

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560223

研究課題名(和文) レーザ計測による乱流火炎の構造解析と消炎機構の解明

研究課題名(英文) A Study of turbulent flame structure and extinction mechanism by laser diagnostics

研究代表者

山本 和弘 (YAMAMOTO, Kazuhiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60283488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々は非常に強い乱流場に形成される火炎を対象に、旋回噴流燃焼器を用いてPLIF法によりOHラジカルを計測し、乱流予混合火炎の火炎構造と燃焼速度について検討してきた。そこで本研究では、OH-PLIF法により乱流予混合火炎の瞬時の火炎構造を可視化し、消炎特性や局所の燃焼速度を検討する。また、2枚のレーザシートをクロスするように燃焼場に照射することで垂直方向と水平方向の画像を取得し、3次元の火炎構造を議論した。本研究では、この計測手法を用いて3次元の火炎面の面積を求め、火炎の局所消炎が起きる理由について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have examined local flame structure by joint PLIF imaging. By considering the degree of flame wrinkling, three-dimensional flame surface area is obtained from 2D images. We have used a cyclone-jet combustor to establish turbulent premixed flames for propane/air mixtures in a wide range of turbulence, covering the flamelet regime and thin reaction zones regime on combustion diagram. Results show that as the mean velocity at the combustor exit is increased, more complex flame structure is observed with multiple flamelets. Near the global extinction, the large reduction of heat release rate occurs, resulting in local extinction.

研究分野：燃焼工学

キーワード：乱流火炎 レーザ計測 消炎 火炎構造

1. 研究開始当初の背景

近年、先進国だけでなく発展途上国の急速な経済発展に伴い、世界中で膨大な化石資源が消費されている。その影響で、大気汚染や地球温暖化と言った環境問題が深刻化しており、燃焼器はクリーンで高効率であることが求められている。一般に、実用燃焼器のほとんどは乱流燃焼であるため、新たな燃焼器の開発や改良には、乱流燃焼の解明が不可欠である。一方、燃焼場のシミュレーションが行なわれているが、非常に微細な時間・空間スケールを考慮する必要がある、実用燃焼器のスケールを考慮したシミュレーションを行うことは、計算負荷が膨大となることから現実的ではない。そのため、実験により燃焼場の検討が行われてきた。

2. 研究の目的

消炎現象を含む乱流火炎の特性は、燃焼場の局所的な状態によって決定される。火炎に流入する燃料と酸化剤の供給量、発熱速度、輻射など火炎から周囲への熱損失やラジカルの消失などが相互に影響する。特に乱流燃焼では、火炎が乱流場に形成されるため、現象が非常に複雑である。そこで、燃焼モデルを構築して現象を単純化し、燃焼器の設計・改善に役立つ知見を得ようという試みがなされている。これまでに、実験的及び理論的な研究が数多く行われ、乱流場における火炎の特性を考慮したモデルが検討されている。

代表的なモデルに「Wrinkled laminar flame or Corrugated flamelets regime (しわ状層流火炎)」が挙げられる。乱れが比較的弱い場合に形成される火炎モデルであり、これまでに詳細な研究が行われてきた。一方、より乱れが強くなると乱流の渦構造が小さくなることで火炎構造が変化する。「Thin reaction zones regime」などのモデルが提案されているが、その妥当性の検証が十分ではない。特に、乱れが強い場合は局所消炎が起こる可能性がある。高効率な燃焼を実現するためには局所的な消炎を抑制する必要があるが、現状では現象の理解が十分ではない。また乱流火炎は3次元構造を持つため、消炎現象を含め、モデルの検証を3次元の場で行う必要がある。

3. 研究の方法

乱流現象はコンピュータを用いた数値計算の進歩により詳細に調べることができるようになり、数多くの研究成果が報告されている。しかしその複雑性ゆえに非常に微細な時間・空間スケールを考慮しなければならず、計算負荷が非常に大きくなる。したがって、理論と数値計算に加えて実験による研究がやはり重要である。最近では、レーザ計測技術が発展してきていることから、PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence, レーザ誘起蛍光法) や PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速計) などにより、

火炎と流れの同時計測が可能となり、瞬時の乱流火炎構造や流れの詳細な検討ができるようになった。

これまでに我々は非常に強い乱流場に形成される火炎を対象に、旋回噴流燃焼器を用いて PLIF 法により OH ラジカルを計測し、乱流予混合火炎の火炎構造と燃焼速度について検討してきた。通常、燃焼速度を求めるには、局所の流速と火炎の移動方向・速度を3次元で正確に把握する必要があるが、実際にそのような計測を行うことは非常に難しい。そこで我々は局所の OH 濃度に着目した。

本研究では、OH-PLIF 法により乱流予混合火炎の瞬時の火炎構造を可視化し、消炎特性や局所の燃焼速度を検討する。また、2枚のレーザシートをクロスするように燃焼場に照射することで垂直方向と水平方向の画像を取得し、3次元の火炎構造を議論した。本研究では、この計測手法を用いて3次元の火炎面の面積を求め、火炎面密度を評価した。また、2次元の流れ場を可視化する PIV と瞬時の火炎面を求める OH-PLIF 法の同時計測を行い、局所消炎が起こる状況について詳しく検討した。

4. 研究成果

まず画像から火炎面を抽出した。水平方向の画像から火炎の円周方向の長さ L_f を求めた結果を図1に示す。流速 $U_m = 10 \sim 30 \text{ m/s}$ の範囲において、当量比 $\phi_m = 0.90$ の条件では、おそらく乱れによる火炎の変動で火炎長さは単調に増加した。しかし当量比が 0.75 の場合は、流速が 20 m/s 付近で最大となり、その後火炎長さは減少した。

