B 2 1 2

標準添加 LIF 法によるジェット燃料火炎中の 一酸化窒素濃度・温度計測

伊東 和哉[○], 遠山 政利, 斎藤 寛泰, 吉川 典彦(名古屋大学)

山田 秀志, 林 茂(宇宙航空研究開発機構)

Measurements of Temperature and Concentration of Nitrogen Monoxide in a Jet Fuel Flame by Standard Addition LIF Method

Kazuya ITOH, Masatoshi TOYAMA, Hiroyasu SAITOH, Norihiko YOSHIKAWA
Hideshi YAMADA and Shigeru HAYASHI

ABSTRACT

An LIF imaging spectroscopy was applied to the quantitative measurements of NO concentration and temperature profiles in a jet fuel flame. The NO mole fractions were determined comparing the LIF signals of NO-seeded flame and non-seeded flame. A two-line thermometry technique was used for obtaining the temperature distributions. A narrow-band pass filter was used to sufficiently remove noise lights, and two-dimensional distributions of concentration and temperature of NO were obtained. The flame was stabilized inserting a honeycomb ceramic tube on the burner exit of preheated kerosene-air mixture. The result shows that NO is produced via the thermal NO mechanisms and that the NO concentration and temperature were higher in comparison with a methane-air premixed flame in a standard Bunsen burner.

Keywords: Measurement, LIF, Nitrogen Monoxide, Jet Fuel Flame

1. 結 論

窒素酸化物の排出削減や効率的な環境対応型航空機エンジン用燃焼器の開発には燃焼場の詳細な情報が必要であり、レーザを利用した可視化技術の確立が期待されている。

過去、LIF 法と標準添加法を組み合わせることで、気体炭化水素燃料火炎中の一酸化窒素(NO)濃度・火炎温度計測において妥当な結果を得た¹⁾。本研究では、航空機エンジン計測の基礎実験として航空機ジェット燃料(ケロシン)火炎中の NO 濃度・温度計測を試みた。

2. 濃度及び温度計測法

火炎中の NO モル分率 X_{NO} と NO-LIF 強度 S_F は線形関係にあり、蛍光強度 S_F は

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

で表される¹⁾。ここで C はクエンチング及びレーザと LIF の減衰等の影響を含んだ定数であり、 C を求めることは困難である。標準添加 LIF 法は、NO を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ある場合、以下の(2)式から NO モル分率を決定できる。

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

上記の式が成り立つためには、添加した NO が化学反応によって変化しないという条件が必要であるが、この条件が十分に満たされることは既に確認している¹⁾。本研究で NO モル分率計測に用いた励起線は、 $P_{11}(23.5), P_{21}+Q_{11}(14.5), Q_{22}+R_{12}(20.5)$ の 226.03nm にある励起線で、 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0)$ 遷移に属する。この励起線は大気圧火炎中で O_2 の励起線と重ならず、強い NO-LIF を与える²⁾。

$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(0,2)$ 遷移に伴う蛍光強度 S_F と温度 T の関係は次のように表される。

$$\frac{S_F^a}{S_F^b} = \frac{g^a B^a U_L^a}{g^b B^b U_L^b} \exp\left(-\frac{E^a - E^b}{k_B T}\right) \quad (3)$$

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吸収係数、 U_L はレーザ強度、 E は NO 分子の基底状態における回転エネルギー、 k_B はボルツマン定数を表す。上添え字 a, b は異なる 2 つの励起波長を表す。本研究で用いた励起線は $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0)$ 遷移 $R_{22}(20.5)(225.59)$ 及び $P_{11}(36.5)(225.18\text{nm})$ である。

