

レーザー誘起ブレイクダウン分光法による 燃焼場の当量比計測に関する研究

日大生産工(院) ○高月 基博 日大生産工 今村 幸 日大生産工 秋濱 一弘

1 緒言

エンジン燃焼に伴う大気汚染物質の低減には温度、当量比等の燃焼状態の改善が不可欠である。ただし、エンジン内部は均一な燃焼場ではなく、その要所における局所的な当量比を求めることは、非常に重要である。そこで、当量比計測手法として燃焼場でも強い信号が得られるレーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) に着目した。

レーザー誘起ブレイクダウン (絶縁破壊) 分光法とは、原子発光分析法の一種である 1)。観測対象にレーザー光を集光すると、原子中の束縛電子は高いエネルギーを与えられ、励起状態を経た後、電離状態に至り、ブレイクダウン (絶縁破壊) を起こす。この際にプラズマが発生する。後に、自由電子が元の軌道に遷移する際、各元素が固有波長の光を発する。この光の波長及び発光強度を分光測定することで、対象の定性・定量分析を行うことができる。これを用いて、燃料由来の原子発光 (C, H) と空気由来の原子発光 (N, O) の強度比から、局所的な当量比の見積を行うことが可能であると考えられる。

本研究においては、過去に例のない輝炎を含む拡散燃焼場の LIBS スペクトル及び原子発光強度比の測定を行った。また、化学反応シミュレーションソフト「CHEMKIN-PRO」を用いて、測定点 (ブレイクダウンポイント) における当量比の理論計算を行った。これらを比較することで、燃焼場の当量比計測の可能性を検討した。

2 実験装置及び方法

2.1 LIBS実験概略

Fig.1 に LIBS 実験の概略図を示す。発振された YAG パルスレーザー (第二高調波 532nm, 周波数 10Hz) をレンズで集光し、火炎中にブレイクダウン (絶縁破壊) を起こしプラズマを発生させる。プラズマに含まれる原子発光を光ファイバーで分光器に送り、LIBS スペクトルの観測を行った。レーザー出力は 140 mJ/pulse, 分光器の積分時間 (露光時間) 1 ms,

平均回数を 30 回とした。

測定対象として対向流拡散火炎を用いた。バーナー上管より燃料 (プロパン) と空気、バーナー下管より空気のみを供給し、平面拡散火炎を形成させた。上管の燃料 : 空気の比率は任意に変更でき、種々の当量比条件を実現可能である。また、レーザー照射位置を上下方向に変えることによって、当量比の違いによる LIBS スペクトルの変化を観測した。

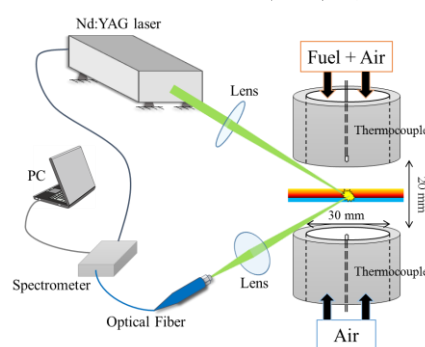


Fig.1 Schematic diagram of LIBS experimental setup

2.2 対向流拡散火炎の反応計算

対向流拡散火炎内の原子数比、当量比を CHEMKIN-PRO を用いて計算した。使用した反応機構は Wang ら 2) による KM2 モデルを気相反応とした。本モデルは 199 の化学種と 1351 の素反応から成り、 $C_1 \sim C_4$ の燃料を対象としている。計算条件として、ガス供給口の気体温度、体積 (流速) 増加分を加味している。

原子数比と当量比の算出法を以下に記述する。各化学種 i は、モル分率 n_i 、及び、化学種を構成する原子数 C_i, H_i, O_i (C_3H_8 の場合、 $C=3, H=8$) が決まっている。その場合、 $[C] : [H] : [O]$ の原子数比は、下式から求められる。

$$[C] : [H] : [O] = \left[\sum_{i=1}^{199} C_i n_i \right] : \left[\sum_{i=1}^{199} H_i n_i \right] : \left[\sum_{i=1}^{199} O_i n_i \right] \cdots (1)$$

また、プロパンが完全燃焼する際の反応式 $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ より、原子数比 $[C] : [O] = 3 : 10$ の時、

Study on Equivalence Ratio Measurement in a Flame
by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

Motohito TAKATSUKI, Osamu IMAMURA and Kazuhiro AKIHAMA

当量比 $\Phi=1$ となる。同様に, $[C]:[O]=6:10$ より $\Phi=2$, $[C]:[O]=9:10$ より $\Phi=3$ から, $\Phi=10[C]/3[O]$ の式が成り立ち, 当量比の換算が可能である。

3. 実験結果及び考察

3.1. 実験及び計算上の火炎位置の比較

Fig.2 に対向流拡散火炎中心部の直接写真 (90°回転) と, 計算結果の比較を示す。計算条件は, バーナー上管の燃料濃度 11%, 流速 9.54 cm/sec, ガス温度 593 K, バーナー下管の流速 8.64 cm/sec, ガス温度 537 K とした。また, 火炎画像は横軸と対応しており, 温度, 当量比と火炎の色の関係が分かる。図中の破線は, 計算上の温度最高点 (2312K) の位置を示しており, この際の当量比は 1.02, バーナー上管出口からの距離は 11.5mm である。火炎画像と比較した場合, 温度最高点が青炎上に存在し, 計算が概ね妥当であることが分かる。

