レーザー誘起ブレイクダウン分光法による過濃燃焼場の局所当量比計測

日大生産工 今	;村	室
---------	----	---

1. 緒言

エンジンなどの燃焼廃棄物である粒子状物質 (PM) と窒素酸化物(NO_x)は、燃焼温度と当量比に強く依 存して生成されている1). これらの低減には、燃焼状態 の把握が必要不可欠であり, エンジン内部のような燃 料と空気の混合が不均一で短時間での変動がある燃焼 場の計測技術が求められる. そこで当量比計測手法と して非接触で高い分解能を有するレーザー誘起ブレイ クダウン分光法 (LIBS: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) に着目した. LIBSとは原子・分子発光分 析の一種である.測定対象にレーザー光を集光し,原 子中の束縛電子に高いエネルギーが与えられると励起 状態を経て、電離状態に至る. 電離により生成した自 由電子が周囲の原子と衝突して、自由電子が増加して ブレイクダウン(絶縁破壊)を起こす.この際にプラ ズマが発生し、レーザーエネルギーが途絶えると、自 由電子は元の軌道に遷移して、各原子・分子が固有波 長の光を発する. 燃焼場でブレイクダウンを起こし, プラズマ発光を分光測定することで、燃料由来と酸化 剤由来の発光の強度比から、局所的な原子数比(当量 比)を見積もる.

先行研究では、輝炎場で原子・分子発光強度比を測定し、数値計算で求めた当量比と良好な相関関係が得られることを初めて示し、H656 nm/O777 nm発光強度比はレーザーエネルギー依存性が小さいことも示された²⁾.本研究は、対向流バーナーを用いて、供給する全体流量とプロパン/空気予混合気の当量比を可変とし、様々な条件下で拡散火炎を形成し、当量比Φ=0-8までの希薄領域から過濃領域に渡って種々の条件でLIBS 計測を行い、H656 nm/O777 nm発光強度比と原子数比(当量比)の線形関係とそのロバスト性を確認した.



Fig.1 実験概略図

日大生産工(院) 〇小出 裕貴 大熊 康典 山﨑 博司 秋濱 一弘

2. 実験装置及び方法

2.1. LIBS実験概略図

Fig.1にLIBS実験の概略図を示す.Nd:YAGレーザー (第二高調波, 532 nm)をレンズで集光し, 対向流バ ーナー内で、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.この 生スペクトルは、すすの赤色発光やプラズマの連続発 光が原因で、バックグラウンドを含んでいる.これを 差し引く、ベースライン補正を行い、計75回のスペク トルを平均化して、1つのLIBSスペクトルを算出した. また、レーザーの入射エネルギーは100 mJ/pulseに固定 した. ディレイジェネレーター (Stanford Research Systems社製Model DG645)を用いて、レーザー発振周 波数を1 Hzに設定を行い、分光器の測定タイミングを 同期し,分光器の積分時間(露光時間)は1.0msとした. 測定対象とした対向流バーナーの上管にプロパンと空 気,下管には上管と等しい流量で空気のみを供給して, 上管の全体流量1-3 L/min, プロパン/空気の当量比を 可変とした9条件の拡散火炎を形成した.計測は対向流 バーナー位置を上下方向に変更し、上下管間隔20 mm に対して上管から5-15 mmの区間で1 mmずつ測定点 (ブレイクダウンポイント)を移動し、LIBSスペクト ルの変化を観測した.

また,熱電対で対向流バーナーの上下管のノズル出口 ガス温度の測定を行い,そのガス温度と流速,モル分 率を境界条件として用いCHEMKIN-PROの数値計算に より測定点(ブレイクダウンポイント)の原子数比(当 量比)を算出してLIBSスペクトルとの比較を行った.

2.2. 局所原子数比の方法算出

LIBSの発光強度比と比較のため,化学反応シミュレ ーションソフトCHEMKIN-PROのOpposed-flow flame モデルを用いて対向流拡散火炎中の[C]:[H]:[O] 原子数を計算した.使用した反応機構はWangら³によ るKM2モデルを気相反応とした.本モデルは202の化 学種と1351の素反応から成り立ち,計算条件として, ガス供給口の気体温度上昇による流速増加分を加味し ている.

