

LIF 法による HCCI 燃焼中の NO 濃度計測に関する研究

56215 橋詰芳弘

(指導教員 河野 通方 教授)

Key Words : HCCI , LIF method , NO , rapid compression machine

1. 緒言

現在、高効率化と低公害化を同時に実現する予混合着火 (HCCI) エンジンが研究、開発されている。HCCI エンジンでは従来のエンジンより火炎温度が低くなり、NO_x の排出量を低減させることができるなどの長所がある。しかし、この予混合圧縮着火機関は超希薄混合気の利用により NO_x の低減が期待されているものの、燃焼室内の NO 計測はあまり行われておらず、NO_x 排出特性に及ぼす作動条件等の影響についても未解明な点が多く残されている。

本研究では、LIF 法により、HCCI 燃焼中における NO 濃度を測定することを目的としている。これまでの研究において、励起波長として 226.1nm を採用して NO 濃度計測を行ったが^[1]、LIF 方法による計測とガスクロマトグラフによる燃焼後の NO 濃度には誤差が生じた。そこで本研究においては励起波長を変えることにより O₂ や CO₂ などの NO 以外の分子の蛍光、クエンチングの影響を考察することにより、正確な NO 濃度を測定することを目的とする。

2. LIF 法

LIF 過程に関する単純な 2 準位系モデルから得られるレート方程式を $I = \frac{(A+Q)c}{2B}$ の条件の下で、分子のボルツマン分布の影響を考慮して解くと、蛍光強度 I_{FL} は簡易的に

$$I_{FL} \propto \frac{A}{Q+A} N_0 f_B(T) I \quad (1)$$

と表せる。

ここで、A はアインシュタインの A 係数、Q は無放射遷移速度定数、I はレーザー強度、N₀ は NO 分子の数密度、f_B(T) はボルツマンフラクション、T は温度である。さらに本研究では Q = A であるため、式(1)は次のように書き換えられる。

$$I_{FL} \propto \frac{N_0}{Q} f_B(T) I \quad (2)$$

また、無放射遷移速度定数は以下の式で表される^[3]。

$$Q = \sum_i n_i v_i \quad (3)$$

ここで、n_i は化学種 i の数密度、v_i は NO 分子と化学種 i との衝突断面積、v_i は NO 分子と化学種 i との相対速度である。衝突断面積 v_i は過去の文献値を使用することにする。

ボルツマンフラクション f_B(T) は、ある量子数の回転準位のエネルギーを持つ測定対象分子の全 NO 分子に対する割合であり、次式により求められる^[4]。

$$f_B(T) = \frac{h^2}{8 \pi^2 k T I} (2J+1) \exp \left(-J(J+1) \frac{h^2}{8 \pi^2 k T I} \right) \quad (4)$$

ここで、h はプランク定数、k はボルツマン定数、J は量子数、I は分子の慣性モーメントである。

また、濃度測定時の温度は、圧力データと気体の状態方程式

$$PV = mRT \quad (5)$$

により簡易的に求めた。

以上により、NO 濃度の分かっている基準ガスの蛍光強度と比較することにより、求める NO 濃度は次式により求まる。

$$N_0 = \left(\frac{f_B(T_C)}{f_B(T)} \right) \left(\frac{Q}{Q_C} \right) \left(\frac{N_C}{I_{FL,C}} \right) I_{FL} \quad (6)$$

ここで、N は NO 分子の数密度、C は基準ガスに関する数値である。

3. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。NO 分子を励起する光源として、Nd:YAG レーザ (Spectra-Physics 社製、PRO230) をポンプレーザとする OPO レーザ (Spectra-Physics 社製、MOPO-SL) を使用する。励起波長は 225.5 ~ 226.5nm を選択した。レーザー強度は 1.5 ~ 2mJ である。OPO レーザより燃焼室内に照射されると、レーザーの経路上にある NO 分子が励起され、蛍光を発する。この発せられた蛍光は強制冷却された CCD を持つイメージンテンシファイア搭載の CCD カメラ (ANDOR 社製、DU412-BV) によって撮影される。レーザーは 0.1sec の間隔で照射し続けており、レーザーが照射されると、トリガー信号としてパルスジェネレータ (BNC 社製 555Series) に送られる。そして、パルスジェネレータによって CCD カメラによる撮影が同期される。また、実験開始信号は PC2 により行われる。実験が開始されると、PC2 はレーザーからの信号待ち状態となり、レーザーからの信号を受けると、ソレノイドに信号を送り、急速圧縮機が作動する。CCD カメラにより撮影された画像は PC1 に、燃焼室内の圧力データは PC2 に取り込まれる。燃焼室形状は 30mm × 36mm の円柱形状である。燃料は n-ブタンを使用した。

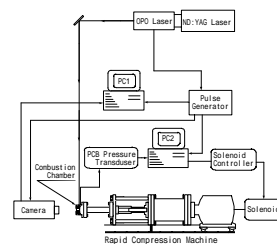


図 1 実験装置

3. 実験結果および考察

当量比 0.3, 圧縮比 15 の実験において, 励起波長を 226.1nm とし, LIF 法を用いて式(6)から求められた NO 濃度約 30ppm であった. 同様の条件で実験を行い, 燃焼後のガスをガスクロマトグラフにより NO 濃度を計測した結果, 10ppm 以下となった. LIF 法による計測は燃焼室内圧力が最大となる時点で行われているものの, LIF 法の計測結果は排出ガス中における NO 濃度に比べ非常に高い値を示している. この誤差の原因の一つとしては, 励起波長 226.1nm において, NO 以外の分子の蛍光, またはクエンチが考えられる. そのため 226.1nm よりも適した波長を選択することを試みた.

