# レーザ誘起蛍光法の実用燃焼場への 応用技術開発

Application of Laser Induced Fluorescence to Practical Combustion Fields

技	術	本	部	出	П	祥	啓*1	野	田	松	平*2
				村	田	ΤĒ	義*3	曽	田	ΤĒ	浩*'
				稲	Ħ		満*5				

地球環境保全という社会的ニーズに対応し、燃焼器の高効率化、低公害化を行うためには、燃焼反応場の詳細な把握が必要で あり、そのためには正確な in-situ 計測技術が不可欠となっている。本研究では、レーザ誘起蛍光法を実用燃焼器へ応用するこ とを前提に、ガスタービン燃焼器、ディーゼルエンジンを模擬した液体燃焼噴霧場、微粉炭燃焼場において OH ラジカル、NO 分子を同法により計測した。実用燃焼場におけるレーザ誘起蛍光法の適用性を確認するとともに、瞬時二次元計測による乱流燃 焼構造の把握や NO 生成と OH ラジカルとの関係等、従来実用燃焼場では不可能であった計測が可能となることを示した。

Detailed measurement techniques are necessary to understand the reaction mechanism of combustion to cope with environmental conservation and improve the efficiency of combustors. In this study measurement techniques using LIF have been developed in the fields of gas, liquid, and solid fuel combusion to apply LIF to practical combustors such as gas turbine combustors, internal combusion engines and boilers. Two dimensional distributions of OH and NO were measured in a gas turbine combustor and liquid fuel burners, and in a pulverized coal combustor, and the applicability of LIF in these fields was demonstrated to analyze the turbulent combustion characteristics and NO formation process in practical combustors.

## 1.まえがき

ディーゼルエンジンやガスタービン等の燃焼技術分野では、燃 焼効率の向上に加えて、低公害化が急務の課題となっている.従 来,空気-燃料混合形態を変化させて改善を図っていたが、より 一層の高効率、低公害化を行うためには、燃焼器内の局所的及び 時間的燃焼状態や NO 生成等、燃焼反応過程に立入った計測技 術の開発及びそれを踏まえた対策が重要であり、実用燃焼器に適 用可能な非接触かつ三次元性を有する計測法の開発が望まれてい る.

レーザ誘起蛍光法(LIF: Laser Induced Fluorescence)は、 ppm オーダ以下の計測も十分可能な超高感度計測手法であり、 瞬時二次元分布計測ができるため、従来の一点計測では困難であ った測定場全体の把握が可能である。近年、乱流火炎<sup>(1)</sup>やガソリ ンエンジン<sup>(2)</sup>への応用がなされてきているが、微粉炭(固体)燃 焼場やディーゼルエンジン(高圧液体噴霧)燃焼場等、実用燃焼 場への適用にはいまだ多くの課題が残されている。本研究では、 LIFを実用燃焼器へ応用することを前提に、ガスタービン燃焼器、 ディーゼルエンジンを模擬した液体燃焼噴霧場、微粉炭燃焼場に おいて燃焼反応推進、サーマル NO 生成等に関連が深い OH ラ ジカル、環境汚染問題に直接関係する NO 分子を計測し、瞬時 二次元計測による乱流燃焼構造の把握や NO 生成と OH ラジカ ルとの関係等、実用燃焼場における本計測技術の有効性を示す。

# 2. LIF の実用燃焼場への応用課題と対策

LIFを用いた計測では、蛍光強度がクエンチング現象に依存す るため<sup>(3)</sup>、定量的計測を行うためには、飽和蛍光法<sup>(1)(4)</sup>、前期解 離蛍光法<sup>(5)(6)</sup>、時間分解蛍光法<sup>(7)</sup>等の手法を使用する必要があり、

\*3長崎研究所応用物理研究室長

ブンゼンバーナにおける定量的計測が行われている<sup>(8)</sup>.しかるに, LIF をガスタービン,エンジン等の実用燃焼器に適用する場合に は,上記クエンチングの問題のほかにレーザ光の散乱及び吸収, 燃焼場に存在する芳香系炭化水素やすす等から発生するバック グラウンド蛍光(BG 蛍光)等が存在する.そのため,LIFの適 用自体が困難となり,各種燃焼場における上記現象の特性把握及 びその除去技術が重要な課題となる.本研究では,後者の課題解 決を目標にした.従来考慮されていなかったBG 蛍光の対策とし て,BG 蛍光のレーザ波長依存性が小さいことを利用し,計測分 子に対し共鳴及び非共鳴レーザ光を用いたBG 蛍光除去技術を実 用燃焼場に適用した.また,各燃焼場に適した励起波長,蛍光検 出波長等の最適化を図った.なお,当社では前記の各種手法を組 込み,さらにレーザ波長自動設定機能等を持たせた燃焼・プラズ マ解析装置を製品化している.

