

# 燃焼のレーザ応用二次元複合計測技術 の開発とその応用

特集 プロジェクト研究

高城 敏美\*

## Development of 2-D Laser Diagnostics of Combustion and its Application

Key Words : 2-D Laser Diagnostics, Combustion Research, Gas Turbine Combustor

### 1. はじめに

現在、一次エネルギー源の約85%が化石燃料の燃焼によっており、2010年でもその比率は75%と予想されている。好むと好まざるにかかわらず、今後も相当長期間、莫大な燃料を消費し続けることになろう。このとき、化石燃料(石炭、石油、天然ガス)の埋蔵量の有限性から、燃料消費量低減のための燃焼技術とエネルギー有効利用に関する研究が最重要課題であり、また、地球環境、局地環境保全のために燃焼に伴う環境汚染物質排出低減のための燃焼技術の進展が要請されている。本研究プロジェクトは、燃焼技術の基礎になる火炎構造研究のためのレーザ応用計測技術の開発とその応用に関するものである。

### 2. プロジェクトの目標

燃焼は化学種の拡散、混合、反応、発熱および熱移動が並列に生じる複雑現象である。比較的高速の燃料および酸化剤の流れは乱流となり、火炎内の流速、温度、化学種濃度が空間的に不均質で、時々刻々変化する。このような火炎はガスタービン燃焼器、ボイラ、内燃機関などの工業用燃焼器で生じ、実験室でも基本的に類似の火炎を容易に構成できる。火炎内のスカラー量(温度、化学種濃度)と流速の変動

が流体の巻き込み現象や乱流輸送流速を支配し、また、流速の変動と化学反応の相互干渉により火炎構造の変化や消炎を誘起する。このような火炎の内部構造を明らかにするためには、流速、温度、化学種濃度の瞬時、2次元同時測定が肝要である。本プロジェクトの第一の目的はこれを実行することである。火炎内の温度分布を2次的に瞬時に検出することは、YAGパルスレーザ光をシート状にして火炎内に導入し、高感度光検出素子を持つCCDカメラによって、レーザ散乱光の強度分布を検出することによって行う。このことは、プロジェクト開始前から可能になっていた。本プロジェクトでは、この温度の二次元瞬時計測を、ダブルパルスYAGレーザを用い、短い時間間隔で2画面計測し、温度むらの画像の移動を相関をとることによって求め、流速ベクトルの二次元分布を得る方法を新たに提案し、温度と流速の二次元同時測定を可能とする。さらに、燃焼で重要な活性化学種であるOHなどの濃度を色素レーザ誘起蛍光により二次元瞬時検出し、それらを合わせて、標記研究の一つの目的を達成しようとする。第二の目的は、それらの計測手法を応用して、乱流拡散火炎およびその素過程である基礎的の火炎について、計測を行い、数値解析を援用しながら、乱流火炎の微視的構造を解明することである。第三の目的はガスタービン燃焼器の特性を支配する燃料と酸化剤の混合特性を、レーザ誘起蛍光を用いて二次元的に計測し、ガスタービン燃焼器の最適設計の指針を得ることである。

### 3. 研究計画と組織

本プロジェクトはNEDOの独創的産業技術研究開発促進事業のエネルギー・環境技術領域で採択されたもので、平成8~10年の3年間で実施する。



\*Toshimi TAKAGI  
1941年2月1日生  
1968年大阪大学大学院博士後期課程  
機械工学専攻修了  
現在、大阪大学大学院・工学研究科・  
機械物理学専攻、教授、工学博士、  
熱工学、燃焼、輸送現象論  
TEL 06-6879-7311  
FAX 06-6879-7313  
E-Mail takagi@mech.eng.osaka-  
u.ac.jp

研究組織は筆者を総括代表者とし、筆者の研究室の教官(岡本達幸助教授, 小宮山正治講師, 木下進一助手)ならびに川崎重工業技術研究所の森建二副所長, 竹村正熱技術研究部部長, 藤井健一課長, 浜辺謙二, 廣川雅俊両グループ長, 柏原宏行研究員である。筆者の研究室の博士後期課程大学院生の宮藤章君および吉田憲司君(いずれも学術振興会特別研究員)は研究遂行の強力な協力者である。大学側では上記の第一および第二の目的, 同研究所では第三の目的を達成するための研究開発を実施する。