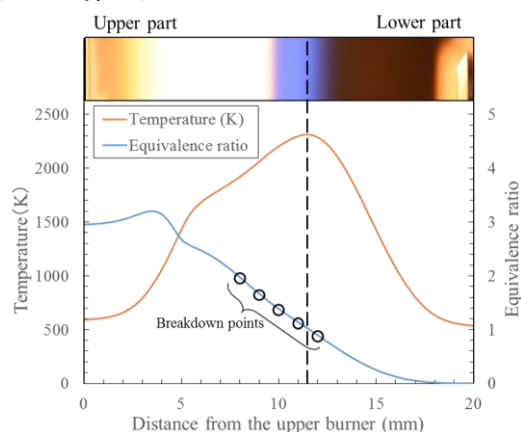


Fig.2 Comparison of the flame position between experimental images and calculated values (Fuel mixture ratio = 11%)

3.2. 当量比と強度比の相関性

Fig.3 に燃料濃度 11%, バーナー上管出口からの距離 8 ~ 12mm における LIBS スペクトルを示す。測定したスペクトルよりベースラインの差し引き後, 656nm の H 発光ピークを 1 として正規化している。これを見ると, 385nm の CN 発光及び 777nm の O 発光の感度が高い。しかし, CN 発光が関与する強度比はレーザー出力に依存すること³⁾から, O_{777nm}/H_{656nm} 強度比と当量比との相関を調査した。Fig.4 に CHEMKIN-PRO で得られた当量比と, O_{777nm}/H_{656nm} 強度比の関係を示す。バーナー上管供給ガスの燃料濃度として, 15%, 11%, 7% の場合を示す。全ての条件において当量比の増加と共に, 強度比の低下がみられ, 両者の間の相関が見られた。

ただし, 本研究においてはレーザービームと対向流バーナー本体との干渉により, Fig.2 に示したように測定位置が限られ, 計測した当量比範囲が 1~2 と

狭かった。また, 本実験ではバーナー上管より燃料と空気の混合気を供給しているため, 燃料濃度 15% 以下では当量比が最大でも 4 程度に限定される。今後はさらなる装置の改良と当量比条件拡大を行う。

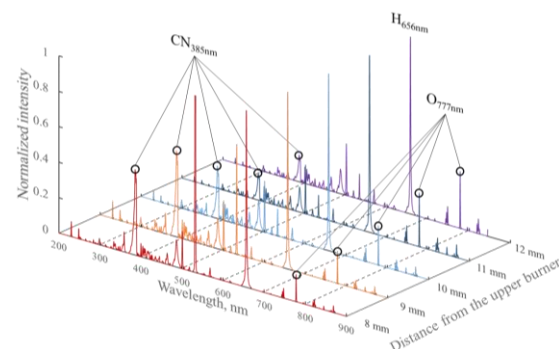


Fig.3 Normalized LIBS spectra measured in the counterflow diffusion flame (Fuel mixture ratio = 11%)

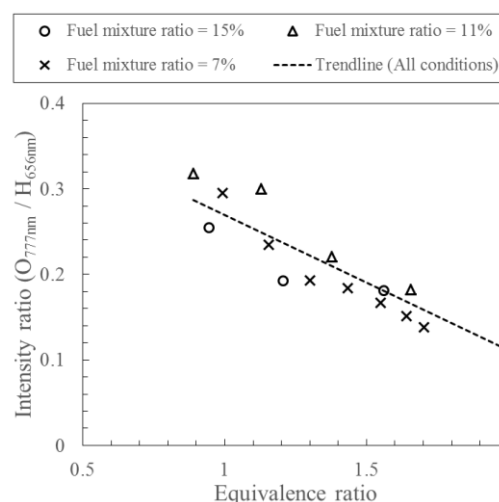


Fig.4 Correlation between measured O_{777nm}/H_{656nm} ratio and the equivalence ratio calculated by CHEMKIN-PRO

4 結言

本研究より, 以下の知見を得た。

- (1) 計算結果と火炎画像の比較より, CHEMKIN-PRO による当量比計算結果が概ね妥当と判断された。
- (2) 当量比と強度比の間に相関性が見られ, 燃焼場における当量比計測の可能性を示した。

「参考文献」

- 1) 河原伸幸 他, 非定常噴霧におけるレーザー誘起プラズマによる着火特性, 微粒化Vol.20, No.70 (2011), P.61-67,
- 2) Yu Wang et.al, Soot modeling of counterflow diffusion flames of ethylene-based binary mixture fuels, Combustion and Flame Vol.162 (2015), P.586-596,
- 3) Zhengjie Shi et.al, Local Equivalence Ratio Measurement in Opposed Jet Flames of Premixed and Non-Premixed Methane-Air Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics (2016)