標準添加 LIF 画像分光法による
火炎中の一酸化窒素の濃度・温度計測*奥野和也^{*1}, 佐野高也^{*1}, 斎藤寛泰^{*2}
吉川典彦^{*2}, 林 茂^{*3}Measurements of Temperature and Concentration of Nitrogen Monoxide in
Flames by LIF Imaging Spectroscopy with Standard Addition MethodKazuya OKUNO^{*4}, Takaya SANO, Hiroyasu SAITOH,
Norihiko YOSHIKAWA and Shigeru HAYASHI^{*4} Department of Micro-nano Systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

An NO-LIF imaging spectroscopy of $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ (0,0) excitation (225-226 nm) and $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ (0,2) emission (246-248 nm) was applied to methane-air flames with equivalence ratio of 0.8, 1.0, 1.2, and a methane diffusion flame for measuring mole fractions of nitrogen monoxide (NO) and temperature. The mole fractions were determined comparing the NO-LIF intensities of non NO-seeded and NO-seeded cases. Temperatures in flames were also obtained using two-line method. Nitrogen monoxide was doped in both burner nozzle flow and surrounding air co-flow to enable two-dimensional measurements of mole fraction in the flames. The results of NO mole fraction images which should be closely correlated to the obtained temperature distributions showed good agreement with the well known NO formation mechanisms. Narrow-band filters for removing non-resonant lights were not enough to remove the strong Mie scattering of laser light by soot in the diffusion flame. Introduction of an imaging spectrometer provided high signal-to-noise ratio of NO-LIF imaging. The NO-LIF acquisition technique for the diffusion flame also revealed that NO $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ (0,0) excitation was a good choice to capture strong NO-LIF while avoiding non-resonant lights such as LIF of soot precursors and Laser Induced Incandescence (LII) of soot.

Key Words: Flame, Laser, Spectroscopic Measurement, Imaging Spectroscopy, Laser Induced Fluorescence, Nitrogen Monoxide, Thermometry

1. は じ め に

窒素酸化物 (NO_x) の排出削減や燃焼装置設計を更に効率化するために、在来の排気ガス中の濃度計測法に替わり、燃焼場の直接計測法の確立が期待されている。

吸引管を用いて燃焼ガスを採取し分析して、火炎中 NO_x の主成分である一酸化窒素 (NO) の濃度を計測する場合、点計測となり、短時間の計測では燃焼場全体を把握することは期待できない。また、接触計測であり計測場を乱す。さらに、吸引管内で採取ガスの NO が二酸化窒素 (NO₂) へと変化し、NO₂ が凝集水に吸収されることがある⁽¹⁾⁽²⁾。一方、レーザ誘起蛍光 (LIF:

Laser Induced Fluorescence) を用いた場合、非接触で迅速かつ燃焼場全体にわたる高空間分解能の NO 濃度計測が期待できる。しかし、分子衝突による励起分子の消光 (クエンチング) 速度は計測場の温度、圧力、化学種に依存するため、LIF を用いた火炎中の NO 絶対濃度計測は困難となる⁽³⁾。クエンチングの影響に対処する大気圧下の定量画像計測法として、時間分解蛍光法⁽⁴⁾が挙げられるが、精度の良い計測を行うには、0.1 ns オーダの短時間パルス幅の高出力レーザと高時間分解能の ICCD カメラなど特殊性の高い装置を必要とするため、計測例は極めて少ない。

ここでは、分析化学で用いられている標準添加法を LIF 画像分光に応用することにより、火炎中の NO 濃度画像計測を試みた。標準添加法とは、分析対象物質と同じ物質の濃度が既知の試料 (標準試料) を一定量分析試料に添加した場合の計測結果を基準として分析試料中の分析対象物質の濃度を求める方法である。標準添加法を用いれば、後述するように NO モル分率を

* 原稿受付 2006 年 4 月 19 日。

^{*1} 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、名古屋大学大学院工学研究科。^{*3} 正員、(独)宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ (〒182-8552 調布市深大寺東町 7-44-1)。

