

機関番号：14401  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360097  
 研究課題名（和文） 乱流予混合火炎におけるスカラー画像相関計測法の開発と火炎安定性への応用  
 研究課題名（英文） Development of Scalar Imaging Correlation Measurement in Turbulent Premixed Flame and its Application to Flame Stability  
 研究代表者  
 小宮山 正治 (KOMIYAMA MASA HARU)  
 大阪大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：40178372

## 研究成果の概要（和文）：

本研究ではアセトン-LIF とレーリー散乱を組み合わせて2次元上での燃料と空気の混合挙動および温度分布を瞬時同時に計測する測定法を開発した。この測定法を層流予混合火炎の温度と濃度分布の同時計測に適用し、1次元予混合火炎の計算結果に基づき、温度と濃度分布計測の適用性を明らかにした。さらに、本測定法を希薄予混合火炎に適用し、燃料濃度分布の不均一性と火炎安定性の関連性を明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

In this study, we present an instantaneous and simultaneous measurement of 2-D mixing behavior and temperature distributions by combining acetone LIF and Rayleigh scattering. We examined air-fuel mixing characteristics in an unburned region where is adjacent to a reaction zone by laser induced fluorescence. Acetone vapor, which fluoresces by UV laser light, was used as a tracer. The CH<sub>4</sub> concentration was estimated from the acetone concentration, which was obtained by acetone LIF intensity. The mixing behavior has been evaluated by measuring CH<sub>4</sub> concentration distributions. It was clarified the suitability of the measurement technique based on the simultaneous measurement and simulation results in a laminar premixed flame. Relationship between inhomogeneous fuel distributions and flame base stability was clarified by simultaneous measurement results in lean premixed flame.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：レーザー計測, 燃焼, 温度, 成分濃度, 安定性

## 1. 研究開始当初の背景

現在、環境適合・窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）低減の観点から希薄予混合火炎が工業用燃焼器に利用される場合が増加している。特に、ガスタービンのさらなる高効率化にはタービ

ン入口温度の上昇、つまりガスタービン燃焼器における燃焼温度の高温化が最も有効であるが、同時に NO<sub>x</sub> の排出量増加にも関連することになる。これを解決する有効な方法として、希薄予混合燃焼を利用することがあ

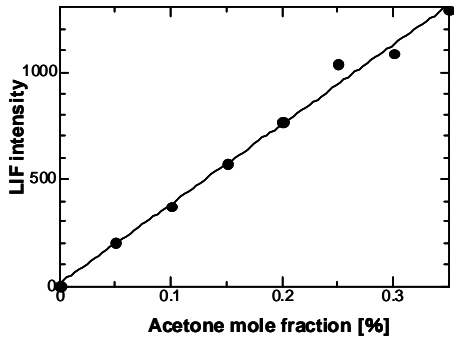


Fig.1 Relationship between acetone mole fraction and LIF intensity at room temperature and atmospheric pressure.

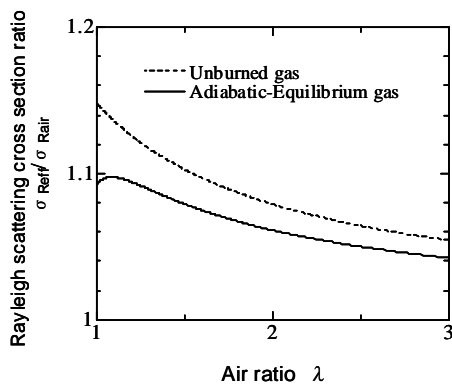


Fig.2 Relationship between air ratio,  $\lambda$  and effective Rayleigh scattering cross section,  $\sigma_{Reff}$  normalized by that of air,  $\sigma_{Rair}$  in the  $CH_4/N_2$  flame.

