レーザ誘起蛍光スペクトルを用いた拡散火炎内の
NO 回転温度測定*林 田 和 宏^{*1}, 天 谷 賢 児^{*2}
白 井 紘 行^{*2}, 新 井 雅 隆^{*2}Rotational Temperature Measurement of NO in a Sooting Diffusion Flame
through Laser-Induced Fluorescence SpectrumKazuhiro HAYASHIDA, Kenji AMAGAI,
Hiroyuki SHIRAI and Masataka ARAI^{*3}^{*3} Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

LIF thermometry in a sooting diffusion flame was newly proposed based on a spectral matching method. A tunable ArF excimer laser was used to excite the several absorption lines in the $D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0, 1)$ band system of NO. In the case of sooting diffusion flame, emission spectrum consisted of NO and O₂ fluorescence, and off-resonance emissions related to the soot. The O₂ fluorescence and the off-resonance emissions overlapped on the NO fluorescence. However, the off-resonance emissions near the vacuum ultraviolet region (VUV) were weaker than the NO fluorescence, and the $\epsilon(0, 3)$ band of the NO fluorescence, which appeared near the VUV region, was free from the O₂ fluorescence. Therefore, NO rotational temperature in a sooting diffusion flame could be measured by the spectral matching method using the $\epsilon(0, 3)$ band. By using this technique, NO rotational temperature in a propane diffusion flame could be measured.

Key Words: Spectroscopic Measurement, Laser, Flame, Diffusion Combustion, Laser-Induced Fluorescence, NO, Rotational Temperature

1. 緒 論

レーザ誘起蛍光 (LIF: Laser-Induced Fluorescence) 法⁽¹⁾は燃焼現象の有力な計測手法として、ブンゼン火炎などの基礎的な火炎^(2,3)や実用燃焼装置^(4,5)の火炎計測に広く適用されている。LIF 法による火炎温度計測では、一般に、分子の電子的基底状態における回転温度を計測する場合がほとんどである。回転温度は回転準位数密度分布を調べることで求めることができるが、そのためには分子のいくつかの吸収線を選択的に励起しなければならず、波長スキャンが可能なレーザ光源、もしくは複数のレーザ光源が必要となる。このため、従来より単一波長のレーザ光で温度を求める手法が検討されており、レーザ光

の吸収により電子的励起状態に遷移した分子の回転緩和や振動緩和を利用した温度計測⁽⁶⁻¹⁰⁾が試みられている。著者らも前報⁽¹¹⁾において、単一波長のレーザ光で NO の回転温度を求める新しい手法としてスペクトルマッチング法を提案した。これは、回転緩和による LIF スペクトルの形状の温度依存性を利用するもので、実験で得られたバンドスペクトルと計算で求めたバンドスペクトルの形状の一致性より回転温度を推定する方法である。前報では、このスペクトルマッチング法によって予混合火炎の温度計測が可能であることを示した。

一方、被測定火炎についてみると、従来の LIF 法による温度計測のほとんどが予混合火炎や水素拡散火炎といった不輝炎を対象としており、すすが多く含まれる拡散火炎の温度計測は困難とされてきた。これは、測定場にすすが存在すると、目的とする分子の蛍光以外に、すすのレーザ誘起赤熱発光⁽¹²⁾ (LII: Laser-Induced Incandescence) やブレイクダウン光⁽¹³⁾が発生するため

* 原稿受付 2003 年 8 月 19 日。

^{*1} 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1)。^{*2} 正員, 群馬大学工学部 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。
E-mail: arai@me.gunma-u.ac.jp

ある。この他にも、すすの前駆物質と考えられる多環芳香族炭化水素 (PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) の蛍光⁽¹⁴⁾が発生するなどの問題もある。つまり、これらの光 (まとめて非共鳴光という) が測定対象分子の蛍光と重畳して検出されるために、信号光強度の情報をもとに温度を求める従来の方法では拡散火炎の温度計測は困難であった。