E-mail: k_okuno@yoshilab.nuae.nagoya-u.ac.jp

決定する際にクエンチングの影響を考慮する必要がなくなる。一方、温度分布は LIF 二線法⁽⁵⁾により計測を試みた。

以前にもメタン-空気予混合平面火炎の予混合気中に NO を添加し、LIF を用いてバーナ中心軸上の NO 濃度の点計測を行った例⁽⁶⁾は報告されているが、計測結果を NO 生成機構の検証等に用いることを前提としたものであった。本研究は、広領域・高分解能の迅速 NO 濃度・温度計測が可能な標準添加 LIF 画像分光法が、小型バーナ火炎中で実現できることを示し、本計測法の実用燃焼場への適用を目標とする。

実験は、当量比 $\phi=0.8, 1.0, 1.2$ のメタン-空気予混合火炎およびメタン拡散火炎で行った。拡散火炎の場合、すすのミー散乱光やレーザ誘起赤熱発光 (LII: Laser Induced Incandescence)、すすの前駆物質である PAH による LIF などの非共鳴光の影響が大きく、干渉フィルタを用いても、S/N 比の高い NO-LIF 画像計測が困難とされてきた⁽³⁾⁽⁷⁾。そこで、二次元的に波長分解が実現できるイメージ分光器を用いて非共鳴光の低減を図り、予混合火炎と同様の計測法で温度・モル分率画像計測を試みた。

2. 濃度・温度計測原理

まず、標準添加 LIF 法について説明する。火炎中の NO モル分率 X_{NO} と NO-LIF 強度 S_F との関係は、

$$S_F = CX_{NO} \quad (1)$$

のように表される。ここで C はクエンチングの影響を含んだ比例定数である。よって、火炎中の LIF を用いる場合には C を求めることは困難である。標準添加 LIF 法は、NO 添加しない場合の蛍光強度 S_F と、計測場にモル分率 X_{SNO} にあたる NO を添加した場合の蛍光強度 S_{SF} の比をとり C をキャンセルして計測場中の NO モル分率を決定する方法である。実験装置条件が一定で、定常火炎を計測する場合、

$$\frac{S_F}{S_{SF}} = \frac{X_{NO}}{X_{NO} + X_{SNO}} \quad (2)$$

となりクエンチングの影響を含んだ C はキャンセルされ、

$$X_{NO} = \frac{S_F}{S_{SF} - S_F} X_{SNO} \quad (3)$$

から火炎中の NO モル分率を決定できる。本研究で NO モル分率計測に用いた励起線は、 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0) P_1(23.5)$, $P_2 + Q_{11}(14.5)$, $Q_{22} + R_{12}(20.5)$ 遷移 (225.96 nm) を含む。この励起線は大気圧火炎中で O_2 の励起線とも重ならず、強い NO-LIF を得られ

ることで知られている⁽⁸⁾。また、観測波長は $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(0,2)$ 遷移バンド (246~248 nm) を用いた。

次に、温度計測法である LIF 二線法について示す。 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(0,2)$ 遷移に伴う蛍光強度 S_F と温度 T [K] の関係は次のように表される。

$$\frac{S_F^a}{S_F^b} = \frac{g^a B^a U_L^a}{g^b B^b U_L^b} \exp \left\{ \frac{-(E^a - E^b)}{k_B T} \right\} \quad (4)$$

ここで g は基底準位の NO 分子の縮退度、 B はアインシュタインの誘導吸収係数 [$J^{-1} \cdot s^{-2} \cdot m^3$], U_L はレーザエネルギー密度 [$J \cdot s \cdot m^{-3}$], E は励起対象となる NO 分子の基底状態における回転エネルギー [J], k_B はボルツマン定数 [$J \cdot K^{-1}$] を表す。上添え字 a, b は異なる 2 つの励起波長を表す。また、 $A^2\Sigma^+$, 振動量子数 $v=0$ に励起された NO-LIF を対象とする場合、励起状態の回転量子数の違いによるクエンチング速度の差はほとんどなく、等しいとみなすことができる⁽⁵⁾。本研究で温度計測に用いた 2 つの励起線は、 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0) R_{22}(20.5)$ 遷移 (225.52 nm) および $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0) P_{11}(36.5)$ 遷移 (225.11 nm) である。