#### 4. 研究開発内容

##### 4.1 温度, 濃度および流速の二次元同時測定法と乱流火炎の測定

図1に構成した測定装置の概略図を示す。二次元温度測定にはレーザシートを用いたレーリ散乱法を用いる。圧力と有効散乱断面積が一定の条件では気体の温度はレーリ散乱光強度に反比例するので, レーリ散乱光強度の瞬時二次元画像を検出することによって, 瞬時二次元温度分布を求めることができる。レーリ散乱による二次元速度測定は, 微小時間間隔で2回のパルス光を発振するNd:YAGレーザの第2高調波532nm (300mJ/pulse)を用い, 本プロジェクトで提案したレーリ散乱画像流速測定法(RIV: Rayleigh Scattering Image Velocimetry)による。2回のパルス光を発振するダブルパルスNd:YAGレーザと2台のCCDカメラを用いて, 微小時間差 $\tau$ で2枚のレーリ散乱強度画像を得る。小領域画像の相互相関関数を計算し, その最大値をとる空間的位置から小領域の移動距離と方向を求め, 流体の速度ベクトルを求める。この方法(RIV法)は従来流体に混入した粒子の動きから流速を測定するPIV法と異なり, 粒子の混入が不要であること, 粒子の混入がないため, 粒子からのミー散乱と同波長のレーリ散乱を温度測定に用い, 温度と速度の同時測定が可能となる。

一方, 濃度の測定として, 燃焼反応に重要なOHラジカルをレーザ誘起蛍光(LIF)により測定する。Nd:YAGレーザ励起の色素レーザと高調波発生器により, (1, 0)振動バンドのP2(7)吸収線, 285.43nmに調光されたパルス光(10mJ/pulse)を用いる。一般に, 火炎のレーザ誘起蛍光測定には燃焼場における温度と成分濃度による衝突失活および基底準位に存在するOH分子の分率の変化が主にその蛍光強

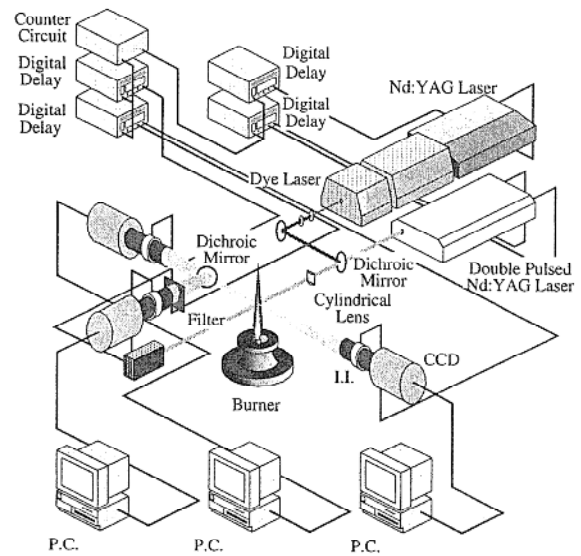


図1 温度, 流速およびOH濃度の二次元瞬時同時測定の光学系

度に影響を与える。そのため, 層流対向流拡散火炎の数値計算を本研究と同じ燃料の火炎に適用した結果と温度の依存性を考慮したOHと他分子との衝突失活断面積に基づき, ガス成分の衝突失活速度を考慮してレーザ誘起蛍光強度とOH数密度の関係を求めた。その結果, OH誘起蛍光強度とOH数密度がほぼ比例することからOH誘起蛍光強度からOH濃度への変換を行った。