これに対して、前報で提案したスペクトルマッチング法はスペクトルの形状より回転温度を見積もる方法であるため、蛍光と非共鳴光が重畳して検出される拡散火炎においても温度計測が行なえる可能性がある。そこで本報では、スペクトルマッチング法による拡散火炎内の NO 回転温度計測の可能性について検討する。

2. 実験装置および方法

2.1 レーザ誘起蛍光解析装置 本研究で使用したレーザ誘起蛍光解析装置の構成を図 1 に示す。励起光源には 193nm のレーザ光が得られる ArF エキシマレーザ (Lambda Physik 社, LPX-150T) を使用した。レーザ光の線幅は 3pm (FWHM), パルス幅は 15ns で、193.0-193.9nm の範囲内で発振波長を変化させることができる。本研究では、1 パルスあたりのレーザ出力は約 70mJ に設定した。励起対象分子は NO で、レーザ光の発振波長を変化させて NO の $D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,1)$ バンドのいくつかの吸収線を選択的に励起した。

レーザ光は焦点距離 $f=1000\text{mm}$ のレンズで集光して火炎に照射した。レーザ光の照射に伴う蛍光や非共鳴光は分光器 (Chromex 社, 250IS) でスペクトルに分解し、ICCD カメラ (La-Vision 社, FlameStar II) で分光スペクトル像を撮影した。ICCD カメラのゲート幅は 50ns に設定した。分光器は Czerny-Turner 型の回折格子分光器で、1200grooves/mm (ブレイズ波長 250nm) の回折格子を有する。なお、分光器の入射スリット幅は $50\mu\text{m}$ で、この

Fig. 1 Experimental setup

時の分解能は約 0.2nm である。また、輝炎部にレーザ光を照射する際には、すすに起因する非常に強度の強いミュー散乱光が発生するため、ICCD カメラの保護を目的として $193\pm 4\text{nm}$ の光をカットするノッチフィルタを分光器の手前に設置した。

2.2 測定対象火炎 本研究における測定対象火炎は、定常なプロパン噴流拡散火炎である。図 2 に火炎を形成するために用いたバーナの概略図と火炎の直接写真を示す。燃料 (流量 0.05L/min) は内径 6mm のステンレス製円管より鉛直上方に噴出させ、火炎長さ $L_f=30\text{mm}$ の層流拡散火炎を形成した。また、火炎を安定化させるために火炎周囲に四分円ノズルで整流した空気流を形成した。空気流の温度 T_a は室温 (300K) で、四分円ノズル出口における空気流の噴出速度は 50cm/s である。

Fig. 2 Schematic view of the test flame

また、プロパン拡散火炎の励起スペクトルや発光スペクトルの特性を把握するために、平面火炎バーナ (McKenna 社製) を用いて形成したメタン-空気予混合火炎も使用した (図 3)。予混合気は直径 60mm の銅粒子を焼結した多孔質体を通して均一に鉛直上方に噴出され、バーナからの高さ約 0.5mm の位置に平面火炎が安定に形成される。なお、多孔質体は水冷によりその温度が一定に保たれるようになっている。

NO の励起スペクトルを測定する場合、ArF エキシマレーザの発振波長域には O_2 の Schumann-Runge バンド⁽¹⁵⁾が存在するため、燃焼ガス中に O_2 が含まれないように注意する必要がある。このため、当量比 $\phi=1.2$ の過濃予混合

Fig. 3 Methane-air premixed flat flame

気（メタン流量 3L/min, 空気流量 25L/min）を用いて火炎を形成し、火炎面下流に O_2 が存在しない条件において計測を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 測定対象分子および励起バンドの選択