3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。XeCl エキシマレーザ (Lambda Physik, COMPEX201, 発振波長: 308 nm) と波長可変色素レーザ (Lambda Physik, SCANMATE2, Coumarin450 色素) により得たレーザビーム光を SHG 結晶に入射させた後、4 つのペランブロッカプリズムで基本波を分離し第二高調波 (レーザ波長: 約 226 nm, パルス幅: 約 10 ns, 繰り返し周波数: 10 Hz, 波長幅: 約 0.002 nm) を得た。さらに、2 枚の円筒レンズにより厚さ約 0.5 mm, 高さ約 20 mm のレーザシートを形成し、バーナ火炎に導いた。計測位置はバーナ自体をリニアステッピングモータにより上下させることで調整した。また、デジタルパルス/ディレイジェネレータ (Stanford Research Systems, DG535) を用いてエキシマレーザからの同期信号を ICCD カメラコントローラ (浜松ホトニクス, C7970) の外部トリガに送り、ICCD

Fig. 1 Experimental apparatus.

カメラ (浜松ホトニクス, C8484-05 & M7971, 最大画素数: 1024 × 1024 画素) の NO-LIF 取得タイミングの制御を行った。画像取得の際 CCD カメラは、2 × 2 画素を 1 画素とするビニングモード (画素数: 512 × 512 画素) に設定した。画像はレーザパルス 200 回分の積算とし、カメラのゲート幅は、LIF をすべて取り込み、かつ、火炎の自発光の影響を抑えるために 100 ns に設定した。

予混合火炎の計測時には、カメラの前に紫外用カメラレンズ (Nikon, UV-Nikkor, f4.5) を取り付け、干渉フィルタ (日本真空光学, 中心波長 246.8 nm, 半値幅 14.6 nm, 最大透過率 24.2 %) を用い、 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 遷移に伴う (0,2) バンドの蛍光 (246~248 nm) を選択的に透過させた。一方、拡散火炎の場合にはレーザ照射によるすすからのミー散乱光が強く、干渉フィルタではその影響を十分取り除くことができなかった。そこで、イメージ分光器 (分光計器, ISM130, 半値幅: 5 nm (最適条件)) を用いて $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ (0,2) バンドの蛍光を得ることを試みた。イメージ分光器は、二次元分光計測が可能で、測定波長も自由に選択することができる。干渉フィルタを用いた場合よりも得られる LIF 強度は弱くなるが、分光して測定波長帯以外の光を除去するので、本実験のように測定波長と強いノイズ光の波長が近い場合でもノイズ光を十分に除去することができる。拡散火炎の場合は、PAH-LIF や LII が存在する可能性があるので⁽³⁾、励起波長から 0.005 nm シフトさせたレーザ光を用いて画像を取得し、それをバックグラウンド画像として LIF 画像の補正に用いた。

バーナは、内径 22 mm の円筒バーナに内径 76 mm の同軸流筒を取り付けたものを用いた。レーザ強度は LIF 画像取得毎の前後にパワーメータにより計測して平均をとり、画像取得時のレーザ強度とした。実験は 0.8~1.2 mJ/pulse の間で行ったが、レーザ強度がこのように変化するのは、色素溶液や SHG クリスタルが温度特性をもち、レーザ作動時間が長くなると、それらの温度が上昇して収率が低くなるためである。火炎の形成条件としては、予混合火炎の場合、予混合気ノズル出口流速、周囲空気流速をそれぞれ 69 cm/s, 36 cm/s に、拡散火炎では、燃料ノズル出口流速を 4.4 cm/s, 周囲空気流速を 37 cm/s に設定した。レーザシート中心から上下 5 mm の範囲を採用し、バーナを 10 mm ずつ移動させて 6 つの異なる高さで LIF 画像を取得した。計測領域はバーナノズルから高さ 5~65 mm, バーナ中心左右 20 mm とした。

次に、NO を添加する方法を示す。予混合火炎の場合、NO (純度 99.5 vol%) を N_2 により 1000 ppm 程度

に希釈し、さらに、 O_2 を加え大気と同じ酸素窒素体積比 ($N_2:O_2=79:21$) にした後、コンプレッサから供給される空気と混合した。このようにして成分調整された混合気体を、燃焼用空気および周囲流空気として用いた。拡散火炎の場合、NO を N_2 により 10 vol% 程度に希釈して CH_4 に添加し、 CH_4 : 99.8 vol%, $N_2 + NO$: 0.2 vol% の混合気を作り、燃料として用いた。周囲流への NO 添加方法は予混合火炎の場合と同様とした。NO の添加量は、NO モル分率計測の場合は 100 ppm, 温度計測の場合は 400 ppm とした。流量の調整はすべて浮き子式流量計 (Brooks Instrument) により行った。流量計の精度誤差のため、NO を 100 ppm 添加した場合、NO 添加精度は 100 ± 6 ppm となる。

