乱流火炎の計測*

香 月 正 司^{*1}

Measurements on Turbulent Flames

Masashi KATSUKI

Key Words: Combustion, Measurement, Turbulent Flame

1. はじめに

火炎中で起こっている現象は極めて複雑で、われわれがそれらを完全に理解するには至っていない。しかし、エネルギーの節約、燃焼負荷率の増大、汚染排出物の低減など、つぎつぎと課せられる問題を解決するためには、燃焼現象の詳細に踏み込んだ観測が不可欠で、それを実現する適切な計測技術の開発が、燃焼研究の重要な課題となっている。

一般的な燃焼装置では、乱流燃焼が行われることが多く、そのような火炎内では、時々刻々、場所々々によって、温度、流速、濃度をはじめとするあらゆる量や状態が変化しているところに特徴がある。すなわち、NOの生成を例に取り上げてみても、NOの大半は2000 K以上の高温で急速に生成され、それ以下の温度での生成量は、あまり問題とはならないことがわかっていて、もし2000 Kの既燃ガスと300 Kの未燃混合気が入り乱れて半々に存在する場所において平均温度を測定すれば、われわれが手にする測定値は1150 Kでしかない。この値しか持たないわれわれは、2000 Kにおいて生成されるNOの量を予測することも、理解することも不可能となるわけである。したがって、変動量を測定し、変動量の性質を知ることが、乱流火炎の本質を追求し、上に述べた問題を解決するうえで重要となってくるのである。

そこで、乱流火炎の研究に用いられる測定技術、および用いるべく開発されている計測方法などを概観し、それらの得失を考えてみたい。

2. 温度測定

2.1 遅れ補償熱電対 燃焼ガス温度の測定に最も多く利用される方法は、熱電対である。しかし乱流火炎中で変動する温度に追従するのに十分な応答性を備えたものはほとんどなく、線径25 μmのPt/Pt-13%Rh熱電対ですら、その感温部の熱容量のために、10 ms程度の遅れを生じる。したがって変動温度の測定を実現するためには、この応答遅れになんらかの対策を施す必要がある。

細線熱電対の応答遅れを電氣的に補償する方法は1952年のShepard-Warshawskyの論文⁽¹⁾に基づいている。細線部の熱伝導と放射を無視すると、ガス温度 T_g は

$$T_g = T_j + \tau_c \frac{dT_j}{dt} \quad \tau_c = \frac{\rho c V}{\alpha s} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ただし T_j は熱電対温接点温度、 α は熱伝達率、 ρ, c, s, V はそれぞれ素線の密度、比熱、接点表面積、接点体積である。したがって τ_c が定数であれば、時定数 τ_c の一次進め演算によって T_j から T_g が求められる。

この遅れ補償熱電対を用いた研究は数多く見られ^{(2)~(7)}、その結果、温度変動の確率密度分布の特徴と火炎微細構造の変化が明らかにされている。すなわち、乱流予混合火炎の基本的な火炎構造である“しわ状層流火炎”(Wrinkled laminar flame)の場合には、図1(a)に示すような、未燃混合気温度と燃焼ガス温度にピークを持ち、ほとんど中間温度の現れない双峰性分布となる。また“分散反応領域”(Distributed reaction zone)の場合には、図1(b)のような中間温度に対する高い確率が広く分布する確率密度分布が現れる。

* 原稿受付 昭和63年10月3日。

*1 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1)。

補償時定数 τ_c が一定の仮定の下に、多くの測定が行われたが、実際の時定数は流速や温度の影響を受けて変化する(図2)。したがって、 τ_c 一定の場合には高温時の過補償、もしくは低温時の補償不足の問題が生じる。この点を改善すべく、コンピュータ処理により刻々 τ_c を変化させる方法⁽⁸⁾や、刻々 τ_c を測定しながらその値を利用する方法⁽⁹⁾、あるいは流速との同時測定⁽¹⁰⁾を行いつつ、 τ_c を求める方法などが現れており、今後はこのような方向へ進むと思われる。

遅れ補償熱電対による変動温度の測定は、かなり実地的な場でも利用できる利点があるが、火炎内に感温部を挿入しなければならないことや、熱電対自体の使用上限温度の問題がある。

