高強度乱流予混合火炎の微細構造に関する一考察

A Study of Microstructures of High Intensity Turbulent Premixed Flames

淵 端 学*・井 田 民 男*
Manabu FUCHIHATA and Tamio IDA

(Received November 8, 2004)

We discussed the flame structure of premixed flames in high intensity turbulent fields, where Damköhler numbers were around or lower than unity. In the former study, low Damköhler number flames were successfully formed in relatively weak turbulent reactant flows by using very lean premixture of sufficiently long chemical characteristic time, where the transition of flame structure from ‘Distributed reaction zone’ to ‘Wrinkled laminar flame’ was observed. We, in the present study, discussed microstructures of turbulent premixed flames in high intensity turbulent fields of low Damköhler number. As a result, we have suggested two types of microstructures of intense turbulent premixed flames. One is a propagating flame with local extinct protrusions resulting in cylindrical or warped flamelets surrounded by a pseudo-distributed reaction zone, and the other is a propagating flame with local extinction spots resulting in a pseudo-distributed reaction zone. The proposed models are consistent with experimental observations, and the classifications of the two types of flame structures are understood to correspond the boundary separating ‘Distributed reaction zone’ and ‘Well-stirred reactor’ on Borghi’s diagram.

Key Words: Turbulent Premixed Flame, Flame Structure, Distributed Reaction, Well-Stirred Reactor, Flamelet

1. 緒 言

Summerfield^{1), 2)}らが分散反応領域構造を提案して以来, 高強度乱流場に形成される火炎の構造について, 多くの研究者が実験的観察および火炎構造モデルの提案を行ってきた。

Chomiak³⁾は燃焼反応が, テイラスケールで伸長を受けたコルモゴロフスケールの渦管内の, スカラー消散率の高い領域で集中して起こると考えた。これは Tennekes⁴⁾が示した乱流の微細構造モデルに基づいた火炎構造モデルであった。Tabaczynski⁵⁾はこれと類似の火炎構造モデルをエンジン内の燃焼に適用し, 主に燃焼速度について実験値と一致させている。しかし小林ら⁶⁾は Chomiak のモデルと共通する特徴を持つ伸長円筒状予混合火炎について詳細な検討を行い, 分散反応領域に分類されるような強い乱流場では火炎伸長率の制限により円筒状火炎片が存在できないことを明らかにした。このことから最近では Chomiak のモデルは現実性が低いと考えられている。

吉田ら⁷⁾⁻¹⁰⁾は対向噴流バーナを用いて分散反応領域に分類される条件の火炎を形成し, 詳細な計測から, 燃焼反応は主に群島状の層流火炎片で起こっており, 燃焼反応の後半部分において微小渦全体が反応する分散反応領域が形成される

としている。しかし群島状の層流火炎片が渦の中心に向かって伝ばし, 渦の崩壊に伴って微小渦のスケールに達すれば, あとは瞬間的に燃え尽きるはずである。さらに層流火炎の存在は火炎面前方の未燃混合気と火炎面背後の既燃ガスとの混合を抑制するのであり^{11), 12)} 燃焼反応後半とはいえ微小渦内部が, 反応速度が低下するほどに未燃混合気と既燃ガスが混合した状態となるとは考えにくい。

それでは Summerfield 以前の, Damköhler¹³⁾ や Ballal¹⁴⁾ のモデルが正しいのかと言えば, これについても多くの研究により¹⁵⁾⁻¹⁸⁾ 分散反応領域火炎が形成されると判定される乱流場においても, 反応帯の厚みは層流火炎のそれとほとんど変わりがなく, むしろ伸長により薄くなっている場合もあることが報告されている。この反応帯構造は近年 thin reaction zone と表現され, 高強度乱流予混合火炎構造として提案されている。これらの観察結果より, 微細渦が火炎帯内の物質輸送を支配し, 火炎帯厚みを増加させるとしたモデルも否定的に考えざるを得ない。

以上のことから現在では, 層流火炎片モデルや thin reaction zone モデルが主流となっており, 乱流予混合火炎は局所における伸長率¹⁹⁾ や選択拡散効果²⁰⁾ によって燃焼速度が変化した層流火炎片により構成されていることが実験的にも検証

* 近畿大学理工学部機械工学科(〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

Department of Mechanical Engineering, School of Science & Engineering, Kinki University (3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan)

Fig. 1 Burner.