## 3. ガスタービン燃焼器への応用

## 3.1 ガスタービン燃焼器計測装置

ガスタービン燃焼器計測部を図1に示す. 燃焼器は8個のメイ ンバーナ(予混合バーナ)及びパイロットバーナ(拡散バーナ) から形成されている.20個の燃焼器を組合せ1.6 MPaにて160 MWの出力を発生できる.本研究では,実機燃焼器内筒を石英 ガラスで延長し,燃焼器ノズル下流での大気圧燃焼状況が観察で きる構造とした.LIF計測にはYAGレーザ励起色素レーザを使 用した.シート状レーザ光はガスタービン燃焼器下部より測定場 に集光され,測定場からの蛍光はI.I.付きCCDカメラを用いて 検知される.一計測領域は50×60 mmとし,300×350 mmの OH, NO分布を求めた.

<sup>\*1</sup> 長崎研究所応用物理研究室 工博 \*4 長崎研究所技師長

<sup>\*2</sup>長崎研究所応用物理研究室主務 \*5高砂研究所燃焼、伝熱研究室



Optical setup for gas turbine combustor





OH instantaneous distribution inside gas turbine combustor

#### 3.2 ガスタービン燃焼器計測結果

OH 計測では(1,0) バンド  $P_1$ (6) 吸収線(284.458 nm)を, NO 計測では(0,0) バンド  $Q_1$ (18) 吸収線(225.786 nm)を 使用し,OH では305~340 nm,Noでは240~300 nmの蛍光を 観測した.共鳴波長から0.05 nm ずらした非共鳴レーザ光を用 いて,BG 蛍光を除去した.図2に火炎の直接写真及びOH, NOの時間平均分布を示す.OH ラジカルは主にパイロットバー ナ火炎とメインバーナ予混合気の接触部で高濃度に形成され,バ ーナ端からの距離Xが増加するにつれ存在領域は燃焼器内部全体 に広がっていく.NO はパイロットバーナ出口部で高濃度に存在 し,バーナ端からの距離Xの増加に伴いNO 蛍光強度も徐々に 低下していく.また,主に燃焼器中心軸周辺にNO が存在して いることが分かる.メインバーナ部からの顕著なNO 生成は認 められなかった.NO 低減には局所的NO 生成を低下させること が必要と考えられ,パイロットバーナでの保炎機能を保ちつつ燃 焼状態を均一化させることが有効であろう.

図3にOHの瞬時分布を示す.パイロットバーナ部の火炎は 激しい乱流構造を有しており,局所的に高濃度のOHが生成さ れていることが分かる.乱流火炎構造はバーナ端からの距離が増 加しても観測されており,しわ状の火炎構造がめいりょうに観察 されている.

## 4. 液体燃焼場への応用

## 4.1 液体燃烧場計測装置

本研究では常圧及び高圧噴霧燃焼器を使用した.燃焼器には4 方向に石英窓を有しており、燃焼器上部からレーザ光を入射し、 側面から蛍光を観察する.常圧燃焼器では液体燃料としてイソオ クタンを使用した.液体燃料はノズル部の噴霧器により霧化され、 電熱線により着火される.高圧噴霧燃焼器はディーゼルエンジン を模擬したものであり、液体燃料として自己着火性を有するイソ オクタン 50%とテトラデカン 50%の混合燃料を使用した.水素 26%-酸素 47%-窒素 27%の混合気体を点火プラグにて着火し、 燃焼器内に高温、高圧の燃焼ガスを生成させる.この高温、高圧 ガス中に液体燃料を噴霧し、高圧液体燃料燃焼場を形成した.

#### 4.2 常圧液体燃焼場計測結果

計測にはOHの(1,0) バンドQ<sub>1</sub>(8)吸収線(283.553 nm)を使用し、305~340 nmの蛍光を観察した.図4に常圧液 体燃焼場における火炎写真及びOH計測結果を示す.火炎長は





200 mm であり、安定な火炎が形成されている。BG 蛍光として は液滴からの蛍光が主であった. 図中に2枚の異なった時間に計 測した OH 分布を示しているが、計測ごとに火炎形状は変化し ており、しわ状の火炎帯等の乱流燃焼における特性がよく観察さ れている.