レーリ散乱用およびLIF用のそれぞれのパルス光を2枚のダイクロイックミラーとシリンドリカルレンズ( $f = 700\text{ mm}$ )により測定体積部に厚さ0.2mmのシート光を形成する。測定対象からの微小時間差をもつレーリ散乱光およびレーザ誘起蛍光を入射光に対して直角方向から, 可視光を透過して紫外光を反射するダイクロイックミラーと可視光用カメラレンズ( $f1.2$ )および紫外光用カメラレンズ( $f3.5$ )を用いてそれぞれ集光する。レーリ散乱強度測定には対向する位置に置かれた2台のCCDカメラを用い, OH誘起蛍光強度測定には1台のCCDカメラを2台目のレーリ散乱受光用カメラに直交する位置に配置して用いた。また, OH誘起蛍光から色素レーザによるレーリ散乱光を取り除くために蛍光測定用のCCDカメラの前面にはハイパスフィルタを装着している。4台のデジタルディレイとカウンタ回路により2回のレーリ散乱光と1回のレーザ誘起蛍光および3台のCCDカメラに装着したイメージ・インテンシファイアのゲート時間とを同期させ, 光強

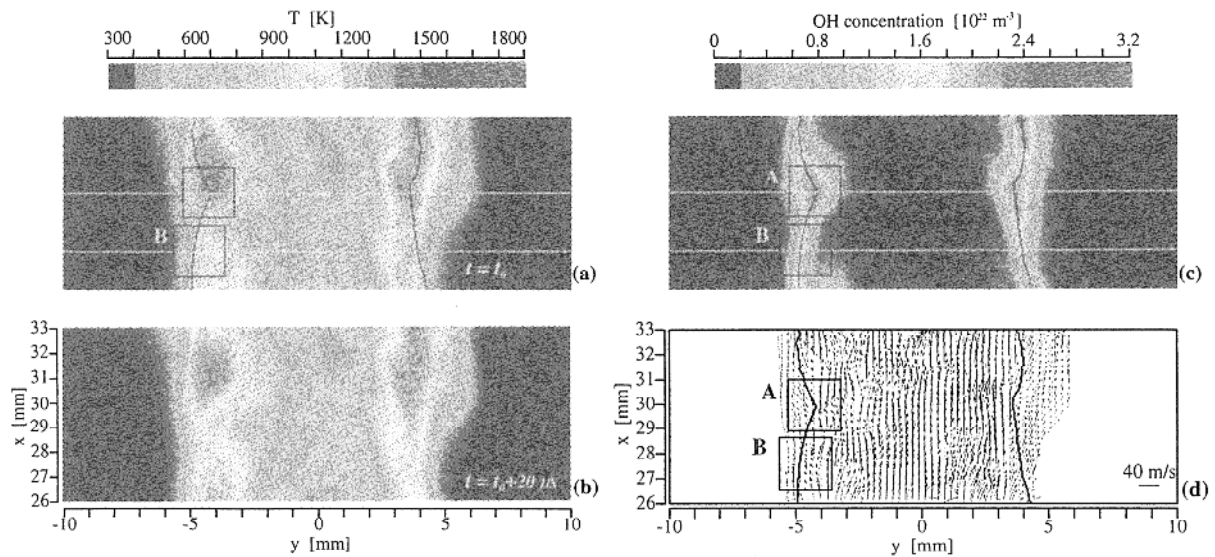


図2 乱流拡散火炎内の温度(a), (b), OH濃度(c)および流速ベクトル(d)の二次元同時測定例

度増幅後二次元的に各々のCCDカメラで別々に検知する。測定領域は約20mm(レーザの光軸方向)×7mm(鉛直方向)(CCDカメラ上では390×133素子に対応する)の範囲である。測定対象とした火炎は円管ノズルから周囲空気流中にガス燃料を噴出させる同軸流拡散火炎である。燃焼ガスの散乱断面積が空気と大きく変わらないように体積混合割合がH<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>が30%と70%の混合気を燃料としている。

図2は測定対象とした乱流拡散火炎の瞬時同時二次元温度(図(a), (b)), OH濃度(図(c))および速度ベクトル(図(d))の分布の例を示す。図(b)は図(a)の20μs後の温度分布を示す。ここでは、xはノズル出口からの軸方向距離を、yはノズル中心軸からの半径方向距離をそれぞれ表す。図(a), (c), (d)中の実線は各断面における半径方向OH濃度の最高値を結んで求めた火炎面(反応帯)を表す。瞬時二次元速度ベクトル(図(d))は2枚の瞬時二次元レーリ散乱強度分布(図(a), (b))からレーリ散乱画像流速測定法(RIV)に基づき算出し、また、OH濃度はレーザ誘起蛍光により測定したものである。