されてきている。

しかしさらに乱流強度があがるとどうなるであろうか。直接火炎構造に言及してはいないものの、興味深い報告として Klimov と Williams²¹⁾の、強乱流場では火炎の局所伸長により局所的な消炎が起こるとする説や、高橋ら^{22), 23)}の、吹き消え寸前の伝ば性を消失した火炎が分散反応領域であるとする報告などがある。両説はともに、伝ば火炎の消炎限界付近を層流火炎片構造が存在できなくなる条件とみている点で共通しているとも言える。

これらのモデルに関連しては、近年急速に発達した LIF 計測により、高強度乱流火炎内に局所消炎領域が確認されている^{24), 25)}ことから現実性があるように思われる。しかし、局所消炎現象と分散反応領域構造との関連があきらかではないことや、Summerfield らが示した高速乱流中に定在する分散反応領域火炎が、伝ば性を消失した火炎であるとは考えにくいなどの疑問点がある。

高強度乱流場における予混合火炎の構造について、筆者らは非常に希薄な予混合気流を用いて、比較的大スケール・弱乱流強度の流れ場に高強度乱流場と同様のダムケラ数の小さい乱流予混合火炎を形成し、さらに計測法に独自の改良を施して火炎構造観察を行った^{26), 27)}。実験に用いたバーナをFig.1に示す。その結果、火炎基部せん断層内のダムケラ数が小さい領域では伝ば火炎はすぐには形成されず、まず予混合気と

Fig. 2 Flame structure of lean premixture surrounded by high temperature burned gas flow.

既燃ガスとの混合層内で分散反応的な燃焼反応が起きた後、その影響で乱流渦がある程度消散してから伝ば火炎が出現するという、火炎構造が遷移しつつ燃焼が進行する過程が観察された（Fig.2 参照）。

本報では、高温既燃ガスに囲まれた予混合気流の燃焼パターンとして、この火炎構造遷移が一般的に起こるとの考えをもとに、乱流強度が火炎帯内に局所消炎を引き起こす程度にまで至った高強度乱流予混合火炎の微細構造について考察し、その火炎構造モデルを検討する。

2. 高強度乱流予混合火炎の微細構造

乱流予混合火炎の局所では、未燃予混合気が反応帯をはさんで高温既燃ガスと隣接しており、それらの間で分子拡散や乱流拡散によって熱および物質が移動しつつ、反応が進行している。このような構造は巨視的に乱流予混合火炎を観察した場合にも当てはまることから、乱流予混合火炎面の形状や構造がフラクタル性を持つことを指摘した報告^{28)~31)}がいくつかなされている。これらのことから考えて、乱流予混合火炎構造は自己相似性を持っていると考えられる。そこで、筆者らにより観察された前述の巨視的な燃焼現象が微細スケールでも相似的に起こり得ると考えると、伝ば火炎において局所消炎が起こった場合に、火炎面背後に通り抜けた予混合気塊に同様の現象が起こると考えられる。この概念図を Fig.3 に示す。

まず Fig.3(a)に示したのは、局所消炎を起こした直後の様子である。局所消炎は主に伸長によって引き起こされる^{32), 33)}と考えられるため、局所消炎部分の予混合気と既燃ガスとの

Fig. 3 Microstructure of high intensity turbulent premixed flame No. 1.

界面では、火炎面に平行な速度成分の火炎面伝ば方向速度勾配は必然的にきつくなる。さらに局所消炎は、伝ば火炎面前方に予熱帯が形成できなくなることによって引き起こされるため、これもまた必然的に、伝ば火炎が存在する場合に比べて予熱帯が薄く低温なっていると考えられる。このため予熱帯内における、小スケール渦の消散量も少なくなるので、伝ば火炎帯内において予熱帯から反応帯に進入できる渦のスケールより、さらに小さなスケールの渦までが予混合気と既燃ガスの界面に到達可能になると考えられる。

局所消炎を起こした予混合気の渦と既燃ガスの界面では、伝ば火炎の再形成に要する時間より乱流混合特性時間の方が短い場合、すなわちダムケラ数が小さい場合（この条件は局所消炎が起こるような領域ではほぼ満たされる）、伝ば火炎の再形成までに予混合気と既燃ガスの混合層が形成される。その後、伝ば火炎面が混合層の中央付近に出現する（Fig.3(b)参照）。やがて渦界面の混合層全体に伝ば火炎が形成され、渦の中心に向かって伝ばをはじめる。このとき混合層内の、伝ば火炎が出現する位置より既燃ガス側の領域では、伝ば火炎によらない分散反応的な燃焼反応により予混合気も燃焼する（Fig.3(c)参照）。そして再着火した伝ば火炎の既燃ガスが、分散反応的な反応帯を外側へ押し広げるとともに、渦内部に向かって火炎が伝ばし混合気を燃焼させる。（Fig.3(d)参照）。