る。これは拡散燃焼に比べて高温領域を減らすことが可能で、均質な温度分布を形成することによる  $NO_x$  低減効果が大きいためである。しかし、一方では逆火の危険性から旋回羽根後流で燃料と空気を急速に混合する必要があり、混合状態が不完全な予混合状態で火炎を形成することになる。また、予混合火炎は発熱率が局所的に集中する傾向があるために振動燃焼を誘引しやすく、燃焼器さらにはタービン翼を破損する可能性もある。このため、均質な予混合状態を形成し、かつ安定した火炎状態を維持するための燃焼方法を確立することが急務となっている。このためにはその乱流予混合火炎構造の詳細な解明が必要であり、レーザー応用による複合画像計測が一つの有用な手段となる。しかし、燃料濃度と火炎温度の同時計測による予混合火炎特性の考察はほとんどみられない。

## 2. 研究の目的

乱流燃焼場や乱流混合場では流速やスカラー量（温度、化学種濃度）が空間的に不均一かつ時間的に変動し、これらの特性が乱流

混合や火炎構造を支配するため、乱流場での流速とスカラー量の瞬時分布計測方法の確立とその適用による現象の解明が肝要となる。本研究では燃焼に与える影響を抑えるためにトレーサーとして混入するアセトンの量を測定可能な最小量に抑え、単パルスの高出力紫外光レーザーによるレーザー誘起蛍光法を用いて、希薄予混合燃焼器内の燃料と空気の混合状態の瞬時計測およびレーリ散乱による火炎温度計測を同時に行うための光学系を構築し、これ旋回流をともなう予混合火炎の計測に適用することで、その有用性を明らかにし、また不均質な燃料濃度場における希薄部分予混合火炎特性に関して考察を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、アセトン蒸気( $CH_3COCH_3$ )を燃料濃度のトレーサーとして用いる。Nd:YAG レーザーの4倍波 ( $\lambda = 266 \text{ nm}$ ,  $100 \text{ mJ/pulse}$ )を用いて、アセトン蒸気を吸収励起させて、測定点からのレーザー誘起蛍光強度を測定する。メタンと窒素を体積割合で9:1に混合させたガスを燃料として用いる。この窒素には飽和蒸気圧のアセトン蒸気を含ませ、燃料には体積割合で2.0%のアセトン蒸気を含むように調整する。燃料中のメタン濃度はレーザー誘起蛍光から計測したアセトン濃度から測定する。このアセトン濃度はアセトン分子からのレーザー誘起蛍光強度より計測する。ここでは燃料と空気の混合濃度分布をそのアセトン-LIF強度分布から測定する。

図1は大気圧下、室温におけるアセトンのモル分率とレーザー誘起蛍光強度をレーザー計測により求めた関係図である。この図から非燃焼領域において、実験で用いたアセトンの濃度範囲において、アセトンのモル分率とその蛍光強度が5.8%の偏差で比例することがわかる。この関係を用いて、アセトン-LIF強度とアセトンの数密度を対応づけることを考える。本実験では、一様濃度場におけるレーザー強度に対する蛍光強度画像の測定結果から、燃料に含ませるアセトンの濃度を2.0%とした。

温度測定にはレーリ散乱法を用いて瞬時2次元温度分布測定を行う。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、散乱光強度の瞬時2次元像を検出することで、瞬時2次元温度分布を求めることができる。本研究では燃料として、窒素で希釈されたメタンを用いて、予混合火炎( $CH_4 90\% + N_2 10\%$ )を形成して、レーザー計測を実施した。断熱平衡計算により求めた空気比 $\lambda$ と空気のレーリ散乱断面積 $\sigma_{Rair}$ で規格化した混合ガスのレーリ有効散乱断面積 $\sigma_{Reff}$ 比の関係を図2に表

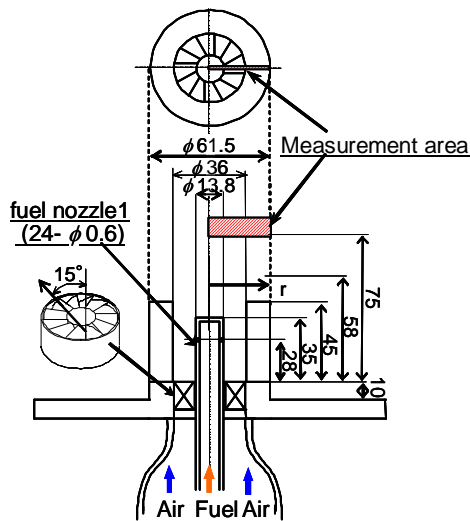


Fig.3 Schematic view of combustor (Nozzle  
A)

している. この図から測定条件の空気比 1.2 以上の条件で未燃焼ガスと既燃焼ガスの散乱断面積比に最大 3 %程度の差異が生じることがわかる.