これらの測定によって、流速、温度、濃度の二次元同時分布が得られるので、流速の二次元分布から各場所の渦度、せん断ひずみ速度、膨張速度、火炎伸張率中の歪速度テンソルなどを算出でき、温度とOH濃度分布との対応など、従来検討されていない流れと火炎の干渉効果が乱流火炎内で直接検討できる特徴がある。得られた知見を列挙すると次の通り

である。

- (1) 乱流拡散火炎をミクロに見れば歪を受けた層流火炎と類似した火炎片(層流火炎片)が連続した領域と乱れが大きい下流部では火炎塊の集合した領域がある。
- (2) 層流火炎片が流速変動により強い伸張を受けると反応領域(OH濃度の極大値の領域)の温度およびOH濃度の低下を引き起こし、局所的に消炎がおこる。火炎片が中心軸方向内向きに傾斜するとき強い正の伸張を受け易く、そのような火炎片が局所消炎を起こし易い。
- (3) 流速が増すと伸張率の大きさも増し、反応帯での温度も下がる傾向となり、局所消炎がおこる領域が増えてくる。
- (4) 伸張率が負となる(圧縮される)領域があり、温度は下がり難い傾向がある。
- (5) 温度とOH濃度の分布は層流火炎片と考えられる領域でも層流火炎におけるものとの対応関係が異なり、火炎構造は層流火炎の構造から予測できない特性がある。下流では層流火炎片とは考え難い火炎塊の集合でその火炎構造も層流火炎の構造と著しく異なり、層流火炎片モデルの適用ができないことが示唆される。

#### 4.2 乱流火炎の素過程の解析

乱流火炎場では、燃料と酸化剤のミクロな混合部に火炎が形成され、流速の乱れにより、火炎が伸張や圧縮を受け、また、火炎が歪を受け、正または負

の曲率を持つ。これらの火炎構造への影響を明らかにするため、火炎の状態の制御が可能な対向流拡散火炎に別の燃料または酸化剤の噴流を衝突させることにより局所的な定常または非定常の歪を付加することのできる火炎を提案し構成した。その火炎構造および消炎特性をレーザ誘起レーリ散乱による二次元瞬時温度計測を行い実験的に調べるとともに、数値計算により解析した。数値解析は素反応動力学と厳密な多成分拡散を考慮したもので、モデルを用いない直接数値解析である。

平面火炎に空気側より空気のマイクロ噴流を衝突させたときの温度の二次元分布を実験および数値計算により求め比較した。火炎がマイクロ噴流の衝突により、伸張を受け、局所的に消炎が生じること、しかし、時間が経過すれば再着火が生じることなどが実験で明らかとなり、数値解析によってもかなり良く予測できることが示された。実験と解析を伸張率、火炎の曲率の異なる火炎で行い、また定常と非定常でも行い、それらの影響を調べ、次の結果を得ている。

- (1) 実験で観測される火炎挙動は直接数値解析によりかなりよく予測できる。このため火炎内で生じている現象を解析から詳細に分析することができる。
- (2) 正の伸張率が増すと火炎の温度が下がり、消炎に至る。
- (3) 同一の燃料と酸化剤でも火炎の曲率の正負によって火炎温度が著しく異なる。このため、消炎限界も異なる。この差異は火炎の曲率と成分(水素)の選択拡散の様式により生じる。
- (4) 火炎に酸化剤または燃料のマイクロ噴流を衝突させた場合に、消炎の後再着火する場合としない場合がある。この原因も火炎曲率と水素の選択拡散の様式に起因する。
- (5) 定常の火炎では火炎の伸張率と火炎温度は単調な関係があるが、非定常火炎では定常火炎では消炎するよりもはるかに大きい伸張率でも火炎が存在し得る。
- (6) 伸張率と温度の関係は一義的には決まらず、火炎曲率と非定常性によって大幅に影響を受ける。
- (7) これらの選択拡散と火炎曲率の相互影響および非定常性の特性は従来ほとんど指摘されていなかったものである。