LIF 法による回転温度計測では、火炎内に比較的高い濃度で存在し、かつ計測が容易な $OH^{(16,17)}$ をトレーサとして利用することが多い。しかしながら、中間生成物である OH は火炎面周辺にしか存在しないため、火炎全体の温度情報を得ることができないという問題がある。トレーサ分子としては火炎全体に高い濃度で存在するものが望ましいが、LIF 計測が可能でそのような条件を満たす分子の一つとして NO を挙げることができる。また、 NO はあらかじめ燃料中に添加しておくことも可能であり⁽¹⁸⁾、これにより火炎面の前後を通して測定場に高い濃度で存在させることができる。このため、 NO は回転温度計測に利用しやすい分子であるといえる。このような理由から、本研究では測定対象分子として NO を選択した。

前述のように、拡散火炎の LIF 計測では蛍光とともに非共鳴光が発生するという問題がある。図 4 に火炎の LIF 計測で使用される NO の励起バンドの蛍光と非共鳴光のおおよその発光波長範囲をそれぞれ示す。いずれの励起バンドにおいても蛍光は主に 300nm 以下の紫外域に検出されるのに対し、非共鳴光は紫外から赤外域まで幅広い波長範囲に連続的に現れる。紫外域における非共鳴光の発光強度は、波長が短くなるにつれて急激に弱くなるため、非共鳴光の影響を小さくするためにはできるだけ短

Fig. 4 Wavelength relationship between NO band and off-resonance emission

波長側で蛍光を検出することが重要となる。この観点から、主な蛍光が 200-250nm と最も短波長側に現れる $D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,1)$ バンドが拡散火炎の NO 回転温度計測に最適な励起バンドであると考え、拡散火炎の温度計測に適用することとした。

3.2 拡散火炎の励起スペクトル 本研究で提案するスペクトルマッチング法による拡散火炎内の NO 回転温度計測を説明する前に、従来より行なわれている電子的基底状態の回転温度計測法について述べる。ここでは、測定対象火炎として図 3 に示したメタン予混合火炎を用いる。メタン予混合火炎のパナからの高さ $z=10\text{mm}$ の位置にレーザ光を照射し、レーザ光の波長 λ_{ex} をスキャンして求めた励起スペクトルを図 5 に示す。スキャンはレーザ光の波長を 0.6pm ずつ変化させて行い、各波長に

Fig. 5 Excitation spectrum of $NO D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,1)$ band

Fig. 6 Boltzmann plot of $D^2\Sigma^+\leftarrow X^2\Pi(0,1)$ band

において 20 パルス分の積算の信号光強度を求めた。信号光はノッチフィルタを通してレイリー散乱光をカットした後に、ICCD カメラ（感度波長範囲 190-830nm）で検出した。前述のように、この火炎は過濃予混合気（ $\phi=1.2$ ）を用いて形成されており、同じ波長域に励起バンドを有する O_2 が火炎面近傍の下流域に存在しないように工夫されている。したがって、このスペクトルは NO の蛍光成分のみで構成されており、 $D^2\Sigma^+\leftarrow X^2\Pi(0,1)$ バンドの励起スペクトルを表している。参考に、図の上部に NO の吸収線の波長位置を付した。

一般に、レーザ光の線幅は吸収線の幅よりも広いため、励起波長が非常に近い吸収線が複数存在する場合にはそれらが同時に励起される場合がある。ここでは、 P_1 、 Q_1 および R_1 ブランチの吸収線は励起波長が非常に近いために、二つあるいは三つの吸収線が同時に励起されることが多く、このような場合のピーク強度は比較的高い値となる。これに対して、 P_2 、 Q_2 および R_2 ブランチの各吸収線の励起波長は他の吸収線と比較的離れており、各吸収線を単独で励起できる場合が多い。

図 5 に示した励起スペクトルの各ピーク強度は、励起を受けた下部回転準位 J'' の分子数密度に比例しているので、各ピーク強度を用いてボルツマンプロット⁽¹⁾を行うことで、電子的基底状態 $X^2\Pi$ の下部振動準位 $v''=1$ における NO の回転温度を導き出すことができる。なお、複数の吸収線が同時に励起されることによって構成されるピークについては、その強度に対する各吸収線の寄与率を判別することは困難であるのでプロットは行わないこととした。このような複数の吸収線より構成されているピークを除いて、図 5 の各ピーク強度 I_{fr} を読み出してボルツマンプロットを行った結果を図 6 に示す。図中、 F_r は下部回転準位 J'' の回転エネルギー、 S_{fr} は分子の遷移強度、 T_R は回転温度を表す。この結果、各プロット点は概ね直線上に乗り、その傾きを最小二乗法より求めて回転