2.2 レイリー散乱法 火炎内に感温部を挿入しなければならない熱電対に対し、非接触測定の可能な

光学的温度測定は魅力がある。しかも、上述のような応答遅れも問題とならない。最近の乱流火炎の温度測定には、レーザ光源を利用する光学的測定が多く試みられており、レイリー散乱法^{(11)~(13)}のほか、後に述べるラマン散乱法⁽¹⁴⁾CARS法⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾といったものがある。レイリー散乱は、ラマン散乱に比べるとはるかに強いので、大出力光源を用いなくても比較的SN比の良好な信号が得られる。したがって、アルゴンレーザ程度の光源を用いても連続測定が可能であり、実用的には有効である。

多成分系におけるレイリー散乱光強度 I は

$$I = CI_0 N \sum_i (f_i \sigma_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし I_0 は入射光強度、 N は分子数密度、 f_i は i 化学種のモル分率、 σ_i は同じく散乱断面積、 C は光学系定数である。ガス分子の数密度 N は完全ガスに対する状態方程式で与えられ、圧力および入射光強度を一定とすると、次式のようなになる。

$$I = C' (\sum_i f_i \sigma_i) / T \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、 $\sum_i (f_i \sigma_i)$ が一定であれば、 I を検出して温度を知ることができる。

小宮山ら⁽¹⁷⁾は、図3に示すような一次元受光素子列(DARSS)を用いて、レーザ光に沿う多点同時測定を行っている。図4はその測定の一例で、1点ごとに光電子増倍管を用いて計測した値と、DARSSによる多点同時測定の結果は非常によく合っている。吉川ら⁽¹²⁾

(a) しわ状層流火炎

(b) 分散反応領域

図1 温度変動の確率密度分布形

図2 時定数に対する流速・温度の影響⁽¹⁰⁾

図3 DARSSを用いた温度の多点同時測定⁽¹⁷⁾

図4 多点同時測定と一点測定の比較⁽¹⁷⁾

は光電子増倍管のショットノイズの影響を検討しており、精面度でもかなり信頼性の高いデータを得ていると思われる。

しかしこの方法は、燃焼の前後においてガスの散乱断面積が変化しないこと、測定点前後の火炎からのノイズが低いことなどの制約を受けるため、使用できる燃料の種類や濃度、火炎の形態もかなり限定されるという問題を抱えている。

2.3 ラマン散乱法 レイリー散乱が入射光と同じ振動数の散乱光を発するのに対し、ラマン散乱は分子固有の遷移エネルギーレベルに対応する振動数シフトを生じ、ストークス・ラマン散乱光スペクトルと、反ストークス・ラマン散乱光スペクトルを発する。観測される光強度 I_s は次式で表される。

$$I_s = cN I_0 \sigma \Omega f(T) L \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ただし、 I_0 は入射光強度、 c は定数、 σ は散乱断面積、 Ω は立体角、 L は観測部長さ、 $f(T)$ はスペクトルの温度依存項を表す。 N は基準準位の分子数であり、温度の関数として与えられる。

温度決定には、スペクトルのラインシミュレーションや積分法⁽¹⁸⁾がある。しかし、ラマン散乱光強度は非常に弱いので、測定精度を確保するためには SN 比の向上が不可欠であり、大出力レーザ光源の使用や、集光立体角の拡大、妨害成分の除去をはじめ、種々の工夫がなされている。

式(4)からわかるように、ラマン散乱法は温度測定だけでなく、同時に濃度測定にも使用できる点に魅力がある。ラマン散乱法の一つである CARS 法も温度と濃度の同時測定ができるうえに、散乱光強度が強いので、SN 比のよい信号が得られ、火炎の測定には有利であると言われる。

3. 流 速 測 定

3.1 レーザドップラー流速計 ピトー管やヨーメータを火炎内に挿入して流速を求めた時代には、変動流速はおろか、平均流速の測定精度も極めて低いものであった。そして変動流速を計測すべく考案されたマイクロフォンプローブ⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾も、火炎流に適用した場合には、流速変動、密度変動、圧力変動と、それら相互の相関を分離することがむずかしく、明快な流速測定法とはなり得なかった。したがって、レーザドップラー流速計 (LDV) の出現によって、いっきにこの問題が解決され、乱流燃焼そのものの研究がいちだんと加速されたと言っても過言ではないであろう。