#### 4.3 ガスタービン燃焼器用バーナにおける燃料/空気混合計測へのレーザ誘起蛍光の応用

ガスタービンは発電用コンバインドプラントやコージェネレーションシステムのトッピングに利用され、総合熱効率の向上に大きい役割を果たしてきたが、さらなる高性能化と窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )排出量の低減が要請されている。このためには、燃焼器内における現象の解明が不可欠であり、特にバーナ部における燃料(メタン)/空気混合状態の把握が重要である。本研究では、バーナ出口近傍における燃料/空気の二次元濃度計測システムを研究開発するとともに、そのシステムを用いてバーナの様々なパラメータが及ぼす燃料/空気混合状態への影響を解明しようとする。このため、高空間分解能・高時間分解能を持ち、また計測場を乱すことがなく二次元計測ができるレーザ誘起蛍光計測法(LIF)を用いた計測システムを構築し適用する。本研究においては燃料であるメタン中にトレーサとしてアセトンを選択し、シードシステムも合わせて構築した。ガスタービンモデル燃焼器のバーナ部においては、スワラーにより空気に旋回がかけられ、そこにシード剤が添加されたメタンが燃料ノズルから噴射され空気と混合される。光学系は、光源にはKrFエキシマレーザの248nmの光が用いられる。シリンドリカルレンズによりシート光となるように整形された光はバーナ部の横断面を切る方向に照射される。シードシステムにより燃料中にシードされたアセトン蒸気は、レーザ光により励起され、それらの濃度すなわち燃料濃度に比例した蛍光を出す。これらの蛍光は、イメージンシファイヤ付きCCDカメラにより計測する。また、光学フィルタを用いてミー散乱ならびにレーリ散乱等のノイズを抑制した。実験の結果から、バーナ出口における燃料/空気の混合状態は旋回空気流における燃料ノズルからのガス噴出速度の違いによる貫通力の変化がおおきく影響することを示している。

#### 5. 今後の展開

- (1) 新たに提案した粒子を混入せずに流速の二次元分布を瞬時に測定できるRIV法(Rayleigh Scattering Image Velocimetry)を拡張したスカラー量の移動画像による流速の二次元分布測定法の適用範囲とその精度の検証を行い、その計測手法の確立を行う。

- (2) 流速変動が制御可能な拡散火炎を構成し、開発した温度・速度ベクトル・OH濃度(CH, NO, その他化学種濃度を含む)の二次元同時測定法と数値解析を援用し、乱流火炎の素過程を解明する。
- (3) 広範囲の乱流火炎に(1), (2)の計測法を適用し、乱流火炎のマイクロ構造を明らかにするとともに、乱流火炎の数値予測手法の基礎を構築する。
- (4) ガスタービン燃焼器内の流動, 混合および燃焼に及ぼす各種パラメータの影響を明らかにし、高性能燃焼器の設計指針を得る。

#### 文 献

- (1) M.Komiyama, A.Miyafuji, & T.Takagi, Flamelet Behavior in a Turbulent Diffusion Flame Measured by Rayleigh Scattering Image Velocimetry, 26th Symposium (International) on Combustion, (1997), pp.339-346.
- (2) T. Takagi, Y. Yoshikawa, K. Yoshida, M.Komiyama & S.Kinoshita, Studies on Strained Non-Premixed Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, *ibid*, (1997), pp.1103-1110.
- (3) K.Yoshida & T.Takagi, Transient Local Extinction and Reignition Behavior of Diffusion Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, 27th Symposium (International) on Combustion, Colorado, USA (1998-8) (to be published).
- (4) M.Komiyama, A.Miyafuji & T.Takagi, Investigation of Local Behavior in a Turbulent Diffusion Flame by Rayleigh Scattering Image Velocimetry and OH Laser Induced Fluorescence (submitted).
- (5) T.Takagi, M.Komiyama & A.Miyafuji, Structural Studies of Combustion by Use of Laser-Aided 2-D Flame Visualization, International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal and Combustion Flow, (1998-12) (Plenary Lecture).