温度を算出したところ、1583K という温度が求められた。この温度は熱電対（R 型、線径 0.3mm）で測定して得られた温度（1605K）とほぼ一致している。ただし、本研究では熱電対指示温度の補正を行っていないため、得られた温度にはある程度の誤差が含まれているものと推測される。以上のように、すすを含まない予混合火炎については、信号光強度の情報をもとにする従来の方法で回転温度を求めることができる。

これに対して、プロパン拡散火炎の励起スペクトルを計測した結果を図 7 に示す。計測方法はメタン予混合火炎の場合と同様である。(b) はノズルからの距離 $z=35$ mm の火炎下流、(c) は火炎軸上の輝炎部 $z=25$ mm で計測した励起スペクトルである。また、比較のために図 5 に示したメタン予混合火炎の励起スペクトルを(a)に示す。(a)と(b)を比較すると、(b)は(a)よりもピーク数が増えていることがわかる。これは、(b)の測定条件が火炎下流の O_2 が存在する位置であり、(a)が NO の蛍光のみで構成されているのに対し、(b)は NO と O_2 の蛍光より構成されているためと考えられる。さらに、(c)の輝炎部で計測した励起スペクトルでは、レーザ光の波長によらずに起因する強い非共鳴光が発生するために、スペクトルの形状は特徴的なピークのない形状となっている。なお、(c)の 193.28nm と 193.48nm 付近で強度が減衰しているが、この波長域には常温の O_2 が強く励起されるバンドが存在するため⁽¹⁹⁾、レーザ光が測定場に到達するまでに大気中の O_2 に吸収されてレーザ光強度が減衰したためである。このように、拡散火炎の励起スペクトルは、NO の蛍光だけではなく、さまざまな光の成分より構成されているため、従来のように励起スペクトルを用いて回転温度を求めることは困難である。

Fig. 7 Excitation spectra of the propane diffusion flame

Fig. 8 Emission spectra of the propane diffusion flame

Fig. 9 Emission spectra from 192 nm to 226 nm

3.3 プロパン拡散火炎の蛍光スペクトル 図 7 に示した励起スペクトルを構成する光の発光特性を調べるために、分光器を用いて分光分析を行った。図 8 にレーザ光の波長 λ_{ex} を NO の $R_2(27.5)$ 線と一致する 193.43 nm に設定して計測したメタン予混合火炎とプロパン拡散火炎の蛍光スペクトルを示す。蛍光スペクトルは、20 パルス分の積算強度を 20 回平均して求めた。(a) はメタン予混合火炎の蛍光スペクトルで、スペクトルは NO の蛍光のみで構成されている。一方、プロパン拡散火炎の場合、(b) の火炎下流 ($z=35$ mm) のスペクトルは (a) と似たような形状であるが、(a) に比べて多くのピークが見られる。

Fig. 10 Synthetic spectra of $\epsilon(0,3)$ band

また、(c) の輝炎部 ($z=25$ mm) で得られたスペクトルでは、紫外域から可視域にかけて連続的な非共鳴光が現れていることがわかる。しかしながら、非共鳴光の強度は NO の主な蛍光が現れる波長域 (蛍光波長 λ_{em} が 200-250 nm 程度) ではさほど強いものではないことが確認できる。