図 3 には実験に用いた予混合燃焼器の概略図を示す. この燃焼器では空気流は空気流入り口において旋回羽根により旋回流れを与えられる. 旋回羽根の出口角度は垂直に対して 15 度に設定している. このときのスワール数は 0.19 である. 燃料は周囲空気流に対して中央燃料ノズル出口から半径方向外向きに噴出する. 図中の燃料ノズル A は旋回羽根下流 28 mm の位置に内径 0.6 mm の燃料出口孔を周方向等間隔に合計 24 個もつ. そして, そこから旋回羽根下流 45 mm までは予混合区間として管内径を広げず, 混合燃料の流速を速い状態に保つ. 旋回による循環流領域の形成および火炎の逆火を防ぐために流れ管路の断面積を一定に保つ. 一方, ノズル B を用いる場合には, ノズル A よりも予混合区間の距離を長くし, より均質な混合状態を得るために, 旋回羽根上流部で, 半径方向に外径 4 mm の細い管を 60°ピッチで突き出した管の先端, 中心部, および根元に設けたノズルより燃料を噴射させている.

図 4 はアセトン-LIF とレーリー散乱による瞬時同時二次元メタン濃度と温度分布測定のための計測系を示す. 燃料は前述したように, アセトン飽和蒸気を含む窒素により希釈されたメタンを用いている. アセトン蒸気は窒素ガスをアセトン容器内を通過させることで, 混入させている. 酸化剤としての空気流は圧縮機から水蒸気やちりを取り除いた後, 燃焼器に導いている. ヘリウムガスはレーリー散乱による温度測定の際に背景からの散乱光強度を計測するために用いる.

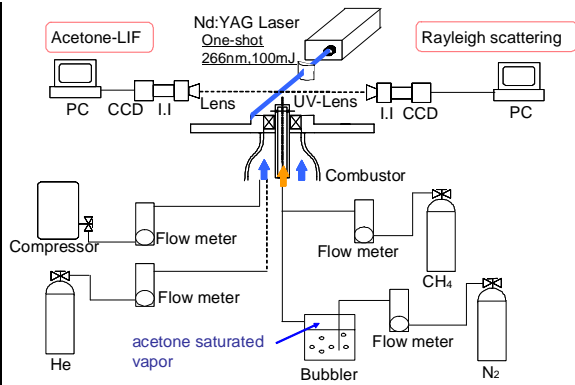


Fig.4 Experimental apparatus

使用する光源としては Nd:YAG レーザー (PIV-400, Spectra-Physics) の 4 倍波 266 nm の紫外光を 1 パルス 100 mJ の出力で用いる. この 1 パルスのレーザー光を用いて, 2 次元上のアセトン濃度と温度分布の瞬時同時計測を行う. レーザー光は焦点距離  $f=700$  mm の円筒レンズを用いて, 測定領域に集光され, 厚さ 0.2 mm, 高さ 6 mm のシート光を形成する. アセトン分子から放出される誘起蛍光は  $f/1.2$  の可視光用カメラレンズを用いて集光され, イメージインテンシファイア (浜松ホトニクス, C4273) で増幅された後, CCD カメラ (CH250, Photometrics, 512x512 pixels) で受光される. 空間分解能は 0.61 mm/pixel である. レーリー散乱光は UV カメラレンズ ( $f/3.5$ ) によりレーザー光に対して直角方向から集光され, イメージインテンシファイア (浜松ホトニクス, C4273) で増幅された後, 同様の CCD カメラ (CH250, Photometrics, 512x512 pixels) で受光される. アセトン-LIF とレーリー散乱光の受光を同期させるためにカウンター回路と 2 台のパルス発生器 (DG535, Stanford Research) を用いた. アセトン誘起蛍光およびレーリー散乱の受光時間はそれぞれ 1  $\mu$ s に設定し, 火炎からの化学発光の影響が無視できる程度であることを確認している.