Fig.3 に示したのは、一つの渦の断面についての概念図であり、実際の反応帯は局所消炎を起こして虫食い状になった伝ば火炎の背後に、分散反応的な反応帯のエンベロープをまとった紐状の円筒層流火炎片、もしくは湾曲した層流火炎片が折り重なって存在するような構造になると考えられる。再形成された層流火炎片は、その外縁に既燃ガス層を形成しつ

つ未燃混合気側へ伝ばするので、互いに干渉あるいは混合することは起こりにくい。

上記のモデルは、局所で伸長消炎を引き起こす渦のスケールが比較的大きな場合に該当し、渦のスケールが小さい場合は少し違った構造が現れると考えられる。その概念図を Fig.4 に示す。

Fig.4(a)に示したのは、局所消炎を起こした直後の様子であり、スケールが小さいこと以外は Fig.3(a)と条件的な差はない。Fig.3(b)に示したと同様に、渦の界面で予混合気と既燃ガスとの混合層が形成される。ここで渦のスケールが大きい場合には、この混合層中に伝ば火炎が再形成され则认为られるが、渦のスケールがある大きさより小さい場合には、伝ば火炎の再形成までに渦内の予混合気全体が既燃ガスによって希釈されてしまい、伝ば火炎が再形成できなくなると考えられる（Fig.4(b)(c)参照）。そして全体が予混合気と既燃ガスの混合層となった渦は、分散反応的な反応帯として燃焼する（Fig.4(d)参照）。

Fig.4 に示したのは、Fig.3 と同様に一つの渦の断面についての概念図であり、実際の反応帯は局所消炎を起こして虫食い状になった伝ば火炎の背後に、細かな紐状の分散反応的な反応帯が折り重なって存在する、もしくは紐状の分散反応的な反応帯が互いに混合することにより、層状になって伝ば火炎の背後に存在するような構造になると考えられる。この場合は、渦内部に Fig.3 に示したような伝ば火炎が再形成されないため既燃ガス帯が形成されず、紐状の分散反応的な反応帯が互いに混合すると考えられる。

低ダムケラ数の場に形成される予混合火炎の構造が上記のようであると仮定したとき、冒頭に挙げた従来の研究報告に

Fig. 4 Microstructure of high intensity turbulent premixed flame No. 2

ある燃焼現象がどのように説明できるかを以下に考察する。

3. 従来の研究結果に対する考察

3.1 高橋らの研究について

高橋らの研究^{22), 23)}では可燃限界以下の希薄混合気と高温燃焼ガスの混合層を利用して、ダムケラ数の小さい火炎を作り出し、その火炎における、温度、イオン電流およびラジカル自発光波形の各種統計解析、周波数解析の結果が、強乱流中に形成された分散反応領域火炎と相似であることから、分散反応領域火炎は伝ば性を消失した火炎であると推定した。しかし従来のその他の研究^{1)-3), 7), 14)}に見られる分散反応領域火炎は、可燃性の予混合気流中に定在する火炎であり、決して伝ば性を消失した火炎ではない。この点について高橋らの研究では明確な回答が示されていないため、たとえ極めて相似性が高い各種物理量の計測結果が得られたとしても、従来観察されてきた分散反応領域火炎と同じ燃焼現象であるという確証に欠けていた。しかし、両者が異なる燃焼形態であると断言するにはあまりにも計測結果の相似性が強かったことも確かである。そのためこの点については肯定も否定もされないまま今日に至っている。

そこで本研究結果をふまえた場合、高橋らの観察した分散反応領域火炎が、その他の研究者らによって観察されてきた高強度乱流場における予混合気の燃焼現象とどのように対応するかについて考える。

希薄可燃限界以下の予混合気が燃焼する場合、基本的に伝ば火炎は出現しない。しかし高温パイロット流が近傍に存在する場合、予混合気中の燃料と酸素は高温パイロット流から熱やラジカルの供給を受けて活性化され、分子同志が衝突し