最後に、取得した画像に対して施した画像処理について述べる。予混合火炎の場合は取得した LIF 画像からダークノイズ減算、拡散火炎の場合はダークノイズ減算に加え、バックグラウンド画像を減算した後、7 × 7 画素メディアンフィルタによる異常画素の除去を 1 回行った。さらにレーザ強度の正規化処理を行い、予混合火炎の場合は 6 × 6 画素、拡散火炎の場合は 4 × 4 画素の平均値を 1 画素とし、得られた画像を最終的な NO-LIF 画像とした。これらの画像から温度、モル分率を 1 画素ごとに算出した。このとき、温度およびモル分率画像の単位画素スケールは、予混合火炎の場合は 0.50 mm × 0.50 mm, 拡散火炎の場合は 0.67 mm × 0.67 mm となる。これらの空間分解能は、火炎反応帯内の NO 生成の様子を知るには不十分であるが、燃焼場全体の NO 濃度分布を把握するには十分である。

4. 実験結果および考察

4-1 標準添加法適用の妥当性の検討 燃焼反応により火炎中の原子・分子数が増加した場合は、添加 NO モル分率が減少する。(以下、これを希薄化と呼ぶ。) 標準添加法で NO モル分率を計測した結果は、希薄化による添加 NO モル分率の減少割合に比例して実際より大きく見積られることになる。希薄化の影響は予混合火炎の場合、平衡ガス組成計算⁽⁹⁾により予測することができる。メタンと空気 (O_2 : 21.0 vol%, N_2 : 79.0 vol%) の予混合気を仮定し、平衡化学種は、 H_2 , CO_2 , O_2 , H_2O , CO , H , O , OH , HO_2 , N_2 とし、 N_2 , NO の生成、消失は起こらないものとした。また平衡圧力を 1 atm とし、平衡温度は断熱火炎温度より 200K 程度低い温度から断熱火炎温度まで変化させた。これは、実際の火炎温度は輻射損失により断熱火炎温度より低くなると考えられるためである。平衡計算の結果、いずれの当量比においても断熱火炎温度で最も希薄化の

Fig. 2 A simulated distribution of seeded NO mole fraction in the diffusion flame (CH_4 , $Re_0=56.6$, $u_\infty/u_0=1.0$).

Fig. 3 Normalized LIF intensity v.s. seeded NO mole fraction.

影響が大きく、NO を 100 ppm を添加した場合の断熱火炎温度における平衡 NO モル分率は、 $\phi=0.8$: 99.9 ppm, $\phi=1.0$: 99.3 ppm, $\phi=1.2$: 96.4 ppm となった。以上より、 $\phi=0.8, 1.0$ の場合は希薄化による計測誤差は最大でも+1%以下となり、ほとんど影響がないと考えられる。一方、 $\phi=1.2$ の場合は希薄化による計測誤差は最大で約+4%となる。

拡散火炎の場合は、山下により開発された燃焼計算プログラム⁽¹⁰⁾を用いた、2次元同軸流メタン拡散火炎のシミュレーション計算を行い、希薄化の影響を考察する。化学反応系はメタン・空気系のスケレタル素反応機構⁽¹¹⁾を用いた。燃料ノズル出口流速 $u_0=96.8$ cm/s、ノズル内径 $d=1.0$ mm とし、本研究の拡散火炎の実験の場合と同じ燃料ノズル流のレイノルズ数 $Re_0=56.6$ とした。また、周囲空気流速は $u_\infty=96.8$ cm/s とし、燃料ノズル出口流速と同じ流速とした。用いた素反応機

構には NO の化学反応は含まれていない。燃料および周囲空気中の添加 NO モル分率が 100 ppm とした場合の結果を図 2 に示す。火炎中で添加 NO モル分率は約 95~100 ppm の値をとっている。火炎反応帯付近で減少量が大きくなっている。この場合、希薄化により最大で約+5%の計測誤差が生じる。本研究で対象とする拡散火炎においても希薄化により同程度の計測誤差が生じると考えられる。