ここでは, 1 パルスでアセトン-LIF とレーリー散乱を同時に計測するために以下の点に考慮を払った. レーザー誘起蛍光を検出するための CCD カメラは可視光用のカメラレンズを用いていることと, レーザー光の波長が紫外光域の 266 nm であるためにアセトン-LIF のみを受光する. 一方, レーリー散乱を受光するための CCD カメラは紫外光と可視光域を透過するカメラレンズを用いているためにレーリー散乱と誘起蛍光の両者を受光することになる. そのため, 以下の方法により校正を行った. アセトン-LIF 用の CCD カメラとレーリー散乱用のカメラで, 与えられた燃料濃度に対するアセトン-LIF

強度を検出する。両者の CCD カメラによって受光したアセトン-LIF 光の強度比を求める。アセトン-LIF 光のみの強度分布を検出した結果と各 CCD カメラのアセトン-LIF 光の強度比を用いて、レーリー散乱光受光 CCD カメラで計測された強度分布からアセトン-LIF 光強度のみを取り除いて、レーリー散乱光強度を計測する。

また OH・温度同時計測には、OHLIF 法およびレーリー散乱法を用いた。OH 濃度分布には Nd:YAG レーザー励起の色素レーザーと倍波発生装置 (SHG) によって、285.43nm に調整されたパルス光を、温度計測の励起光源としてダブルパルス Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 532nm を用い、得られる OH からの誘起蛍光およびレーリー散乱光をそれぞれ紫外線透過レンズおよび可視光域レンズで集光し、CCD カメラによって 2 次元的に検知した。

#### 4. 研究成果

同時計測の検討のために、まずブンゼンバーナーを用いて層流予混合火炎に対する計測を行った。燃料流速 1.5 m/s, 空気比  $\lambda = 1.2$  での測定結果を図 5 に示す。図中、上図は燃料濃度を、中図には温度分布を、下図には 2 次元分布の中央領域ノズル出口から  $h = 11$  mm における半径方向分布を示す。ここで、燃料濃度はノズル出口での流体の濃度を 1 としたときの相対数密度で表している。レーザー誘起蛍光を用いて測定したメタン濃度分布に関しては反応帯における温度と成分濃度の影響に関して考慮する必要がある。ここでは、測定された火炎温度に基づいて予測されるメタン濃度を算出し、これを実際に測定したメタン濃度と比較することを考える。均質混合気から形成される予混合火炎を仮定し、各空気比に対するメタン濃度と火炎温度の対応関係を一次元の自由伝播火炎の計算コード、PREMIX に基づいて算出する。その中で、熱物性値および素反応に関する諸量は GRI-MECH 3.0 を用いている。これから、メタン濃度の予測値は各測定点の検出した火炎温度と PREMIX より求めたメタン濃度と火炎温度の対応関係から求める。測定した図中に黒線で示すメタン濃度は予測値のメタン濃度 (図中の青線) と良く対応することがわかり、本測定方法が有効であることを示している。

図 6 には旋回流をとまなう燃焼器を用いた空気比  $\lambda = 1.2$  の測定条件における燃料と空気の混合挙動と火炎温度の 2 次元同時分布の測定結果を示す。同時同時測定による燃料濃度分布と火炎温度分布をそれぞれ、上図と中図に表している。測定条件で瞬時の燃料濃度分布と火炎温度分布の境界面が良く

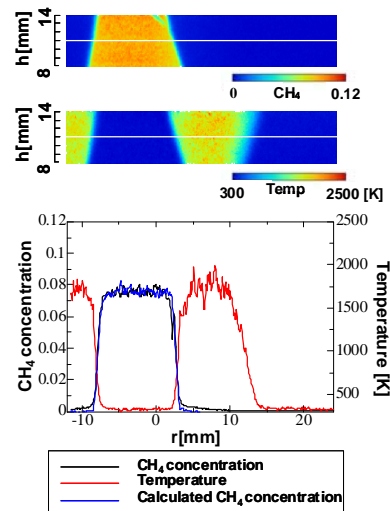


Fig. 5 Fuel concentration and flame temperature distributions in the laminar premixed flame using a Bunsen-type burner for  $\lambda = 1.2$ .