たときに反応を起こす。この反応機構は2章で述べた、分散反応的な反応帯のものと同じであるといえる。つまり2章の結果に見られるように、可燃範囲内の予混合気が燃焼する場合でも、伝ば火炎が局所消炎を起こすような条件では、その背後に高橋らが観察したものと同じ構造の反応帯が出現し得るといえる。

2章に示した火炎構造モデルに従えば、先行する伝ば火炎の局所消炎部分の面積が大きくなるにつれて、火炎面背後の温度が低下していき、分散反応的な反応の強度が指数的に低下していく。すると虫食い状の伝ば火炎面背後の温度やラジカルの量も同様に減少していくと考えられる。よって、先行する伝ば火炎面の局所消炎部分の面積がある値以上になると、火炎は急速に消炎にいたることになる。しかしバーナにパイロットバーナが備えられている場合は、火炎面背後へ熱やラジカルがより多く供給されることになり、より消炎しにくくなる。高橋らが観察したのはこの究極の燃焼形態であり、パッチ状の伝ば火炎の既燃ガスを必要とせず、パイロット流の既燃ガスのみによって反応を維持していたものと考えられる。

3.2 層流火炎片モデルおよび thin reaction zone モデルについて

Damköhler¹³⁾以来、分散反応領域火炎は層流火炎構造の反応帯内に反応帯厚み以下のスケールの渦が進入し、反応帯厚みが増加されることにより出現するとされてきた。しかし最近、計測技術の進歩によって高強度乱流場における火炎帯の微細構造についての計測が可能となり、その結果のほとんどが反応帯厚みは高強度乱流場においても層流火炎のそれとほとんど差はなく、Kolmogorov スケールが層流火炎帯厚みよ

り小さい場でも反応帯内では乱流輸送が支配的にはならないことを示している¹⁵⁻¹⁸⁾。これは従来の分散反応領域火炎モデルでは高強度乱流火炎の構造をうまく説明できないことを意味している。しかし2章に示した火炎構造モデルによれば、伝ば火炎面に局所消炎が起こることが分散反応的な構造の出現条件であり、小スケールの渦が反応帯内に侵入できなくとも分散反応領域火炎の出現が説明できるため、層流火炎片モデル、thin reaction zone モデルとも矛盾しないモデルといえる。

3.3 その他の研究に見られる分散反応領域火炎について

これまで多くの研究者らによって考えられてきた分散反応領域構造のほとんど^{3), 5), 7)}は Fig.3 に示した構造に近いと考えられる。しかしこの構造では燃焼反応は主に伝ば火炎構造で起こっており、Summerfield らが観察した distributed reaction zone^{1), 2)}とは少し趣が違うように感じられる。というのは Summerfield らの観察した distributed reaction zone は、反応の様々な段階の領域が層流火炎帯厚みの 10～100 倍ほどの厚みの領域に分散して存在するとしていたものであり、これはたとえば微細な紐状に分断されていても伝ば火炎の構造をとる限りありえないと考えられるからである。実際、多くの研究の結果は、観察した火炎が分散反応領域である根拠として、温度分布に中間温度領域が現れることを挙げており、各種火炎発光の空間的分布のずれは Summerfield らが指摘したものよりはるかに微小である。しかし Fig.4 に示した構造であれば Summerfield らの観察した distributed reaction zone を説明できる。Summerfield らが用いたのはパイロットバーナ付きの二次元スロットバーナであり、Fig.4 に示した火炎構造において伝ば火炎面の局所消炎面積比率がかなり高くても、その背後で既燃ガスに希釈された予混合気が分散反応的な反応を進行させることができたと考えられる。そして高速の流れ場中で伝ば火炎よりも緩慢な速度で反応が起こったため、空間的に反応段階が分離して観察されたと考えられる。なお、高橋らの研究^{22), 23)}で観察された、希薄可燃限界以下の予混合気が高温パイロット流との混合層中で反応する分散反応領域火炎においては、OH、CH ラジカル自発光ポイント測定信号間の相互相関係数の低下が確認されており、化学反応の各種段階にある領域が空間的に分散している構造であったと考えられる。このことから、高橋らの観察した火炎は Summerfield らの観察した火炎に近い性質を持っていたといえる。