以上より、流量計の精度の影響と希薄化の影響を合わせた場合、おおよその NO モル分率計測の誤差範囲は、 $\phi=0.8$: -6%~+6%, $\phi=1.0$: -6%~+7%, $\phi=1.2$: -6%~+10%, 拡散火炎: -6%~+11%と推算される。

次に、NO 添加量と添加 NO による LIF 強度との間の線形性を調べた。NO を添加した場合の LIF 強度から NO を添加しない場合の LIF 強度を差し引いて、7×7 画素メディアンフィルタを 1 回施した後、1 mm×1 mm 分の画素の平均値をとることで添加 NO-LIF 強度を得た。結果を図 3 に示す。0 ppm (NO を添加しない場合) の添加 NO の LIF 強度を 0, 150 ppm 添加した場合を 1 とし、0 ppm, 75 ppm, 100 ppm, 125 ppm, 150 ppm 添加した場合の相対 LIF 強度をプロットした。実験方法は NO モル分率計測のための LIF 取得の場合と同じである。計測点は、予混合火炎の場合は円錐状火炎先端から高さ 10 mm, 拡散火炎の場合はバーナから高さ 20 mm の火炎反応帯付近とした。図 3 より見てとれるように、すべての条件で線形性が確認できる。

火炎中に添加した NO は火炎面に存在する CH と主に $\text{CH} + \text{NO} \rightarrow \text{HCN} + \text{O}$ のように反応し、消滅する場合がある⁽¹²⁾。しかし、添加 NO が生成される NO と同じ程度の少量であるならば、このような反応はほとんど起こらない⁽¹³⁾。本実験の NO モル分率計測の場合、添加 NO は 100 ppm としたので、添加 NO の消滅反応の影響は考慮しなくてよいと考えられる。

4.2 メタン-空気予混合火炎への適用 当量比 $\phi=0.8, 1.0, 1.2$ のモル分率、温度分布画像と異なる高さでの半径方向分布を図 4 に示す。モル分率、温度ともに $\phi=1.0$ の時に高い値を示している。これは、thermal NO は温度が高いほど多く生成されるという考え方に一致する。また、 $\phi=1.2$ の時は、 $\phi=1.0$ の時と比べてバーナ中心軸付近の NO モル分率は小さい。これは、 $\phi=1.2$ の場合、温度が $\phi=1.0$ よりも低く、thermal NO の生成が抑制されたためと考えられる。 $\phi=0.8$ の時、火炎中全体で NO モル分率が他と比べ小さな値をとっている。これは、希薄燃焼なので prompt NO の生成量が少なく、また火炎温度が比較的低く thermal

Fig. 4 NO mole fraction and temperature distributions of the premixed flames.

Fig. 5 Signal intensities at NO-LIF resonant wavelength and at off-resonant wavelength obtained with the imaging spectrometer.

Fig. 6 NO mole fraction and temperature distributions of the diffusion flame.

NO の生成も抑制されているためと考えられる。また、すべての火炎で 40～60 mm においても下流に向かうにつれ、NO モル分率が若干増加している。一方、温度分布は、下流部でも火炎温度が高温に保たれていることがわかるので、下流に向かうに従い thermal NO の生成量が増加したと考えられる。火炎温度は最高で $\phi=0.8, 1.0, 1.2$ の場合でそれぞれ、約 1900 K, 2100 K, 2000 K となり、それぞれの断熱火炎温度 (1997 K, 2226 K, 2137 K) よりも約 100 K 低いが、計測値は火炎の放射損失による温度低下を反映していると考えられる。

4.3 メタン拡散火炎への適用 図 5 の画像は、NO を励起しない波長を用いて得られたバックグラウンド画像とモル分率計測に用いた NO を添加しない場合の NO-LIF 画像であり、グラフは、両者の異なる高さにおける水平分布を比較したものである。これより、イメージ分光器を用いた場合、高 S/N 比で NO-LIF 分布画像が取得できていることがわかる。