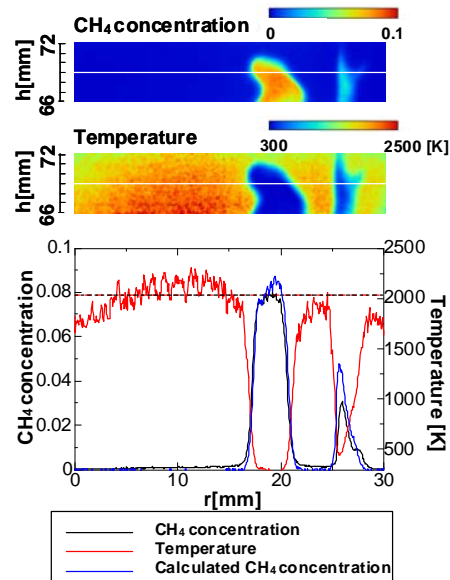
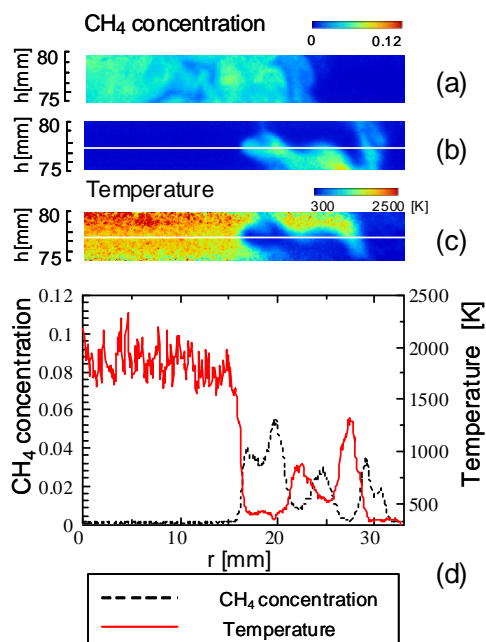
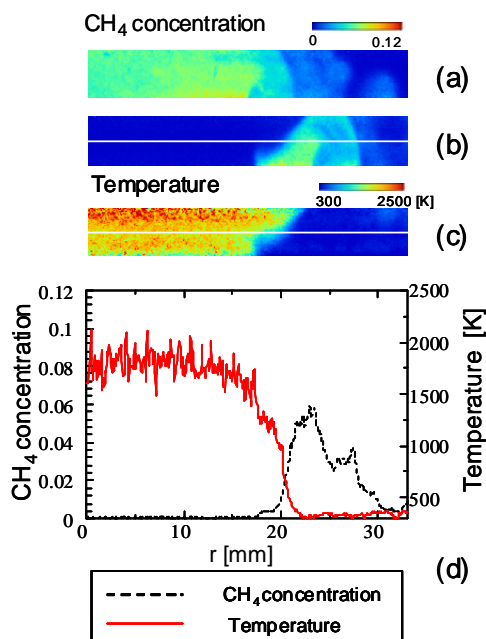


Fig. 6 Fuel concentration and flame temperature distributions in the turbulent premixed flame for  $\lambda = 1.2$ .

一致することがわかる。これから、本測定方法を瞬時 2 次元火炎面形状計測に適用することが有効であると考えられる。下図には 2 次元分布の中央領域における燃料濃度および火炎温度分布の半径方向分布を示す。図 5 と同様にメタン濃度の予測値は各測定点の検出した火炎温度と PREMIX より求めたメタン濃度と火炎温度の対応関係から求める。測定した図中に黒線で示すメタン濃度は予測値のメタン濃度 (図中の青線) と良く対応することがわかり、本測定方法が有効であることを示している。