4. 分散反応領域火炎の出現条件

つぎに、2章に示した二つの火炎構造の出現条件について考える。まず、Fig.3 および Fig.4 に示した構造は、しわ状層流火炎が局所消炎を起こすことが必要条件であることは明らかである。これについては Kalrovitz³²⁾らの伸長消炎の理論を一般化した Klimov と Williams の基準³³⁾が知られている。

$$l_k < \delta_F \quad (1)$$

ここで、 l_k は乱流のコルモゴロフスケール、 δ_F は層流

火炎帯厚みである。この基準は、Peters³⁴⁾によって乱流カルロピッツ数による評価と等価であることが示され、分散反応領域火炎の出現条件の一つととらえられてきたが、なぜ局所消炎現象が分散反応領域火炎の出現条件となるのかは従来の火炎モデルからは決して明らかではなかった³⁵⁾。しかし2章に示した火炎モデルでは局所消炎を起こす条件が分散反応領域の出現条件と一致することは無理なく説明できる。

つぎに Fig.3 の構造と Fig.4 の構造の境界条件について考えてみる。これらの構造の違いは、局所消炎後、伝ば火炎が再形成されるか否かの違いである。Fig.4 の構造において、伝ば火炎が再形成されないのは、局所消炎部分から既燃ガス中を通り抜けた乱流渦が、伝ば火炎再形成にかかる着火遅れ時間内に既燃ガスとの混合により希釈されてしまうからであった。つまり、局所消炎部分から既燃ガス層に通じ抜けた乱流渦のスケール l_e と、その強さ u'_{le} の比の値がその着火遅れ時間 t_{ri} より小さければ、渦全体が再着火までに既燃ガスによって希釈されるといえる。

$$\frac{l_e / u'_{le}}{t_{ri}} < 1 \quad (2)$$

ここで着火遅れ時間が混合気の化学反応特性時間 τ_c とほぼ等しく、局所消炎が乱流のマクロスケール L_E で起こり、乱流のパワーがそのマクロスケール付近からそれ以下に集中しているとすると

$$t_{ri} \approx \tau_c \quad (3)$$

$$l_e \approx L_E \quad (4)$$

$$u'_{le} \approx u' \quad (5)$$

とおける。ここで、 u' は乱流の乱れ強さである。よって、式(2)は

$$\frac{L_E / u'}{\tau_c} = \frac{\tau_t}{\tau_c} = Da < 1 \quad (6)$$

と表され、ダムケラ数 Da により判定できることになる。ここで、 τ_t は乱流混合特性時間である。つまり Fig.3 の構造は、 $Da > 1$ の条件で現れ、Fig.4 の構造は、 $Da < 1$ の条件で見られることになる。この条件は Borghi の火炎位相図³⁶⁾において、それぞれ distributed reaction zone、well-stirred reactor として分類されている条件と一致している。これまでこれらの火炎構造の違いについては明確な説明はなされておらず、明らかではなかった。ここで提示したモデルに基づけば、Fig.3 に示した構造が Borghi の分類による distributed reaction zone であり、従来のほとんどの研究で観察されていたのはこの構造の火炎であったと考えられる。そして、Fig.4 に示した構造が Borghi の分類による well-stirred reactor であり、Summerfield らや高橋らにより観察された distributed reaction zone はこの構造の火炎であったと考えられる。

5. 結 言

非常に希薄な予混合気流を用いて、比較的大スケール・弱

乱流強度の流れ場に高強度乱流場と同様のダムケラ数の小さい乱流予混合火炎を形成し火炎構造観察を行った結果から得られた火炎のマクロ構造に基づいて、高強度乱流場における予混合火炎の微細構造について考察し、以下の結論を得た。