LDV の測定原理は、2 束のレーザ光の交点には、入射光波面の位相差によって干渉じまができており、一

つの散乱粒子がこの測定体積を通過すると、散乱光強度が変化すると同時に、その観測周波数 f が粒子の速度 u に比例することに基づいている。

$$f = (2nu \sin \theta) / \lambda \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここで λ はレーザ光の真空中での波長、 n は流体の屈折率、 θ はビーム交差角である。2 光束を含む平面を傾けることにより、その方向の流速成分の大きさは測定できるが、流速の正負方向は確定できない。この点を改善するためには、一方または両方の入射光にそれぞれに異なった周波数偏移を与え、干渉じまを移動させることによって、ドップラー信号の周波数を偏移させる方法が用いられる。よく用いられる信号処理方法として、多数の粒子からの信号を連続的に捕捉し、統計的に周波数を求めるトラックと、離散的な単一粒子からの信号を累積するカウンタがある。連続的なデータが必要な場合にはトラックが用いられるが、信号のドロップアウト時の処理などの問題がある。一方、カウンタは連続信号を得ることはできないが、個々のデータの良否の判定をはじめ、より厳密なデータ処理を行うのに適している。

LDV を用いた火炎流の測定はかなり一般化し、多くの論文が発表されている。そして最近では、種々の高度な応用例が見られるようになった。まず二色レーザを用いた速度ベクトルの 2 成分同時測定⁽²¹⁾⁽²²⁾により、レイノルズ応力の測定や、変動温度との同時測定によるスカラ量の乱流拡散束の測定⁽²³⁾が可能になっている。さらに最近では、図 5 に例を示すようなビーム走査形 LDV⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾や多点測定形 LDV^{(26)~(28)}が考案され、火炎流に対しても使用されている。このようなシステムを利用すれば、ある断面 (一次元) の流速分布を瞬時に測定できるし、空間相関係数の測定による乱れのスケールの測定も可能になる。その他に光ファイバを利用した光学系の調整の不要な LDV⁽²⁹⁾の開発も行われ、計測器の簡便化も行われている。したがって、光学系を無調整一体化した既製品が、そのまま利用できるような対象に限定すれば、一般の計測機器と同様のレベルで、火炎内の流速測定ができる。

今や燃焼流の測定に欠くことのできなくなったレーザ流速計にも、いくつかの問題点が残されている。すなわち、火炎近傍では大きな密度変化が存在し、屈折率の変化による焦点の移動が誤差の原因となる⁽³⁰⁾。したがって、特に大形の燃焼装置に LDV を適用する際、焦点位置の確定が困難になる場合がある。また急激な密度変化は散乱粒子数密度の変化をもたらし、バイアス誤差を生じるので、的確なデータ処理方法の開発が必要である。

乱法を用いている。

4.2 CARS 法 ラマン散乱法的一种である CARS 法では、二つの強いレーザー光を必要とする。一つの周波数を ω_1 とすると、他方は可変周波数 ω_2 でなければならない。 ω_1 と ω_2 の差がある分子のラマン遷移周波数に等しければ CARS 光が発生し、その周波数 ω_3 は $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$ の関係を満足すると同時に、可干渉性を持つ。

CARS 光強度 I_3 は次式で与えられる。

$$I_3 = \left(\frac{4\pi\omega_3}{c^2 n_3} \right)^2 |3x_3|^2 I_1^2 I_2 L^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 I_1, I_2 は入射光強度、 c は光速、 x_3 は三次の非線形感受率、 n_3 は媒質の屈折率、 L は相互作用長である。三次の非線形感受率は分子数密度 N に比例するので、散乱光強度は N^2 に比例する。

濃度の決定には、ラマン散乱法と同様の方法が用いられ、温度の決定には、 ω_2 を順次変化させて、振動・回転ラマンスペクトルを観測し、スペクトルシミュレーションと比較決定する。

通常のラマン散乱光は、あらゆる立体角に散乱するため、測定時の集光効率が低い。CARS 法では指向性の優れた反ストークス光が得られる結果、集光効率の高い信号が得られ、SN 比は大幅に改善される。したがって、燃焼計測には通常ラマンより有利であるとして、注目を集めている⁽³³⁾⁽³⁴⁾が、燃焼場特有の問題として、高温時の非共鳴バックグラウンドの増大、SN 比の低下、高温高压時のスペクトル形の変化などがあり、今後の課題として残っている。

4.3 レーザ誘起蛍光法 観測対象となる分子または原子に、特有な波長のレーザー光を照射して励起すれば、基底状態に還移する際に蛍光を発する。この蛍光を捕らえれば、化学反応には無関係に、化学種濃度が測定できる。これまでに Ar レーザで励起できる I_2