プロパンが完全燃焼する際の反応式($C_{3}H_{8} + 5O_{2} \rightarrow 3CO_{2} + 4H_{2}O$)より、CとOあるいはHとOの原子数比からФを求めることができ、Ф(C/O) = 10 [C]/3 [O] とФ(H/O) = 10 [H]/8 [O]の式が成り立つ.この計算手法は数値計算の最高温度と実際の火炎の青炎部分が一致し、既報より正当性が実証されている².

Local Equivalence Ratio Measurement in Fuel Rich Combustion by Laser Induced Breakdown Spectroscopy

Hiroki KOIDE, Osamu IMAMURA, Yasunori OHKUMA, Hiroshi YAMASAKI and Kazuhiro AKIHAMA

結果及び考察

Fig.2は縦軸にLIBSスペクトルから面積計算で算出 したH656 nm/O777 nm発光強度比と横軸に数値計算でLIBS 発光強度比を測定した2原子から算出したΦ(H/O)を 示す.当量比Φ<8の広範囲であっても,燃料が濃い対向 流バーナーの上管付近ほど,H656 nm/O777 nm発光強度比 が増加する線形関係を示した.特に当量比Φ<2.4のH656 nm/O777 nm発光強度比のばらつきは小さく,燃焼計測に 適用できる可能性がある.しかし,当量比Φ>2.4にあた る対向流バーナー上管出口付近はばらつきが大きい.

Fig.3は数値計算で算出した拡散火炎9条件における 対向流バーナー位置と当量比Φ(H/O)の関係であり, Fig.2に対応してばらつきが小さい測定領域(当量比 Φ<2.4):area A, ばらつきが相対的に大きい領域(当量 比Φ>2.4):area Bも示してある. Area Aと比較してarea Bは当量比Φ(H/O)の変化が急峻であり,LIBS測定点 と理論計算の位置がわずかにずれていても当量比が大 きく変化することが分かる.一方area AはLIBS測定点 が多少変化しても,当量比の変化は小さい.このこと がFig.3においてarea Bのばらつきがarea Aより相対的 には大きくなった理由と考えられる.

Fig.4は数値計算で算出した Φ (H/O) と燃焼温度の比 較を示し, Fig.2でLIBS実験値のばらつきが大きいarea Bは当量比に対して燃焼温度が大きく異なった. だが Fig.2より既燃部からarea Bの未燃部にかけても良好な 線形性は概ね実証され,温度依存性も小さいことが示 された.しかし相対的にばらつきの大きかった当量比 $\Phi>2.4$ の過濃条件に関する校正に関しては,圧力容器を 用いた校正実験が有効であると考えられ,LIBSの温度 依存性が小さいことから,室温にてプロパンと空気の 予混合気(当量比 $\Phi=3-5$)のLIBSスペクトルを取得し, Fig.2との関係を調査する予定である.



Fig.2 H_{656 nm}/O_{777 nm}発光強度比と当量比Φ (H/O) の比較





Fig.4 当量比Φ(H/O)と燃焼温度の関係

4. 結言

本研究ではLIBSによる輝炎場の局所原子数比(当量 比)計測を行い,拡散火炎を形成して様々な燃焼条件 で調査した結果,H_{656 nm}/O_{777 nn}発光強度比は温度依存 性が小さく,当量比と良好な線形関係にあることが実 証された.さらに以下の知見を得た.

・H₆₅₆mn/O₇₇₇mn発光強度比は既燃部で,様々な燃焼条件 であってもばらつきが小さく,計測指標に適している. ・未燃部は相対的にばらつきが大きい.測定領域の当 量比変化が大きく,LIBS測定点の微小なずれが,ばら つきに起因した可能性がある.

参考文献

- Akihama, K.et al.,SAE technical paper, 2001-01-0655 (2001).
- 小出裕貴・岩田和也・今村宰・山崎博司・秋濱一 弘,第 56 回燃焼シンポジウム講演予稿集, E345(2018).
- Wang, Y., Raj, A. and Chung, S. H., Combust. Flame,162:586-596 (2015).