拡散火炎の計測で問題となる非共鳴光として、すずのミー散乱光、PAH-LIF, LII が挙げられる。干渉フィルタを用いた場合、ミー散乱光を除去することができず、特に火炎反応帯付近では、NO-LIF よりもミー散乱光の方が強くなり NO-LIF の取得ができなかった。イメージ分光器を用いた場合、図 5 より、火炎反応帯付近での非共鳴光がほとんど確認されないため、ミー散乱光はほぼ完全に除去することができたと考えられる。一方、PAH-LIF は本研究で用いたレーザ波長 (225～226 nm) においては NO-LIF に比べ微弱であったと考えられる。紫外域で励起した場合、PAH-LIF 強度が弱いことは報告されている⁽¹⁴⁾。また、すずの LII の特徴である放射時間の長い光は確認されなかった。これはレーザパワーが比較的弱いので、LII が微弱であった、もしくは発生しなかったためと推測される。よって、ICCD カメラとイメージ分光器を用いた、 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0)$ 励起の NO-LIF 取得法はメタン拡散火炎中で適用できることが確認された。

メタン拡散火炎のモル分率、温度分布画像および異なる高さでの水平方向分布を図 6 に示す。火炎上流では火炎反応帯付近で NO モル分率が大きく、下流での温度増加にともない、中心部で NO モル分率が増加している。火炎上流部では、prompt NO が支配的であり、火炎下流部では prompt NO の生成に加え、thermal NO が生成されているためと考えられる。

4.4 実用燃焼場への適用に向けて 実用燃焼場は、本研究で計測を行ったような層流場だけではなく、乱流場である場合が多く存在するが、その多くは、あ

る時間平均値を中心に変動するような場 (定常乱流場) であると考えられる。今後は、本計測法の適用により実用燃焼場の時間平均 NO 濃度および温度を得ることを目指す。

本計測法を用いて定常乱流場を精度よく計測するには、クエンチング速度の時間変動が小さい必要がある。しかし、高温域 (約 1500 K) では、主要化学種のモル分率の時間変動が小さいとき、クエンチング速度はほとんど変動しないと考えられる⁽¹⁵⁾。

したがって、本計測法を適用して実用燃焼場を計測する場合でも、精度よく時間平均 NO 濃度および温度を計測できる場が多く存在すると考えられる。

5. 結 言

標準添加 LIF 画像分光法により火炎中の NO 濃度・温度分布計測を行い、以下の知見を得た。

1. メタン-空気予混合火炎およびメタン拡散火炎中の NO モル分率画像分布は、LIF 二線法で得られた温度の画像分布との比較から考えられている NO 生成機構と一致した結果が得られた。
2. ICCD カメラとイメージ分光器を用いた $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0)$ 励起の実験手法はメタン拡散火炎中の NO-LIF 画像を高い S/N 比で取得できる。
3. 標準添加 LIF 法による火炎中 NO モル分率計測は、メタン-空気予混合火炎およびメタン拡散火炎において適用可能である。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (A)、課題番号 17206018) の支援を受けて遂行したものである。ここに謝意を表す。また、拡散火炎の燃焼計算に関するプログラムの提供、助言をいただいた名古屋大学工学研究科山下博史教授、林直樹助手に謝意を表します。

文 献

- (1) Hori, M., *Combustion Science and Technology*, Vol. 23, (1980), pp.131–133.
- (2) Matsunaga, N. and Hori, M., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.692 (2004), pp.1064–1071.
- (3) Yoshikawa, N., *Journal of the Combustion Society of Japan*, No.102 (1995), pp.29–35.
- (4) Deguchi, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, No.114 (1998), pp.1–10.
- (5) Bessler, W. G. et al., *Applied Optics*, Vol. 40, No.6 (2001), pp.748–756.
- (6) Mokhov, A. V. et al., *Applied Optics*, Vol. 36, No.15 (1997), pp.3233–3242.

- (7) Arai, M. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.622 (1998), pp.1925–1931.
 - (8) Wolfgang G. B. et al., *Applied Optics*, Vol. 41, No.18 (2002), pp.3547–3557.
 - (9) Gordon, S. and McBride, B.J., *NASA Reference Publication*, NASA-RP 1311 (1994).
 - (10) Yamashita, H., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.630 (1999), pp.783–789.
 - (11) Yamashita, H. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.628 (1998), pp.4248–4255.
 - (12) Tamura, M. et al., *Applied Physics B, Lasers and Optics*, Vol.66, No.4 (1998), pp.503–510.
 - (13) Berg, P. A. et al., *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27, (1998), pp.1377–1384.
 - (14) Hayashida, K. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.695 (2004), pp.1834–1841.
 - (15) Paul, P. H. et al., *Sandia Report*, SAND94–8237, UC-1423 (1995).
-