をはじめ、OH、NO、CH、CO、 O_2 などの測定が行われ、最近では一度に多成分の測定も試みられている⁽³⁵⁾。初期の測定⁽³⁶⁾では一点における測定が行われたが、平面状のレーザー光の照射と、二次元配列素子を組合せた平面 LIF (PLIF)⁽³⁷⁾が開発された結果、瞬間濃度分布の可視化に威力を発揮している(図 8)。さらにこの平面光を走査することによって、三次元画像の構築まで試みられている⁽³⁸⁾。

さらに、LIF は濃度測定だけでなく、速度⁽³⁹⁾温度⁽⁴⁰⁾圧力⁽⁴¹⁾の測定にも拡張できるので、火炎の診断以外にも有力な計測方法があるといえるが、小さな火炎に適用が限定されることが問題となるであろうし、現在のところは計測法の開発そのものが、研究対象となっているレベルである。

4.4 ラジカル化学自発光の可視化 燃焼反応に伴うラジカルからの微弱な化学自発光も、狭帯域干渉フィルタを通したのちに増強してやれば、燃焼反応の種々の段階が画像化できる^{(42)~(44)}。たとえば、CH ラジカルの化学発光は、図 9 に示すように、かなり高い背景光連続スペクトルに重なって、波長 431.2 nm にバンドヘッドを持つ。したがって、わずかに波長のずれた透過特性を持つ 3 枚の狭帯域干渉フィルタを通して火炎像を撮影すれば、1 枚は CH ラジカルの発光像を含み、他の 2 枚の像からは背景光のレベルが得られるので、画像処理により両者の差を取れば、火炎内の CH ラジカルの分布が得られる。図 10 には反応帯の厚い層流拡散火炎の (a) 直接写真と、(b) OH ラジカルおよび (c) CH ラジカルの化学発光の分布像が示されている。それぞれのラジカルの分布は、直接写真からはとても予測できない。この方法は自発光を捕らえるわけであるから、絶対濃度を測定することにはならないが、燃焼反応の強度分布を手軽に可視化できるので、燃焼診断技術として有効であろう。

図 8 PLIF による O_2 の三次元画像⁽³⁸⁾

図 9 CH ラジカルの発光スペクトルと干渉フィルタの透過特性⁽⁴³⁾

図 10 層流拡散火炎の画像⁽⁴²⁾

4.5 静電探針 火炎中には種々のラジカルやイオンが存在するため、火炎が導電性を持つことはよく知られている。そこで、接地されたバーナに対して負電位を持つ静電探針を火炎内に挿入すれば、探針近傍の陽イオン濃度に比例した微小電流が検出される。この電流値は探針表面積および負電位を一定とすれば、イオン濃度に比例する。炭化水素燃料の場合、陽イオンは主として CHO^+ や H_3O^+ などであるが、その判別と絶対濃度の測定はむずかしい。しかしイオンの存在が燃焼反応の存在を示すという定性的な測定手段であると考えれば、反応領域の検出⁽⁴⁵⁾や火炎長の変動の測定、あるいは火炎面の動きを捕らえるのにおおいに利用できる⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾。熱電対による測定では、高温が検出されたとしても、火炎であるか既燃ガスであるかの区別は困難である。しかし図 11 に示すように、静電探針と熱電対による同時測定を行えば、乱流火炎内の未燃混合気塊と既燃ガス塊の存在確率や、それらのうず塊に対する火炎の存在位置が検出され、火炎の微細構造の理解に役立つ⁽⁴⁸⁾。また図 12 は、静電探針によるイオン電流信号と、高速度シュリーレン写真の同時記録例で、その多数回の記録から得られた整構造うず内のイオン電流分布が示されている。静電探針は熱電対と同様接触形測定器であるが、燃焼反応の出現頻度を連続的に捕らえるには有効な手段であり、十分実用に耐える。

5. 圧 力 測 定

乱流中での燃焼反応に伴って圧力変動が生じること

図 11 静電探針と熱電対による同時測定例⁽⁴⁸⁾

は自明であるが、この局所の圧力変動を測定することは非常にむずかしい。また、たとえその測定が可能であっても、その値が燃焼反応に、あるいは全体の性能にどのようなかわりを持つかはまだほとんど解明されていない。しかし圧力変動と流速こう配変動の相関が、乱れを介して燃焼反応に影響を及ぼすことは十分に予測できるし、振動燃焼の起振項として働く可能性もある。したがって、局所圧力変動の測定法の開発とともに、これらの点の解明は興味深い。