## 4.3 高圧液体燃焼場計測結果

図5に高圧液体噴霧燃焼場における圧力波形,OH 蛍光強度分 布,火炎発光分布を示す。主に火炎発光部で BG 蛍光が発生する ため、その除去を行った、液体燃料燃焼により、点火プラグの点 火後 40~100 ms に圧力上昇が観測されている。OH は主に火炎 発光部外側で計測されており、OH 形状は乱流構造を示している. 火炎発光部下方では OH 蛍光強度が上方に比べ弱くなっている が、これは液体燃料等によりレーザ光が吸収されているものと考 えられる.

## 5. 微粉炭燃焼場への応用

## 5.1 微粉炭燃烧場計測装置

本研究では微粉炭としてモーラ炭を使用した. 微粉炭はフィー ダにて一定に主流に供給され、インジェクタにより主流に均一に 微粉炭を混入させた後、内径6mmのテフロン管を用いて空気 (9 1/min) で搬送される. 微粉炭供給量はフィーダの回転数によ リ0~0.028g/sの範囲でコントロールされる. 微粉炭供給後, 主流にはメタン(1.5 l/min)及び酸素(0.85 l/min)を添加し,



内径6mm ブンゼン型バーナに火炎を形成した.

#### 5.2 微粉炭燃焼場計測結果

OH 計測では(1,0) バンドQ<sub>1</sub>(8) 吸収線(283.553 nm)を, NO計測では(0,0)バンドR<sub>1</sub>(27)吸収線(224.649 nm)を 使用した。本研究で用いた火炎では、微粉炭粒子やすす等による レーザ光の減衰は最大5%であり問題とならないが、より広い領 域を計測する場合には十分な注意が必要である。図6に火炎の直 接写真, OH, NO 計測結果を示す. 微粉炭燃焼場では r=2~5 mm で OH 蛍光強度は低下している. これは微粉炭燃焼に伴い r=2~5mm でのOH が消費されるためであり、酸素濃度が十 分にある外炎部では OH 濃度の低下は観察されない。 微粉炭な しの場合には火炎面は常に一定となり、層流火炎を形成している. 一方、微粉炭を燃焼させると微粉炭粒子の燃焼により、火炎面に 乱れが生じている。

NO 計測では内炎部で強い BG 蛍光の影響を受けるため、計測

三菱重工技報 Vol. 32 No. 2 (1995-3)



36 微粉炭燃焼場における OH, NO 分布計測結果 微粉炭量の増加と共に, OH は減少し NO は増加している. OH and NO distribution in pulverized coal combustion field

領域を245~255 nm とし BG 蛍光の低減を図るとともに、その 除去を行った。OH とは異なり NO では微粉炭量燃焼場でr= 3~10 mm の NO 蛍光強度が増加している。これは、微粉炭燃焼 による温度上昇及び微粉炭中に含まれる窒素分による影響である と考えられる。

# 6.まとめ

BG 蛍光除去及び励起波長,蛍光検出波長等の最適化を行うこ とにより,ガスタービン燃焼器,ディーゼルエンジンを模擬した 液体燃焼噴霧場,微粉炭燃焼場において,OH ラジカル,NO分 子が計測可能となった.本技術を用いることにより,瞬時二次元 計測による乱流燃焼構造やNO生成とOH ラジカルとの関係の 把握が可能となり,従来解析が困難であった各種燃焼場の反応機 構,公害物質生成機構等の解明に対して有力なツールとなる.今 後,各種定量化手法と組合せて本手法を実用燃焼器へ適用し,燃 焼器内の燃焼解析に活用していく.

## 参考文献

- (1) 出口ほか, 機械学会論文集 (B 編) 60-577 (1994) p.216
- (2) Andresen, P. et al., Applied Optics Vol. 29 No. 16 (1990)
  p.2 392
- (3) 出口ほか, 第 31 回燃焼シンポジウム前刷集(1993) p.428
- (4) 出口,博士論文,豊橋技術科学大学(1990)
- (5) Lucht, R. P., Ph. D. Thesis, Purdue University, (1981)
- (6) Andresen, P. et al., Applied Optics Vol. 27 No. 2 (1988) p.365
- (7) 野田ほか, 三菱重工技報 Vol. 30, No. 2 (1993) p.129
- (8) Cattolica, R. J. et al., Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, (1988) p.1 165