この短波長側のスペクトルの構造をより詳しく把握するために、図 8 の 192-226 nm の波長域を拡大したスペクトルを図 9 に示す。(a) のメタン予混合火炎の NO 蛍光スペクトルを見ると (実線)、スペクトルは上部振動準位が 0 の ϵ バンド ($D^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ 間の遷移) と δ バンド ($C^2\Pi - X^2\Pi$ 間の遷移) のバンドスペクトルより構成されていることがわかる。一方、点線は火炎外縁の NO 濃度の非常に低い位置において計測した O_2 の蛍光スペクトルである ($\lambda_{ex}=193.43$ nm)。なお、スペクトル中には若干の NO 蛍光が含まれているものと考えられる。次に、(b) のプロパン拡散火炎下流のスペクトルを見ると、その形状は (a) と異なり、NO の蛍光に加えて O_2 の蛍光が現れている。さらに (c) の輝炎部で得られたスペクトルでは、長波長側になるほどスペクトル強度のベースレベルが増加しており、バックグラウンドとして非共鳴光が重なっていることがわかる。

これらのスペクトルを見比べると、NO のバンドスペクトルの多くが O_2 の蛍光と重なっているものの、 $\epsilon(0,3)$ バンドのみは O_2 の蛍光と干渉していないことが確認できる。さらに、 $\epsilon(0,3)$ バンドの波長域では非共鳴光の強度は非常に小さいことがわかる。したがって、拡散火炎に対しても、この $\epsilon(0,3)$ バンドを用いることによりスペクトルマッチング法によって NO 回転温度を求めることができるものと考えられる。

3.4 プロファイルの励起回転準位依存性 図 10 に回転温度 T_R を 500, 1000, 1500, 2000 K にそれぞれ設定して求めた $\epsilon(0,3)$ バンドの計算スペクトル⁽¹¹⁾を示す。こ

Fig. 11 Excitation rotational level dependability of the band spectrum

のプロファイルは、レーザ光の吸収によって電子的励起状態 $D^2\Sigma^+ \leftarrow \nu=0$ に遷移した NO が、上部振動準位内 $\nu=0$ において十分に回転緩和を行い、回転準位数密度分布がボルツマン分布になったと仮定して求めたもので、プロファイルは回転温度のみによって変化する。この図より、 $\epsilon(0,3)$ バンドのバンドヘッドは 209.0nm 付近に位置しており、回転温度によるプロファイルの変化はこれより短波長側で顕著に表れることがわかる。なお、計算スペクトルを求める際には、分光測定系の波長感度特性を補正するべきであるが、 $\epsilon(0,3)$ バンドのスペクトルの幅は 4nm 程度と非常に狭いため、その範囲では感度が一定であると仮定して計算を行った。

スペクトルマッチング法は、この計算で得られたプロファイルと実験で得られたプロファイルの比較により回転温度を推定するものであるが、実際に上部振動準位の回転準位数密度分布にボルツマン分布が成立しているかを確認するために、実験で得られるスペクトルと計算スペクトルのプロファイルの比較を行った。その結果を図 11 に示す。(a) はメタン予混合火炎を対象として、上部回転準位 $J=32.5, 34.5, 35.5, 36.5$ の F_1 準位 (spin doubling による) にそれぞれ励起して得られた $\epsilon(0,3)$ バンドのスペクトルである。一方、(b) は $J=23.5, 28.5, 31.5$ の F_2 準位に励起して得られたスペクトルである。また、同図中には図 6 で求めたメタン予混合火炎の NO 回転温度 (1583K) で計算した計算スペクトルを点線で示してある。これより、いずれの実験スペクトルも計算スペクトルと完全に一致するプロファイルとなっておらず、実際にはボルツマン分布が成立していないことがわかった。