- (1) 高強度乱流場に形成される予混合火炎の構造について2つのモデルを提案した。
- (2) 従来の研究結果との対比の結果、これまで分散反応領域火炎を観察したとされてきた各種研究の中で、Summerfieldらや高橋らによって観察された火炎と、その他の研究者によって観察されてきた火炎とは異なる構造であり、それぞれ今回提案した2つの火炎構造に該当すると考えられる。
- (3) 今回提案した2つの火炎モデルの出現条件について検討した結果、これらは Borghi ダイアグラムの分類による distributed reaction zone と well-stirred reactor に該当すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) M. Summerfield, S.H. Reiter, V. Kebely and R.W. Mascolo : Jet Propulsion, **24** (1954) 254.
- 2) M. Summerfield, S.H. Reiter, V. Kebely and R.W. Mascolo : Jet Propulsion, **25** (1955) 377 .
- 3) J. Chomiak : Proceedings of the Combustion Institute, **16** (1976) 1665.
- 4) H. Tennekes : The Physics of Fluids, **11** (1968) 669.
- 5) R.J. Tabaczynski, F.H. Trinker and B.A.S. Shannon : Combust. Flame, **39** (1980) 111.
- 6) 小林秀昭, 北野三千雄 : 燃焼の科学と技術, **2** (1994) 27.
- 7) A. Yoshida : Proceedings of the Combustion Institute, **22** (1988) 1471.
- 8) 吉田 亮, 成澤道則, 辻 廣 : 日本機械学会論文集, **58-552B** (1992) 2571.
- 9) A. Yoshida, M. Narisawa and H. Tsuji : Proceedings of the Combustion Institute, **24**, 519.
- 10) 吉田 亮, 成澤道則, 辻 廣, 廣瀬龍興 : 日本機械学会論文集, **59-560B** (1993) 1401.
- 11) 高橋丈雄 : 大阪大学博士論文 第3章 (1991)
- 12) Y.C. Chen, N. Peters, G.A. Schneemann, N. Wruck, U. Renz and M.S. Mansour : Combust. Flame, **107** (1996) 223.
- 13) G. Damköhler : Z. Elektrochem., **46** (1940) 601; NACA TM 1112 (1947) [English Trans.].
- 14) D.R. Ballal and A.H. Lefebvre : Proc. Roy. Soc. Lond., **A344**-1637 (1975) 217.
- 15) 古川純一, 原田栄一, 平野敏右 : 日本機械学会論文集, **55-520B** (1989) 3758.
- 16) J. Furukawa, E. Harada and T. Hirano : Proceedings of the Combustion Institute, **23** (1990), 789.
- 17) 丸田 薫, 古川純一, 五味 努, 平野敏右 : 日本機械学会論文集, **59-566B** (1993) 3277.
- 18) A. Buschmann, F. Dinkelacker, T. Schäfer, M. Schäfer and J. Wolfrum : Proceedings of the Combustion Institute, **26** (1996) 437.
- 19) D.A. Knaus and F.C. Gouldin : Proceedings of the Combustion Institute, **28** (2000) 367.
- 20) H. Kido, M. Nakahara, K. Nakashima and J. Hashimoto : Proceedings of the Combustion Institute, **29** (2002) 1855.
- 21) F.A. Williams : Combust. Flame, **26** (1976) 269.
- 22) 高橋丈雄, 香月正司, 水谷幸夫 : 日本機械学会論文集, **55-511B** (1989) 859.
- 23) 高橋丈雄, 香月正司, 水谷幸夫 : 日本機械学会論文集, **58-547B** (1992) 929.
- 24) M.S. Mansour, N. Peters and Y.C. Chen : Proceedings of the Combustion Institute, **27** (1998) 767.
- 25) F. Dinkelacker, A. Soika, D. Most, D. Hofmann, A. Leipertz, W. Plifke and K. Döbbeling : Proceedings of the Combustion Institute, **27** (1998) 857.
- 26) 淵端 学, 香月正司 : 高温学会誌, **24-4** (1998) 137.
- 27) 淵端 学, 香月正司, 水谷幸夫 : 日本機械学会論文集, **66-652B** (2000) 3249.
- 28) M. Murayama and T. Takeno : Proceedings of the Combustion Institute, **22** (1988) 551.
- 29) F.C. Gouldin : Combust. Flame, **68** (1989) 249.
- 30) 吉田 亮, 安藤美彦, 柳澤 忠, 辻 廣 : 燃焼の科学と技術, **1** (1992) 37.
- 31) 吉田 亮, 柳澤 忠, 笠原正広, 辻 廣 : 燃焼の科学と技術, **2** (1994) 39.
- 32) B. Karlovitz, D.W. Denniston, D.H. Knapschaefer and F.E. Wells : Proceedings of the Combustion Institute, **4** (1953) 613.
- 33) F.A. Williams : Combust. Flame, **26** (1976) 269.
- 34) N. Peters : Proceedings of the Combustion Institute, **21** (1986) 1231.
- 35) R.G. Abdel-Gayed and D. Bradley : Combust. Flame, **76** (1989) 213.
- 36) N. Peters : in Turbulent reactive flows, R. Borghi and S.N.B. Eds. Murthy, Springer-Verlag., 242.