火炎内の被測定点をだ円反射面の一つの焦点に、他の焦点にマイクロフォンを置くことによって音圧を捕らえ、圧力変動の発生源、すなわち反応率の変動を知る試みがなされている(図 13)。この方法は長波長音ほど解像度が落ちる傾向があるが、15~20 kHz のかなり高周波数の熱発生率変動をよく捕らえている。その他にも、火炎全体からの音圧と、火炎発光やイオン電

図 12 静電探針と高速度シュリーレン写真の同時測定⁽⁴⁵⁾

流の変動の相関を求め、音圧を発熱率変動の尺度として用いているものがある^{(50)~(53)}。火炎全体から発せられる音を捕らえた場合、火炎内の局所変動量との対応を知る必要があるが、その一つの試みとして、火炎内に挿入された静電探針によるイオン電流信号との相関を調べたのが図 14 である⁽⁵³⁾。静電探針の挿入位置と相互相関係数のピークが現れる“ずれ時間”の間には、規則性が見られる。すなわち、一つは火炎局所の燃焼反応から直接発生する音であり、他は局所で生じたじょう乱が、対流速度に近い速度で火炎すいを伝ばし、火炎先端付近において大きな発熱量変動を引き起こして発生する音である。このように音圧として捕らえられる圧力変動が、乱流火炎の診断に利用できる可能性は示されているが、具体的な利用はまだそれほど多くない。さらに、単純に燃焼音を計測すると、燃焼器あるいは流路系に基づく音響学的周波数に支配される振動が現れることが多いので、乱流燃焼によって発生するランダムな圧力変動と区別し、両者の関連性を調べる必要がある。

圧力変動もしくは音圧の測定は、熱発生率の変動や振動燃焼、あるいは火炎の不安定を観測するのに最も有効な手段であると考えるが、測定される量と現象の間の関係を明らかにすることが、実用化のためには、まず急がれる問題であろう。

6. む す び

密度、温度、濃度、流速、圧力などすべての量が変動

図 13 だ円反射面を利用した燃焼音の測定⁽⁴⁹⁾ 図 14 プンゼンからの燃焼ごう音とイオン電流の変動の相互相関係数のピークのずれ時間⁽⁵³⁾

する乱流火炎を対象とするかぎり、単独の量の測定によって現象のすべてを理解することはむずかしい。したがって、上述の測定も単独ではなく、組合せ、あるいは同時測定を行うことが有効な場合が多い。乱流火炎の微視的な診断には、そのような手法をおおいに利用すべきであろう。

燃焼研究の分野では、新しい測定法の開発や応用には大きな力が注がれているが、すでに十分実用に耐えるものもあれば、さらに今後の発展を待たねばならないものもある。いずれにしても、乱流燃焼に関するわれわれの知見はごく限られたものであり、それをさらに押し広めていくのは、新しい測定技術であると考ええる。