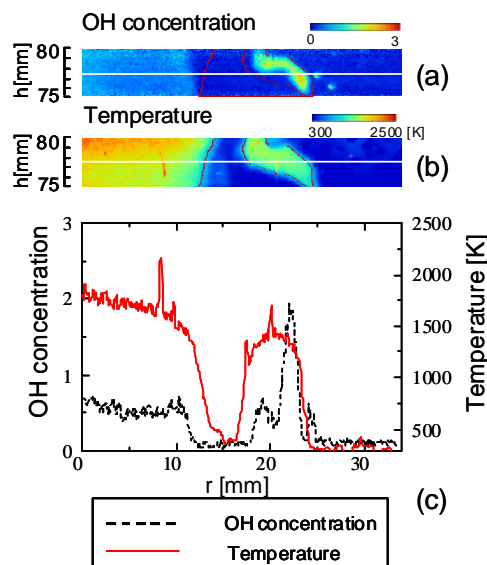
(i) nozzle A



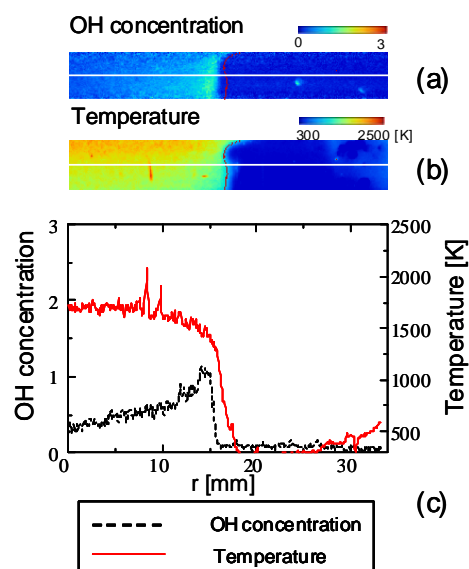
(ii) nozzle B

Fig. 7 Simultaneous measurement results of fuel concentration and temperature for  $\lambda = 1.4$ .

次に、図3に示す燃焼器と形状の異なる燃料ノズルAとノズルBを用いて、燃料濃度分布と火炎構造の関連性を分析した。図3に斜線で示した測定断面 ( $h=75\sim 80\text{mm}$ ,  $r=0\sim 30\text{mm}$ ) で、流量条件は燃料流量  $Q_{\text{fuel}}=12\text{Nl/min}$ 、空気比  $\lambda$  を1.4の条件で実験を行った。図7(a)には未燃焼場における瞬時濃度分布を示す。燃料ノズルが旋回羽根の上流側に設置したノズルBの濃度分布がノ



(i) nozzle A



(ii) nozzle B

Fig. 8 Simultaneous measurement results of OH concentration and temperature for  $\lambda = 1.4$ .

ズルAに比較して、均質な分布をもつことがわかる。また、燃焼場における火炎基部での瞬時濃度分布の統計処理より、火炎位置の変動がノズルAの場合にノズルBよりも小さくなっていることを発表論文(2)で明らかにしている。次に燃焼場での燃料濃度分布図7(b)および火炎温度分布図7(c)を図に示す。また測定領域中央部の半径方向分布を図7(d)に示している。燃料濃度に比べて温度分布の