実験スペクトルのプロファイルが励起回転準位ごとに異なっているが、これは回転緩和速度が励起準位によって異なる値をとるために⁽²⁰⁾、回転緩和の進み具合に差が

表れたものと考えられる。図からわかるように、(a)、(b) ともに励起準位が低い方が計算スペクトルに近いプロファイルとなっていることがわかる。従来より、回転緩和と速度は励起先の上部回転準位が低いほど速いことが報告されており⁽²⁰⁾、(a)、(b) ともにこれに対応した結果となっている。ここで(a)と(b)を見比べると、(b)の方がより低い上部回転準位に励起したにも関わらず、(a)よりもボルツマン分布から大きく離れたプロファイルとなっている。これは、同じ回転量子数の励起準位でも、 F_1 と F_2 では F_1 準位の方が回転緩和と速度が速いことを示唆している。なお、(a)の $J=32.5$ は ArF エキシマレーザで励起可能な最も低い F_1 準位であるが、より低い回転準位に励起することができれば、さらにボルツマン分布に近いプロファイルが得られることが予想される。

以上のように、いずれの実験スペクトルも計算スペクトルと完全には一致しないものの、 $J=32.5$ の F_1 準位に励起して得られたプロファイルについては、ピークより短波長側においては計算スペクトルのプロファイルと良く一致している。短波長側でより早くプロファイルが一致した理由については、回転緩和による上部振動準位内における熱平衡分布は回転準位の高い方で達成され易く⁽²⁰⁾、NO の場合、概して短波長側が高い上部回転準位からの遷移で構成されているためと考えられる。したがって、この部分の一致性を調べることで回転温度を推定することが可能になるものと考えられる。上記の結果に基づき、 $J=32.5$ の F_1 準位に励起して得られる $\epsilon(0,3)$ バンドのプロファイルを、スペクトルマッチング法による拡散火炎内の NO 回転温度計測に適用することとした。

3.5 プロパン拡散火炎の NO 回転温度計測
 $J=32.5$ の F_1 準位に励起することができる $P_1(33.5)$ 線を使用し、プロパン拡散火炎内の NO を励起して

Fig. 12 Comparison of experimental and synthetic band spectra

$\epsilon(0,3)$ バンドのプロファイルを求めた。図 12(a)は火炎下流 ($z=35\text{mm}$) の実験スペクトルと計算スペクトルの比較である。実線が実験スペクトル、点線が回転温度 T_R を 1200, 1350, 1500K でそれぞれ計算して得られた計算スペクトルのプロファイルを表す。図より、実験スペクトルのピークより短波長側のプロファイルについては、回転温度が 1200K と 1500K に対応した計算スペクトルの間に含まれており、1350K との一致性が最も良い。したがって、 $z=35\text{mm}$ の位置における NO の回転温度は約 1350K と推定でき、その誤差は $\pm 150\text{K}$ 程度であると判断できる。同様に、輝炎部 ($z=25\text{mm}$) の結果を(b)に示す。輝炎部の実験スペクトルは NO の蛍光に非共鳴光の連続スペクトルが重畳しているために、これに相当すると思われるバックグラウンド値を単純に差し引いたプロファイルを用いた。この場合、ピークより短波長側の実験スペクトルのプロファイルは、回転温度が 1400K と 1600K に対応した計算スペクトルの間に含まれており、1500K との一致性が最も良い。したがって、 $z=25\text{mm}$ における NO の回転温度は $1500 \pm 100\text{K}$ と見積もることができる。

厳密には、他の信頼性の高い方法によりガス温度（並進温度）を計測し、今回の結果と比較するべきであるが、現在のところ拡散火炎に適用可能なガス温度計測法は見当たらない。参考に、熱電対で計測した温度は $z=35\text{mm}$ で 1360K、 $z=25\text{mm}$ で 1550K であり、スペクトルマッチング法で求めた NO 回転温度と比較的良好な一致が見られる。このように、本研究により、すすを多く含むような火炎においても NO 回転温度の推定が可能であり、これがガス温度に近い値であることを確認することができた。他のレーザ計測法によってすすを含む火炎の回転温度を計測することが難しいことを

考えると、本報で提案した計測法は拡散火炎の NO 回転温度計測に有効な方法であると考えられる。

4. 結 論

レーザ光の照射に伴う蛍光と非共鳴光の分光分析を行い、その発光特性を詳細に調べた。この結果をもとに、スペクトルマッチング法により拡散火炎内の NO の回転温度を計測する方法を検討した。以下に得られた主な結果を示す。

