental investigation of three-dimensional flame-front structure in premixed turbulent combustion II. Lean hydrogen/air Bunsen flames, *Combustion and Flame*, **138** (2004), 155-174.
- (3) Soika, A., et al., Pressure influence on the flame front curvature of turbulent premixed flames: comparison between experiment and theory, *Combustion and Flame*, **132** (2003), 451-462.
- (4) Tanahashi, M., et al., Coherent Fine-Scale Eddies in Turbulent Premixed Flames, *Proceeding of the Combustion Institute*, **28** (2000), 529-535.
- (5) Characorborty, N. and Cant, S., Unsteady effects of strain rate and curvature on turbulent premixed flames in an inflow-outflow configuration, *Combustion and Flame*, **137** (2004), 129-147.
- (6) Peters, N., Laminar Flamelet Concept in Turbulent Combustion, *Proceeding of the Combustion Institute*, **21** (1986), 1231-1250.
- (7) Hirasawa, T., et al., Response of Flame Displacement Speeds to Oscillatory Stretch in Wall-Stagnating Flow., *Combustion and Flame*, **121** (2000), 312-322.
- (8) Sung, C.J. and Law, C.K., Structural Sensitivity, Response, and Extinction of Diffusion and Premixed Flames in Oscillating Counterflow, *Combustion and Flame*, **123** (2000), 375-388.
- (9) Muller, C.J., et al., Effect of Unsteady Stretch Rate on OH Chemistry during a Flame-Vortex Interaction: To Assess Flamelet Models, *Combustion and Flame*, **100** (1995), 323-331.
- (10) Li, J., et al., Flame structure, Burning Velocity and Burning Rate in Stretch Controlled Premixed Flame, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B(Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B)*, **70**-691, (2004), 205-210.
- (11) Im, H.G., et al., Responce of Counterflow Premixed Flames to Oscillating Strain Rates, *Combustion and Flame*, **105**(1996), 358-372.
- (12) Ishizuka, S. and Law, C.K., An experimental Study on Extinction and Stability of Stretched Premixed Flames, *Proceeding of the Combustion Institute*, **19** (1982), 327-335.
- (13) GRI-Mech, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.
- (14) Kee, R.J., et al., *Sandia Report*, SAND 89-8009 (1989).
- (15) Smooke, M.D., Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
- (16) Law, C.K., Dynamics of Stretched Flames, *Proceeding of the Combustion Institute*, **22** (1988), 1381-1402.
- (17) Niioka, T., et al., *Nenshogensho no kiso (Fundamentals of Combustion Phenomena)*, (2001), 143, Ohmsha (in Japanese).
- (18) Egolfopoulos, F.N., Dynamics and Structure of Unsteady, Strained, Laminar Premixed Flames, *Proceeding of the Combustion Institute*, **25** (1994), 1365-1373.
- (19) Shimizu, A., et al., Study on Unsteady NO_x Formulation Characteristics in Diffusion Flame and Verification of Combustion Method Predicting No_x Emission of Turbulent Flame, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B(Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B)*, **69**-678, (2003), 205-212.