空間的なばらつきは少ない。これは上流からの燃焼ガスと火炎面で形成される燃焼ガスとの混合によって、温度の不均質が抑制されているためではないかと考えられる。

さらに、測定断面における空気比 1.4 の燃焼場での OH 濃度分布および火炎温度分布を図 8 に示す。OH 濃度分布図 8 (a) および温度分布図 8 (b) の図中、赤線で示しているのは、温度分布から求めた火炎面である。また、測定領域中心線  $h = 77.5\text{mm}$  における各測定結果の半径方向分布を図 8 (c) に示している。この結果から、OH と温度の形状は少し異なっているが、火炎面と OH 存在領域はよく一致していることがわかる。さらに、図 8 (c) に示すノズル B の半径方向分布から、OH が温度の既燃ガス側で立ち上がり、反応が進行し燃焼ガスになるにつれて OH が減少している様子が捉えられていることがわかる。これは、層流一次元予混合計算結果で得られる結果とよく一致する。また、ノズル A の結果に見られるように、同時刻に計測された、温度の差にあまり違いがない 2 つの火炎帯においても、OH 濃度が大きく異なる場合が見られた。この現象は  $r = 20\text{mm}$  付近に見られるような火炎面に囲まれた領域で多く見られた。これは、火炎面が複雑な火炎帯では、その周囲に未燃ガスが存在しており、その火炎帯を囲んでいる燃料の濃度差により、OH 濃度に差が生じているのではないかと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) Komiyama, M., Takeishi, K. and Araki, K., “Measurements of Fuel Concentration and Temperature Distributions in Lean Premixed Flame with Swirling Flow”, Proceedings of 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, 査読有, (2011), Paper No. AJTEC2011-44479.
- (2) Araki, K., Komiyama, M. and Takeishi, K., “Characteristics of Lean Premixed Flames with Swirling Flow in Inhomogeneous Fuel Concentration Distributions”, Proceedings of 21<sup>st</sup> International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, (2010), Paper No. ISTP-21-220
- (3) 小宮山正治, 武石賢一郎, 田中千紗子, 奥村桂子, 岩崎悠志, “旋回流希薄予混合火炎中の燃料濃度と火炎温度分布の瞬時同時計測”, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, Vol. 76, No. 761, (2010), pp. 108-115.
- (4) Komiyama, M., Takeishi, K., Okumura, K. and Araki, K., “Simultaneous Measurement of Fuel Concentration and Temperature Distributions by LIF and Rayleigh Scattering in Lean Premixed Flame”, Proceedings of the 7th Pacific Symposium

on Flow Visualization and Image Processing, 査読有, (2009), CD-ROM: 21B-2.

- (5) Okumura, K., Komiyama, M., Takeishi, K., Tanaka, C., Iwasaki, Y., “Mixing Behavior of Gaseous Fuel and Temperature Characteristics in Lean Premix Combustor with Swirling Flow”, Proceedings of 19th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, (2008), CD-ROM: 188.
- (6) 小宮山正治, 武石賢一郎, 田中千紗子, 奥村桂子, “レーザ誘起蛍光による旋回流予混合器中の気体混合挙動の可視化”, 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol. 28, No. 11, (2008), pp. 86-93.

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) 荒木和美, 小宮山正治, 武石賢一郎, “燃料濃度不均質場における希薄予混合火炎の火炎特性に関する研究”, 第 4 8 回燃焼シンポジウム, 2010. 12. 2, pp. 280-281, 福岡ガーデンパレス.
- (2) 小宮山正治, “予混合火炎のレーザ画像計測と火炎特性”, 第 3 8 回日本ガスタービン学会定期講演会(招待講演), 2010. 10. 21, pp. 39-43, アスティとくしま.
- (3) 荒木和美, 小宮山正治, 武石賢一郎, 奥村桂子, “温度・濃度同時レーザ画像計測による旋回流希薄予混合火炎特性に関する研究”, 第 4 7 回燃焼シンポジウム, 2009. 12. 3, pp. 372-373, 札幌コンベンションセンター.
- (4) 岩崎悠志, 小宮山正治, 武石賢一郎, 田中千紗子, 奥村桂子, “希薄予混合燃焼器における燃料濃度分布と火炎温度分布計測に関する研究” 日本機械学会フェロー賞(若手優秀講演), 日本機械学会 2008 年度年次大会, Vol. 7, 2008. 8. 6, pp. 29-30, 横浜国立大学.
- (5) 奥村桂子, 小宮山正治, 武石賢一郎, 岩崎悠志, “レーザによる旋回流希薄予混合火炎の温度と濃度の瞬時同時計測に関する研究”, 第 4 6 回燃焼シンポジウム, 2008. 12. 5, pp. 430-431, 京都テルサ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小宮山 正治 (KOMIYAMA MASAHARU)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 40178372

### (2) 研究分担者

武石 賢一郎 (TAKEISHI KENICHIRO)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 70379113

小田 豊 (ODA YUTAKA)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 50403150