励起波長を 225.5 から 226.5nm の間で 0.1nm 間隔でスキャンさせ, Ar で希釈した当量比 0.3 の n-ブタン-酸素混合気を燃焼させた際に計測された蛍光強度を図 2(a)に示す. この場合, 混合気中に窒素が存在しないため NO は存在しないと考えられる. 計測された蛍光は主に酸素分子の蛍光であると予想されるが, 酸素分子以外の化学種が寄与している可能性も考えられる. また同様の混合気を N₂ で希釈し, 200ppm の NO を混合させた際の蛍光強度を図 2(b)に示す. 上述のように当量比 0.3 で HCCI 燃焼させた場合, NO 濃度は 10ppm 以下と微量であったため, NO からの蛍光を計測しやすいように予め混合気に NO を混合させた. これにより, HCCI 燃焼下において NO による蛍光が計測できると思われる. 図 2(a), (b)を比較すると, 励起波長が 225.5nm のとき蛍光強度は(a)が弱く, (b)が強いことが分かる. これは, 同波長では NO 以外の化学種からの蛍光の影響は小さく, かつ NO からの蛍光を高感度で検出することが可能であることを示している. このような観点から, 本実験の範囲内において NO 濃度計測に適した励起波長は 225.5nm であると考えられる.

励起波長を 225.5nm としたとき, 雰囲気圧力 6MPa の高圧下における NO 濃度と蛍光強度の関係を図 3 に示す. NO 分子以外の分子の濃度は一定であるため式(10)より, 蛍光強度は NO 濃度に比例するはずである. 同図より, 蛍光強度は NO 濃度に比例していることが確認された.

また, 励起波長 225.5nm において, 当量比 0.3 の混合気に NO を 0ppm, 100ppm, 200ppm 混合させ, 燃焼させた際の蛍光強度を図 4 に示す. 同図より NO 濃度が高くなるにつれて蛍光が強くなることがわかる.

以上より, 励起波長 225.5nm において, NO 濃度を計測することが可能であることを確認した.

当量比 0.3, 圧縮比 15 ~ 18 の条件で, 励起波長を 225.5nm としたとき, LIF 法により求められた NO 濃度を図 5 に示す.

圧縮比 15 における NO 濃度は 7.5[ppm]となり, 励起波長 226.1nm よりも誤差が小さくなることが確認できる.

5. 結論

本研究により, 以下の知見を得た.

- ・HCCI 燃焼下における LIF 法による NO 濃度計測には NO 以外の化学種からの蛍光が大きな影響を及ぼす.
- ・上記の影響が小さい励起波長として 225.5nm を選択し, NO 濃度計測の可能性が示唆された.

参考文献

1. 畦津圭介・中谷辰爾・津江光洋・河野通方・浦田泰弘, 第 42 回 燃 焼 シ ン ポ ジ ウ ム 講 演 論 文 集

pp.299-300(2004)

2. Eckbreth, A.C. Laser Diagnostics for Combustion, Temperature and Species Energy and Engineering Science Series Abacus Press, Cambridge, 1998

3. Paul, P.H., Carter, C.D., Gray, J.A., Durant, Jr., J.L., Thomas, J.W., and Furlnetto, M.R. (1995). Correlations for the NO A₂ Electronic Quenching Cross-section, Sandia National Laboratories Rept. SAND 94-8237

4. Reisel, J.R., Carter, C.D. and Laurendau, N.M., J.Q. Spectrosc. Radiat. Transf., 47(1992), 43-54

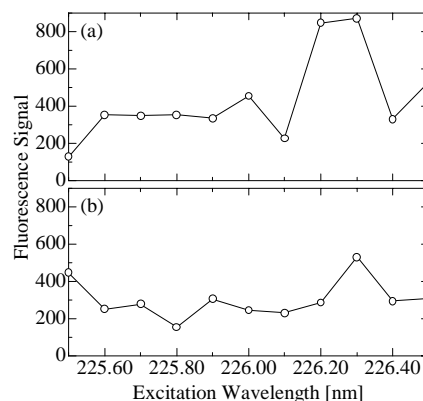


図 2 当量比 0.3 の混合気を燃焼させた際の各波長における蛍光強度(a)Ar 希釈(b)N₂ 希釈(NO200ppm)

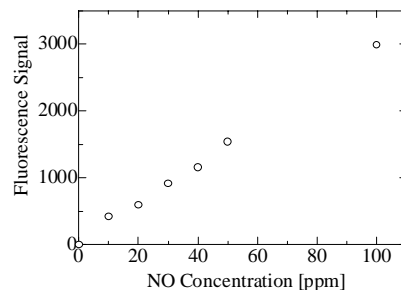


図 3 6MPa における NO 濃度と蛍光強度の関係

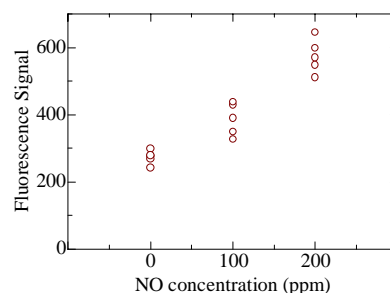


図 4 当量比 0.3 の混合気に NO を 0ppm, 100ppm, 200ppm 混合させ, 燃焼させた際の蛍光強度

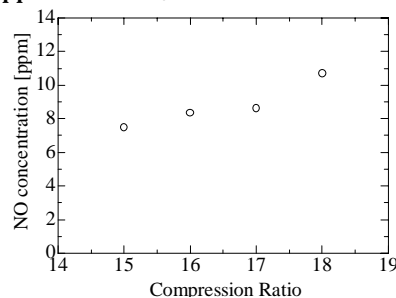


図 5 HCCI 燃焼中の圧縮比と NO の関係