1. $D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,1)$ バンドは、 O_2 の Schumann-Runge バンドとの重なりが問題となるものの、NO の $\epsilon(0,3)$ バンドのみは O_2 の蛍光と干渉せず、かつ非共鳴光の影響をほとんど受けないことを見出すことができた。
2. $\epsilon(0,3)$ バンドのプロファイルの励起回転準位依存性を示し、火炎の回転温度計測にスペクトルマッチング法を適用する際に適した吸収線 ($P_1(33.5)$ 線)を選定した。
3. メタン予混合火炎の場合、 $P_1(33.5)$ 線を励起して得られる $\epsilon(0,3)$ バンドのプロファイルにスペクトルマッチング法を適用した結果、得られた回転温度はボルツマンプロットで得られた回転温度と良く一致した。
4. ここで提案した NO の回転温度計測法により、プロパン拡散火炎内の NO の回転温度が推定でき、これがガス温度に近い温度であることを確認することができた。

謝辞 本研究では、群馬大学工学部特別設備である瞬間画像解析装置を利用させていただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) Eckbreth, A. C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature*

- and *Species Second Edition*, (1988), 381, Gordon and Breach Publishers.
- (2) Bechtel, J. H., *Appl. Opt.*, **18**-13 (1979), 2100-2106.
- (3) Head, D. E., Jeffries, J. B., Smith, G. P. and Crosley, D. R., *Combust. Flame*, **88** (1992), 137-148.
- (4) Andresen, P., Meijer, G., Schlüter, H., Voges, H., Koch, A., Hentschel, W., Oppermann, W. and Rothe, E., *Appl. Opt.*, **29**-16 (1990), 2392-2404.
- (5) Knapp, M., Luczak, A., Schlüter, H., Beushausen, V., Hentschel, W. and Andresen, P., *Appl. Opt.*, **35**-21 (1996), 4009-4017.
- (6) Chan, C. and Daily, J. W., *Appl. Opt.*, **19**-12 (1980), 1963-1968.
- (7) Zizak, G., Horvath, J. J. and Winefordner, J. D., *Appl. Spectrosc.*, **35**-5 (1981), 488-493.
- (8) Crosley, D. R. and Smith, G. P., *Appl. Opt.*, **19**-4 (1980), 517-520.
- (9) Joklik, R. G., *Combust. Sci. and Tech.*, **87** (1992), 109-125.
- (10) Neuber, A. A., Janicka, J. and Hassel, E. P., *Appl. Opt.*, **35**-21 (1996), 4033-4040.
- (11) 林田和宏, 白井紘行, 天谷賢児, 新井雅隆, 機論, **66**-651, B(2000), 3013-3020.
- (12) Melton, L. A., *Appl. Opt.*, **23**-13 (1984), 2201-2208.
- (13) Bengtsson, P.-E. and Aldén, M., *Combust. Flame*, **80** (1990), 322-328.
- (14) Beretta, F., Cincotti, V., D'Alessio, A. and Menna, P., *Combust. Flame*, **61** (1985), 211-218.
- (15) Michael, P. L. and Hanson, R. K., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **36**-5 (1986), 425-440.
- (16) Wang, C. C. and Davis Jr., L. I., *Appl. Phys. Lett.*, **25**-1 (1974), 34-35.
- (17) Andresen, P., Bath, A., Gröger, W., Lülff, H. W., Meijer, G. and ter Meulen, J. J., *Appl. Opt.*, **27**-2 (1988), 365-378.
- (18) Seitzman, J. M., Kychahoff, G. and Hanson, R. K., *Opt. Lett.*, **10**-9, (1985), 439-441.
- (19) Sappay, A. D. and Funk, D. J., *Appl. Phys. B56*, (1993), 229-234.
- (20) Crosley, D. R., *Opt. Eng.*, **20**-4 (1981), 511-521.