3. 実験装置及び方法

XeCl エキシマレーザ (Lamda Physik, COMPex201, 発振波長: 308 nm) と波長可変色素レーザ (Lamda

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、第二高調波(レーザ波長: 約 226nm, パルス幅: 約 10ns, 繰り返し周波数: 10Hz, 波長幅: 約 0.002nm, レーザ強度: 0.8~1.2mJ/pulse)を得た。さらに、2 枚の紫外用平面反射ミラーと円筒レンズ(焦点距離: 40mm, 1000mm)により厚さ約 0.5mm, 高さ約 20mm のレーザシートを形成し、バーナ火炎に導いた。画像はレーザシート中心から上下 5mm の範囲を採用し、リニアステッピングモータによりバーナを上下させることで、計測位置を調整した。

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 カメラ(浜松ホトニクス, C8484-05 & M7971)の NO-LIF 取得タイミングの制御を行った。画像はレーザパルス 100 パルス分の積算とし、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 200ns に設定した。

レーザからの散乱光を取り除き NO-LIF のみを取得するため、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: 248.6nm, 半値幅: 14.6nm, 最大透過率: 24.2%)を用い、 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(0,2)$ 遷移の蛍光(246~248nm)を選択的に透過させた。同時に、全ての計測位置でバックグラウンド画像を取得した。バックグラウンド減算処理と異常画素除去を行った画像を最終的な NO-LIF 画像として、NO モル分率・温度画像を算出した。

バーナは、予混合チャンバに内径 76mm と内径 35mm のノズルを取り付けたものを使用した。チャンバ内で約 550℃に予熱した空気と噴霧したジェット燃料を混合させ、気化させたジェット燃料をノズルに供給し、ノズル出口に設置したハニカムを用いて火炎の形成と保炎を行った。火炎の形成条件は主流流速 37cm/s, 周囲流速 3cm/s, 当量比 0.92 に設定した。また、火炎の計測範囲はバーナノズルから鉛直 12~82mm, 水平方向 30~30mm とした。

標準添加法を用いる場合、標準試料として NO を添加する必要がある。NO(純度 99.5vol%)を N_2 により 1200ppm 程度に希釈し、さらに、大気と同じ酸素窒素体積比($N_2 : O_2 = 79 : 21$)となるよう O_2 を加えた後、コンプレッサから供給された空気と混合した。NO 添加量は 174 ± 8.5 ppm とした。

4. 実験結果及び考察

LIF 法では、NO を励起しない波長で取得した画像がノイズ光となる。本計測では紫外用カメラレンズに干渉フィルタを組み合わせ、NO-LIF 画像を取得することを試みた。火炎全域にわたり S/N が 20 以上となり、NO モル分率・温度画像を算出するのに十分な S/N を得ることができた。

Fig.1 に取得した NO-LIF 画像より算出した NO のモル分率と温度の水平方向分布を示す。Fig.1 より、高さ 15, 25mm の火炎反応帯直後で急激に温度上昇が起こり、温度上昇に伴って NO モル分率も増加していることを確認できる。高さ 45~75mm にかけて温度変化は

小さく、1800K 以上で一定となるのに対して NO モル分率は大きく増加している。このことから火炎下流では、Thermal NO が生成していると考えられる。

また、メタン-空気予混合火炎の計測結果では、NO モル分率は 70ppm, 火炎温度は 2000K であった。メタン-空気予混合火炎と比較して、予熱空気を用いているためジェット燃料火炎の火炎温度は 2000K 以上と高い値となり、NO モル分率は 500ppm 以上と非常に高い濃度となった。

5. まとめ

標準添加 LIF 法の適用範囲を広げ、ジェット燃料火炎の NO モル分率・火炎温度の平面分布計測が可能であることを示した。また、ジェット燃料火炎と通常のメタン-空気予混合バーナ火炎の NO モル分率・火炎温度について比較を行い、予熱燃焼の効果によって、ジェット燃料火炎の温度と NO 排出レベルが高いことが明らかになった。

Fig. 1 Distributions of NO mole fraction and temperature

参考文献

- 1) 奥野和也, 佐野高也, 斎藤寛泰, 吉古典彦, 林茂: 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, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72, No. 723 (2006) pp. 2733-2340.
- 2) Wolfgang G. B. et al., Applied Optics, Vol. 41, No. 18, (2002), pp. 3547-3557.