文 献

- (1) Shepard, C. E. and Warshawsky, I., *NACA Tech. Note*, 2703 (1952).
- (2) Lockwood, F. C. and Odidi, A. O. O., *Proceeding 15th Symposium (International) on Combust.*, (1975), 561, The Combustion Institute.
- (3) Ballantyne, A. and Moss, J. B., *Combust. Sci. Technol.*, **17** (1974), 63.
- (4) Lewis, K. J. and Moss, J. B., *Proceeding 17th Symposium (International) on Combust.*, (1979), 267, The Combustion Institute.
- (5) Yoshida, A. and Günther, R., *Combust. Sci. Technol.*, **26** (1981), 43.
- (6) Yanagi, T. and Mimura, Y., *Proceeding 18th Symposium (International) on Combust.*, (1981), 1031, The Combustion Institute.
- (7) Katsuki, M., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **67** (1987) 27.
- (8) Yule, A. J., ほか 2 名, *AIAA Paper*, No. 78-30 (1978).
- (9) Lockwood, F. C. and Moneib, H. A., *Combust. Sci. Technol.*, **26** (1981), 177.
- (10) Heitor, M. V., ほか 2 名, *Exp. Fluids*, **3** (1985), 323.
- (11) 吉川・ほか 2 名, 機論, **50-452**, B (昭 59), 1088.
- (12) Driscoll, J. F., ほか 2 名, *Proceeding 19th Symposium (International) on Combust.*, (1982), 477, The Combustion Institute.
- (13) Dibble, R. W., ほか 3 名, *Exp. Fluids*, **5** (1987), 103.
- (14) 吉川・ほか 3 名, 航宇学会誌, **31-350** (昭 58), 144.
- (15) Eckbreth, A. C., *Laser Probes for Combustion Chemistry*, (1980), 271, American Chemical Society.
- (16) Fujii, S., ほか 4 名, *Combust. Sci. Technol.*, **36** (1984), 211.
- (17) 小宮山・ほか 2 名, 機論, **54-502**, B (昭 63), 1486.
- (18) 山岸・後藤, 第 24 回燃焼シンポジウム講演集, (昭 61), 4.
- (19) Günter, R. and Lenze, B., *Proceeding 14th Symposium (International) on Combust.*, (1973), 675, The Combustion Institute.
- (20) 水谷・ほか 2 名, 機論, **42-355** (昭 51), 921.
- (21) Brum, R. D. and Samuelsen, G. S., *Exp. Fluids*, **5** (1987), 95.
- (22) 前田・菱田, 流れの計測と可視化・大阪ジョイント講演会要旨集, (1985), 59, 流れの計測懇談会.
- (23) 高城・ほか 4 名, 機論, **53-488**, B (昭 62), 1418.
- (24) Durst, F., *Rev. Sci. Instrum.*, **52** (1981), 1676.
- (25) 日野・ほか 4 名, 流れの計測と可視化・大阪ジョイント講演会要旨集, (昭 60), 59, 流れの計測懇談会.
- (26) Nakatani, N., ほか 2 名, *Proc. Dyn. Flow Conf.*, (1978), 583.
- (27) Nakatani, N., ほか 2 名, *Proc. 7th Symp. Turbulence*, (1981), 380.
- (28) 池田・ほか 4 名, 流れの計測と可視化・大阪ジョイント講演会要旨集, (昭 60), 43, 流れの計測懇談会.
- (29) 日野・ほか 2 名, 第 1 回流れの計測大阪シンポジウム講演会要旨集, (昭 58), 129, 流れの計測懇談会.
- (30) Hashimoto, M., ほか 3 名, *Bull. JSME*, **26-221** (1983), 1908.
- (31) Shodl, R., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **102-4** (1980), 412.
- (32) 速水, 流れの計測, **3-4** (昭 60), 3.
- (33) Fujii, S., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **48** (1982), 233.
- (34) 松本・ほか 2 名, 日本航空宇宙学会誌, **29-328** (昭 56), 26.
- (35) Jeffries, J. B., ほか 3 名, *Proceeding 21st Symposium (International) on Combust.*, (1986), 1709, The Combustion Institute.
- (36) Fairbanks, W. M., ほか 2 名, *J. Opt. Am.*, **65** (1975), 199.
- (37) Kychakoff, G., ほか 3 名, *Appl. Opt.*, **21** (1982), 3225.
- (38) Hanson, R. K., *Proceeding 21st Symposium (International) on Combust.*, (1986), 1755, The Combustion Institute.
- (39) Hassa, C., ほか 2 名, *Exp. Fluids*, **5** (1987), 240.
- (40) Seitman, J. M., ほか 2 名, *Opt. Lett.*, **10** (1985), 439.
- (41) Ackermann, U., ほか 2 名, *Exp. Fluids*, **3** (1985), 45.
- (42) 水谷・ほか 2 名, 機論, **52-476**, B (昭 61), 1931.
- (43) 水谷・ほか 2 名, 機論, **54-504**, B (昭 63), 2219.
- (44) 梶本・松井, 第 24 回燃焼シンポジウム講演前刷集, (昭 61), 31.
- (45) 香月・ほか 4 名, 機論, **50-452**, B (昭 59), 1077.
- (46) Suzuki, T. and Hirano, T., *Proc. ASME. JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, **4** (1983), 151.
- (47) Suzuki, T., ほか 3 名, *Proceeding 21st Symposium (International) on Combust.*, (1986), 1385, The Combustion Institute.
- (48) 香月・ほか 3 名, 第 24 回燃焼シンポジウム講演集, (昭 57), 148.
- (49) Ramohalli, K. and Seshan, P., *Combust. Sci. Technol.*, **37** (1984), 253.
- (50) Shivashankara, B. N., ほか 2 名, *AIAA J.*, **13** (1975), 623.
- (51) Mehta, G. K., ほか 2 名, *Proceeding 18th Symposium (International) on Combust.*, (1981), 1051, The Combustion Institute.
- (52) Ramachandra, B. N. and Strahle, W. C., *AIAA J.*, **21** (1983), 1107.
- (53) Katsuki, M., ほか 3 名, *Proceeding 21st Symposium (International) on Combust.*, (1986), 1543, The Combustion Institute.