さらに火炎構造について調べるため、火炎の平均半径を調べた。火炎の位置を画像から特定して平均の火炎半径を求めた。ただし、消炎した部分は火炎半径をゼロとした。各条件で求めた平均の火炎半径 R_f を図2に示す。これによると当量比 $\phi_m = 0.90$ においては、火炎半径がほとんど変化していないが、当量比 $\phi_m = 0.75$ では、流速が 20 m/s 以上になると火炎半径は減少した。当量比 $\phi_m = 0.75$ では、流速を増加させると局所消炎が起こるためであると思われる。

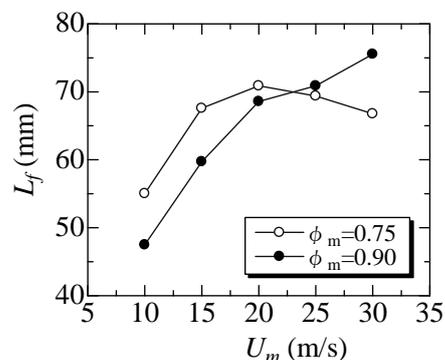


Fig.1 Flame length

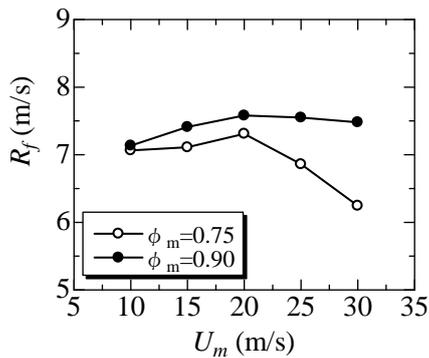


Fig.2 Mean flame radius

次に、火炎面密度 Σ を評価した。まず、3次元の火炎面の面積を求めた。垂直方向の各画像から軸対称を仮定して火炎面の面積を見積ることとしたが、実際の火炎は軸対称の構造をとらない。そこで、図1の火炎長さと同図2の平均の火炎半径から求めた周方向長さをもとに、火炎が凹凸になることによる火炎面積の増加率 R を求めて、火炎面の面積を見積った。これにより得られた火炎面密度を図3に示す。当量比0.75, 0.90においてそれぞれ求めた。

これによると、当量比によらず流速を増加させると火炎面密度は増加することがわかる。また、当量比が小さい0.75のほうが火炎面密度は大きくなった。したがって、図1に示した火炎長さとは明らかに傾向が異なり、局所消炎が起こる当量比 $\phi_m = 0.75$ 、流速20m/s以上の条件でも火炎面密度は流速を増加させると大きくなることが明らかとなった。したがって、火炎長さをもとに2次元で見積った火炎面密度は、実際の値と異なる可能性があることが示唆された。

また、流れ場と瞬時の火炎構造を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1)主噴流の流速を大きくすると、火炎面に多くの凹凸が見られ、形状が複雑になる。また、主噴流の流速が大きいと乱れも大きくなる。

(2)火炎面の曲率は下流にいくと急激に減少する。また、乱れが大きほど火炎面の凹凸が小さくなるため曲率は大きい。一方、当量比が小さいと火炎面の曲率は大きくなるが、未燃側と既燃側の曲率を比較した結果、未燃側に凸の曲率の方が既燃側に凸の曲率よりも小さい。

(3)火炎面におけるひずみ速度を求めたところ、負の値をとる頻度のほうが多い。また、当量比0.75の方が0.90に比べて大きなひずみ速度の大きさは増加する。一方、主噴流の流速が大きほどひずみ速度の大きさも増加するが、局所消炎をとる条件においてひずみ速度の値が特に大きな負の値をとる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

①K. Yamamoto, S. Ishii, M. Ohnishi, Local Flame Structure and Turbulent Burning Velocity by Joint PLIF Imaging, Proc. Combustion Inst., 33, 1285-1292, 2011. 査読有

②鈴木啓夢, 山本和弘: 乱流燃焼場における火炎構造と火炎の安定性に及ぼす旋回流の影響, 日本機械学会論文集 (B編), 第79巻804号, 1714-1723, 2013. 査読有

③山本和弘, 加藤慎也, 林直樹, 山下博史: 三重管バーナの流れ場と浮き上がり火炎の干渉, 日本機械学会論文集, 第80巻820号, 2014. 査読有

[学会発表] (計 6 件)

①山本和弘, 石井慎治, 乱流予混合火炎の3次元構造と火炎面密度の評価, 第50回燃焼シンポジウム, 2012. 査読無

②鈴木啓夢, 山本和弘, 旋回噴流燃焼器における旋回流と乱れの評価, 第50回燃焼シンポジウム, 2012. 査読無

③奥洋平, 山本和弘, 林直樹, 山下博史, 三重管バーナに形成される浮き上がり火炎の研究, 第51回燃焼シンポジウム, 2013. 査読無

④山本和弘, 磯部佑介, 林直樹, 山下博史, 三重管バーナに形成される浮き上がり火炎の挙動に関する研究 (第3報), 第51回燃焼シンポジウム, 2013. 査読無

⑤森岡, 奥洋平, 山本和弘, 林直樹, 山下博史, 三重管バーナに形成される浮き上がり火炎の研究, 第52回燃焼シンポジウム, 2014. 査読無

⑥山森健太, 森岡諒, 山本和弘, 林直樹, ステレオPIVを用いた乱流予混合火炎の流れ場の計測, 日本機械学会東海支部第64期総会講演会講演論文集, 2015. 査読無

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和弘 (YAMAMOTO Kazuhiro)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60283488

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：